

**Kamil Formela, Andrzej A. Marsz**

Akademia Morska w Gdyni, Wydział Nawigacyjny,

Katedra Meteorologii i Oceanografii Nautycznej

81–374 Gdynia, ul. Sędzickiego 19

e-mail: aamarsz@am.gdynia.pl

**ZMIENNOŚĆ LICZBY DNI ZE SZTORMEM  
NAD BAŁTYKIEM (1971–2009)**

**Changeability in the number of days with gale  
over the Baltic Sea (1971–2009)**

**Summary.** This work describes the changeability in the annual number of days with gales (wind force  $\geq 8^{\circ}B$ ) over the Baltic Sea in the last 39-year period (1971–2009). The material that was analysed was provided by data from every day SLP (sea surface pressure) maps at 00 UTC. A negative trend in the number of days with gales was noted over the entire Baltic in the analysed period. Rapid decrease in the frequency of storms was observed after the year 1995 together with weaker NAO and its change into negative phase. The changeability in the number of days with gales over the Baltic Sea during the year does not show any correlation with the warming over this area. It negates the strongly advocated theory claiming that the increase in the number of Baltic gales is an ‘extreme phenomenon’ following the global increase in temperature.

**Słowa kluczowe:** wiatry sztormowe, Bałtyk, zmienność, zjawiska ekstremalne

**Key words:** wind storms, Baltic Sea, changeability, extreme events

**WSTĘP**

Pod mianem sztormu rozumie się sytuacje, w których siła wiatru osiąga 8 i więcej stopni w skali Beauforta, co odpowiada prędkości wiatru  $17,1$  i więcej  $m \cdot s^{-1}$ . Górna granica prędkości wiatru jest tu nieokreślona – najwyższy stopień skali Beauforta ( $12^{\circ}B$  – wiatry huraganowe) jest otwarty – ma tylko dolną granicę, jaką jest  $32,6 m \cdot s^{-1}$ . Występowanie wiatrów o sile sztormu stwarza na morzu poważne utrudnienia, a w niektórych wypadkach zagrożenia dla żeglugi,

pracy portów, urządzeń hydrotechnicznych, stabilności brzegów morskich – i ogólnie – bezpieczeństwa strefy przybrzeżnej. Ponieważ sztormy nad Bałtykiem występują względnie często, trudno uznawać je za zjawiska ekstremalne, choć niekiedy stwarzają ekstremalnie trudne warunki dla statków znajdujących się w zasięgu ich działania.

Sztormy są często wymieniane jako zjawiska „ekstremalne”, których częstość ma rosnąć wraz z postępującym globalnym ociepleniem. W odniesieniu do Bałtyku, mimo iż dotychczasowe badania wykazują, że częstość sztormów w ostatnich latach nie rośnie, ale wręcz maleje (Bärring, Fortuniak 2009), teza ta jest uporczywie propagowana. Jako argumenty, że liczba sztormów nad Bałtykiem rośnie i ma dalej rosnąć wraz ze wzrostem temperatury, przywołuje się najczęściej wyniki badań modelowych. Celem tej pracy jest przedstawienie zmienności liczby dni ze sztormem nad Bałtykiem w ostatnich 39 latach, co pozwoli na ustosunkowanie się do tezy o związku częstości występowania sztormów nad Bałtykiem z postępującym na tym samym obszarze ociepleniem.

