

## ZMIANY POWIERZCHNI LODÓW MORSKICH NA MORZACH EURAZJATYCKIEJ ARKTYKI I ICH POTENCJALNY WPŁYW NA NAWIGACJĘ NA PÓŁNOCNEJ DRODZE MORSKIEJ W DRUGIEJ DEKADZIE XXI WIEKU

CHANGES OF SEA ICE EXTENT ON THE EURO-ASIATIC ARCTIC SEAS  
LINKED TO POTENTIAL OF NAVIGATION ON THE NORTHERN SEA ROUTE  
IN THE SECOND DECADE OF XXI CENTURY

Andrzej A. Marsz<sup>1</sup>, Tadeusz Pastusiak<sup>2</sup>, Anna Styszyńska<sup>1</sup>

<sup>1</sup> – Katedra Meteorologii i Oceanografii Nautycznej, Wydział Nawigacyjny Akademii Morskiej w Gdyni  
ul. Sędzickiego 19, 81-374 Gdynia  
aamarsz@am.gdynia.pl, stysa@am.gdynia.pl

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

**Zarys treści.** W pracy przedstawiono wyniki szczegółowej analizy zachodzącej współcześnie (1979-2013) ewolucji pokrywy lodowej na morzach Arktyki Rosyjskiej, przez które prowadzą trasy Północnej Drogi Morskiej (PDM) oraz analizę długości sezonu żeglugowego (okresu, w którym koncentracja lodów nie przekracza 15%). Stwierdzono występujące w ostatnich latach (2002-2013) wyraźne polepszenie się potencjalnych warunków żeglugi, choć na morzach Łaptiewów i Wschodniosyberyjskim warunki te pozostają nadal bardzo trudne i labilne, nawet w okresie najmniejszego rozwoju pokrywy lodowej (druga połowa sierpnia – pierwsza połowa października). Przeprowadzona analiza długości okresu „bezlodowego”, w którym warunki lodowe dopuszczają względnie swobodną żeglugę statków nieposiadających najwyższych klas lodowych wykazuje, że w obecnych, wyjątkowo łagodnych warunkach lodowych, trasy na morzach Łaptiewów i Wschodniosyberyjskim nie gwarantują corocznej swobodnej żeglugi bez pomocy lodołamaczy nawet w sezonie nawigacyjnym, stanowiąc „wąskie gardła” całego szlaku PDM. Dla okresu od lipca do listopada podano orientacyjne ryzyko żeglugi na poszczególnych morzach dla statku samodzielnie pokonującego trasę PDM.

**Słowa kluczowe:** lód morski, zmiany pokrywy lodowej, Północna Droga Morska, Arktyka Rosyjska.

### 1. Wprowadzenie

Północna Droga Morska to arktyczny szlak żeglugowy łączący Europę z Dalekim Wschodem przebiegający wzdłuż wybrzeży Eurazji. Składa się z serii różnych wariantów tras żeglugowych poprowadzonych przez morza Arktyki Rosyjskiej: Barentsa, Karskie, Łaptiewów, Wschodniosyberyjskie i Czukockie. Jednym z podstawowych czynników określających możliwość korzystania z Północnej Drogi Morskiej jako szlaku transportowego jest charakter pokrywy lodów morskich występujących w danym momencie na akwenach tworzących ten szlak. Pokrywę lodową charakteryzuje wiele parametrów, takich jak powierzchnia zajęta przez pokrywę lodową na danym akwenie, rozmiary

fragmentów lodu pokrywającego daną powierzchnię, grubość lodu morskiego, jego koncentracja (zwarcie), rzeźba powierzchni lodu, ..., etc. Wszystkie one wprowadzają określone ograniczenia dla poruszającego się w lodach statku.

Rozkład parametrów lodowych nieprzerwanie zmienia się w czasie i przestrzeni. Część tych zmian ma charakter sezonowy i jest związany z rocznym cyklem zamarzania i rozmarzania powierzchni morza. Część zmian parametrów pokrywy lodowej zachodzi aperiodycznie, będąc rezultatem krótkookresowej zmienności warunków hydrometeorologicznych na-, lub nad danym akwenem. Na wszystkie te, okresowe – zachodzące w cyklu rocznym i nieokresowe zmiany – zachodzące w ciągu roku, nakładają się długookresowe zmiany warunków hydrometeorologicznych, sterujące długookresowymi trendami zmian pokrywy lodowej. W rezultacie nakładania się na siebie tych różnoskalowych procesów międzyroczna i międzysezonowa zmienność warunków lodowych jest bardzo duża.

Chociaż na żeglugę w lodach wpływ wywierają warunki lodowe, takie, jakie występują w danej chwili na trasie, jaką pokonuje statek, to aktualne możliwości żeglugi na Północnej Drodze Morskiej określają rezultaty zmian klimatycznych, jakie zachodziły w XX wieku, a zwłaszcza na przełomie XX i XXI wieku. Z tego względu przedstawi się w tym miejscu najważniejsze cechy zmian pokrywy lodowej, ze szczególnym uwzględnieniem zmian, jakie zaszły w ostatnim 30. leciu. Podstawowym parametrem, na który zwróci się uwagę jest powierzchnia zlodzona (ang. „extent”). Pod tym mianem rozumie się dalej powierzchnię danego akwenu pokrytą lodem o koncentracji (zwarcu) od 15 do 100%. Granica 15% powierzchni pokrytej lodem wynika z granicznych możliwości wiarygodnego rozpoznania lodu w danym pikselu skanowania przez czujniki radiometrów mikrofalowych (AVHRR) zainstalowanych na satelitach.

Powierzchnia zlodzona nie daje bezpośrednio informacji przydatnej dla nawigatora pokonującego konkretną trasę na akwenach zlodzonych, jednak jest pożyteczną informacją o charakterze ogólnym – im większa/mniejsza w danym momencie (dniu, miesiącu, sezonie, roku) powierzchnia zlodzona, tym mniejsza/większa powierzchnia „czystej wody”, czyli wody o zlodzeniu od 0 do 15%. Z tego powodu powierzchnia zlodzona (extent) jest powszechnie stosowana do przedstawiania zmian zachodzących w międzymiesięcznym, międzysezonowym i międzyrocznym przebiegu procesów na poszczególnych akwenach i w skali całej Arktyki i Antarktyki (patrz SII – Sea Ice Index; Fetterer i Knowles 2004).

W ogólnej klasyfikacji stopnia zlodzenia stosowanej w nawigacji (patrz m.in. MANICE 2005) wyróżnia się klasę „open water”, którą określa się wody o pokryciu lodem od 0 do 1/10 lub 1/8 (10-12,5%). Na takich wodach statek może rozwinąć na dłuższych odcinkach pełną prędkość eksploatacyjną, a ewentualnie występujące na jego trasie fragmenty lodu omijać bez istotnego zmniejszania prędkości. Dolna granica powierzchni zlodzonej równa 15% jest bardzo bliska granicy „open water”, umożliwiającej praktycznie żeglugę bez przeszkód. W przypadku pokrycia lodem powierzchni morza nieprzekraczającej 4/10, co oznacza, że nie mniej niż 60% powierzchni morza tworzy czysta woda, przeciętnie na ~75% długości trasy statek będzie mógł utrzymać prędkość eksploatacyjną, a na ~25% trasy zajdzie potrzeba zmniejszenia prędkości w związku z koniecznością manewrowania w lodach oraz wydłużenia trasy w związku z koniecznością obejścia skupień lodu. Wraz z dalszym wzrostem powierzchni zlodzonej warunki żeglugi ulegają szybkiemu, nieliniowemu pogarszaniu się (spadek prędkości podróży, wydłużenie drogi, zwiększona strata czasu, etc). Przy zwarcu lodów równym 7 samodzielna żegluga statku nie będącego lodolamaczem staje się niemożliwa. Statkowi grozi ugrzęźnięcie i wmarznięcie w lód, a następnie poruszanie się dalej w niekontrolowany sposób wraz z dryfującym lodem.

Dane o zmianach powierzchni lodów morskich na półkuli północnej z okresu poprzedzającego wprowadzenie obserwacji lotniczych i satelitarnych są bardziej niż skąpe, na dodatek obciążone dużymi, nieznanyymi błędami. O ile na morzach, na których żegluga była regularna i miała duże natężenie (np. na Bałtyku; patrz np. Alenius i Makkonen 1981, Seinä i Palosuo 1993) informacja o zmianach powierzchni lodów morskich sięga kilkuset lat wstecz, to w Arktyce (poza Islandią) takich informacji jest niewiele. Peryferyczne położenie Arktyki w stosunku do obszarów silnie rozwiniętych gospodarczo i nieznanomość tych obszarów dla cywilizacji europejskiej oraz niemal całkowita ich bezludność, nie czyniły, aby żegluga tam była potrzebna. Ograniczona żegluga związana była z eksploatacją zasobów żywych Arktyki – połowów ryb, polowań na foki i morsy, połów wielorybów. Rejsy odkrywcze i statków badawczych w Arktyce były nieliczne. Prowadzono je w Arktyce od XVII wieku.

Ze względu na występowanie wyjątkowo trudnych warunków pogodowych, lodów morskich i nocy polarnej, ta okazjonalna żegluga w Arktyce ograniczona była do tak zwanego sezonu nawigacyjnego, obejmującego okres drugiej połowy lata i początku jesieni. Bardziej precyzyjnie przeciętny sezon nawigacyjny w Arktyce definiowany jest jako okres od drugiej połowy lipca do drugiej połowy października, kiedy temperatura powietrza i powierzchnia czystej wody są tam największe. Realnie, ze względu na dużą zmienność międzyroczną i międzysezonową warunków hydrometeorologicznych rzeczywiste momenty początku i końca sezonu nawigacyjnego, a tym samym i jego długość, wykazują bardzo dużą zmienność (m.in. Arikajnen 1990, Rodrigues 2008, 2009). Jak podaje Drent (1993), w latach 30. i 40. XX wieku długość sezonu nawigacyjnego na Północnej Drodze Morskiej wynosiła przeciętnie 93 dni, w latach 50. i 60. XX wieku wzrosła do 122-128 dni, a w latach 70. XX wieku – do 140-150 dni.

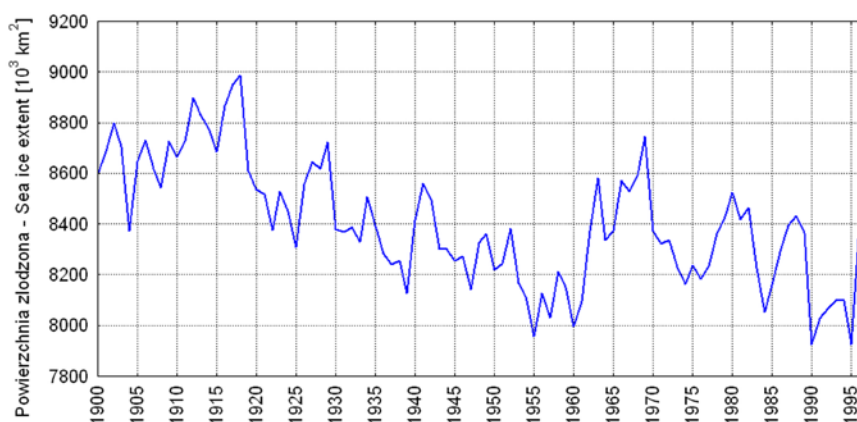
Z tego względu informacja o stanie pokrywy lodowej w Arktyce dostarczana przez statki jest nieciągła w czasie i przestrzeni. Stanowi ona wyrwykowe dane wyłącznie z okresu sezonu nawigacyjnego. Największa ilość danych pochodzi z przełomu sierpnia i września, kiedy zaznacza się minimum powierzchni złodzonej. Informacje o lodach dostarczane przez statki dotyczyły głównie punktowych pozycji, rzadziej obejmujących dłuższe odcinki położenia granicy lodów. Trzema wyjątkami od żeglugi w sezonie nawigacyjnym były zamierzony dryf Framy (1893-1896) i niezamierzone dryfy Jeannette (1879-1881) oraz Siedowa (1937-1940), kiedy statki znajdowały się w lodach również w okresie chłodnej pory roku. Informacje o lodach dostarczane przez te statki wyjaśniły, że zarówno w chłodnej, jak i cieplej porze roku wokół ich pozycji powierzchnia morza była całkowicie pokryta przez lód uniemożliwiający żeglugę (m.in. Marchenko 2012).

## **2. Długookresowe zmiany powierzchni lodów**

Względnie wiarygodnym zbiorem danych charakteryzującym długookresowe zmiany powierzchni lodów morskich w okresie poprzedzającym obserwacje satelitarne jest zbiór Zacharowa (Zakharov 1997). Zbiór ten zawiera dane o powierzchni lodów w końcu sierpnia – a więc w momencie bliskim rocznemu minimum – i obejmuje okres lat 1900-1996. Charakteryzuje on powierzchnię złodzoną, wyznaczoną przez południowy zasięg lodu w sektorze Arktyki obejmującym obszar od wschodnich wybrzeży Grenlandii do bieguna północnego i od bieguna dalej do środkowej części Cieśniny Beringa. W tak wyznaczonych granicach zbiór ten obejmuje około 77% powierzchni Arktyki. Dokładność powierzchni złodzonych podawanych w zbiorze Zakharova w poszczególnych latach jest zróżnicowana. Wynika to ze wzrastającej w miarę upływu czasu ilości obserwacji lodowych i poprawy ich jakości.

Jak pisze Zakharov (1996, 1997), do połowy lat 30. XX wieku wartości powierzchni zlodzonej należy traktować jako orientacyjne, od drugiej połowy lat 30' do 1945 jako bliskie rzeczywistości<sup>1</sup>, a po roku 1945 – jako pewne. Zakharov (1997) posługując się metodami korelacji i regresji liniowej na podstawie tego zbioru oszacował powierzchnię lodów morskich na obszarze całej Arktyki, jaka występowała w drugiej połowie sierpnia i na przełomie sierpnia i września w latach 1900-1996.

Przebieg zmian powierzchni zlodzonej w latach 1900-1996, według danych ze zbioru Zakharova (1997) pokazuje ryc. 1. Z przedstawionych danych wynika, że w XX wieku zachodziły w okresie minimum rozwoju lodów znaczne zmiany ich powierzchni. Od początku wieku do roku 1917-1918 następowało zwiększanie się powierzchni zlodzonej, osiągając w roku 1918 niespełna 9 milionów km<sup>2</sup> ( $8,988 \cdot 10^3$  km<sup>2</sup>). Trend zmian powierzchni zlodzonej w tym okresie (1900-1918) jest równy  $+16,87 \cdot 10^3$  km<sup>2</sup>·rok<sup>-1</sup> ( $p < 0,003$ ).



