

Grzegorz Kruszewski

Akademia Morska w Gdyni, Wydział Nawigacyjny,
Katedra Meteorologii i Oceanografii Nautycznej
81–374 Gdynia, ul. Sędzickiego 19
e-mail: krucha@am.gdynia.pl

**ZWIĄZKI PRĘDKOŚCI WIATRU Z TEMPERATURĄ
POWIETRZA NAD BAŁTYKIEM (1950–2009)**

**Correlation between surface wind speed and air temperature
in the Baltic region (1950–2009)**

Summary. This work deals with correlation between surface wind speed in two grid points and air temperature at selected 12 stations in Baltic region (Fig. 1). Mean monthly data were used for analysis. Wind speed regime in analysed grids is quite different (Fig. 2). Statistically significant trends for period 1950–2009 were found in January in [60,20] grid and in February, June, September and October in [55,15] grid. Air temperature in the same years shows positive trends at majority stations for period January to August (except June), with the highest values of linear trend in January and February (up to +0,07°C per year). Synchronic significant correlations (wind speed and air temperature in the same month) were found for both grid points, positive in winter, negative in summer months (Tab. 2 and 3). The strongest relations were observed usually with stations situated close to grid point, but statistically significant coefficients were found even on large distances (over 500 km). The highest positive correlation coefficients exceed +0.64 in January (air temperature at Hännösand & wind speed at [60,20] grid) and -0.55 in July (Stockholm, Visby & [55,15] grid).

Słowa kluczowe: prędkość wiatru, temperatura powietrza, Morze Bałtyckie, analiza korelacji

Key words: surface wind speed, air temperature, Baltic Sea, correlation analysis

WSTĘP

Wiatr i zmiany jego prędkości nad obszarami morskimi są nie tylko ważnym czynnikiem wpływającym na działalność ludzką prowadzoną na morzu, ale re-

gulują również cały szereg procesów naturalnych, takich jak falowanie, prędkość prądów wiatrowych czy wymiana ciepła między powierzchnią morza a atmosferą. Celem tego artykułu jest ukazanie charakteru związków zachodzących między prędkością wiatru (dalej Vw) a temperaturą powietrza (dalej TP) nad Bałtykiem w ciągu ostatnich 60 lat. Zagadnienie to wydaje się być ważne również z tej przyczyny, że zmiany prędkości wiatru, podobnie jak zmiany temperatury powietrza, wpisują się w zachodzące współcześnie zmiany klimatyczne (The BACC Author Team 2008).

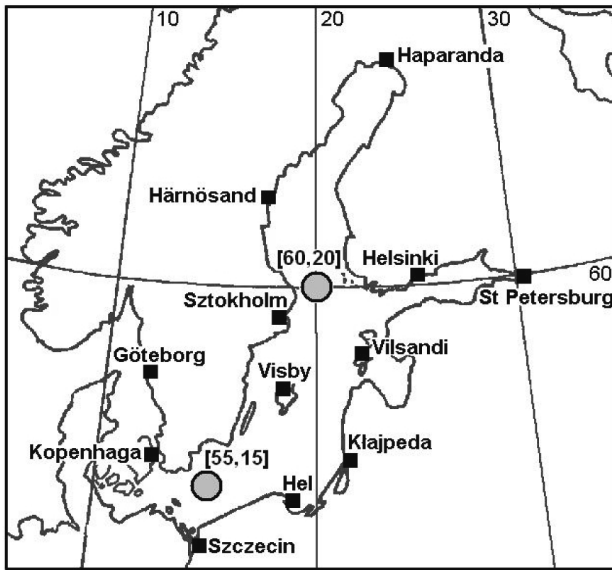
Ze względu na problemy z homogenicznością danych o Vw pochodzących ze stacji brzegowych, jak i danych obserwacyjnych wiatru z obszaru morza zbieranych przez statki (np. Kwiecień 1987) zdecydowano się na wykorzystanie danych z reanaliz. Przydatność tego typu danych w odniesieniu do analizy Vw nad Bałtykiem wykazali m.in. Pryor i Barthelmie (2003) oraz Kruszewski (2008).