## ŹRÓDŁA DANYCH, METODY OPRACOWANIA

Źródłem danych do analizy były codzienne dolne mapy synoptyczne z godziny 00 UTC (rozkład SLP i wysokości geopotencjału 500 hPa) stanowiące wynik reanaliz NCEP/NCAR, archiwizowane na stronie [www.wetterzentrale.de/topkarten/fsreauer.html](http://www.wetterzentrale.de/topkarten/fsreauer.html) (DWD). Przeprowadzono analizę 14 254 map z badanego okresu. Każde pole SLP nad powierzchnią Bałtyku na kolejnej mapie było analizowane pod kątem wystąpienia prędkości wiatru przywodnego równego lub większego od dolnej granicy sztormu. Prędkość wiatru przywodnego szacowano z prędkości wiatru geostroficznego, przy przyjęciu średniego współczynnika redukcyjnego równego 0,7, bez uwzględnienia zmian gęstości powietrza spowodowanego zmianami jego temperatury. Do oszacowania granicznej prędkości wiatru geostroficznego niezbędne było obliczenie granicznego gradientu barycznego. Przy przyjęciu średniej szerokości geograficznej obszaru Bałtyku równej  $59^\circ$  i współczynnika redukcyjnego, oszacowany graniczny gradient baryczny wynosi w przybliżeniu  $4,38 \text{ hPa}$ , co odpowiada prędkości wiatru geostroficznego  $24,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , a wiatru przywodnego  $17,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Ponieważ mapy były w wersji elektronicznej, w celu sprawnego procesu identyfikacji sytuacji sztormowych posłużono się „kursorem sztormowym”. Przy rozdzielczości mapy  $823 \times 656$  pikseli i długości  $10^\circ$  łuku południka (koło wielkie) równej 89 pikseli, średnica „kursora sztormowego”, odtwarzającego odległości między izobarami ( $dP = 5 \text{ hPa}$ ) odpowiadającej obliczonemu granicznemu gradientowi barycznemu wynosiła w przybliżeniu 10 pikseli. Oznacza to, że jeśli podczas analizy mapy nie było możliwe umieszczenia „kursora sztormowego” między sąsiadu-

jącymi izobarami, występował tam wiatr przywodny o prędkości przekraczającej  $17,1\text{--}17,2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Zidentyfikowane w ten sposób sytuacje sztormowe były traktowane jako doba, w której wystąpił sztorm, notowana była data jego wystąpienia (rok, miesiąc, dzień), co utworzyło „kalendarz dni ze sztormem”. Ze względu na znaczną rozciągłość Bałtyku i chęć poznania zasadniczych cech zróżnicowania regionalnego występowania liczby dni ze sztormem, cały Bałtyk podzielono wzdłuż równoleżnika  $60^\circ\text{N}$  na dwie części – północną i południową. W kalendarzu każdy przypadek wystąpienia sztormu, niezależnie od rozmiaru pola wystąpienia wiatrów sztormowych, odnotowywano w zależności od tego, nad jaką częścią Bałtyku wystąpił sztorm. Uwzględniano trzy możliwe przypadki – pole wiatru sztormowego występowało wyłącznie na części południowej Bałtyku (S), wyłącznie północnej (N) czy też na obu częściach jednocześnie (O). Dane zestawione w kalendarzu sztormowym poddano następnie analizom statystycznym. Dalej zostaną przedstawione jedynie wyniki analizy zmienności międzyrocznej.

### ZMIENNOŚĆ MIĘDZYROCZNA LICZBY DNI ZE SZTORMEM NAD BAŁTYKIEM

Wbrew obiegowym opiniom o wyjątkowej burzliwości Morza Bałtyckiego, średnia wieloletnia roczna liczba dni ze sztormem nad Bałtykiem nie jest, w porównaniu do Morza Północnego czy też Morza Norweskiego, duża. W badanym 39-leciu wynosi ona  $41,9 (\pm 1,46)$  dni w roku i nie odbiega istotnie od średnich podawanych wcześniej (np. Łomniewski 1962, Kwiecień 1987, *Baltijskoe more* 1992). Liczby dni ze sztormem w poszczególnych latach zestawiono w tabeli 1.

Dane tabeli 1 wykazują, że nad akwenami północnymi Bałtyku (na N od  $60^\circ\text{N}$ ) liczba dni ze sztormem w ciągu roku jest nieznacznie większa niż nad akwenami południowej części morza. Szeregi czasowe rocznej liczby dni ze sztormem na części północnej i południowej morza nie są ze sobą istotnie skorelowane ( $r = 0,19$ ,  $p = 0,243$ ), co oznacza, że kolejne wzrosty i spadki liczby dni ze sztormem na obu częściach Bałtyku nie występują synchronicznie. Podobnie zachowuje się zmienność rocznej prędkości wiatru nad Bałtykiem (Kruszewski 2008). Brak synchroniczności w zmienności liczby dni ze sztormem i średniej rocznej prędkości wiatru między południowym a północnym Bałtykiem wskazuje, że na obu częściach Bałtyku wiatry sztormowe generowane są przez układy niżowe przemieszczające się różnymi torami.