Ryc. 1. Zmiany powierzchni zlodzonej na obszarze Arktyki w drugiej połowie sierpnia lat 1900-1996.  
Dane – zbiór Zakharova (1996, 1997)

Fig. 1. Changes of sea ice extent on the Arctic in the second half of August, years 1900-1996.  
Data – Zakharov collection (1996, 1997).

Od tego momentu następuje niejednostajny spadek powierzchni zlodzonej do końca okresu obserwacji. Pierwszy okres spadku powierzchni zlodzonej trwa od roku 1918 do 1955, z tym, że już w roku 1955 powierzchnia zlodzona osiąga najmniejszą wartość, a w latach 1955-1960 powierzchnia zlodzenia wykazuje niewielką zmienność i utrzymuje się na względnie stałym, niskim poziomie. W skali całej Arktyki nie zaznacza się w przebiegu zmian powierzchni zlodzenia bardzo silny spadek powierzchni lodów morskich, jaki zaznaczył się w sektorze atlantyckim Arktyki w drugiej połowie lat 30. XX wieku i pierwszej połowie lat 40. XX wieku<sup>2</sup>. Oznacza to, że zmiany powierzchni zlodzonej nie zachodziły synchronicznie na całej powierzchni Arktyki, dla której zestawiał dane Zakharov. Potwier-

<sup>1</sup> Od połowy lat 30.XX wieku na obszarze mórz przylegających do wybrzeży ZSRR w sezonie nawigacyjnym wprowadzono lotniczy zwiad lodowy. Po roku 1945, a zwłaszcza po 1948 roku („zimna wojna”) zwiad ten był prowadzony regularnie w ciągu całego roku. Jako metodę rejestracji stanu powierzchni morza stosowano fotografie lotniczą, uzupełnioną od przełomu lat 60. i 70.XX wieku rejestracją radarową.

<sup>2</sup> W tym okresie szereg statków radzieckich i krążownik pomocniczy Kriegsmarine Komet (1940 rok) przebyły, bez większych problemów całą trasę Północnej Drogi Morskiej w jednym sezonie nawigacyjnym.

dają taki stan rzeczy analizy i dane Polyakova i in. (2003). Wartość trendu zmian powierzchni zlodzenia w okresie 1918-1960 jest równa  $-12,68 \cdot 10^3 \text{ km}^2 \cdot \text{rok}^{-1}$  ( $p < 0,0001$ ).

Po okresie pierwszego spadku dochodzi do odwrócenia trendu i niezmiernie gwałtownego wzrostu powierzchni zlodzonej. Zaledwie w okresie 10 lat (1960-1969) powierzchnia zlodzona wzrasta z około 8 milionów  $\text{km}^2$  do około 8,7 mln  $\text{km}^2$  (trend  $+66,84(\pm 13,81) \cdot 10^3 \text{ km}^2 \cdot \text{rok}^{-1}$  ( $p < 0,002$ )). Po roku 1969 powierzchnia zlodzenia zmniejsza się, trend jest równy  $-10,99(\pm 3,91) \cdot 10^3 \text{ km}^2 \cdot \text{rok}^{-1}$  ( $p < 0,003$ ), przy czym w latach 1990-1995 ponownie występuje lokalne minimum, w którym zmienność międzyroczna jest mała, a średnie wartości powierzchni zlodzonej niewielkie.

Podsumowując obraz zmian zlodzenia omawianej części Arktyki w XX wieku, można stwierdzić, że powierzchnia pokryta lodami w okresie minimum ich rozwoju wykazuje dużą zmienność zarówno krótko-, jak i długookresową. W krótkookresowym przebiegu zlodzenia zauważa się występowanie gwałtownych zmian międzyrocznych o rozmiarach  $\pm 200\text{-}300$  tysięcy  $\text{km}^2$ . Zmiany długookresowe charakteryzują się występowaniem dłuższych okresów, w czasie których występują nieregularne spadki (faza spadkowa), i krótszych okresów, w których następuje gwałtowny, bardzo szybki wzrost powierzchni zlodzonej (faza wzrostowa). W całym okresie zaznacza się wyraźna tendencja do przewagi spadków powierzchni zlodzonej – kolejne lokalne minima w cyklach spadkowych są coraz to niższe. Ogólnie, trend powierzchni zlodzonej w latach 1900-1996 jest równy  $-5,55(\pm 0,67) \cdot 10^3 \text{ km}^2 \cdot \text{rok}^{-1}$ . Trend ten jest wysoce istotny statystycznie ( $p < 0,0001$ ), przy czym długookresowy trend liniowy opisuje wypadkową zmian, ale w niewielkim stopniu charakteryzuje rzeczywisty przebieg zmian zlodzenia.

### 3. Zmiany powierzchni lodów w okresie satelitarnym (1978-2013)

Od listopada 1978 roku, w związku z wprowadzeniem na orbity satelitów wywiadowczych, wyposażonych w wysokorozdzielcze bierne radiometry mikrofalowe (AVHRR – Advanced Very High Resolution Radiometer), uzyskuje się niemal ciągle obraz zmian powierzchni zlodzonej i innych parametrów lodu morskiego. Od tego momentu<sup>3</sup> wartości zmian powierzchni lodów morskich można określić z dużą dokładnością, zależną jedynie od stosowanych algorytmów przeliczania natężenia promieniowania mikrofalowego w pikselu na parametry lodowe. Wystarczająco duża jest również rozdzielczość przestrzenna. Istnieje szereg zbiorów danych przedstawiających powierzchnię lodów morskich, ich koncentrację, wiek i grubość lodu. Zbiory te, opracowywane przez służby różnych państw (głównie USA, Japonię, Rosję i kraje nordyckie) mają odmienne organizacje i formaty oraz rozdzielczości przestrzenne i czasowe.

Dalej, ze względu na rozdzielczość przestrzenną uwzględniającą kolejne morza leżące na trasie Północnej Drogi Morskiej, zostanie wykorzystany zbiór opracowany przez AANII (Arkticheskoi i Antarkicheskoi Nauchno-Issledovatel'skij Institut (Арктический и антарктический научно-исследовательский институт) w Sankt Petersburgu, w Rosji (<http://www.aari.nw.ru/main.php?lg=0>). Na zbiór ten

---

<sup>3</sup> Istnieją wcześniejsze (1960-1978) satelitarne zbiory danych informujące o powierzchni pokrywy lodowej, uzyskiwane z obrazów przekazywanych z satelitów klasy TIROS przez zainstalowane na nich kamery TV. Dane te są nieciągłe, a ich wiarygodność jest bardzo niska, gdyż nie przekazywały one informacji w okresie nocy nad danym obszarem, a określenie granic zasięgu lodów było niemożliwe w okresach występowania słabego oświetlenia danego obszaru i/lub występowania pokrywy chmur nad powierzchnią lodów, etc. Również rozdzielczość przestrzenna tych obrazów była bardzo niska. Ze względu na te ograniczenia, zbiory te nie są współcześnie wykorzystywane.

składają się podzbiory xxx.monthly.mean.exnt.csv<sup>4</sup>, charakteryzujące powierzchnię zlodzoną na poszczególnych morzach. Zbiór ten zawiera średnie miesięczne powierzchnie zlodzone (extent) na poszczególnych akwenach Arktyki, co oznacza, że wartości w nim zawarte są najbliższe rzeczywistej powierzchni zlodzonej, jaka występuje w drugiej dekadzie danego miesiąca. Na trasie Północnej Drogi Morskiej granice akwenów w tym zbiorze pokrywają się dokładnie z granicami poszczególnych mórz, określonymi przez Międzynarodową Organizację Hydrograficzną (Limits of oceans and seas. International Hydrographic Organization, 1953), co pozwala na łatwą interpretację danych z tego zbioru. Dalej zostaną scharakteryzowane poszczególne akweny leżące na trasie Północnej Drogi Morskiej i podejściu do niej – na morzach Barentsa i Beringa.

Charakterystyka ograniczy się do zmian powierzchni zlodzonej (extent). Pod mianem powierzchni zlodzonej (extent) rozumie się powierzchnię morza pokrytą lodem o zwartości  $\geq 15\%$ , czyli pokrytej lodem o koncentracji od 15 do 100%. Zmiany zlodzenia będą omówione w trzech przekrojach czasowych – w skali średniej rocznej, w miesiącach stanowiących potencjalny sezon nawigacyjny (lipiec – listopad) i w miesiącach wystąpienia minimum rozwoju lodów (sierpień – wrzesień), w okresie od listopada 1978 do grudnia 2013 roku (34-35 lat).

### 3.1. Morze Barentsa

Morze Barentsa nie jest akwenem, przez które przechodzą zasadnicze odcinki szlaku Północnej Drogi Morskiej, jednak, aby dojść do któregoś z punktów rozpoczynających ten szlak (Mysa Żelaniya na północy, Karskich Wrót lub Jugorskiego Śara na południu), trzeba przez wody tego morza przepłynąć. Na Morzu Barentsa występują również zjawiska lodowe mające negatywny wpływ na żeglugę.

Wody południowo-zachodniej części Morza Barentsa, do długości  $\sim 37,5^\circ\text{E}$  i szerokości geograficznej  $\sim 73^\circ\text{N}$  nigdy nie zamarzały. Przyczyną takiego stanu rzeczy jest dopływ do tej części morza cieplejszych wód Norweskiego Prądu Przybrzeżnego i Prądu Norwesko-Atlantyckiego, wnoszących ciepłe Wody Atlantyckie do Morza Barentsa. W początku XX wieku wody Morza Barentsa, na wschód i północ od podanych przybliżonych granic, zamarzały w czasie surowych zim. Silne zmniejszenie się powierzchni lodów morskich na Morzu Barentsa odnotowano w latach 1919-1924 (Johannessen i in. 2004) i od tego czasu lody na tym morzu mogą w sezonie nawigacyjnym stwarzać problemy dla żeglugi jedynie w jego północnej i wschodniej części, a zwłaszcza w południowo-wschodniej, płytkowodnej części (akwen między Półwyspem Kanin a Nową Ziemią). Ujemny trend rocznej powierzchni zlodzenia Morza Barentsa utrzymuje się również w okresie obserwacji satelitarnych.

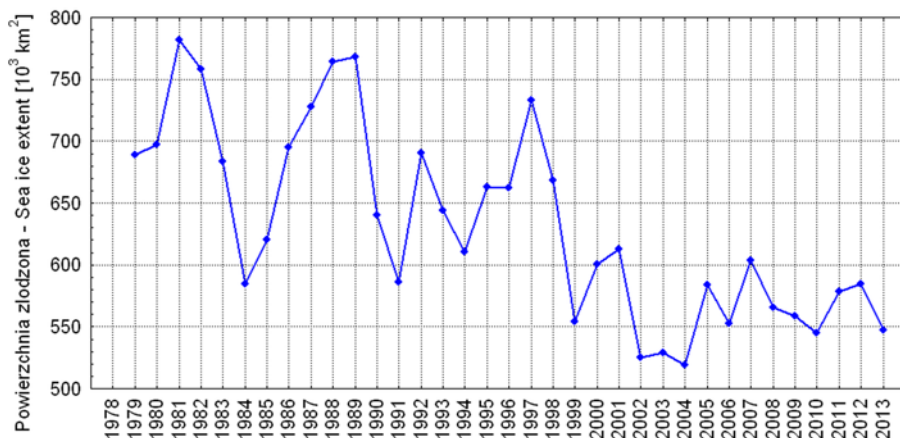
Przebieg rocznych wartości zlodzenia (średnia miesięczna w roku) daje informację o najbardziej ogólnych zmianach powierzchni zlodzenia zachodzących z roku na rok, z pominięciem zmian cyklu rocznego. W latach 1979-1991 zaznaczała się duża zmienność międzyroczna (ryc. 2), bez wyraźnego zmniejszania się maksymalnych powierzchni zlodzonych (lata 1981, 1982, 1988, 1989). Po tym okresie powierzchnia zlodzona zaczęła się zmniejszać – w latach 1998 i 1999 średnia roczna powierzchnia zlodzona gwałtownie się zmniejszyła i od 2000 roku praktycznie nie przekracza 600 tys. km<sup>2</sup>, co stanowi około 42% powierzchni tego morza.

W sezonie nawigacyjnym, który dla całej Arktyki można zdefiniować jako okres od lipca do przełomu października i listopada, powierzchnia zlodzenia na Morzu Barentsa w okresie 1979-2013 wyka-

---

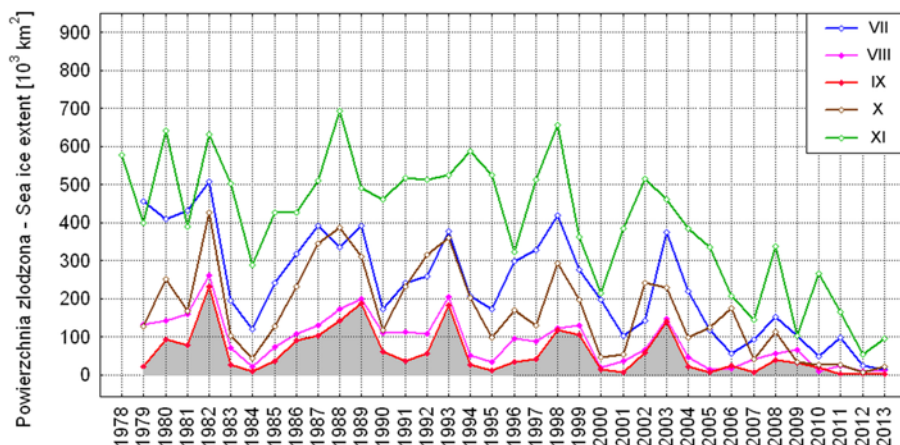
<sup>4</sup> Gdzie xxx. w nazwie zbioru oznacza skrót nazwy akwenu.

zuje systematyczne zmniejszanie się. O ile w okresie 1979-2002/2003 średni spadek był relatywnie powolny (patrz ryc. 3), a zmienność międzyroczna duża, to w latach 2002-2003 spadek powierzchni gwałtownie przyspieszył, natomiast zmienność międzyroczna zmniejszyła się (patrz ryc. 3). Od lipca 2006 roku, w sezonie nawigacyjnym praktycznie niemal cała powierzchnia Morza Barentsa jest wolna od lodu – lód utrzymuje się w poszczególnych latach jedynie na północnych obrzeżach tego akwenu. W ostatnich latach (2007-2013) zwraca uwagę systematyczne opóźnienie rozpoczynania się następnego sezonu lodowego – rozrost powierzchni zlodzonej w listopadzie jest coraz to wolniejszy. W latach 2009, 2012 i 2013 średnia powierzchnia zlodzona w listopadzie nie przekraczała 7% powierzchni morza. Świadczy to o wzrastających zasobach ciepła w wodach tego morza.



