

## ZMIANY CZASU TRWANIA ŻEGLUGI W WARUNKACH „BEZŁODOWYCH” NA PÓŁNOCNEJ DRODZE MORSKIEJ W LATACH 2008-2016

### CHANGES OF ‘ICE-FREE’ NAVIGATION SEASON ON THE NORTHERN SEA ROUTE IN THE YEARS 2008-2016

Tadeusz Pastusiak

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

**Zarys treści.** Celem pracy było określenie trendu zmian liczby dni, w których żegluga na PDM jest możliwa w warunkach „bezlodowych”. Trend redukcji powierzchni zlodzonej w latach 1978-2016 był prawie dwukrotnie większy w sezonie letnim (wrzesień) niż w sezonie zimowym (marzec). W latach 2008-2016 na wszystkich morzach PDM występowały dodatnie trendy zmian liczby dni „bezlodowych”. Najszybciej zwiększała się liczba dni bezlodowych na Morzu Karskim, najwolniej na Morzu Czukockim. Liczba dni „bezlodowych” na poszczególnych morzach przyrastała szybciej w ostatnim okresie w latach 2008-2016 niż w latach 1979-2008. Po zachodniej stronie PDM (morza Karskie i Łaptiewów) średnie zmiany roczne w latach 2008-2016 były o około 3 razy większe od wartości z okresu wcześniejszego 1979-2008. Po wschodniej stronie PDM (morza Czukockie i Wschodnio-syberyjskie) zmiany te były tylko około 2 razy większe. Jeśli procesy te będą trwały nadal to Północna Droga Morska, z potencjalnie ważnego szlaku transportowego stanie się jednym z ważnych, najprawdopodobniej sezonowych, szlaków transportu morskiego.

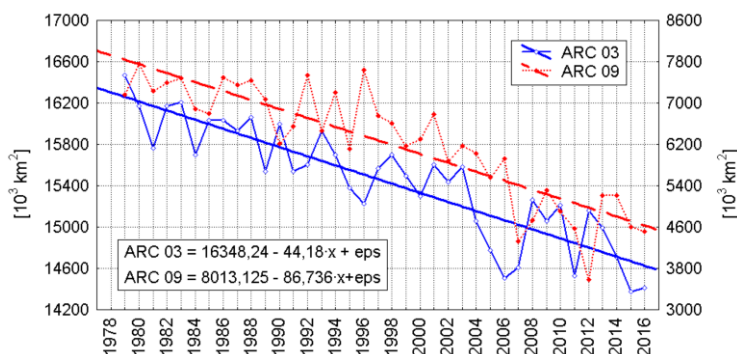
**Słowa kluczowe:** Północna Droga Morska, liczba dni bezlodowych, żegluga bezlodowa, trendy powierzchni zlodzonej.

### 1. Wprowadzenie, cel pracy

Obserwacje satelitarne pokrywy lodowej w Arktyce, które rozpoczęły się od listopada 1978 roku wykazują, że powierzchnia lodów morskich na tym obszarze zmniejsza się. Zmniejszanie powierzchni zlodzonej<sup>1</sup> nie zachodzi równomiernie, ale wyraźnie przyspieszyło po roku 1988-1989 (Serreze i in. 2007, Comiso i in. 2008, Cavalieri i Parkinson 2012), a szczególnie silnie po roku 2002-2003 (Marsz i in. 2014). Zachodzi równocześnie zmiana struktury wiekowej pokrywy lodowej – zmniejsza się systematycznie w pokrywie lodowej udział lodów wieloletnich o dużej grubości (Laxon i in. 2003), przez co dochodzi do coraz wcześniejszego uwalniania poszczególnych akwenów lub ich części od pokrywy lodowej.

<sup>1</sup> Powierzchnia zlodzona – powierzchnia akwenu pokryta przez lody o koncentracji od 15 do 100%. Wody, na których znajduje się lód o koncentracji mniejszej od 15% traktuje się jako wody wolne od lodu (ang. *open water*). Pojęcie „powierzchnia zlodzona” odpowiada określeniu „extent” w literaturze anglojęzycznej dotyczącej problematyki lodów morskich.