Maksimum aktywności sztormowej w rozpatrywanym okresie przypadało na lata 1992–1993, po roku 1995 liczba dni ze sztormem gwałtownie się zmniejszyła (patrz tab. 1 i ryc. 1). W badanym okresie trend rocznej liczby dni ze sztormem nad całym Bałtykiem wykazuje statystycznie istotny, słaby trend

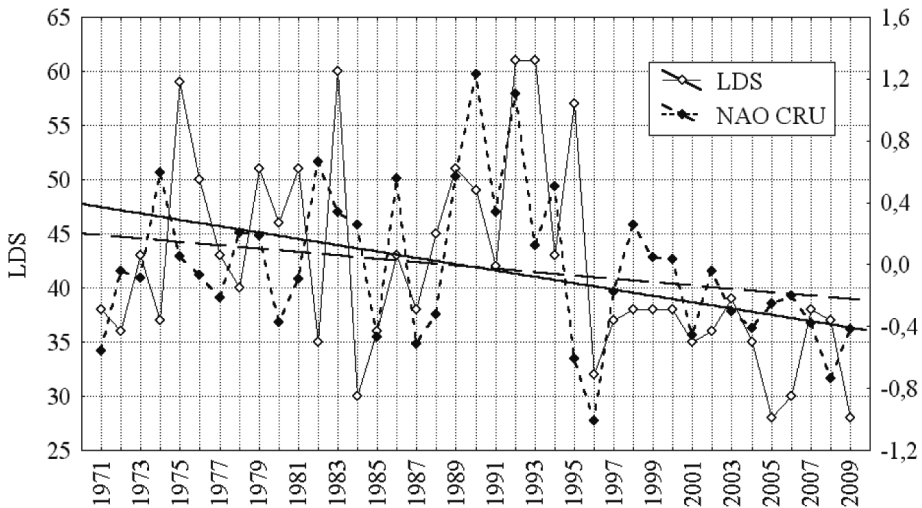
**Tabela 1.** Liczba dni ze sztormem w roku nad obszarem północnego Bałtyku (N), południowego Bałtyku (S), występujących jednocześnie nad obiema częściami Bałtyku (O) i suma dni ze sztormem w roku nad całym obszarem Bałtyku (LDS)

**Table 1.** Number of days with gales during a year over the northern part of the Baltic Sea (N), over the southern Baltic (S), observed over both parts of the Baltic (O) and the sum of days with gales over the entire Baltic Sea during a year (LDS)

Rok	N	S	O	LDS
1971	17	11	10	38
1972	15	11	10	36
1973	18	11	14	43
1974	12	16	9	37
1975	24	19	16	59
1976	16	18	16	50
1977	24	15	4	43
1978	19	16	5	40
1979	21	20	10	51
1980	12	23	11	46
1981	24	10	17	51
1982	13	8	14	35
1983	19	22	19	60
1984	11	10	9	30
1985	17	9	10	36
1986	19	16	8	43
1987	15	15	8	38
1988	15	23	7	45
1989	17	21	13	51
1990	19	15	15	49
1991	17	13	12	42
1992	32	14	15	61
1993	23	19	19	61
1994	15	14	14	43
1995	23	18	16	57
1996	14	12	6	32
1997	17	8	12	37
1998	17	10	11	38
1999	17	8	13	38
2000	19	10	9	38
2001	16	8	11	35
2002	20	10	9	39
2003	20	10	9	39
2004	10	11	14	35
2005	11	9	8	28
2006	16	4	10	30
2007	13	10	15	38
2008	9	17	11	37
2009	12	11	5	28
Średnia	17,00	13,41	11,49	41,90
sn	4,63	4,81	3,76	9,12
Min (rok)	9 (2008)	4 (2006)	4 (1977)	28 (2005, 2009)
Max (rok)	32 (1992)	23 (1980, 1988)	19 (1983, 1993)	61 (1992, 1993)

sn – odchylenie standardowe/standard deviation

ujemny ( $-0,221$  dnia-rok $^{-1}$ ;  $p < 0,022$ ). W tym samym okresie liczba dni ze sztormem nad południowym Bałtykiem wykazuje ujemny trend statystycznie istotny ( $-0,169$  dnia-rok $^{-1}$ ), nad północnym – słaby ujemny, statystycznie nieistotny ( $-0,110$  dnia-rok $^{-1}$ ). Liczba dni ze sztormem występującym jednocześnie na obu częściach Bałtyku praktycznie nie wykazuje trendu ( $-0,013$  dnia-rok $^{-1}$ ).