Ryc. 2. Przebieg rocznych wartości powierzchni zlodzonej na Morzu Barentsa (1979-2013)

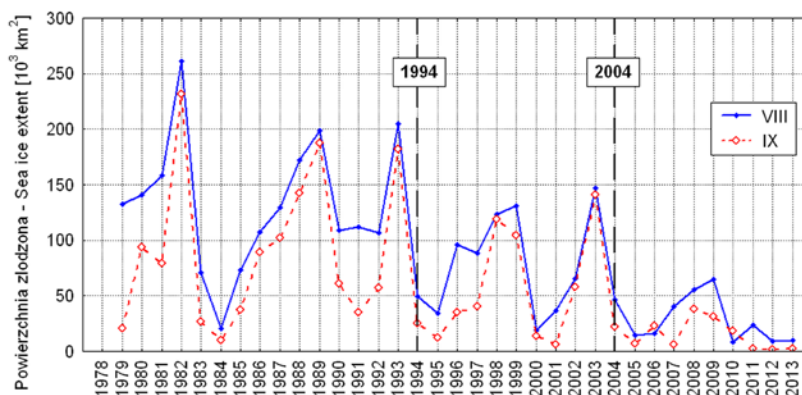
Fig. 2. Course of annual sea ice extent on the Barents Sea (1979-2013).



Ryc. 3. Zmiany średniej miesięcznej powierzchni zlodzonej na Morzu Barentsa w sezonie nawigacyjnym (lipiec-listopad) w latach 1978-2013

Fig. 3. Changes of monthly sea ice extent on the Barents Sea during navigation season (July-November), years 1978-2013.

Spadek powierzchni zlodzonej w okresie minimum rozwoju pokrywy lodowej na Morzu Barentsa nie zachodzi jednostajnie, lecz również ma przebieg skokowy. W sierpniu-wrześniu rozpatrywanego okresu zauważa się na ogólnym tle spadkowym dwa skoki – pierwszy przypada na rok 1994, po którym powierzchnia zlodzona nie wzrosła powyżej 150 tys. km<sup>2</sup>, co stanowi około 10% powierzchni morza, drugi – przypadający na rok 2004. Po tym ostatnim „skoku” powierzchnia zlodzona we wrześniu (ryc. 4) w ciągu 5 lat była bliska zero, a przez 5 lat wynosiła poniżej 40 tys. km<sup>2</sup> (poniżej 3% powierzchni morza). Pozwala to na sformułowanie stwierdzenia, że w sierpniach i wrześniach ostatnich 10 lat na Morzu Barentsa występują praktycznie warunki bezlodowe.



Ryc. 4. Zmiany powierzchni zlodzonej na Morzu Barentsa w miesiącach minimum rozwoju powierzchni zlodzonej (sierpień, wrzesień) w latach 1979-2013

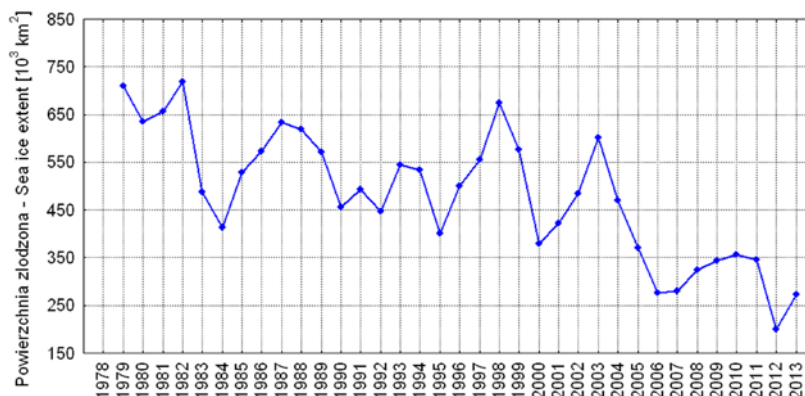
Fig. 4. Changes of monthly sea ice extent on the Barents Sea during the minimum cover times (August – VIII and September – IX), years 1979-2013.

### 3.2. Morze Karskie

Na morzach położonych na wschód od Morza Barentsa roczny i długookresowy cykl zmian powierzchni zlodzonej jest odmienny od tego, jaki obserwuje się na Morzu Barentsa. Morza te przez dłuższy lub krótszy okres zamarzają całkowicie. Następuje to na wszystkich morzach (Karskim, Łaptiewów, Wschodniosyberyjskim i Czukockim) w marcu i kwietniu. Niektóre z mórz w poszczególnych latach zamarzają całkowicie już wcześniej – w grudniu, styczniu, lutym. Procesy topnienia lodu, które rozpoczynają się zazwyczaj w maju, zachodzą z różną intensywnością na poszczególnych akwenach i ich częściach. W trakcie topnienia powierzchnie „czystej wody” nie są ze sobą połączone, lecz tworzą zazwyczaj izolowane polynie. Często są to polynie wzdłużbrzegowe. Dodatkowo, następujący dryf lodów często zmienia zarysy obszarów „czystej wody” i przerywa ciągłość polyni. Wszystko to razem powoduje, że zmiany powierzchni zlodzenia w maju i czerwcu w niewielkim stopniu uprawniają do wnioskowania z obserwowanych zmian powierzchni zlodzonej o możliwości prowadzenia nawigacji na dłuższych dystansach. Dynamika krawędzi lodów jest w tym czasie bardzo duża.

Zmiany powierzchni zlodzonej na Morzu Karskim (powierzchnia morza 883 tys. km<sup>2</sup>) zachodziły w rozpatrywanym okresie 1979-2013 odmiennie niż na Morzu Barentsa. W latach 1979-2004 średnia roczna powierzchnia zlodzona na Morzu Karskim wykazywała stosunkowo słaby (-5,6 tys. km<sup>2</sup>·rok<sup>-1</sup>), statystycznie istotny, trend ujemny, przy dość dużej zmienności międzyrocznej. Między rokiem 2004

a w 2006 nastąpiło gwałtowne przyspieszenie redukcji powierzchni zlodzonej (ryc. 5). Trend spadkowy rocznej powierzchni zlodzonej między rokiem 2004 i 2013 wynosi  $14,2 \text{ tys. km}^2 \cdot \text{rok}^{-1}$  i również jest statystycznie istotny. Wystąpienie „skoku” spadku zlodzenia jest na tym morzu wyraźnie opóźnione w stosunku do podobnego gwałtownego spadku zlodzenia na Morzu Barentsa (1998-1999) o sześć lat.



Ryc. 5. Przebieg rocznych wartości powierzchni zlodzonej na Morzu Karskim (1979-2013)

Fig. 5. Course of annual sea ice extent on the Kara Sea (1979-2013).

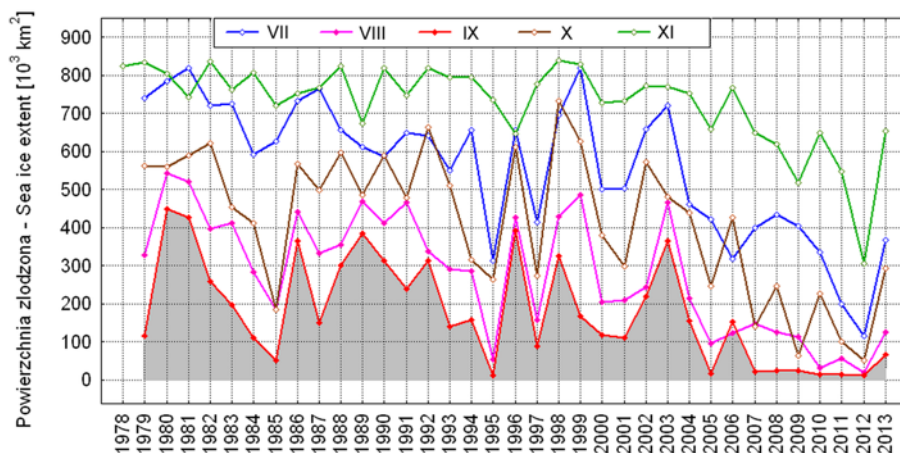
Po ostatnim silnym spadku w roku 2006 średnia roczna powierzchnia zlodzona na Morzu Karskim nie przekracza  $\sim 350 \text{ tys. km}^2$  ( $\sim 40\%$  powierzchni morza), gdy wcześniej (1979-2004) najczęściej występująca powierzchnia zlodzona mieściła się w przedziale między 400 i 650 tys.  $\text{km}^2$  ( $45\text{-}75\%$  powierzchni morza).

Zmiany zlodzenia w sezonie nawigacyjnym (ryc. 6) na Morzu Karskim były i są duże. W badanym okresie następuje szybka zmiana powierzchni pokrytej lodem morskim z miesiąca na miesiąc. Do roku 2004, w lipcu średnia powierzchnia zlodzona wahała się od  $\sim 820 \text{ tys. km}^2$  (1999) do  $310 \text{ tys. km}^2$ , przy średniej wieloletniej około  $650 \text{ tys. km}^2$  ( $\sim 75\%$  powierzchni morza), co czyniło, że akwen ten w lipcu był jeszcze niedostępny dla nawigacji lub nawigacja na nim była skrajnie trudna. Od roku 2005 nastąpiło wyraźne polepszenie warunków nawigacyjnych w lipcu, do roku 2013 w żadnym z lat powierzchnia zlodzona nie przekroczyła w lipcu  $430 \text{ tys. km}^2$  ( $\sim 49\%$  powierzchni morza). Takie zlodzenie wskazuje jednak, że mimo wyraźnej poprawy warunków lodowych w lipcach ostatnich kilku lat, żegluga na Morzu Karskim w tym miesiącu może jeszcze w poszczególnych latach napotykać na poważne problemy.

Charakterystyczną cechą końca sezonu nawigacyjnego na Morzu Karskim jest bardzo szybki przyrost powierzchni zlodzonej. Wyjątkowo gwałtowny przyrost powierzchni lodów obserwuje się między połową października a połową listopada. Przyczyną takiego stanu rzeczy jest bardzo silne wysłodzenie relatywnie cienkiej powierzchniowej warstwy wody, a tym samym bardzo mała zdolność akumulacji ciepła słonecznego w wodach. Należy pamiętać, że do Morza Karskiego uchodzą, nie licząc innych dużych rzek, wielkie rzeki Zachodniej Syberii – Ob z Irtyszem oraz Jenisej. W rejonie ujść rzecznych i w odległości do 100-150 km od brzegów piknoklina leży na niewielkiej głębokości – często mniejszej niż 20 m.

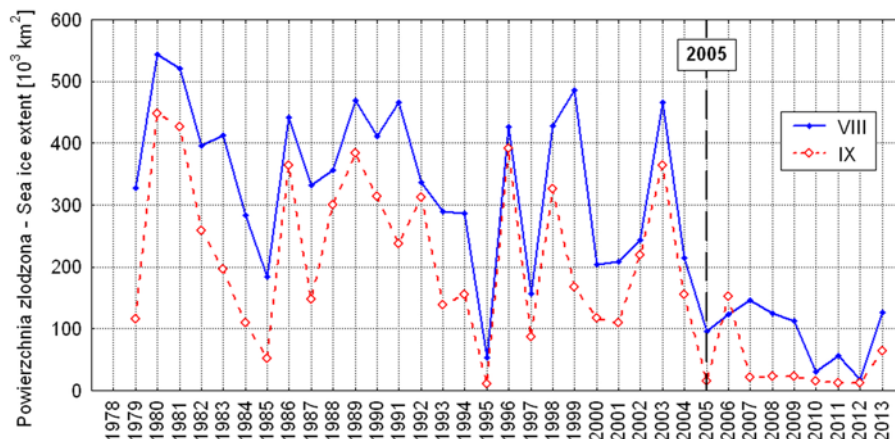
O ile przyrost powierzchni lodów między połową września (minimum roczne) a połową października wykazuje również wyraźne, choć opóźnione (po 2006 roku), zmniejszenie w ostatnich latach,

wskazujące na wydłużenie się sezonu nawigacyjnego, to zaznaczające się w tych samych latach (2007-2013) opóźnienie w tworzeniu się lodów między połową października i połową listopada nie skutkuje podobnie znacznym zmniejszeniem się rozmiaru powierzchni zlodzonej. Przeciętna pokrywa zlodzona Morza Karskiego w połowie listopada wynosi około 580 ( $\pm 55$ ) tys. km<sup>2</sup>, co oznacza, że ~66( $\pm 6$ )% powierzchni morza jest już pokryta lodem. Grubość tego lodu można szacować na 35-40 cm. Pozwala to sformułować tezę, że nawet w okresie ostatniego polepszenia się warunków lodowych sezon nawigacyjny dla statków bez klasy lodowej i bez prowadzenia lub asysty lodołamacza na Morzu Karskim kończy się przeciętnie w pierwszej dekadzie listopada.



Ryc. 6. Zmiany średniej miesięcznej powierzchni zlodzonej na Morzu Karskim w sezonie nawigacyjnym (lipiec-listopad) w latach 1978-2013

Fig. 6. Changes of monthly sea ice extent on the Kara Sea during navigation season (July-November), years 1978-2013.