Redukcja powierzchni złodzonej jest szczególnie szybka w sezonie ciepłym. O ile trend średniej miesięcznej powierzchni złodzonej w marcu, miesiącu którym w całej Arktyce osiąga ona maksymalne rozmiary, jest równy  $-44,2 \text{ tys. km}^2 \cdot \text{rok}^{-1}$  (1979-2016), to we wrześniu, miesiącu, w którym powierzchnia złodzona ma najmniejszą powierzchnię, trend ten jest prawie dwukrotnie większy i wynosi  $-86,7 \text{ tys. km}^2 \cdot \text{rok}^{-1}$  (ryc. 1).



Ryc. 1. Zmiany powierzchni złodzonej w Arktyce w marcu (ARC 03; skala lewa) i we wrześniu (ARC 09; skala prawa) oraz trendy zmian tych powierzchni (źródło: AANII, zbiór arctic.monthly.me.a.exnt.csv)

Fig. 1. Changes in the ice extent area in the Arctic in March (ARC 03, left scale) and September (ARC 09; right scale) and trends changes therein (source: AARI database arctic.monthly.me.a.exnt.csv)

Szybkie zmniejszanie się powierzchni złodzonej w sezonie ciepłym stwarza korzystne warunki dla żeglugi – na akwenach leżących w najwyższych szerokościach mogą sezonowo operować statki o konstrukcji bez znacznych wzmocnień przeciwlodowych i o typowych mocach napędu głównego (klasy L2 według Polskiego Rejestru Statków). Najkorzystniejsze warunki żeglugi dla takich statków są wtedy, gdy koncentracja lodu na danym akwenie jest mniejsza od 15%. Dodatkowo, z pewnym ograniczeniem, można poszerzyć tę granicę do koncentracji 25% (Pastusiak 2014, 2016b). Statek może w takich warunkach poruszać się z pełną prędkością eksploatacyjną, nie zachodzi również potrzeba „obchodzenia” powierzchni akwenów pokrytych lodem o większej koncentracji i grubości. W związku z tym nie wydłuża się w istotnym stopniu długość trasy, a jej pokonanie zajmuje najmniej czasu. Stwarza to najkorzystniejsze warunki ekonomiczne żeglugi.

Północna Droga Morska (dalej PDM) jest szlakiem tranzytowym między portami europejskimi a portami Dalekiego Wschodu, który prowadzi przez morza Karskie, Łaptiewów, Wschodniosyberyjskie i Czukockie do Cieśniny Beringa. Z punktu widzenia nawigacji istotne jest występowanie akwenów wolnych od lodu, tworzących jednolitą, nieprzerwaną strefę „czystej wody” na morzach tworzących ten szlak. Występowanie takich warunków określono terminem „warunki bezlodowe”. Czasu występowania warunków bezlodowych na poszczególnych morzach Arktyki nie należy utożsamiać z sezonem nawigacyjnym. Pojęcie „sezon nawigacyjny” jest szersze, obejmuje dłuższy okres, w którym statki, z odpowiednimi ograniczeniami, lub bez nich, mogą poruszać się po tych akwenach.

Celem pracy jest określenie trendu liczby dni, w których żegluga na poszczególnych morzach PDM jest możliwa w sezonach nawigacyjnych lat 2008-2016 w warunkach bezlodowych. Trendy z okresu 2008-2016 zostaną następnie porównane z trendami zmian okresu bezlodowego w latach

1979-2008 podanymi przez Rodriguesa (2008, 2009). Celem tego porównania jest poznanie tempa zmian oraz określenie rejonów, w których zmiany te zachodzą najszybciej. Analiza zmian w tym krótkim, bo zaledwie 9-letnim okresie jest ważna z tego względu, że po roku 1995 rozpoczęło się wykorzystywanie PDM jako szlaku tranzytowego przez żeglugę międzynarodową, a nie tylko, jak było to wcześniej, przez statki pływające pod banderą rosyjską. Rozpatruje się nadto od pewnego czasu możliwości wykorzystania PDM jako alternatywnego szlaku transportu kontenerów (Verny i Grigentin 2009, Liu i Kronbak 2010), na którym długość okresu niezakłóconej żeglugi odgrywa zasadniczą rolę. Takie warunki w Arktyce spełnia żegluga w warunkach bezlodowych.