**Ryc. 1.** Przebieg rocznej liczby dni ze sztormem nad całym Bałtykiem (LDS) i rocznej wartości wskaźnika NAO CRU

**Fig. 1.** The course of the annual number of days with gale over the Baltic Sea (LDS) and annual value of NAO CRU

### PRZYCZYNY ZMIAN CZĘSTOŚCI SZTORMÓW NAD BAŁTYKIEM

Niezależnie od tego, jaki miałyby być mechanizm wiążący wzrost częstości sztormów z postępującym wzrostem temperatury powietrza, między szeregami tych wielkości powinny wystąpić statystycznie istotne dodatnie współczynniki korelacji, stanowiące dowód lub przesłankę istnienia takich związków. Analiza nie wykazuje występowania nawet słabych, ale statystycznie istotnych współczynników korelacji między roczną temperaturą powietrza w regionie bałtyckim a liczbą dni ze sztormem w ciągu roku w rozpatrywanym okresie. Podobnie brak związków między częstością sztormów nad Bałtykiem a anomaliami temperatury globalnej, hemisferycznej i strefy umiarkowanej półkuli północnej ( $44\text{--}64^\circ\text{N}$ ). Współczynniki korelacji między wymienionymi anomaliami temperatury powietrza a częstością sztormów nad Bałtykiem są ujemne. Taki stan wskazuje, że doszukiwanie się przyczyn zmienności częstości sztormów nad

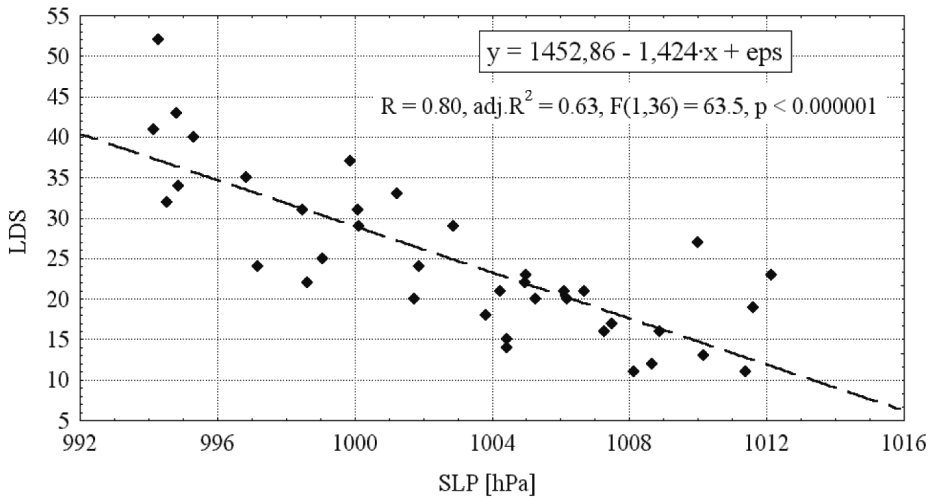
Bałtykiem w zachodzącym ociepleniu w skali globalnej, hemisferycznej, strefowej czy regionalnej nie jest racjonalne.