Ryc. 7. Zmiany powierzchni zlodzonej na Morzu Karskim w miesiącach minimum rozwoju powierzchni zlodzonej (sierpień, wrzesień) w latach 1979-2013

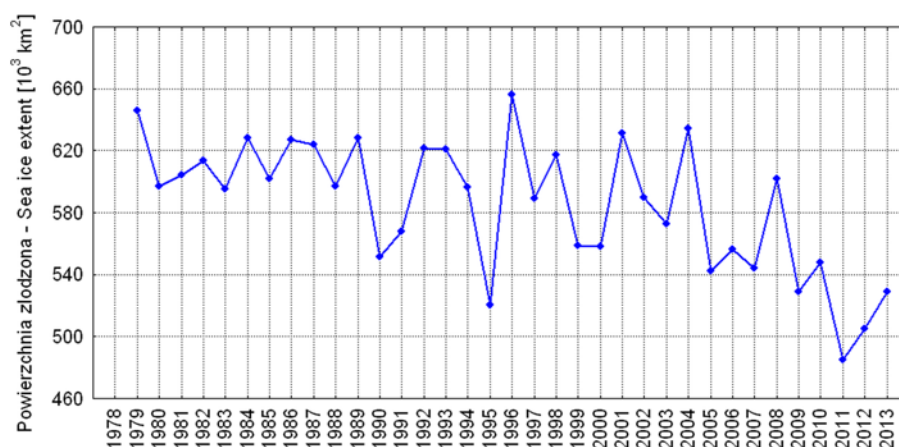
Fig. 7. Changes of monthly sea ice extent on the Kara Sea during the minimum cover times (August – VIII and September – IX), years 1979-2013.

Przebieg zmian zlodzenia na Morzu Karskim w sierpniu i wrześniu (ryc. 7) wykazuje występowanie gwałtownego skoku w powierzchni zlodzonej. O ile w latach 1978-2004 zaznaczała się bardzo duża zmienność międzyroczna, z przewagą powierzchni zlodzonej między 450 a 350 tys. km<sup>2</sup> w sierpniu (51-40% powierzchni morza) i ~250 tys. km<sup>2</sup> we wrześniu (28%), to od roku 2005 powierzchnia zlodzona gwałtownie się zmniejszyła. W ostatnich latach (2005-2013) powierzchnia zlodzona sierpniu nie przekroczyła 147 tys. km<sup>2</sup> (2007 rok; ~17% powierzchni morza), a we wrześniu powierzchnia zlodzona na całym Morzu Karskim wynosi przeciętnie od dwudziestukilku do kilkunastu tys. km<sup>2</sup>, co praktycznie oznacza wystąpienie reżimu bezlodowego. Wyjątkami w tym okresie są lata 2006 (~153 tys. km<sup>2</sup>) i 2013 (~65 tys. km<sup>2</sup>), które wskazują, że mimo nadzwyczajnego polepszenia się warunków lodowych w dwu miesiącach o najmniejszej powierzchni lodów na Morzu Karskim nie można wykluczyć w przyszłości wystąpienia w tych miesiącach znacznie zwiększonej powierzchni lodów, a tym samym ograniczenia możliwości lub poważnych utrudnień w żegludze statków bez klasy lodowej.

### 3.3. Morze Łaptiewów

W całym okresie obserwacji satelitarnych zmiany rocznej powierzchni zlodzonej na Morzu Łaptiewów (powierzchnia morza ~662 tys. km<sup>2</sup>) charakteryzują się występowaniem tendencji spadkowej. Trend zmian powierzchni zlodzonej w latach 1979-2013 wynosi  $-2,6(\pm 0,56)$  tys. km<sup>2</sup> i jest statystycznie istotny. Wartość średniego trendu dla całego tego okresu jest wynikiem silnego spadku powierzchni zlodzonej na Morzu Łaptiewów w ostatnich 10 latach

Przebieg zmian rocznej powierzchni zlodzonej jest wyraźnie dwudzielny (patrz ryc. 8). W latach 1979-2004 spadek rocznej powierzchni zlodzonej jest nieznaczny ( $-0,97$  tys. km<sup>2</sup>·rok<sup>-1</sup>) i statystycznie nieistotny, co pozwala na sformułowanie tezy, że w tym okresie roczna powierzchnia lodów nie wykazywała istotnych zmian. Rzeczywisty spadek powierzchni zlodzonej na Morzu Łaptiewów rozpoczął się po roku 2004. W latach 2004-2013 trend jest równy  $-9,98$  tys. km<sup>2</sup>·rok<sup>-1</sup> i statystycznie istotny. Oznacza to, że w ostatnich 10 latach doszło do około 10-krotnego przyspieszenia spadku rocznej powierzchni zlodzonej w stosunku do poprzedniego okresu.



Ryc. 8. Przebieg rocznych wartości powierzchni zlodzonej na Morzu Łaptiewów (1979-2013)

Fig. 8. Course of annual sea ice extent on the Laptev Sea (1979-2013).

Ponieważ dopiero w ostatnim okresie (2005-2013) roczna powierzchnia zlodzenia spada, podawanie średniej powierzchni zlodzonej dla tego okresu nie ma większego sensu. Najmniejsza roczna powierzchnia zlodzona w okresie silnego spadku powierzchni lodów wystąpiła w roku 2011 (ryc. 8) i wynosiła  $\sim 485$  tys.  $\text{km}^2 \cdot \text{rok}^{-1}$ , co stanowi  $\sim 74\%$  powierzchni Morza Łaptiewów. Oznacza to, że w roku najbardziej korzystnych dla nawigacji warunków lodowych, średnia roczna powierzchnia „czystej wody” na tym morzu stanowiła zaledwie 26% powierzchni akwenu.

Zmienność powierzchni zlodzonej na Morzu Łaptiewów w sezonie nawigacyjnym jest bardzo zróżnicowana (ryc. 9). W lipcach lat 1979-2004 powierzchnia zlodzona była stale wysoka, wahając się, od  $\sim 661$  tys.  $\text{km}^2$  (rok 2004;  $\sim 100\%$  powierzchni morza) do  $\sim 430$  tys.  $\text{km}^2$  (1995 rok;  $\sim 65\%$ ), przy średniej  $\sim 555$  tys.  $\text{km}^2$  ( $\sim 84\%$  powierzchni morza). Po roku 2004 powierzchnia zlodzona w lipcu zaczęła nierównomiernie spadać, osiągając minimum  $\sim 247$  tys.  $\text{km}^2$  w roku 2011 ( $\sim 37\%$  powierzchni morza). Jednak poza tym jednym przypadkiem powierzchnia zlodzona Morza Łaptiewów w lipcu utrzymuje się w granicach między 335 (rok 2012) a 634 (rok 2008) tys.  $\text{km}^2$ , co odpowiada pokryciu lodem od  $\sim 51$  do  $\sim 96\%$  powierzchni morza.

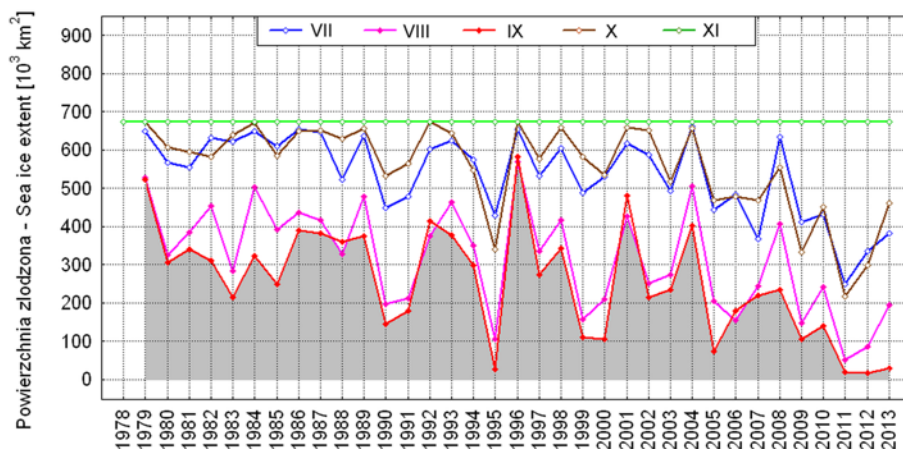
Tak kształtujące się zmiany powierzchni zlodzenia w lipcu pozwalają na stwierdzenie, że mimo bardzo szybkiego polepszania się warunków lodowych, miesiąc ten na Morzu Łaptiewów nie może być zaliczony do sezonu nawigacyjnego. Nie można wykluczyć, że jeśli tendencja do postępującego zmniejszania się powierzchni zlodzonej utrzyma się nadal, w niektórych z najbliższych lat żegluga w lipcu po wodach Morza Łaptiewów może być możliwa bez większych ograniczeń. Nie wydaje się jednak, aby przy obserwowanej skali i charakterze zmienności powierzchni zlodzonej na Morzu Łaptiewów w lipcu można było bezkrytycznie ekstrapolować obserwowany obecnie trend.

Zmniejszanie się powierzchni zlodzonej w sierpniu i wrześniu na Morzu Łaptiewów było w całym rozpatrywanym okresie szybsze niż w pozostałych miesiącach sezonu nawigacyjnego, jednak i w tych przebiegach zaznacza się dość wyraźnie przyspieszenie tempa spadku powierzchni lodów po roku 2004. W sierpniu, poza rokiem 2008, powierzchnia zlodzona na Morzu Łaptiewów w latach 2005-2013 wahała się w granicach od  $\sim 250$  do  $\sim 50$  tys.  $\text{km}^2$ , przy średniej  $\sim 190$  tys.  $\text{km}^2$ , co stanowiło  $\sim 29\%$  jego powierzchni. Po roku 2004 we wrześniu powierzchnia zlodzona nie przekroczyła na Morzu Łaptiewów  $\sim 235$  tys.  $\text{km}^2$  (rok 2008;  $\sim 35\%$  powierzchni morza), przy czym w ostatnich trzech latach (2011, 2012 i 2013) powierzchnia zlodzona wynosiła od kilkunastu do dwudziestukilku tys.  $\text{km}^2$ , co pozwala traktować występujące tam warunki jako bezlodowe ( $\leq \sim 3\text{-}4\%$  powierzchni morza).

Między wrześniem a październikiem powierzchnia zlodzona na Morzu Łaptiewów przyrasta niezmieennie szybko (ryc. 10). Niewielka głębokość akwenu i bardzo silne wysłodzenie wód powierzchniowych przez uchodzące do tego morza rzeki (Chatanga, Olenek, Lena i Jana) powodują, że ilość możliwego do akumulacji ciepła w wodach jest nikła. Silne spadki temperatury powietrza, jakie następują w październiku<sup>5</sup> stanowią przyczynę wręcz eksplozywnego tworzenia się pokrywy lodowej. Średni przyrost powierzchni lodów od września do października w całym okresie lat 1979-2013 jest równy  $300,5$  tys.  $\text{km}^2$  (przy wartości odchylenia standardowego  $84,3$  tys.  $\text{km}^2$ ), co odpowiada  $45,4\%$  powierzchni całego Morza Łaptiewów. W latach, których powierzchnia zlodzona na Morzu Łaptiewów we wrześniu była większa, skutkuje to niemal całkowitym lub całkowitym pokryciem lodem Morza

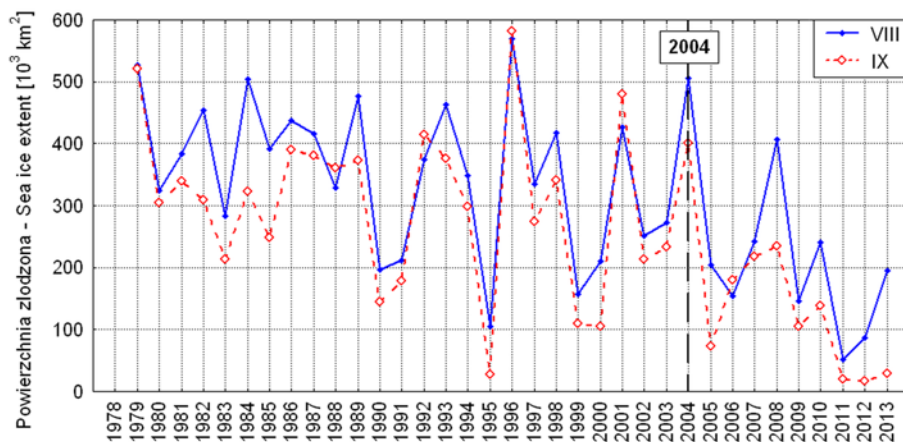
<sup>5</sup> Przeciętny spadek temperatury miesięcznej między wrześniem ( $\sim +1(\pm 2)^\circ\text{C}$  a październikiem ( $\sim -10(\pm 2)^\circ\text{C}$  na stacji Ostrov Kotelnij wynosi  $11$  deg, na stacji Chatanga ( $\sim +2,8(\pm 2)^\circ\text{C}$  i  $\sim -11(\pm 3)^\circ\text{C}$  odpowiednio) wynosi  $\sim 13$  deg.

Łaptiewów już w drugiej dekadzie października. Takie sytuacje wystąpiły w latach 1979, 1984, 1989, 1992, 1993, 1996, 1998, 2001, 2002 i 2004. Po roku 2004, kiedy powierzchnia zlodzona we wrześniu znacznie się zmniejszyła, ten gwałtowny rozwój lodów między wrześniem a październikiem nie prowadzi do całkowitego lub niemal całkowitego pokrycia wód Morza Łaptiewów lodem, ale rozmiary przyrostu powierzchni pokrywy lodowej w tym czasie tylko nieznacznie się zmniejszyły w stosunku do obserwowanych przed rokiem 2004. W drugiej dekadzie listopada powierzchnia Morza Łaptiewów jest już całkowicie pokryta lodem (ryc. 9) o minimalnej grubości 30-40 cm, uniemożliwiając żeglugę statkom o klasie lodowej równej, niższej od L2 bez asysty lodolamacza.



Ryc. 9. Zmiany średniej miesięcznej powierzchni zlodzonej na Morzu Łaptiewów w sezonie nawigacyjnym (lipiec-listopad) w latach 1978-2013

Fig. 9. Changes of monthly sea ice extent on the Laptev Sea during navigation season (July-November), years 1978-2013.



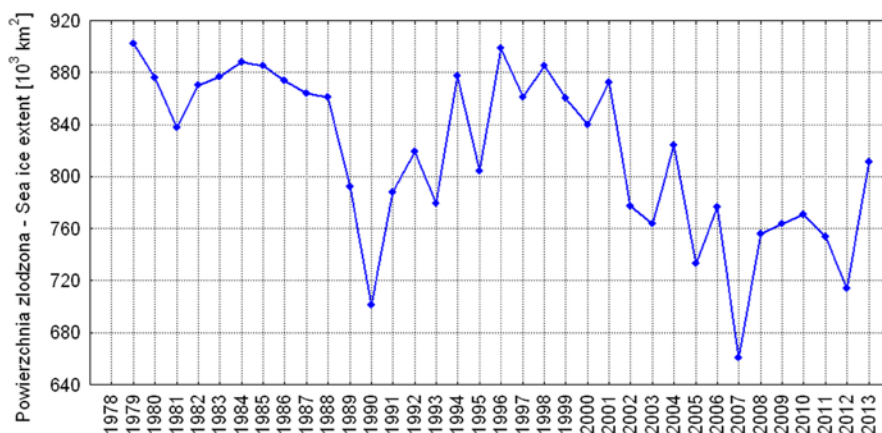
Ryc. 10. Zmiany powierzchni zlodzonej na Morzu Łaptiewów w miesiącach minimum rozwoju powierzchni zlodzonej (sierpień, wrzesień) w latach 1979-2013

Fig. 10. Changes of monthly sea ice extent on the Laptev Sea during the minimum cover times (August – VIII and September – IX), years 1979-2013.