ŹRÓDŁA DANYCH I METODY BADAWCZE

W pracy wykorzystano zbiór zawierający średnie miesięczne wartości prędkości wiatru przywodnego, pochodzący z bazy danych NOAA-ESRL Physical Science Division, Boulder, Colorado, zawierającej materiały reanaliz (Kalnay i in. 1996; źródło danych: <http://www.cdc.noaa.gov/>). Do analizy wybrano ciągi z dwóch punktów, które charakteryzują cechy regionalnego różnicowania Vw nad otwartymi wodami Bałtyku i są wzajemnie słabo skorelowane. Jeden leży na Morzu Alandzkim – na głównej osi Bałtyku (60°N, 20°E), drugi na Bałtyku Południowym (w pobliżu Bornholmu – 55°N, 15°E). Dalej w tekście używać się będzie skróconego zapisu współrzędnych gridów jako [60,20] i [55,15].

W analizach uwzględniono średnie miesięczne wartości temperatury powietrza pochodzące z 12 stacji położonych wzdłuż linii brzegowej (Göteborg, Haparanda, Härnösand, Hel, Helsinki, Kłajpeda, Kopenhaga, St. Petersburg, Sztokholm, Szczecin, Vilsandi, Visby) na wysokości nieprzekraczającej 50 m n.p.m. Ciągi danych pochodzą z *Monthly Climatic Data for the World*, bazy danych Nordklim oraz danych publikowanych przez IMGW. Położenie uwzględnionych w analizie gridów i stacji przedstawia ryc. 1.

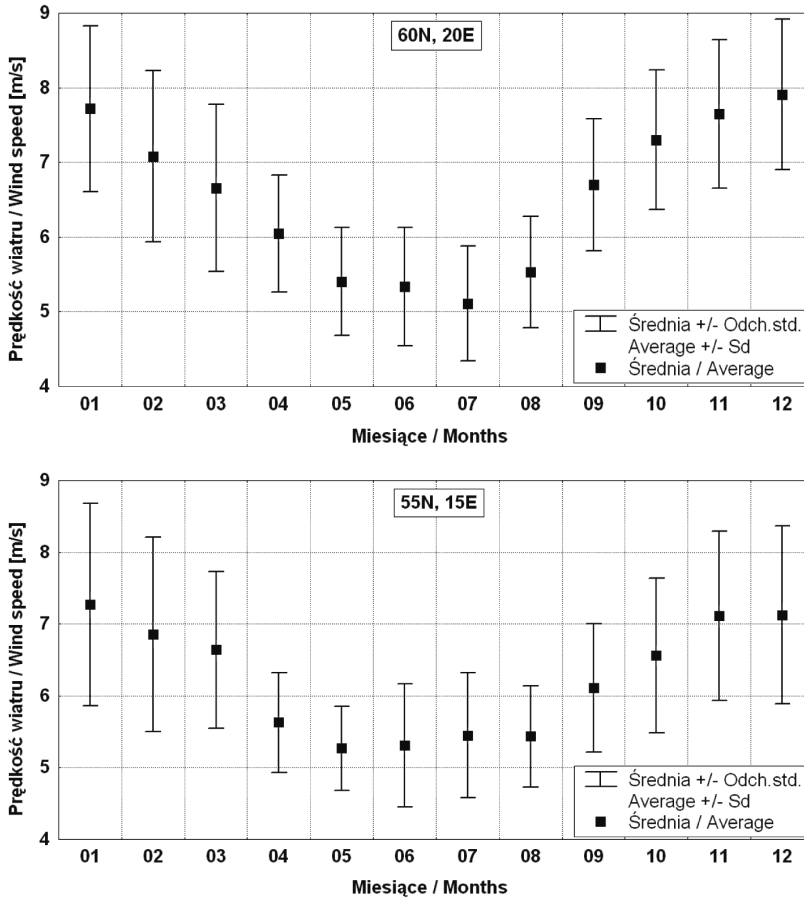
Zmiany prędkości wiatru oraz temperatury powietrza prześledzono w układzie wartości miesięcznych. Wyznaczono współczynniki trendu liniowego i ich istotność statystyczną. Do określenia związków synchronicznych Vw z TP wykorzystano analizę korelacyjną (współczynnik korelacji liniowej Pearsona).