## 2. Dane źródłowe i ich interpretacja

Wskaźnikiem określającym możliwość sprawnego i ekonomicznego realizowania transportu morskiego na PDM, zwłaszcza przez statki bez wzmocnień lodowych, jest liczba dni wolnych od lodu (bezlodowych) na danym akwenu. Szczegółową analizę liczby dni bezlodowych w okresie od 1979 do 2008 roku przeprowadził Rodrigues (2008, 2009), stosując „odwrócony indeks lodowy”. Zdefiniowane przez Rodriguesa kryterium dnia bezlodowego sprowadzało się do występowania w określonym rejonie stanu koncentracji lodu poniżej 15%. Istotną rolę przy obliczaniu liczby dni bezlodowych w danym rejonie odgrywało ustalenie dnia zmiany warunków lodowych. Rodrigues przyjął, że dla zmiany warunków „lodowych” na „bezlodowe” i na odwrót wymagane było wystąpienie danych warunków przez kolejne pięć dni. Piąty dzień potwierdzał zmianę stanu („bezlodowego” albo „lodowego”).

Autor pracy wyszedł z nieco innego założenia. Przyjął, że kluczowym dla uprawiania żeglugi tranzytowej na PDM jest występowanie „korytarza bezlodowego” czyli pasa strefy wolnej od lodu, który przebiega przez cały akwen (tutaj: poszczególne morze PDM) i stwarza możliwość przepłynięcia statku w warunkach bezlodowych z jednego sąsiadującego morza przez dane morze (rejon) do kolejnego sąsiadującego morza. Dlatego też kryterium dnia bezlodowego na poszczególnym morzu obejmowało również występowanie połączenia „bezlodowego” łączącego dwa sąsiadujące morza. Metoda obliczania liczby dni bezlodowych i zmiany warunków „lodowych” na „bezlodowe” i na odwrót pozostały te same jak w pracach Rodriguesa (2008, 2009). W związku z powyższym metody określania liczby dni bezlodowych są bardzo podobne, ale nie są tożsame.

Pojęcie strefy wolnej od lodu stosowane w literaturze problemu dotyczy koncentracji wszystkich postaci lodu poniżej 15-25% (Pastusiak 2014, 2016b). Autor pracy zastosował do analizy mapy koncentracji lodów morskich w uproszczonej skali Marginal Ice Zone (dalej MIZ) (NATICE 2016). Na mapach tych wyróżniono 3 kategorie koncentracji lodu:

- przedział koncentracji poniżej 18% (strefa „bezlodowa”, która może być bez przeszkód wykorzystywana przez statki bez wzmocnień lodowych),
- przedział od 18 do 81% (strefa rozdrobnionego w różnym stopniu lodu morskiego, w której mogą poruszać się statki o zróżnicowanych klasach lodowych, w tym przy koncentracji lodu równej, większej od 60-70% – w asyście lodołamaczy),
- przedział koncentracji powyżej 81% (strefa zwartej kry lodowej, w której poruszać się mogą wyłącznie lodołamacze i statki z klasą lodową płynące za lodołamaczami).