Taki przebieg zmian powierzchni zlodzonej na Morzu Łaptiewów wykazuje, że w stosunku do ostatnich dwudziestu lat XX wieku i przełomu XX i XXI wieku, warunki lodowe po roku 2004 zdecydowanie się polepszyły. Po roku 2004 stosunkowo pewne, obciążone niewielkim ryzykiem, warunki dla żeglugi ograniczone są do sierpnia i września. W lipcu, zwłaszcza w drugiej i trzeciej dekadzie tego miesiąca w niektórych latach istnieje możliwość żeglugi ze zmniejszonym ryzykiem na Morzu Łaptiewów, jednak taka sytuacja nie jest regułą. W październiku warunki żeglugi szybko się pogarszają, żegluga na Morzu Łaptiewów w drugiej połowie października bez asysty lodolamacza staje się bardzo ryzykowana. W przypadku pogorszenia się warunków hydrometeorologicznych, głównie szybkiego spadku temperatury powietrza, grozi to statkowi utknięciem w lodach i do momentu uwolnienia go z lodów przez lodolamacz, do poruszania się w sposób niekontrolowany wraz z dryfującymi lodami.

### 3.4. Morze Wschodniosyberyjskie

Na Morzu Wschodniosyberyjskim (powierzchnia 913 tys. km<sup>2</sup>) w całym analizowanym okresie 1979-2013 obserwuje się niesystematyczny spadek powierzchni zlodzonej. W tym czasie trend średniej rocznej powierzchni zlodzonej jest równy  $-3,83(\pm 0,83)$  tys. km<sup>2</sup>. Trend ten jest wysoce istotny statystycznie. W rzeczy samej w rozpatrywanych latach odnotowuje się dwa okresy głębokich spadków rocznej powierzchni zlodzonej – pierwszy w latach 1989-1993, i drugi – od roku 2002. Ten ostatni spadek rocznej powierzchni zlodzonej jest głębszy i bardziej długotrwały od pierwszego (ryc. 11).



Ryc. 11. Przebieg rocznych wartości powierzchni zlodzonej na Morzu Wschodniosyberyjskim (1979-2013)

Fig. 11. Course of annual sea ice extent on the East Siberian Sea (1979-2013).

W okresie od lipca do listopada zmiany powierzchni zlodzonej zachodzą w odmiennym rytmie niż na Morzu Łaptiewów (ryc. 12). Zwraca uwagę fakt, że zmiany powierzchni zlodzonej w lipcu i październiku w latach 1979-2001 zachodzą nie tylko niemal dokładnie synchronicznie, ale również powierzchnie zlodzone w tych miesiącach są niemal takie same. Taki układ związku powierzchni zlodzonej w lipcu i październiku ulega rozchwianiu od roku 2002. Średnia powierzchnia zlodzona w lipcu na Morzu Wschodniosyberyjskim jest równa ~815 tys. km<sup>2</sup>, co stanowi około 89% powierzchni morza. Maksymalną powierzchnię zlodzoną w lipcu (913 tys. km<sup>2</sup>, czyli niemal 100% pokrycia lodem) odnotowano na tym morzu w roku 1996, nieco tylko mniejszą (~912 tys. km<sup>2</sup>) w roku 1994. Minimalna

powierzchnia zlodzona w lipcu wystąpiła w pierwszym okresie ocieplenia (~502 tys. km<sup>2</sup>, rok 1990), nieco tylko większa (~521 tys. km<sup>2</sup>, rok 2007) w drugim okresie ocieplenia. W czasie tych minimów powierzchnia pokryta lodami o różnej, na ogół dużej zwartości, stanowi 55-57% powierzchni morza. Są to jednak tylko dwa przypadki na 35 lat. Poza nimi, zarówno w pierwszym, jak i drugim okresie ocieplenia, spadki powierzchni zlodzonej w lipcu były relatywnie niewielkie – powierzchnia zlodzona lokuje się w przedziale między ~690 a ~750 tys. km<sup>2</sup>, co oznacza, że powierzchnia „czystej wody” stanowiła wtedy tylko od ~12 do ~25% powierzchni akwenu.

Obserwowana do tej pory zmienność powierzchni zlodzonej w lipcu na Morzu Wschodniosyberyjskim pozwala na stwierdzenie, że żegluga w tym miesiącu jest możliwa w ograniczonym zakresie przeciętnie raz na kilka-, kilkanaście lat. W pozostałych latach żegluga w lipcu na Morzu Wschodniosyberyjskim dla statków bez wysokiej klasy lodowej i asysty lodolamacza nie jest możliwa.

Zmienność powierzchni zlodzonej na Morzu Wschodniosyberyjskim w październiku wymaga nieco szerszego omówienia. Do roku 2001 zmiany te zachodziły niemal tak samo jak w lipcu (ryc. 12). Po roku 2001, czyli w drugim okresie spadku powierzchni zlodzonej na Morzu Wschodniosyberyjskim, związki między powierzchnią zlodzoną w październiku i lipcu zmieniły się – zaznaczył się wyraźnie silniejszy i szybszy spadek powierzchni zlodzonej w październiku niż w lipcu. Oznacza to, że przyrost powierzchni lodów w październiku stał się wyraźnie wolniejszy w stosunku do prędkości topnienia lodów w lipcu.

Silne opóźnienie się tworzenia lodów w październiku po roku 2001 w stosunku do poprzedzającego okresu wskazuje, że po roku 2001 zwiększyły się zasoby ciepła w wodach Morza Wschodniosyberyjskiego. Zwiększenie zasobów ciepła w wodach spowodowało, że potrzeba więcej czasu na przekazanie takiej ilości ciepła z wód do atmosfery, aby kolumna wody osiągnęła temperaturę krzepnięcia, a w konsekwencji mogła zacząć rozwijać się pokrywa lodowa.

Analiza korelacji między powierzchnią zlodzoną na Morzu Wschodniosyberyjskim w październiku, a sezonową temperaturą powietrza na stacji Čokurdakh (70,6°N, 147,9°E, rejon ujścia Indygiryki)<sup>6</sup> wskazuje, że najsilniejsze, wysoce istotne korelacje powierzchni lodów występują z temperaturą powietrza poprzedzającej wiosny (MAM;  $r = -0,63$ ,  $p < 0,001$ ,  $n = 34$ ) i jesieni (SON;  $r = -0,72$ ,  $p < 0,001$ ,  $n = 33$ ). Wpływ temperatury powietrza, jaka występuje wiosną na to, jaka będzie powierzchnia lodów w październiku jest dwójaki – po pierwsze niska temperatura miesięcy wiosennych, zwłaszcza marca i kwietnia, powoduje przyrost grubości lodu, który do stopnienia w okresie lata wymagać będzie większej ilości ciepła, po wtóre niższa temperatura powietrza wiosną, zwłaszcza w maju opóźnia początek letniego topnienia lodów. W rezultacie, im niższa temperatura wiosną, tym więcej grubych lodów pozostaje na powierzchni morza z początkiem okresu topnienia letniego (czerwiec-sierpień). Przy przeciętnych wartościach dopływu energii słonecznej do powierzchni morza latem, we wrześniu pozostaje większa powierzchnia pokryta przez lody, a tym samym z chwilą rozpoczęcia formowania się pokrywy lodowej w nowym sezonie lodowym powierzchnia lodów rozwija się z wyższego poziomu startowego. Tu przyczyny występowania opisanych związków są proste. Analiza przebiegu temperatury powietrza w okresach wiosny na stacji Čokurdakh wykazuje, że jej zasadniczy przyrost nastąpił dopiero po roku 2006, a więc z opóźnieniem w stosunku do początku spadku powierzchni

---

<sup>6</sup> Źródło danych – zbiór NASA GISS Surface Temperature Analysis ([http://data.giss.nasa.gov/gistemp/station\\_data/](http://data.giss.nasa.gov/gistemp/station_data/)). W danych występują w niektórych miesiącach luki obserwacyjne uniemożliwiające obliczenie średnich sezonowych, stąd liczba korelowanych par ( $n$ ) nie jest jednakowa.

lodów w październiku. Wyjaśnia to, że to nie wzrost temperatury powietrza wiosną był przyczyną spadku powierzchni lodów w październiku.

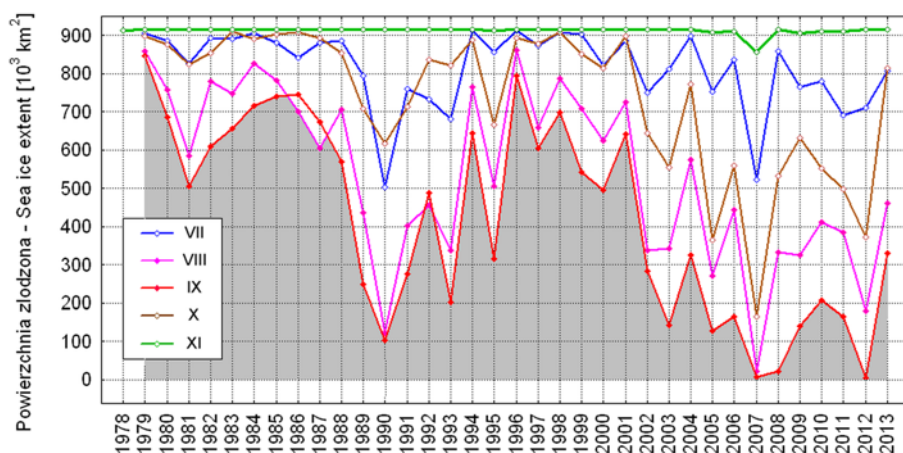
W warunkach zmniejszonej powierzchni zlodzonej w okresie lata i początku jesieni (ryc. 13), strumienie ciepła z oceanu do atmosfery stają się większe, w rezultacie czego następuje wzrost temperatury powietrza w tym samym okresie. Jeśli zasoby ciepła w wodach są większe niż przeciętnie, ten wzrost temperatury powietrza rozciąga się również na październik i następuje jednocześnie opóźnienie w tworzeniu się pokrywy lodowej w tym miesiącu. Stąd też pojawiają się silne korelacje ujemne między powierzchnią zlodzoną w październiku i temperaturą powietrza jesieni. Czy we wzroście temperatury jesieni nad Morzem Wschodniosyberyjskim i spadkiem powierzchni zlodzonej w październiku zaznacza się wpływ „wzmocnienia arktycznego” (Polyakov i in. 2002, Holland i Bitz 2003, Serreze i Francis 2006), spowodowanego dodatkową akumulacją ciepła słonecznego w wodach wolnych od lodu, jest kwestią otwartą.

W ostatnim roku rozpatrywanego okresu (2013) nastąpił wyraźny wzrost powierzchni zlodzonej na Morzu Wschodniosyberyjskim w październiku. Powierzchnia ta zrównała się, tak jak to było w okresie lat 1979-2001, z powierzchnią zlodzoną w lipcu. Sugeruje to, że zasoby ciepła w wodach Morza Wschodniosyberyjskiego mogły zostać wyczerpane. Co jest istotne – temu wzrostowi powierzchni zlodzonej w październiku 2013 roku nie towarzyszy proporcjonalny do rozmiaru powierzchni zlodzonej spadek temperatury powietrza.

Taki obraz zachodzących zmian powierzchni zlodzonej na Morzu Wschodniosyberyjskim w październiku może wskazywać, że zmniejszenie się powierzchni zlodzonej, jaką obserwowało się w latach 2002-2012, kiedy to lody pokrywały zaledwie ~55% powierzchni morza (od ~20 do 65%), było zjawiskiem przejściowym. Nie można wykluczyć, że system wraca do stanu poprzedniego i w najbliższych latach przeciętna powierzchnia zlodzona w połowie października na Morzu Wschodniosyberyjskim będzie wahała się od ~700 do ~850 tys. km<sup>2</sup>, czyli zajmowała od ~77 do ~93% powierzchni morza. W takim stanie rzeczy nie można zakładać, że w październiku na Morzu Wschodniosyberyjskim będzie możliwa żegluga statków o niskiej klasie lodowej bez asysty lodolamacza.

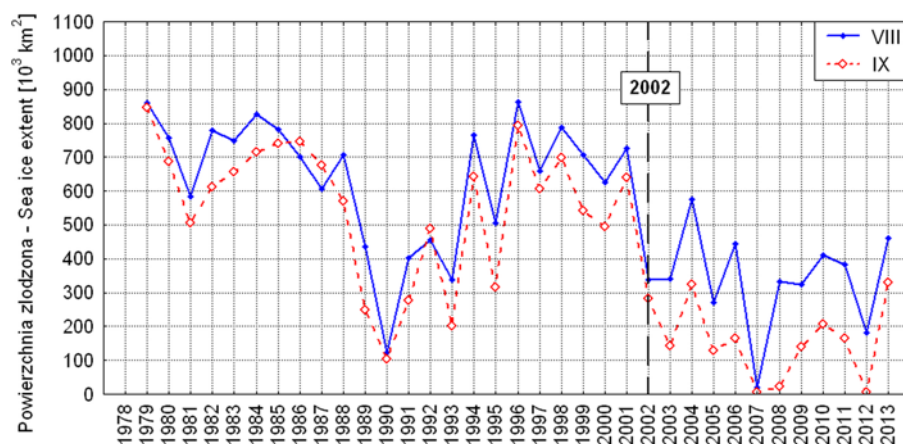
Zmienność powierzchni zlodzonej w sierpniu i wrześniu (ryc. 13) na Morzu Wschodniosyberyjskim w całym badanym okresie jest wyjątkowo duża. W sierpniu, przy średniej z okresu 1979-2013 równej ~538 tys. km<sup>2</sup> (~59% powierzchni morza) powierzchnia zlodzona wahała się od 20,4 (~2%, rok 2007) do ~862 tys. km<sup>2</sup> (~94% powierzchni morza, rok 1996). We wrześniu, przy średniej powierzchni zlodzonej równej ~420 tys. km<sup>2</sup> (~46% powierzchni morza) zmienność powierzchni zlodzonej zawierała się w granicach między 4,4 tys. km<sup>2</sup> (praktycznie warunki bezlodowe, rok 2012) i ~846 tys. km<sup>2</sup> (~93% powierzchni morza, rok 1979).