Ryc. 1. Rozmieszczenie stacji i gridów uwzględnionych w opracowaniu
 Fig. 1. Location of weather stations and grid points used in the study

ZMIANY PRĘDKOŚCI WIATRU

Wybrane do analizy gridy wykazują różne przebiegi V_w w ciągu roku (Kruszewski 2008). Prędkość wiatru w północnej części Bałtyku (grid [60,20]) osiąga maksimum w grudniu ($7,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$). Spadek V_w od grudnia do stycznia jest nieznaczny (ryc. 2), następnie obserwuje się równomierny spadek do maja. Wyraźne minimum roczne występuje w lipcu ($5,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$). Między sierpniem a wrześniem zaznacza się skokowy wzrost średniej V_w (o $1,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), po czym do końca roku V_w systematycznie rosną. W gridzie [55,15] maksimum roczne V_w przypada na styczeń ($7,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), w lutym i marcu V_w nieznacznie spada, po czym zaznacza się skokowe obniżenie między marcem a kwietniem (o około $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$). Słabo zaznaczone minimum roczne V_w przypada na maj i czerwiec ($5,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), praktycznie nie różniąc się od średnich miesięcznych w lipcu i sierpniu. Między sierpniem a wrześniem występuje największy wzrost średniej V_w (o $0,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), po czym prędkości dalej rosną, aż do osiągnięcia maksimum rocznego. Większe V_w notowane są w gridzie [60,20] przez 9 miesięcy w roku. Zwraca uwagę zróżnicowanie wielkości odchylenia standardowego tak w poszczególnych miesiącach (wyraźnie wyższe w chłodnej połowie roku), jak i między gridami – większą zmiennością charakteryzuje się V_w w gridzie [55,15].



Ryc. 2. Przebieg roczny średnich miesięcznych prędkości wiatru w gridach [60,20] i [55,15] (1950–2009)

Fig. 2. Annual course of the monthly average wind speed values in grids [60,20] and [55,15] (1950–2009)

W wieloleciu 1950–2009 w gridzie [60,20] odnotowano istotny statystycznie dodatni trend miesięcznej prędkości wiatru w styczniu ($+0,017 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$). W okresach 30-letnich istotny trend występował w gridzie [60,20] w sierpniu ($-0,04 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$) w latach 1950–1979, natomiast w latach 1980–2009 odnotowano dodatnie istotne trendy V_w w lutym ($0,06$), kwietniu, maju, lipcu i wrześniu (po $0,04 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$).

W gridzie [55,15] istotne trendy dodatnie w latach 1950–2009 wystąpiły w lutym, czerwcu, wrześniu i październiku (odpowiednio $+0,023$; $+0,021$; $+0,015$ i $+0,016 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$). W podokresie 1950–1979 trend dodatni pojawił się w kwietniu ($0,03$) i listopadzie ($0,08 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$). Z kolei w latach 1980–2009

mamy do czynienia z ujemnym trendem prędkości wiatru w grudniu ($-0,06 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$). Przytoczone fakty wskazują na odmienne zachowanie się miesięcznych V_w w wytypowanych do analizy gridach.