Zmiany częstości występowania wiatrów sztormowych stanowią prosty rezultat zmian aktywności cyklonalnej. Wzrost liczby układów niskiego ciśnienia przemieszczających się nad obszarem Bałtyku pociąga za sobą wzrost liczby dni ze sztormami. Jedną z miar aktywności cyklonalnej nad tym obszarem może być wskaźnik NAO. Między zmiennością NAO a zmiennością liczby sztormów nad Bałtykiem zachodzą silne związki. Współczynnik korelacji między roczną liczbą dni ze sztormem a rocznym wskaźnikiem NAO CRU (Jones i in. 1996) jest równy  $+0,38$  ( $p < 0,02$ ). Rycina 1 ujawnia jednak, że związki między obiema wielkościami nie są w pełni synchroniczne – zmiana liczby dni ze sztormem jest w znaczącej liczbie przypadków opóźniona w stosunku do zmian rocznego wskaźnika NAO. Wartość współczynnika korelacji przy rocznym opóźnieniu liczby dni ze sztormem w stosunku do NAO rośnie do  $+0,54$ , a korelacja staje się wysoce istotna. Gwałtowne załamanie się dodatniego trendu liczby dni ze sztormem przypadające na rok 1996 jest poprzedzone równie gwałtownym spadkiem wartości rocznego wskaźnika NAO CRU przypadające na lata 1995–1996. Po tych latach wartość wskaźnika NAO, jak i liczba dni ze sztormem gwałtownie maleją i w szeregach pojawia się silny subtrend ujemny.

O rzeczywiście zmienności rocznej liczby dni ze sztormem decyduje aktywność niżowa w okresie zimowym. Średnio w wieloleciu w okresie zimowym, zdefiniowanym jako okres od grudnia do marca, występuje 24,6 dni ze sztormem, co stanowi  $\sim 58,8\%$  rocznej liczby dni ze sztormem. Miesiące zimowe charakteryzują się szczególnie dużą, kilkakrotnie większą niż w pozostałych miesiącach, zmiennością liczby dni ze sztormem. Podobnie dużą zmiennością charakteryzuje się zimowy wskaźnik NAO. Między zimowym wskaźnikiem NAO Hurrella (1995) a liczbą dni ze sztormem w okresie zimowym na całym Bałtyku współczynnik korelacji liniowej jest równy  $0,72$  ( $p < 0,000\ 001$ ).

Drugim czynnikiem, który wspólnie z NAO steruje zmianami częstości dni ze sztormem nad Bałtykiem w okresie zimowym, są zmiany ciśnienia w Arktyce Atlantyckiej, w punkcie  $75^{\circ}\text{N}$ ,  $15^{\circ}\text{E}$  (patrz Marsz, Styszyńska 2006). Współczynnik korelacji między zimowym ciśnieniem w Arktyce Atlantyckiej a liczbą dni ze sztormem w okresie zimowym nad całym Bałtykiem jest równy  $0,80$ . Oznacza to, że zimowe zmiany ciśnienia w Arktyce Atlantyckiej objaśniają  $\sim 63\%$  zmienności liczby dni ze sztormem nad Bałtykiem (ryc. 2).

Wzrost liczby dni ze sztormem nad Bałtykiem wykazuje w okresie zimowym silny związek ze wzrostem natężenia cyrkulacji strefowej w atlantycko-europejskim sektorze cyrkulacyjnym. Współczynniki korelacji z frekwencją makrotypu cyrkulacji środkowotroposferycznej W według klasyfikacji Wangengeima-Girsa są nad całym Bałtykiem i jego obiema częściami wysokie i statystycznie istotne. Wzrost natężenia cyrkulacji południkowej ogranicza nad Bałtykiem częstość



**Ryc. 2.** Związek między zmianami średniego ciśnienia (SLP) w Arktyce Atlantyckiej (punkt 75°N, 15°E) z okresu zimowego a liczbą dni ze sztormem nad całym Bałtykiem (LDS) w tym samym czasie

**Fig. 2.** Correlation between changes in mean pressure (SLP) in the Atlantic Arctic (point 75°N, 15°E) from winter season (DJFM) and the number of days with gale over the entire Baltic Sea (LDS) in the same period

występowania sztormów. Z frekwencją makrotypu cyrkulacji środkowotroposferycznej E częstość liczby dni ze sztormem jest nad całym Bałtykiem skorelowana ujemnie, a związek jest istotny. Istotne, również ujemne, korelacje liczby dni ze sztormem z frekwencją makrotypu cyrkulacji C Wangengeima-Girsa występują tylko nad północną częścią Bałtyku. W przypadku wzrostu częstości makrotypów cyrkulacji południkowej – E i C – rośnie nad Bałtykiem częstość sytuacji wyżowych, dla których charakterystyczne jest zmniejszenie prędkości wiatru, a sztormy mogą powstawać jedynie jako „sztormy na skrajach wyżów”. W cieplej porze roku związki między frekwencją makrotypów cyrkulacji środkowotroposferycznej a częstością sztormów nad Bałtykiem są słabe i nieistotne.