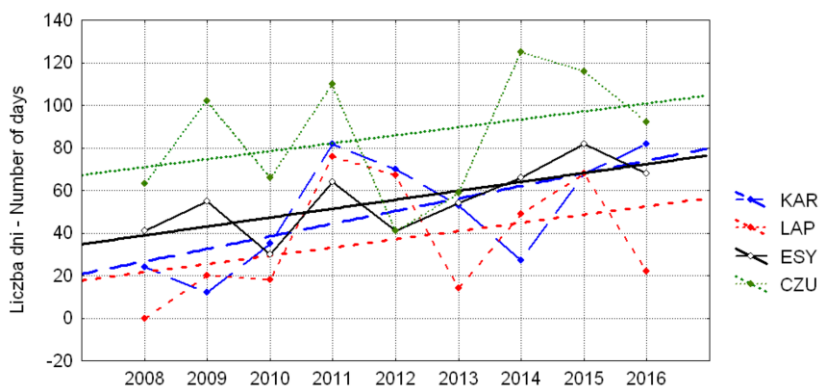
Ponieważ analiza dotyczyła żeglugi statków bez wzmocnień lodowych przyjęto, że obszar żeglugi bezlodowej jest otoczony linią koncentracji lodów morskich 18% (ACIA 2005, Dremlyug 1974,

Pastusiak 2014, 2016b, Petrov 1955, Rodrigues 2008, 2009). Różnica koncentracji lodu między 15 a 18% jest niewielka i mieści się w granicach błędu interpretacji analizy wyników skanowania mikrofalowego prowadzonego przez satelity NOAA wyposażone w czujniki AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer). Liczbę dni z istnieniem „korytarza bezlodowego” w danym sezonie nawigacyjnym (roku) zliczano przeglądając kolejne mapy dobowe MIZ z lat 2008-2016 przy uwzględnieniu sformułowanych wyżej założeń.

Różnice, które pojawiają się w liczbie dni „bezlodowych” na poszczególnych morzach stanowią rezultat tego, że w świetle sformułowanych kryteriów „korytarz bezlodowy” musi również pozwalać na przejście z jednego morza na morze kolejne. Tak więc, na przykład może wystąpić dzień, w którym istnieje „korytarz” pozwalający w warunkach żeglugi bezlodowej wejść przez Cieśninę Beringa na Morze Czukockie, przepłynąć to morze i przejść na Morze Wschodniosyberyjskie. W odniesieniu do Morza Czukockiego taki dzień zostanie zakwalifikowany jako dzień bezlodowy. Dalej, w tym samym dniu, na Morzu Wschodniosyberyjskim brak już ciągłego „korytarza” umożliwiającego przejście tego morza lub brak jest możliwości wejścia na Morze Łaptiewów. Ten sam dzień nie zostanie zakwalifikowany jako bezlodowy dla Morza Wschodniosyberyjskiego.

### 3. Wyniki

Przeprowadzona analiza wykazuje, że w ciągu ostatnich 9 lat na wszystkich morzach występują dodatnie trendy liczby dni „bezlodowych” (ryc. 2). Najszybciej zwiększa się liczba dni bezlodowych na Morzu Karskim (tab. 1), najwolniej na Morzu Czukockim. Trendy, oszacowane metodą najmniejszych kwadratów, są jednak w trzech przypadkach statystycznie nieistotne (tab. 1), tylko na Morzu Wschodniosyberyjskim trend liczby dni „bezlodowych” jest istotny. Oszacowane wartości wszystkich trendów obarczone są znacznym błędem, tak, że przy uwzględnieniu błędu standardowego oszacowania, trend na Morzu Łaptiewów jest praktycznie taki sam jak na Morzu Czukockim.



Ryc. 2. Zmiany liczby dni, w których w sezonie nawigacyjnym danego roku występują na poszczególnych morzach PDM warunki żeglugi „bezlodowej”. KAR – M. Karskie, LAP – M. Łaptiewów, ESY – M. Wschodniosyberyjskie, CZU – M. Czukockie

Fig. 2. Changes in number of days in a given navigation season in which exist 'ice-free' navigation conditions on the particular NSR seas. KAR – Kara Sea, LAP – Laptev Sea, ESY – East Siberian Sea, CZU – Chukchi Sea.