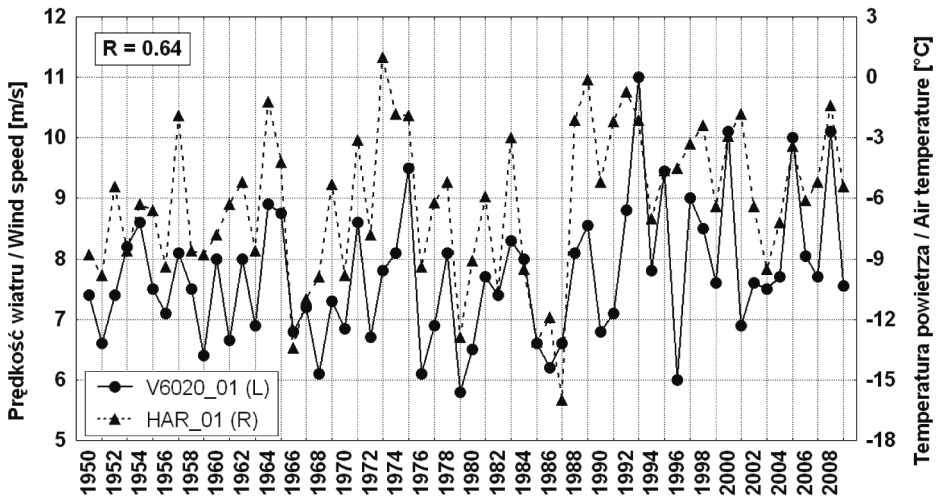
ZMIANY TEMPERATURY POWIETRZA

W latach 1950–2009 istotnie statystycznie, dodatnie trendy miesięcznej TP występują na większości stacji od stycznia do sierpnia (z wyjątkiem czerwca). Najsilniejsze trendy pojawiają się w styczniu i lutym, osiągając $0,074^\circ\text{C} \cdot \text{rok}^{-1}$ w Sankt Petersburgu i $0,066^\circ\text{C} \cdot \text{rok}^{-1}$ w Kłajpedzie. W kwietniu stwierdzono występowanie istotnych i dodatnich trendów na wszystkich analizowanych stacjach. Ich wartości są niższe niż zimą, ale wysoce istotne statystycznie. W pierwszych 30 latach (1950–1979) na wszystkich 12 stacjach odnotowano jedynie trzy przypadki trendów miesięcznych wartości istotnych statystycznie. Nie ma więc podstaw do stwierdzenia ukierunkowanych zmian. W drugim 30-leciu (1980–2009) istotnie statystycznie, dodatnie trendy TP występują na większości stacji w kwietniu, sierpniu i wrześniu. Najsilniejsze trendy TP zaznaczają się w kwietniu na stacjach leżących w południowej części Bałtyku (od $0,085^\circ\text{C} \cdot \text{rok}^{-1}$ w Helu, Szczecinie i Vilsandi do $0,10^\circ\text{C} \cdot \text{rok}^{-1}$ w Göteborgu).

ZWIĄZKI PRĘDKOŚCI WIATRU Z TEMPERATURĄ POWIETRZA

Przeprowadzona analiza korelacji wskazuje na istnienie statystycznie istotnych związków synchronicznych między miesięczną prędkością wiatru a temperaturą powietrza na stacjach odległych nawet o ponad 500 kilometrów. Korelacje te mają dwojaki charakter. W chłodnej porze roku są to korelacje dodatnie, latem ujemne. W przypadku V_w w gridzie [60,20] istotne dodatnie korelacje z TP występują praktycznie na wszystkich stacjach przez pół roku (październik – marzec). Najwyższe współczynniki ($r \geq 0,6$) wystąpiły w styczniu na stacjach położonych bliżej gridu (np. Härnösand, $r = 0,64$; patrz ryc. 3), chociaż nawet na najbardziej oddalonej stacji w Szczecinie współczynnik korelacji w tym miesiącu wyniósł $r = 0,47$ (tab. 1) i ma wysoką istotność statystyczną. Podobnie wysokie korelacje odnotowano w lutym, marcu i grudniu, a trochę słabsze, ale ciągle istotne w październiku i listopadzie.

W kwietniu i wrześniu korelacji praktycznie się nie obserwuje. Odpowiednie współczynniki są bardzo niskie i nieistotne statystycznie. W ciepłej porze roku (maj – sierpień) natomiast występują związki o przeciwnym niż zimą charakterze – korelacje ujemne. Pojawiają się one przede wszystkim na stacjach w otoczeniu gridu [60, 20], (Härnösand, Helsinki, Sztokholm), ale



Ryc. 3. Przebieg miesięcznych prędkości wiatru w gridzie [60, 20] i temperatury powietrza na stacji Härnösand w styczniu

Fig. 3. Course of monthly wind speed values in [60, 20] grid and air temperature at Härnösand in January

Tabela 1. Współczynniki korelacji liniowej między miesięcznymi wartościami prędkości wiatru w gridzie [60, 20] a temperaturą powietrza (1950–2009)

Table 1. Correlation coefficient values between monthly wind speed in [60, 20] grid and air temperature (1950–2009)

Stacja	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Göteborg	0,57*	0,54*	0,44*	0,03	-0,34	-0,46*	-0,25	-0,36	0,11	0,35	0,43*	0,50*
Haparanda	0,61*	0,41*	0,42*	0,02	-0,32	-0,24	-0,31	-0,14	0,25	0,34	0,18	0,36
Härnösand	0,64*	0,52*	0,53*	0,17	-0,27	-0,27	-0,38	-0,34	0,09	0,40	0,35	0,48*
Hel	0,49*	0,48*	0,49*	0,12	-0,03	-0,04	-0,01	-0,15	0,26	0,29	0,26	0,40*
Helsinki	0,60*	0,46*	0,49*	0,05	-0,32	-0,24	-0,29	-0,31	0,16	0,33	0,29	0,51*
Kłajpeda	0,51*	0,48*	0,42*	0,09	-0,07	0,05	-0,07	-0,14	0,26	0,40*	0,31	0,54*
Kopenhaga	0,51*	0,52*	0,50*	0,06	-0,24	-0,38	-0,13	-0,37	0,08	0,28	0,31	0,42*
St. Petersburg	0,58*	0,42*	0,45*	0,06	-0,15	0,09	-0,01	-0,08	0,20	0,28	0,24	0,52*
Sztokholm	0,61*	0,51*	0,54*	0,05	-0,27	-0,23	-0,20	-0,32	0,16	0,30	0,33	0,52*
Szczecin	0,47*	0,45*	0,47*	0,12	-0,09	-0,10	-0,05	-0,14	0,11	0,31	0,28	0,37
Vilsandi	0,60*	0,51*	0,50*	0,11	-0,13	-0,14	-0,14	-0,15	0,25	0,33	0,37	0,53*
Visby	0,61*	0,55*	0,53*	0,10	-0,15	-0,16	-0,21	-0,31	0,19	0,34	0,33	0,55*