W przebiegu zmienności powierzchni zlodzonej na Morzu Wschodniosyberyjskim zaznaczają się dwa okresy silnie obniżonego rozwoju powierzchni pokrywy lodowej – w latach 1989-1993 i po roku 2001 (patrz ryc. 13). W drugim, współczesnym okresie (2002-2013; ryc. 13), średnia powierzchnia zlodzona w sierpniu stanowiła ~340 tys. km<sup>2</sup> (37%), a we wrześniu ~130 tys. km<sup>2</sup> (~14% powierzchni morza). Jednak w ostatnim roku okresu poddanego analizie (2013) powierzchnia lodów w sierpniu i wrześniu wzrosła, przekraczając wartości średnie, charakterystyczne dla drugiego okresu spadku powierzchni lodów. Może to, razem ze wzrostem powierzchni zlodzonej w październiku 2013 roku wskazywać na postępujące pogarszanie się warunków lodowych w tych najbardziej korzystnych dla żeglugi miesiącach.



Ryc. 12. Zmiany średniej miesięcznej powierzchni zlodzonej na Morzu Wschodniosyberyjskim w sezonie nawigacyjnym (lipiec-listopad) w latach 1978-2013

Fig. 12. Changes of monthly sea ice extent on the East Siberian Sea during navigation season (July-November), years 1978-2013.



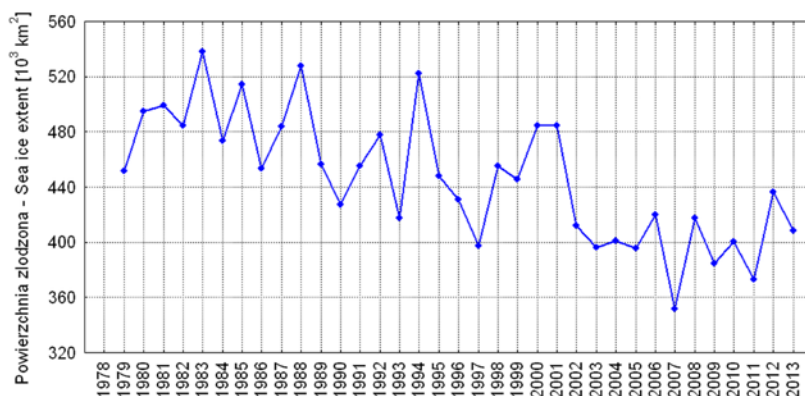
Ryc. 13. Zmiany powierzchni zlodzonej na Morzu Wschodniosyberyjskim w miesiącach minimum rozwoju powierzchni zlodzonej (sierpień, wrzesień) w latach 1979-2013

Fig. 13. Changes of monthly sea ice extent on the East Siberian Sea during the minimum cover times (August – VIII and September – IX), years 1979-2013.

Obserwowane zmiany powierzchni zlodzonej na Morzu Wschodniosyberyjskim pozwalają na stwierdzenie, że w panujących obecnie warunkach spadku powierzchni zlodzonej żegluga statków bez wysokiej klasy lodowej na tych wodach jest możliwa bez większych przeszkód jedynie w sierpniu i wrześniu. Czy w najbliższych latach relatywnie dobre warunki lodowe w sierpniu i we wrześniu utrzymają się nadal jest kwestią otwartą. Żegluga w lipcu i październiku na tych wodach obciążona jest bardzo dużym stopniem ryzyka, gdyż sytuacja lodowa wykazuje bardzo dużą zmienność z roku na rok. Listopad, a zwłaszcza jego druga połowa, jest miesiącem, w którym na Morzu Wschodniosyberyjskim praktycznie brak możliwości ruchu statków bez asysty lodołamacza.

### 3.5. Morze Czukockie

Na Morzu Czukockim (powierzchnia 582 tys. km<sup>2</sup>) panują o wiele łagodniejsze warunki lodowe niż na morzach Łaptiewów i Wschodniosyberyjskim. Średnia roczna powierzchnia zlodzenia to 446,3 tys. km<sup>2</sup>, co stanowi 76,5% całkowitej powierzchni tego morza. W badanym 35. leciu (1979-2013) zaznacza się w przebiegu średniej rocznej powierzchni zlodzenia niezbyt silny, ale wysoce istotny statystycznie trend ujemny ( $-3,30(\pm 0,54)$  tys. km<sup>2</sup>·rok<sup>-1</sup>). Prędkość spadku powierzchni zlodzonej w tym okresie jest nierównomierna. Od początku badanego okresu (1979) do roku 2002 powierzchnia zlodzenia, wykazując duże zmiany z roku na rok, systematycznie malała. Od roku 2002 zmienność międzyroczna średniej rocznej powierzchni zlodzonej na tym morzu zdecydowanie zmalała, a sama powierzchnia przestała się zmniejszać. W tym ostatnim okresie (2002-2013) trend zmian rocznej powierzchni zlodzonej stał się bliski zeru ( $+0,4$  tys. km<sup>2</sup>·rok<sup>-1</sup>) i statystycznie nieistotny (patrz ryc. 14). Moment, w którym nastąpiła wyraźna zmiana reżimu lodowego na Morzu Czukockim jest taki sam, jak i na Morzu Wschodniosyberyjskim (patrz ryc. 11 i 13).

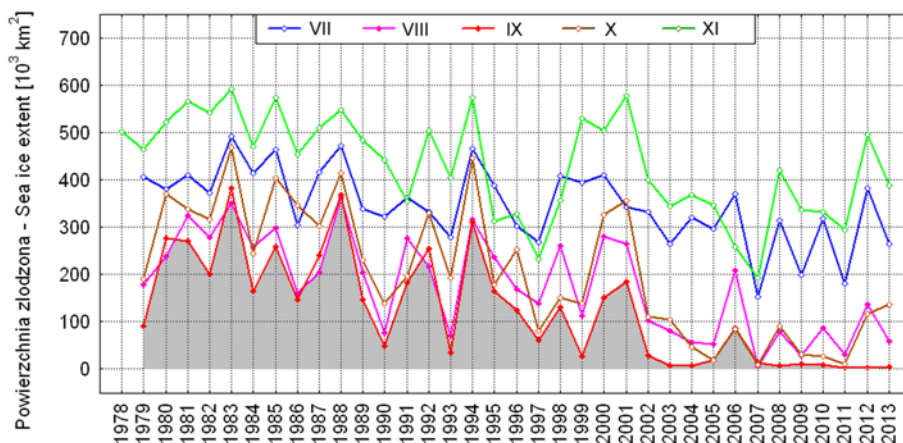


Ryc. 14. Przebieg rocznych wartości powierzchni zlodzonej na Morzu Czukockim (1979-2013)

Fig. 14. Course of annual sea ice extent on the Chukchi Sea (1979-2013).

W sezonie nawigacyjnym sytuacja lodowa na Morzu Czukockim wykazuje duże zróżnicowanie (patrz ryc. 15). Ogólnie we wszystkich miesiącach sezonu nawigacyjnego – od lipca do listopada zaznacza się w rozpatrywanym okresie ujemny, wysoce istotny trend zmian powierzchni zlodzonej – od  $-4,72(\pm 1,09)$  tys. km<sup>2</sup>·rok<sup>-1</sup> w lipcu (najmniejszy w sezonie) do  $-9,84(\pm 1,59)$  tys. km<sup>2</sup>·rok<sup>-1</sup> we wrześniu (największy w sezonie). W lipcu, od początku okresu obserwacji (1979) do roku 2002, powierzchnia zlodzona systematycznie malała (trend  $-3,11$  tys. km<sup>2</sup>·rok<sup>-1</sup>) wykazując jednak dużą zmienność międzyroczną mieszczącą się w przedziale od 492 tys. km<sup>2</sup> (~85% powierzchni morza; 1083 rok) do 264 tys. km<sup>2</sup> (~45%; rok 1997). Po roku 2002 ujemny trend powierzchni zlodzonej utrzymuje się nadal (statystycznie nieistotny), ale znacznie zmniejszył się zakres zmienności powierzchni zlodzonej – w żadnym z lat 2002-2013 maksymalna powierzchnia zlodzenia Morza Czukockiego w lipcu nie była już większa od 382 tys. km<sup>2</sup> (~65% powierzchni morza), przy średniej 287 tys. km<sup>2</sup> ( $\sigma_n = 73,5$  tys. km<sup>2</sup>), stanowiącej ~49,3% powierzchni morza. Oznacza to, że warunki żeglugi na Morzu Czukockim poprawiły się po roku 2002 na tyle, że średnia powierzchnia czystej wody w lipcu stanowi około 50% powierzchni tego morza.

W październiku warunki lodowe na Morzu Czukockim są o wiele lepsze niż w lipcu. Średnia dla całego analizowanego okresu powierzchnia zlodzona w tym miesiącu jest równa ~205 tys. km<sup>2</sup> (~35% powierzchni morza), przy bardzo dużym odchyleniu standardowym ( $\sigma = 137,7$  tys. km<sup>2</sup>). W dużej mierze stanowi to efekt występowania silniejszego niż lipcu ujemnego trendu powierzchni zlodzonej ( $-5,99(\pm 1,42)$  tys. km<sup>2</sup>·rok<sup>-1</sup>). Przebieg zmian powierzchni zlodzonej (patrz ryc. 15) jest, podobnie jak w lipcu, dwudzielny. W latach 1979-2002 średnia powierzchnia zlodzona była równa 271 tys. km<sup>2</sup>, (~47% powierzchni morza) i charakteryzowała się bardzo dużą zmiennością międzyroczną ( $\sigma = 111,9$  tys. km<sup>2</sup>), od roku 2002 powierzchnia zlodzona skokowo się zmniejszyła (średnia 63 tys. km<sup>2</sup>, ~11% powierzchni morza) i jednocześnie wyraźnie zmniejszyła się zmienność międzyroczna. W obu tych okresach trendy wykazują duże zróżnicowanie – w pierwszym trend jest równy –  $6,63$  tys. km<sup>2</sup>·rok<sup>-1</sup>, i jest wysoce istotny statystycznie, w drugim – powierzchnia zlodzona przestała się zmniejszać, trend jest bliski zeru ( $+0,3$  tys. km<sup>2</sup>·rok<sup>-1</sup>) i statystycznie nieistotny. Pozwala to sądzić, że powierzchnia zlodzona na Morzu Czukockim w październiku przestanie się zmniejszać.



Ryc. 15. Zmiany średniej miesięcznej powierzchni zlodzonej na Morzu Czukockim w sezonie nawigacyjnym (lipiec-listopad) w latach 1978-2013

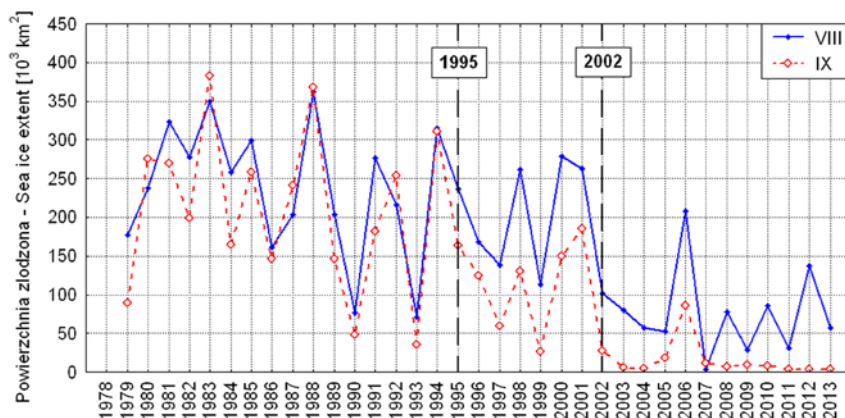
Fig. 15. Changes of monthly sea ice extent on the Chukchi Sea during navigation season (July-November), years 1978-2013.

Średnia powierzchnia zlodzona w listopadzie wynosi ~431 tys. km<sup>2</sup>, co stanowi ~74% powierzchni Morza Czukockiego. Przebieg zmienności zlodzenia w listopadzie pod pewnymi cechami przypomina przebieg zlodzenia w październiku – również i tu na tle silnej zmienności międzyrocznej zaznaczył się po roku 2002 wyraźny spadek powierzchni zlodzonej – do wartości oscylującej około 340 tys. km<sup>2</sup>, czyli 58-60% powierzchni morza. Oznacza to, że obecnie w drugiej dekadzie listopada na Morzu Czukockim pozostaje jeszcze około 40% czystej wody. Można zatem sądzić, że na Morzu Czukockim żegluga jest możliwa bez większych przeszkód jeszcze w pierwszej dekadzie tego miesiąca.

W tym obrazie pojawiają się jednak niepokojące symptomy – w roku 2012 i 2013 powierzchnia pokryta lodem na Morzu Czukockim w listopadzie istotnie wzrosła (ryc. 15), co może sugerować, że dochodzi do stopniowego rozchodowania zasobów ciepła w wodach. To ostatnie prowadziłoby do wcześniejszego zamarzania tego akwenu. Nie jest to tak niepokojąca sytuacja, jak zmiana powierzchni

złodzenia na Morzu Wschodniosyberyjskim w październiku, ale procesy rozwoju powierzchni złodzonej w końcu sezonu nawigacyjnego na obu morzach wykazują pewne cechy wspólne.

Złodzenie Morza Czukockiego w sierpniu i wrześniu (ryc. 15 i 16) charakteryzuje się, podobnie jak i pozostałych miesięcy „cieplej” pory roku, gwałtownym spadkiem, który nastąpił w 2002 roku. Od roku 2002 średnia powierzchnia złodzenia w sierpniu zmniejszyła się do 76,8 tys. km<sup>2</sup>, co stanowi ~13% powierzchni morza, wobec 229,1 tys. km<sup>2</sup> (~39% powierzchni morza) w okresie poprzedzającym, czyli w latach 1979-2001. Mimo przejściowych wzrostów powierzchni złodzonej w latach 2006 (208,1 tys. km<sup>2</sup>) i 2012 (136,8 tys. km<sup>2</sup>), żegluga na tym akwenie nie powinna w sierpniu napotykać na większe utrudnienia. We wrześniu, od roku 2002 (za wyjątkiem roku 2006; powierzchnia złodzona 86,1 tys. km<sup>2</sup>) powierzchnia złodzona spadała do kilku tysięcy km<sup>2</sup>, co praktycznie oznacza występowanie warunków bezlodowych. Tak więc w obu tych miesiącach (sierpniu i wrześniu) żegluga na Morzu Czukockim nie napotyka praktycznie na żadne istotne utrudnienia ze strony panujących tam w ostatnim dwunastoleciu warunków lodowych.