Tab. 1. Wartości trendów zmiany liczby dni żeglugi w warunkach bezlodowych na morzach, przez które prowadzi Północna Droga Morska i ich charakterystyka statystyczna (2008-2016)

Table 1. Values of trends of change of the number of ice-free navigation days on the seas through which leads Northern Sea Route and their statistical characteristics (2008-2016).

Morze – Sea	Trend (dni-rok <sup>-1</sup> ) Trend (days·year <sup>-1</sup> )	Istotność trendu (p) Significance of the trend (p)	adj.R <sup>2</sup>
Karskie – Kara	+5,92(±2,91)	0,0810	0,2817
Łaptiewów – Laptev	+3,87(±3,59)	0,3167	0,0199
Wschodniosyberyjskie – East Siberian	+4,18(±1,59)	0,0340	0,4248
Czukockie – Chukchi	+3,75(±3,82)	0,3589	0,0000

Objaśnienia do tabeli: w nawiasie za wartością trendu – błąd standardowy jego oszacowania, p – istotność statystyczna oszacowania trendu, adj.R<sup>2</sup> – współczynnik determinacji równania liniowego jednej zmiennej, który uwzględnia liczbę stopni swobody, wyjaśniający jaki odsetek wariancji liczby dni „bezlodowych” jest objaśniany przez trend.

Explanations to the table: in brackets after the value of the trend – the standard error of the estimation, p – statistical significance of the trend estimation, adj.R<sup>2</sup> – determination coefficient of linear equations of one variable, which takes into account the number of degrees of freedom, clarifying what percentage of the variance of the number of ice-free days is explained the trend.

Trend zmian liczby dni bezlodowych na Morzu Karskim w ciągu ostatnich 9 lat jest istotny na 90% poziomie ufności i objaśnia około 28% wariancji. Na Morzu Wschodniosyberyjskim istotny (p = 0,03) trend objaśnia około 42% wariancji. Trendy na morzach Łaptiewów i Czukockim nie objaśniają zmienności liczby dni, w których żegluga może odbywać się w warunkach bezlodowych. Wykresy wskazują na średni wzrost liczby dni „bezlodowych” na tych morzach, ale wartości trendów praktycznie są zerowe.

Formalną przyczyną tego, że oszacowane trendy liczby dni „bezlodowych” są statystycznie nieistotne jest bardzo duża zmienność międzyroczna tej wielkości oraz krótkość okresu obserwacyjnego. Odchylenia standardowe (obliczane przy n = 9 jako odchylenia standardowe dla małej próby) dla mórz Karskiego, Łaptiewów i Czukockiego są niemal takie same, mimo że średnie i zakresy zmienności liczby dni „bezlodowych” są na nich dość wyraźnie zróżnicowane. W takiej sytuacji, przy bardzo szerokim zakresie poziomów ufności średnich (tab. 2), również i oszacowanie trendów nie może być istotne.

Zakres zmienności liczby dni „bezlodowych” na poszczególnych morzach oraz inne charakterystyki statystyczne (tab. 2, ryc. 3) wskazują, że warunki lodowe na Morzu Łaptiewów stanowią nadal „wąskie gardło” całej Północnej Drogi Morskiej (Marsz i in. 2014), regulujące możliwość korzystania z tego szlaku. O ile warunki lodowe na Morzu Wschodniosyberyjskim w sezonach nawigacyjnych w latach 2002-2013 były jeszcze trudne (Marsz i in. 2014), to w latach 2014-2016 nastąpiła ich wyraźna poprawa, tak, że w żadnym z sezonów nawigacyjnych okres „bezlodowy” nie był tam krótszy od 60 dni. Spowodowało to, że w okresie 2014-2016 warunki lodowe na Morzu Wschodniosyberyjskim przestały stanowić czynnik regulujący czas funkcjonowania PDM jako szlaku tranzytowego.