Wartości pogrubione istotne na poziomie $p = 0,05$; oznaczone * na poziomie $p = 0,001$

Values printed in bold significant on 95% level; marked * significant on 99.9% level

również w Göteborgu, Kopenhadze czy Haparandzie. Siła związku latem jest wyraźnie słabsza niż zimą, a wartości przekraczające próg istotności statystycznej pojawiają się w pojedynczych miesiącach i nie tworzą wyraźnego zgrupowania.

Korelacje V_w w gridzie [55,15] z TP dały podobny obraz współzależności tych dwóch elementów. Ponownie obserwujemy dodatnie korelacje w chłodnej, a ujemne w ciepłej porze roku. Tym razem jednak odpowiednie współczynniki zimą są nieco słabsze i istotne przez 4 miesiące (grudzień – marzec) na stacjach położonych bliżej gridu, a w przypadku stacji położonych najdalej na północ związek osiąga istotność statystyczną tylko w lutym. Korelacje ujemne występują od kwietnia do września, przy czym na praktycznie wszystkich stacjach przekraczają próg istotności statystycznej w lipcu, a na większości w sierpniu, tworząc dość wyraźne zgrupowanie (tab. 2). Bezwzględne wartości współczynników korelacji latem dotyczące tego gridu są wyższe i zbliżone do odpowiednich zimą, osiągając w lipcu wartość $r = -0,55$ na stacjach Visby i Sztokholm.

Tabela 2. Współczynniki korelacji liniowej między miesięcznymi wartościami prędkości wiatru w gridzie [55, 15] a temperaturą powietrza (1950–2009)

Table 2. Correlation coefficient values between monthly wind speed in [55, 15] grid and air temperature (1950–2009)

Stacja	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Göteborg	0,51*	0,53*	0,31	-0,18	-0,19	-0,02	-0,48*	-0,36	-0,28	0,02	0,16	0,42*
Haparanda	0,13	0,29	0,13	-0,10	-0,14	0,08	-0,15	-0,22	-0,10	-0,06	-0,14	-0,08
Härnösand	0,15	0,38	0,21	-0,17	-0,22	0,10	-0,37	-0,35	-0,27	-0,06	-0,14	0,13
Hel	0,60*	0,49*	0,33	-0,07	-0,23	0,01	-0,53*	-0,30	-0,24	0,15	0,20	0,46*
Helsinki	0,34	0,40*	0,28	-0,10	-0,19	-0,16	-0,47*	-0,40*	-0,23	0,10	0,05	0,14
Kłajpeda	0,54*	0,45*	0,26	-0,10	-0,13	0,03	-0,50*	-0,22	-0,07	0,26	0,31	0,45*
Kopenhaga	0,56*	0,56*	0,36	-0,15	-0,29	-0,08	-0,54*	-0,46*	-0,33	0,02	0,19	0,48*
St. Petersburg	0,39	0,39	0,28	0,04	-0,17	-0,14	-0,27	-0,26	-0,09	0,19	0,19	0,17
Sztokholm	0,34	0,47*	0,28	-0,22	-0,25	-0,07	-0,55*	-0,43*	-0,31	-0,03	-0,03	0,23
Szczecin	0,61*	0,50*	0,33	-0,10	-0,26	0,04	-0,49*	-0,25	-0,26	0,23	0,31	0,57*
Vilsandi	0,46*	0,44*	0,23	-0,05	-0,15	0,08	-0,40*	-0,25	-0,14	0,14	0,19	0,27
Visby	0,48*	0,50*	0,29	-0,14	-0,25	0,02	-0,55*	-0,41*	-0,25	0,06	0,12	0,33