Ryc. 16. Zmiany powierzchni złodzonej na Morzu Czukockim w miesiącach minimum rozwoju powierzchni złodzonej (sierpień, wrzesień) w latach 1979-2013

Fig. 16. Changes of monthly sea ice extent on the Chukchi Sea during the minimum cover times (August – VIII and September – IX), years 1979-2013.

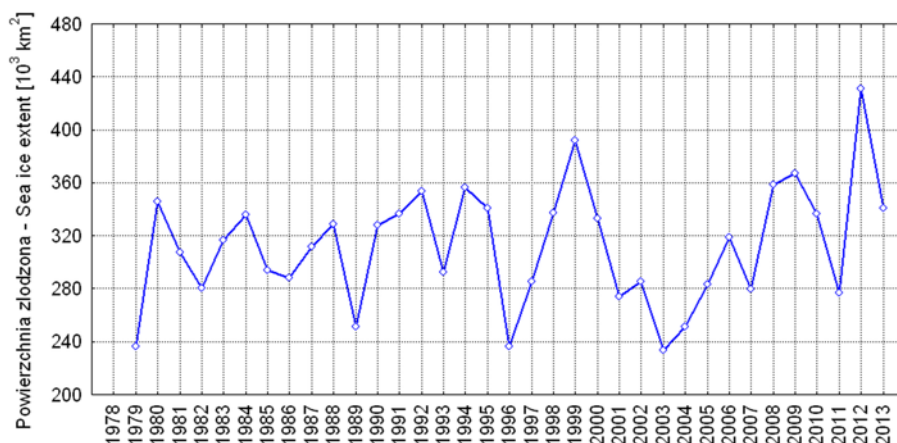
### 3.6. Morze Beringa

Morze Beringa, choć nie stanowi części Północnej Drogi Morskiej, stanowi pierwszy lub ostatni z odcinków „podejściowych” lub „wyjściowych” tej trasy, na której występują lody morskie. Morze to otwarte jest szeroko na południe, co umożliwia nieograniczony rozwój lodów morskich w tym kierunku. Różni to zasadniczo Morze Beringa od pozostałych mórz Arktyki, przez które przebiegają trasy statków tworzące Północną Drogę Morską, na których rozwój lodów morskich ograniczony jest od południa przez linię brzegową kontynentu Eurazji. Z tego względu Morze Beringa, w jego geograficznych granicach, nigdy nie zamarza całkowicie, a powierzchnia złodzenia tego morza, ani też odsetek powierzchni pokrycia lodem nie stanowi miarodajnej miary mogącej charakteryzować warunki żeglugi na tym akwenie.

W badanym okresie (1979-2013) roczna powierzchnia złodzona na Morzu Beringa powiększa się (trend +0,88 tys. km<sup>2</sup>·rok<sup>-1</sup>), choć przyrost ten jest statystycznie nieistotny. Stosunkowo stabilnie

zachowywała się roczna powierzchnia złodzona w latach 1979-1999, natomiast od roku 2000 do 2003 zaznaczał się silny spadek powierzchni złodzonej, by po roku 2003 ponownie gwałtownie wzrastać (patrz ryc. 17).

Zachowanie się miesięcznej powierzchni złodzonej na Morzu Beringa silnie odbiega od zmian powierzchni złodzonej na morzach Arktyki. Powierzchnia złodzona powiększa się roku na rok w okresie od stycznia do maja i maleje w okresie od czerwca do grudnia. Największe i statystycznie istotne trendy dodatnie występują w styczniu i kwietniu ( $4,02$  i  $4,32$  tys.  $\text{km}^2 \cdot \text{rok}^{-1}$  odpowiednio), najsilniejsze trendy ujemne występują w listopadzie i grudniu ( $-1,48$  i  $-1,19$  tys.  $\text{km}^2 \cdot \text{rok}^{-1}$  odpowiednio), przy czym trendy ujemne w żadnym miesiącu nie są statystycznie istotne. Rezultatem tego zróżnicowanego rozkładu trendów jest wypadkowy, słaby dodatni trend roczny.



Ryc. 17. Przebieg rocznych wartości powierzchni złodzonej na Morzu Beringa (1979-2013)

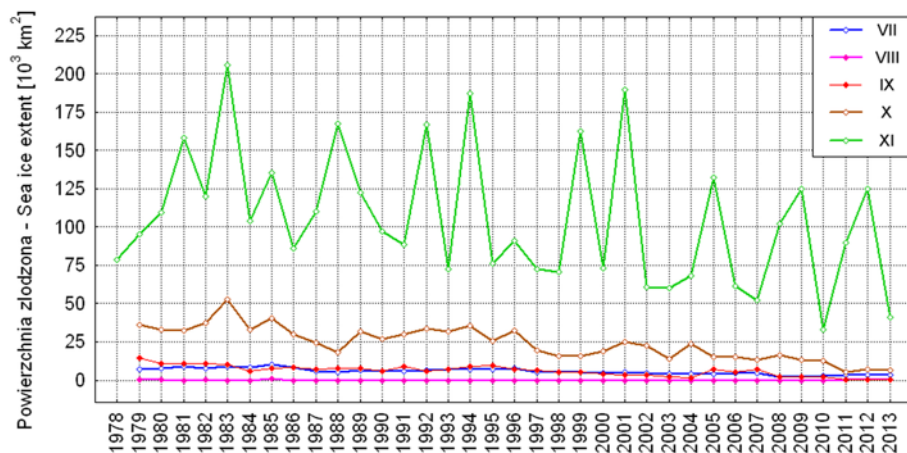
Fig. 17. Course of annual sea ice extent on the Bering Sea (1979-2013).

W okresie od lipca do listopada warunki lodowe Na Morzu Beringa bardzo silnie się zmieniają (ryc. 18). W lipcu powierzchnia złodzona w rozpatrywanym okresie systematycznie spada, przy czym lód utrzymuje się na akwenach północo-wschodniej części tego morza – przy wschodnich wybrzeżach Alaski (Northern Sound), co jest bez znaczenia dla żeglugi umożliwiającej przejście przez Cieśninę Beringa z Pacyfiku na Morze Czukockie lub odwrotnie. Możliwe jest jednak przejściowe występowanie lodów wynoszonych z Morza Czukockiego w Cieśninie Beringa i na południe od tej cieśniny.

W sierpniu na całej powierzchni Morza Beringa, włączając nawet drobne, płytkie zatoki leżące przy NE wybrzeżach Alaski, panują warunki bezlodowe. Te same zatoki zaczynają pokrywać się lodem już we wrześniu, stąd powierzchnia złodzenia zaczyna przyrastać. Powierzchnia złodzona wynosi we wrześniu od kilkunastu tys.  $\text{km}^2$  na przełomie lat 70' i 80' XX wieku do zera w ostatnich trzech latach (ryc. 19). W październiku powierzchnia lodów zaczyna wyraźniej przyrastać, ale w ostatnich latach jest ona mniejsza od 20 tys.  $\text{km}^2$ , a przyrost powierzchni lodów koncentruje się poza trasą prowadzącą w kierunku Cieśniny Beringa. Sytuacja lodowa zmienia się gwałtownie dopiero między październikiem a listopadem, kiedy średnia powierzchnia złodzona wzrasta z  $\sim 24$  tys.  $\text{km}^2$  do  $\sim 105$  tys.  $\text{km}^2$ .

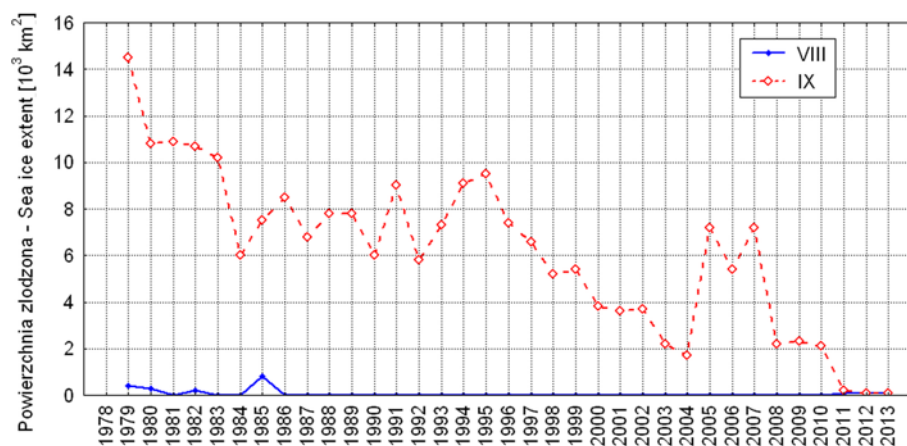
Powierzchnię złodzoną na Morzu Beringa w listopadzie cechuje bardzo duża zmienność międzyroczna, zmienia się ona w granicach od zaledwie  $\sim 40$  do 205 tys.  $\text{km}^2$ . Zdecydowanie niekorzystną

cechą rozwoju pokrywy lodowej w listopadzie jest to, że mimo niewielkiej powierzchni zlodzonej na całym morzu, lody mogą blokować przejście przez Cieśninę Beringa. W niektórych latach w listopadzie, nawet w jego pierwszej dekadzie, może przez Cieśninę Beringa na Morze Beringa dryfować lód morski wynoszony z Morza Czukockiego lub Morza Beauforta. Może to wprowadzać kilkudniowe opóźnienia w przejściu przez Cieśninę Beringa, a w innych latach – całkowicie uniemożliwić przejście przez tę cieśninę.



Ryc. 18. Zmiany średniej miesięcznej powierzchni zlodzonej na Morzu Beringa w sezonie nawigacyjnym (lipiec-listopad) w latach 1978-2013

Fig. 18. Changes of monthly sea ice extent on the Bering Sea during navigation season (July-November), years 1978-2013



Ryc. 19. Zmiany powierzchni zlodzonej na Morzu Beringa w miesiącach minimum rozwoju powierzchni zlodzonej (sierpień, wrzesień) w latach 1979-2013

Fig. 19. Changes of monthly sea ice extent on the Bering Sea during the minimum cover times (August – VIII and September – IX), years 1979-2013.

Taki przebieg zmian powierzchni zlodzonej na Morzu Beringa wskazuje, że podejście statku przez Morze Beringa do Cieśniny Beringa w ciągu ostatnich 10-12 lat nie napotyka na trudności przez cały lipiec, sierpień, wrzesień i październik. W niektórych latach należy liczyć się z zablokowaniem przez lody Cieśniny Beringa w listopadzie i niewielkimi utrudnieniami w lipcu.

#### 4. Długość sezonu żeglugowego

Podsumowując dotychczasowe rozważania można stwierdzić, że powierzchnia zlodzona na morzach, przez które przebiega Północna Droga Morska wydatnie zmniejszyła się w ostatnich kilku-, kilkunastu latach, zdecydowanie polepszając warunki żeglugi, wydłużając sezon żeglugowy i zmniejszając ryzyko ugrzęźnięcia statku w lodach w stosunku do warunków, jakie panowały na tym szlaku wcześniej – w latach 80. i 90. XX wieku.

Długość sezonu żeglugowego na poszczególnych morzach jest jednak zmienna, a charakter zmian powierzchni zlodzonej jest niejednakowy. W tabeli 1 zebrano w sposób syntetyczny wyniki analizy zmian powierzchni zlodzonej na całej trasie PDM, odniesionych do ostatniego okresu, w którym nastąpiła poprawa warunków lodowych. Wobec niejednakowej powierzchni poszczególnych mórz, wartości w tabeli podane są w % powierzchni danego morza pokrytego przez lody o zawartości 15 i więcej % (1-2 do 10 w skali zawartości lodów morskich). W górnym wierszu podane są średnie miesięczne odsetki powierzchni akwenu pokrytej lodem o koncentracji od 1-2 do 10 dla okresu zaznaczonego przy nazwie morza, w dolnym – najniższe i najwyższe odsetki w danym miesiącu odnotowane na danym akwenu w podanym okresie obserwacji. Ostatnim rokiem obserwacji jest rok 2013.

Mając na względzie zmiany powierzchni zlodzonej w ostatnich latach, które charakteryzują się najlepszymi warunkami lodowymi, oszacowano orientacyjnie ryzyko dla żeglugi na poszczególnych akwenach. Przy założeniu, że w najbliższych kilku latach warunki lodowe będą podobne do panujących po roku 2002 lub 2004 wyróżniono cztery kategorie ryzyka, które oznaczono:

R-1 – brak lub nieznaczne ryzyko w realizacji przejścia przez dany akwen, możliwość przejścia każdego roku,

R-2 – ryzyko wydłużenia drogi i/lub wydłużenia czasu przejścia przez dany akwen, konieczność zmian planowanych tras, możliwość przejścia każdego roku,

R-3 – znaczne ryzyko wydłużenia drogi i/lub wydłużenia czasu przejścia statku przez dany akwen, w wyjątkowych przypadkach (niektórych latach) sytuacja lodowa uniemożliwia samodzielne przejście danego akwenu,

R-4 – małe prawdopodobieństwo samodzielnego przejścia statku (brak możliwości przejścia przez dany akwen, konieczność zawrócenia), przejście możliwe tylko w niektórych latach, charakteryzujących się anomalnie korzystnymi warunkami lodowymi.

Analiza tabeli 1 wyjaśnia, że w obecnie panujących na Północnej Drodze Morskiej warunkach lodowych „wąskim gardłem” są odcinki tras PDM przebiegające przez morza Łaptiewów i Wschodniosyberyjskie. Prawdopodobieństwo przejścia każdego roku przez te morza, choć z ryzykiem wydłużenia trasy i przedłużeniem czasu podróży jest ograniczone do jednego miesiąca – września. Przyczyną takiego stanu rzeczy jest występowanie masywów lodowych na Morzu Wschodniosyberyjskim, często schodzących jeszcze w sierpniu daleko na południe i blokujących możliwość przejścia tego akwenu.