#### 4. Dyskusja wyników i wnioski

Porównanie wartości trendów z lat 2008-2016 z trendami oszacowanymi w odniesieniu do okresu 1979-2008 na podstawie danych prezentowanych przez Rodriguesa (2009) pozwala na stwierdzenie, że liczba dni „bezlodowych” na poszczególnych morzach przyrasta szybciej w ostatnim okresie.

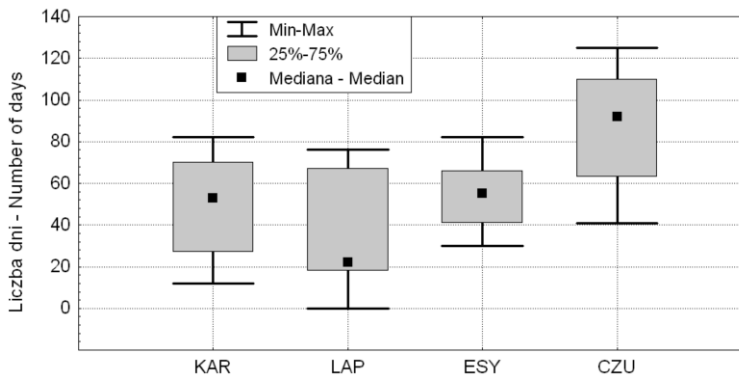
Tab. 2. Średnia liczba dni „bezlodowych” na morzach przez które prowadzi PDM w latach 2008-2016 i jej charakterystyka statystyczna

Table 2. The average number of “ice-free” days on seas through which NSR runs in the years 2008-2016 and its statistical characteristics.

Morze – Sea	Średnia Mean	BSS	Poziom ufności średniej Confidence level		Min	Max	$\sigma_{(n-1)}$
			-95%	+95%			
Karskie – Kara	50,3	8,9	29,9	70,9	12	82	25,06
Łaptiewów – Laptev	37,1	9,4	16,5	58,7	0,0	76	26,46
Wschodniosyberyjskie – East Siberian	55,7	5,4	43,2	68,2	30	82	12,33
Czukockie – Chukchi	86,0	9,8	63,3	108,7	41	125	27,83

Objaśnienia: BSS – błąd standardowy estymacji średniej, wartości średniej w zakresie w zakresie -95 i +95% poziomu ufności, min – najmniejsza liczba dni „bezlodowych” w sezonie nawigacyjnym w okresie obserwacji, max – największa liczba dni bezlodowych w sezonie nawigacyjnym w okresie obserwacji (2008-2016),  $\sigma_{(n-1)}$  – odchylenie standardowe dla małej próby.

Explanation: BSS – standard error of the mean estimation, the average value in the range between (-)95 and (+)95% confidence level, min – the minimal number of “ice-free” days in the navigation season during the observation period, max – the maximal number of “ice-free” days in the navigation season during the observation period (2008-2016),  $\sigma_{(n-1)}$  – standard deviation for a small sample.



Ryc. 3. Zakresy zmienności liczby dni występowania „warunków bezlodowych” na morzach Północnej Drogi Morskiej w latach 2008-2016. KAR – M. Karskie, LAP – M. Łaptiewów, ESY – M. Wschodniosyberyjskie, CZU – M. Czukockie

Fig. 3. Ranges of variability of number of days with “ice-free conditions” on seas of the Northern Sea Route in the years 2008-2016. KAR – Kara Sea, LAP – Laptev Sea, ESY – East Siberian Sea, CZU – Chukchi Sea.

Ponieważ wartości trendów oszacowane z danych Rodriguesa są również statystycznie nieistotne, nie ma uzasadnienia dla przeprowadzenia bardziej szczegółowych porównań. Wystarczy, porównując oszacowane trendy<sup>2</sup> stwierdzić, że w latach 2008-2016 na morzach, przez które prowadzi PDM tempo wzrostu liczby dni umożliwiających żeglugę bezlodową jest od około 1,5 do około 3 razy szybsze niż