## DYSKUSJA WYNIKÓW I WNIOSKI

W okresie 1971–2009 nad obszarem Bałtyku występuje bardzo silny wzrost temperatury rocznej. Jest on znacznie silniejszy od trendu hemisferycznego i globalnego. Występowanie w tym samym czasie ujemnych trendów liczby dni ze sztormem nad Bałtykiem przeczy dość powszechnie lansowanej tezie, że wraz z postępującym ociepleniem rośnie częstość sztormów, jako przejawów „zjawisk ekstremalnych”. Nie jest to stwierdzenie nowe. Badania The WASA

Group (1998) wykazały, że w rejonie NE Atlantyku w okresie ostatnich stukilkudziesięciu lat częstość sztormów wykazuje bardzo dużą zmienność w okresach kilkunastoletnich, nie wykazując jednocześnie żadnych zdecydowanych trendów długookresowych. Barring i Fortuniak (2009), badając zmiany ciśnienia w Sztokholmie i Lund od okresu Minimum Daltona do współczesności (1780–2005), wykazali, że w rejonie Bałtyku i Morza Północnego przy silnej zmienności multidekadowej, brak trendu długookresowego w częstości sztormów. Silny trend dodatni, który zaznaczył się od 1960. do połowy lat 1990., a który był podstawą do formułowania tez o wzroście częstości sztormów wraz z postępującym ociepleniem, zdaniem Barringa i Fortuniaka (2009) stanowił rezultat wystąpienia minimum w działalności cyklonalnej nad tą częścią Europy w latach 1960., a nie szczególnie silnego wzrostu częstości wiatrów sztormowych w latach 1990.

Zmienność częstości występowania sztormów nad Bałtykiem jest związana z charakterem cyrkulacji atmosferycznej w atlantycko-europejskim sektorze cyrkulacyjnym. Wraz ze zmianą epok cyrkulacyjnych (okresy przewagi cyrkulacji strefowej lub południkowej) dochodzi do naturalnej zmiany subtrendów w szeregach liczby dni ze sztormem.

## Literatura

- Baltijskoe More*, 1992, Proekt „Morya SSSR”. *Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morej SSSR*. 3, 1, *Gidrometeorologičeskie usloviya*. Sankt-Peterburg, *Gidrometeoizdat*, ss. 449.
- Barring L., Fortuniak K. 2009, *Multi-indices analysis of southern Scandinavian storminess 1780–2005 and links to interdecadal variations in the NW Europe-North Sea region*. *Int. Jour. Climat.*, 29 (3), 373–384.
- Hurrell J.W., 1995, *Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperatures and precipitation*. *Science*, 269, 676–679.
- Jones P.D., Jonsson T., Wheeler D., 1997, *Extension of the North Atlantic Oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar and south-west Iceland*. *Int. Jour. Climat.*, 17 (13), 1433–1450.
- Kruszewski G., 2008, *Zmiany prędkości wiatru przywodnego nad Bałtykiem w świetle danych z reanalizy NCEP/NCAR (1951–2000)*. *Prz. Geof.*, 53, 1, 27–41.
- Kwiecień K., 1987, *Warunki klimatyczne*. [w:] B. Augustowski (red.), *Bałtyk Południowy*. Gdańskie Towarzystwo Naukowe, Ossolineum, 219–288.
- Łomniewski K., 1962, *Sztormy na południowym Bałtyku*. WSP w Gdańsku, *Zesz. Geogr.*, 4, 193–227.
- Marsz A.A., Styszyńska A., 2006, *O „arktycznych” i „atlantyckich” mechanizmach sterujących zmiennością temperatury powietrza na obszarze Europy i północno-zachodniej Azji*. *Problemy Klimatologii Polarnej*, 16, 47–89.
- The WASA Group, 1998, *Changing Waves and Storms in the Northeast Atlantic?* *Bull. Amer. Met. Soc.*, 79 (5), 741–760.