Tab. 1. Zmiany powierzchni zlodzonej na Północnej Drodze Morskiej w sezonie nawigacyjnym (lipiec-listopad) i orientacyjne ryzyko żeglugi na poszczególnych akwenach w danych miesiącach dla statku samodzielnie pokonującego trasę

Table 1. Changes of sea ice extent in the Northern Sea Route during navigation season (July-November) and approximate risk of individual seas in given months for the ship sailing along this route.

| Miesiąc<br>Month                               | Lipiec<br>July                                                                                                                                                                                                      | Sierpień<br>August             | Wrzesień<br>September          | Październik<br>October          | Listopad<br>November            |
|------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Morze Barentsa – Barents Sea                   |                                                                                                                                                                                                                     |                                |                                |                                 |                                 |
| Powierzchnia zlodzona<br>Sea ice extent        | 1-11%<br>średnio – mean<br>5%                                                                                                                                                                                       | < 3%<br>BL                     | < 3%<br>BL                     | 0-12%<br>średnio – mean<br>5%   | 4-24%<br>średnio – mean<br>13%  |
| Ryzyko po roku 2004<br>Risk after 2004         | R-1                                                                                                                                                                                                                 | R-1                            | R-1                            | R-1                             | R-2                             |
| Uwagi – Remarks                                | bez uwag – without comments                                                                                                                                                                                         |                                |                                |                                 |                                 |
| Morze Karskie – Kara Sea                       |                                                                                                                                                                                                                     |                                |                                |                                 |                                 |
| Powierzchnia zlodzona<br>Sea ice extent        | 13-50%<br>średnio – mean<br>37%                                                                                                                                                                                     | 2-17%<br>średnio – mean<br>10% | 2-17%<br>średnio – mean<br>5%  | 6-48%<br>średnio – mean<br>22%  | 35-87%<br>średnio – mean<br>67% |
| Ryzyko po roku 2005<br>Risk after 2005         | R-1                                                                                                                                                                                                                 | R-1                            | R-1                            | R-2                             | R-3                             |
| Uwagi – Remarks                                | w latach 2007- 2012 we wrześniu warunki bezlodowe<br>in the years 2007-2012 ice-free conditions in September                                                                                                        |                                |                                |                                 |                                 |
| Morze Łaptiewów – Laptev Sea                   |                                                                                                                                                                                                                     |                                |                                |                                 |                                 |
| Powierzchnia zlodzona<br>Sea ice extent        | 38-95%<br>średnio – mean<br>67%                                                                                                                                                                                     | 8-60%<br>średnio – mean<br>34% | 3-60%<br>średnio – mean<br>23% | 32-98%<br>średnio – mean<br>67% | 100%                            |
| Ryzyko po roku 2002<br>Risk after 2002         | R-4                                                                                                                                                                                                                 | R-2                            | R-2                            | R-4                             | R-4                             |
| Uwagi – Remarks                                | ostatnie 3 lata (2011-2013) we wrześniu warunki bezlodowe<br>the last three years (2011-2013) ice-free conditions in September                                                                                      |                                |                                |                                 |                                 |
| Morze Wschodniosyberyjskie – East Siberian Sea |                                                                                                                                                                                                                     |                                |                                |                                 |                                 |
| Powierzchnia zlodzona<br>Sea ice extent        | 75-88%<br>średnio – mean<br>84%                                                                                                                                                                                     | 2-60%<br>średnio – mean<br>37% | 1-36%<br>średnio – mean<br>18% | 19-89%<br>średnio – mean<br>58% | 100%                            |
| Ryzyko po roku 2002<br>Risk after 2002         | R-4                                                                                                                                                                                                                 | R-3                            | R-2                            | R-4                             | R-4                             |
| Uwagi – Remarks                                | w najbliższym czasie bardzo duże prawdopodobieństwo szybkiego pogarszania się warunków lodowych w październiku – in the near future a very high probability of rapid deterioration of the ice conditions in October |                                |                                |                                 |                                 |
| Morze Czukockie – Chukchi Sea                  |                                                                                                                                                                                                                     |                                |                                |                                 |                                 |
| Powierzchnia zlodzona<br>Sea ice extent        | 26-55%<br>średnio – mean<br>50%                                                                                                                                                                                     | 1-36%<br>średnio – mean<br>15% | 1-15%<br>średnio – mean<br>3%  | 2-24%<br>średnio – mean<br>11%  | 33-85%<br>średnio – mean<br>40% |
| Ryzyko po roku 2002<br>Risk after 2002         | R-3                                                                                                                                                                                                                 | R-2                            | R-1                            | R-1                             | R-4                             |
| Uwagi – Remarks                                | duże prawdopodobieństwo szybkiego pogarszania się warunków lodowych w listopadzie – high probability of rapid deterioration of the ice conditions in November                                                       |                                |                                |                                 |                                 |
| Morze Beringa – Bering Sea                     |                                                                                                                                                                                                                     |                                |                                |                                 |                                 |
| Powierzchnia zlodzona<br>Sea ice extent        | X, BL                                                                                                                                                                                                               | BL                             | BL                             | BL                              | X                               |
| Ryzyko – Risk                                  | R-2                                                                                                                                                                                                                 | R-1                            | R-1                            | R-1                             | R-3                             |
| Uwagi – Remarks                                | ryzyko zablokowania Cieśniny Beringa w listopadzie<br>the risk of blocking the Bering Strait in November                                                                                                            |                                |                                |                                 |                                 |

W latach, w których cyrkulacja atmosferyczna występująca w okresie od marca do sierpnia sprzyja odbrzegowemu dryfowi lodów morskich na Morzu Wschodniosyberyjskim (patrz: zmodyfikowany Dipol Arktyczny; Marsz 2008) i następnie wyprowadzaniu ich w kierunku Cieśniny Fram, warunki lodowe na tym morzu ulegają w sierpniu wyraźnej poprawie. W takich przypadkach prawdopodobieństwo schodzenia na Morze Wschodniosyberyjskie i utrzymywania się na nim w sierpniu maszyn lodowych jest nisko, co umożliwia względnie swobodną żeglugę. W ostatnim dwunastoleciu (2002-2013) zdarzyło się to jednak tylko dwukrotnie (lata 2007 i 2012).

Na morzach Łaptiewów i Wschodniosyberyjskim dochodzi również do najwcześniejszego zamarzania, a przyrost powierzchni zlodzonej jest na tyle szybki, że w połowie listopada oba morza są już całkowicie zamarznięte i grubość występującego na nich lodu może przekraczać 30-40 cm. W takich warunkach samodzielna żegluga statku o klasie lodowej L2 i niższej staje się niemożliwa.

Ponieważ Północna Droga Morska jako szlak żeglugowy musi być traktowana jako układ szeregowy lub szeregowo-równoległy odcinków trasy składających się na PDM, o warunkach jej przejścia decyduje odcinek lub odcinki równoległe, na których panują najtrudniejsze warunki. Mimo znacznie korzystniejszych warunków lodowych panujących na morzach Barentsa, Karskim, Czukockim i Beringa, na których warunki lodowe umożliwiające żeglugę obciążoną względnie małym ryzykiem rozpoczynają się nieco wcześniej, ale przede wszystkim trwają o miesiąc dłużej, można sądzić, że w obecnie panujących warunkach lodowych względnie pewna samodzielna nawigacja statków o niskiej klasie lodowej na całej trasie może mieć miejsce tylko w ciągu jednego – półtora miesiąca. W latach o wyjątkowo korzystnych warunkach lodowych sezon żeglugowy może wydłużać się do dwóch – dwóch i pół miesiąca.

## 5. Podsumowanie

Przedstawiona ocena zakłada, że warunki lodowe na Północnej Drodze Morskiej będą takie, jakie obserwuje się w ostatnich kilku-, kilkunastu latach. Jednakże mając na względzie charakter i zakres zmian powierzchni zlodzonej na morzach tej części Arktyki oraz zespół przyczyn prowadzących do zmian warunków lodowych (Marsz 2008, Marsz i Styszyńska 2010), nie można być tego pewnym. Być może, że warunki takie utrzymają się jeszcze przez kilka lat, a nawet ulegną poprawie, wydłużając sezon nawigacyjny. Jednak dotychczasowy przebieg zmian powierzchni zlodzonej, przy uwzględnieniu procesów tworzenia się lodów morskich wskazuje, że istnieje duże prawdopodobieństwo, szybkiego wzrostu powierzchni zlodzonej na Morzu Wschodniosyberyjskim w październiku i słabszego wzrostu powierzchni zlodzonej na Morzu Czukockim w listopadzie. To ostatnie może przyczynić się do szybszego blokowania przez lody Cieśniny Beringa. W rezultacie przyjmowanie obecnie występującego okresu względnie bezpiecznej żeglugi dla statków bez wzmocnień lodowych w warunkach „bezlodowych” jest na tych morzach obciążone dużą dozą niepewności.

Objaśnienia do tabeli 1 – Explanations for Table 1

BL – warunki bezlodowe, żegluga bez przeszkód – ice-free conditions, sailing freely,

X – niezależnie od zmian powierzchni zlodzonej na Morzu Beringa możliwość pojawiania się lodu utrudniającego lub uniemożliwiającego przejście Cieśniny Beringa – regardless of changes in sea ice extent on the Bering Sea the possibility of the occurrence of impeding or preventing ice of the Bering Strait crossing.

Obecnie Północną Drogę Morską należy traktować jako szlak żeglugowy o wyraźnie zaznaczającej się sezonowości nawigacyjnej, na którym żegluga statków handlowych niebędących konstrukcjami specjalnie projektowanymi do żeglugi w ciężkich i bardzo ciężkich warunkach lodowych, może odbywać się przez półtora do dwóch i pół miesiąca, na dodatek obciążona jest ryzykiem przedłużenia czasu podróży czy wręcz niepowodzenia. Tego ostatniego nie można wiarygodnie przewidzieć z większym niż jednomiesięcznym wyprzedzeniem.

## Literatura

- Alenius P., Makkonen L., 1981. Variability of the annual maximum ice extent of the Baltic Sea. Archives for meteorology, geophysics, and bioclimatology, Series B, Volume 29, Issue 4, pp 393-398.
- Arikajnen A.I., 1990. Sudokhodstvo vo l'dakh Arktiki. Moskva "Transport": 247 s.
- Drent T., 1993. Commercial shipping on the Northern Sea Route. The Northern Mariner -Le Marin du nord, III, No. 2 (April 1993): 1-17.
- 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 A, 56 (4): 328-341.
- Fetterer F., Knowles K., 2004. Sea ice index monitors polar ice extent. EOS: Transactions of the American Geophysical Society, 16: 163.
- Holland M. M., Bitz C. M., 2003. Polar amplification of climate change in coupled models. Climate Dynamics, 21: 221-232.
- Limits of oceans and seas, 1953. S-23. International Hydrographic Organization: 40 s.
- MANICE, 2005. Manual of Standard Procedures for Observing and Reporting Ice Conditions – MANICE. Revised Ninth Edition, June 2005: 146 s.
- Marchenko N., 2012. Russian Arctic Seas. Navigational conditions and accidents. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg: 293 s.
- 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.
- Marsz A.A., Styszyńska A., 2010. Współczesne zmiany pokrywy lodów morskich w strefach polarnych i ich konsekwencje dla żeglugi na akwenach arktycznych. Prace Wydziału Nawigacyjnego Akademii Morskiej w Gdyni, 24: 61-80.
- Polyakov I.V., Alekseev G.V., Bekryaev R.V., Bhatt U., Colony R., Johnson M.A., Karklin V.P., Makshtas A.P., Walsh D., Yulin A.V., 2002. Observationally based assessment of polar amplification of global warming. Geophysical Research Letters, 29, 1878, doi: 1029/2001GL011111.
- Polyakov I.V., Bhatt U.S., Colony R., Walsh D., Alekseev G.V., Bekryaev R.V., Karklin V.P., Yulin A.V., 2003. Long-Term Ice Variability in Arctic Marginal Seas. Journal of Climate, 16 (12): 2078-2085.
- Rodrigues J., 2008. The rapid decline of the sea ice in the Russian Arctic, Elsevier, Cold Regions Science and Technology, 54: 124-142.
- Rodrigues J., 2009. The increase in the length of the ice-free season in the Arctic, Elsevier, Cold Regions Science and Technology, 59: 78-101.
- Seinä A., Palosuo E., 1993. The classification of the maximum annual extent of ice cover in the Baltic Sea 1720-1992. Meri 20: 5-20 (in Finnish).
- Serreze M.C., Francis J.A., 2006. The Arctic Amplification Debate. Climatic Change, 76: 241-264. DOI: 10.1007/s10584-005-9017-y.

Zakharov V.F., 1987. Morskie l'dy i klimat. [w:] Kotlyakov V.M., Grosvald M.G. (red.), Vzaimodeistvie oledeneniya s atmosferoi i okeanom. Nauka, Moskva: 66-90.

Zakharov V.F., 1996. Sea ice cover in climatic system. Gidrometeoizdat, St. Petersburg: 213 s.

Zakharov V.F., 1997. Sea Ice in the Climate System. Arctic Climate System Study, World Climate Research Programme, WMO/TD-No.782, World Meteorological Organization, Geneva: 80 s.

Wpłynęło: 12 marca 2014 r., poprawiono: 17 czerwca 2014 r., zaakceptowano: 23 czerwca 2014 r.

### Summary

The paper presents the results of the detailed analysis of the evolution of the ice cover occurring currently (1979-2013) on the Russian Arctic seas (Fig. 2-19), through which leading the Northern Sea Route (NSR) as well as the results of the detailed analysis of the length of the navigation season (the period in which the ice concentration does not exceed 15%). In recent years (2002-2013) was noted a clear improvement of potential navigation conditions, although these conditions on the Laptev Sea and the East Siberian Sea are still very difficult and labile, even during periods of the smallest development of the ice cover (second half of August – the first half of October). The analysis of the length of the "ice-free" period, during which an ice conditions allow for relatively free navigation of vessels without a high ice class shown that in the current, very mild ice conditions, routes leading through the Laptev Sea and East Siberian Sea do not guarantee "ice-free" navigation without assistance of icebreakers in the navigation season each year, being the "bottlenecks" of the entire route NSR. An approximate risk to navigation of the ship overcoming the NSR alone in the period from July to November has been determined for each sea (Table 1).

**Key words:** sea ice, changes of sea ice extent, Northern Sea Route, Russian Arctic.