<sup>2</sup> Wartości trendów oszacowane z danych Rodriguesa (2009): Morze Karskie +2,13(±0,69), Morze Łaptiewów +1,18(±0,73), Morze Wschodniosyberyjskie +2,65(±1,58) i Morze Czukockie +2,58(±1,02) tys. km<sup>2</sup>-rok<sup>-1</sup>.

w okresie lat 1979-2008. Orientacyjnie można przyjąć, że średnia liczba dni „bezlodowych” na PDM jest obecnie (2008-2016) około dwukrotnie większa niż była w okresie poprzednim (1979-2008). Przeglądając historyczne mapy zasięgu lodów morskich w Arktyce (między innymi codzienne mapy NSIDC) oraz zbiory danych, które zawierają miesięczne wartości powierzchni pokrywy lodowej na danych akwenach, wnioskiem o przyspieszeniu redukcji pokrywy lodowej, a tym samym wydłużaniu się okresów umożliwiających żeglugę w warunkach bezlodowych na PDM, jest oczywisty.

Uzyskane oceny pozwalają również, przy zachowaniu odpowiedniej ostrożności, na pewne oceny na temat regionalnego zróżnicowania wielkości zmian liczby dni umożliwiających żeglugę w warunkach bezlodowych. Po zachodniej stronie PDM (morza Karskie i Łaptiewów) średnie zmiany roczne w latach 2008-2016 są o około 3 razy większe od wartości z okresu wcześniejszego 1979-2008. Szczególnemu przyspieszeniu uległy zmiany na Morzu Łaptiewów. Duże zmiany na Morzu Karskim zachodziły już wcześniej, przed rokiem 2008. Według Marsza (2015) głównym czynnikiem wymuszającym zmiany powierzchni lodów w basenie Oceanu Arktycznego jest dopływ ciepła wnoszonego wraz z Wodami Atlantyckim. Ponieważ ciepło to najpierw dociera do „przyatlantyckiej” części Arktyki (morza Barentsa i Grenlandzkie, później Karskie), wcześniej nastąpiły zmiany warunków lodowych na Morzu Karskim niż na Morzu Łaptiewów, a tempo zmian na tych morzach jest większe niż we wschodniej części PDM.

Po wschodniej stronie PDM (morza Wschodniosyberyjskie i Czukockie) zmiany w okresie 2008-2016 są o około 100% większe niż w wcześniejszym okresie 1979-2008. Na wschodzie szybsze zmiany zachodzą na Morzu Wschodniosyberyjskim niż na Morzu Czukockim. Morze Wschodniosyberyjskie jest jedynym morzem, na którym trend liczby dni umożliwiających żeglugę w warunkach bezlodowych jest statystycznie istotny. Może to świadczyć, że ciepło z Wód Atlantyckich dotarło również do Morza Wschodniosyberyjskiego. Według Marsza (inf. ustna) opracowane przez niego prognozy wskazują, że nadal będzie zachodzić w kolejnych sezonach letnich gwałtowne zmniejszenie powierzchni lodów na morzach Łaptiewów i Wschodniosyberyjskim, a w roku 2020-2021 powinny w sierpniu i wrześniu panować tam warunki bezlodowe. Czy prognozy te się sprawdzą, okaże się za 3-4 lata.

Przeprowadzona analiza trendów liczby dni z warunkami „bezlodowymi” wskazuje, że w latach 2008-2016 najważniejsze „ognisko” szybkich zmian warunków lodowych lokowało się w środkowej części trasy PDM, która do ostatnich lat charakteryzowała się najtrudniejszymi warunkami żeglugi. Jeśli procesy te nadal będą trwały z dotychczasowym, lub większym natężeniem, zmienią one diametralnie na korzyść warunki żeglugi na Północnej Drodze Morskiej w ciepłej porze roku. Północna Droga Morska, z potencjalnie ważnego szlaku transportowego stanie się jednym z ważnych, choć najprawdopodobniej sezonowych, szlaków transportu morskiego.

## Literatura

- ACIA, 2005, *Arctic climate impact assessment*. Cambridge University Press: ss. 1042.
- Cavalieri D.J., Parkinson C.L., 2012, *Arctic sea ice variability and trends, 1979-2010*. The Cryosphere, 6: 881-889. doi:10.5194/tc-6-881-2012
- Comiso J.C., Parkinson C.L., Gersten R., Stock L., 2008, *Accelerated decline in the Arctic sea ice cover*. Geophysical Research Letters, 35, L01703, doi:10.1029/2007GL031972.
- Dremlyug W.W., 1974, *Oceanografia nautyczna* (tłum. M. Holec). Wydawnictwo Morskie, Gdańsk: ss. 126.
- Laxon S., Peacock N., Smith D., 2003, *High interannual variability of sea ice thickness in the Arctic region*. Nature, 425: 947-950. doi:10.1038/nature02050.

- Liu M., Kronbak J., 2010, *The potential economic viability of using the Northern Sea Route (NSR) as an alternative route between Asia and Europe*. Journal of Transport Geography, 18: 434-444.
- Marsz A., 2015, *Model zmian powierzchni lodów morskich Arktyki (1979-2013) – zmienne sterujące w 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 eurazjatyckiej Arktyki i ich potencjalny wpływ na nawigację na Północnej Drodze Morskiej w drugiej dekadzie XXI wieku*. Problemy Klimatologii Polarnej, 24: 65-91.
- Pastusiak T., 2014, *Zmienność sezonu “bezlodowego” na Północnej Drodze Morskiej*. Problemy Klimatologii Polarnej, 24: 101-108.
- Pastusiak T., 2016a, *Competiviness of the Northern Sea Route in view of uncertain information*. [w:] *Natural Resources and Integrated Development of Coastal Areas in the Arctic Zone*, Arkhangelsk 2016: 360-369.
- Pastusiak T., 2016b, *The Northern Sea Route as a shipping lane. Expectations and Reality*. Springer International Publishing: ss. 247.
- Petrov M.K., 1955, *Plavanie vo l'dakh*. Morskoy Transport, Moskva: ss. 256.
- Serreze M.C., Holland M.M., Stroeve J., 2007, *Perspectives on the Arctic's Shrinking Sea-Ice Cover*. Science, 315: 1533-1536. DOI: 10.1126/science.1139426
- Verny J., Grigentin Ch., 2009, *Container shipping on the Northern Sea Route*. International Journal of Production Economics, 122: 107-117.
- NATICE, 2016 (U.S. National/Naval Ice Center). Daily ice concentration maps in KML format, [http://www.natice.noaa.gov/products/kml\\_daily.html](http://www.natice.noaa.gov/products/kml_daily.html). Provided courtesy U.S. National Ice Center.
- NSIDC Arctic Sea Ice News & Analysis; <http://nsidc.org/arcticseaicenews/>.

Wpłynęło: 20 września 2016 r., poprawiono: 11 grudnia 2016 r., zaakceptowano: 17 grudnia 2016 r.

## Summary

The purpose of the study was to determine the trend of the number of days in which navigation on the NSR is possible under ‘ice-free’ conditions. Trend of ice extent area reduction in years 1978-2016 was almost two times higher in summer (September) than in winter (March). In years 2008-2016 on all the NSR seas existed positive trends in number of ‘ice-free’ days. The fastest increase in number of ‘ice-free’ days was in the Kara Sea, the slowest on the Chukchi Sea. Number of ‘ice-free’ days on particular seas been growing faster in recent years in the period 2008-2016 than in the period 1979-2008. On the west side of the NSR (the Kara Sea and the Laptev Sea) the average annual changes in the years 2008 to 2016 were about 3 times higher than those of the previous period 1979-2008. On the eastern side of the NSR (the Chukchi Sea and East Siberian Sea), these changes were about 2 times higher only. If these processes will have continued, the Northern Sea Route from potentially important transport route will become important, however most probably seasonal shipping lane.

**Key words:** Northern Sea Route, ice-free days, ice-free navigation, ice extent trends.