Wartości pogrubione istotne na poziomie $p = 0,05$; oznaczone * na poziomie $p = 0,001$
 Values printed in bold significant on 95% level; marked * significant on 99.9% level

DYSKUSJA WYNIKÓW I WNIOSKI

Wykryte związki prędkości wiatru z temperaturą powietrza występują na praktycznie całym obszarze Bałtyku. Statystycznie istotne związki występują na dystansach nawet powyżej 500 km. Pomimo różnych reżimów Vw w wybranych gridach, charakter związków z TP w obu przypadkach był ten sam – dodatnie korelacje w chłodnej, a ujemne w cieplej porze roku. Wzmoczonej aktywności wiatru zimą towarzyszy wzrost, a latem spadek temperatury powietrza nad Bałtykiem. Odmienne znaki współczynników korelacji wskazują, że procesy będące przyczyną wystąpienia związków między prędkością wiatru a temperaturą powietrza nie są takie same latem i zimą.

Analiza zmierzająca do wyjaśnienia przyczyn tych związków wskazuje na podobne powiązania zarówno prędkości wiatru, jak i temperatury powietrza z ciśnieniem atmosferycznym. W okresie zimowym wraz ze spadkiem ciśnienia atmosferycznego rośnie prędkość wiatru nad Bałtykiem oraz temperatura powietrza. Przyczyną wzrostu temperatury na stacjach wokółbałtyckich przy spadkach ciśnienia nad obszarem Bałtyku jest wzrost częstości adwekcji powietrza z sektora zachodniego. Jednocześnie spadek ciśnienia prowadzi do wzrostu gradientów barycznych, co skutkuje wzrostem prędkości wiatru. Wzrost częstości występowania sytuacji wyżowych zimą zmniejsza prędkość wiatru i prowadzi do spadku temperatury powietrza. Dzięki temu w okresie zimowym występują dość silne i statystycznie istotne dodatnie związki prędkości wiatru z temperaturą powietrza, szczególnie wyraźne w przypadku Vw w gridzie [60, 20] i TP nad północną częścią Bałtyku (patrz tab. 1).

W okresie letnim charakter związków ulega odwróceniu. Wzrost częstości sytuacji cyklonalnych (z towarzyszącym im dużym zachmurzeniem i często występującymi opadami) prowadzi do wzrostu prędkości wiatru i spadku temperatury powietrza. Z kolei wzrost ciśnienia prowadzi do osłabienia siły wiatru nad Bałtykiem, a zwiększony dopływ radiacji (przy zmniejszonym w sytuacjach wyżowych zachmurzeniu) jest prawdopodobnie przyczyną wzrostu temperatury powietrza. Nie można również wykluczyć, że silniejszy wiatr – niszcząc przyziemną warstwę graniczną (w której pionowe gradienty temperatury są szczególnie duże) – może powodować spadek temperatury powietrza. W rezultacie w okresie letnim, zwłaszcza w najcieplejszych miesiącach, związki między Vw a TP zmieniają znak na ujemny. Korelacje są słabsze niż w okresie zimowym, a najwyraźniejsze w przypadku Vw w gridzie [55,15] i TP na stacjach środkowego i południowo-zachodniego Bałtyku (tab. 2).

Analizowany związek między prędkością wiatru nad Bałtykiem a temperaturą powietrza stanowi rezultat działania tak zwanego „czynnika trzeciego”,

który steruje zmiennością obu elementów, dzięki czemu występują między nimi okresowe dość silne związki statystyczne, przy braku bezpośrednich związków przyczynowych.

Literatura

- Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell L., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Chelliah M., Ebisuzaki W., Hihhins W., Janowiak J., Mo K.C., Ropelewski C., Wang J., Leetmaa A., Reynolds R., Jenne R., Joseph D., 1996, *The NCEP/NCAR 40-year Reanalysis Project*. Bull. Amer. Met. Soc., 77, 3, 437–471.
- Kwiecień K., 1987, *Warunki klimatyczne*. [w:] B. Augustowski (red.), *Bałtyk Południowy*. Gdańskie Towarzystwo Naukowe, Ossolineum; 219–288.
- Kruszewski G., 2008, *Zmiany prędkości wiatru przywodnego nad Bałtykiem w świetle danych z reanalizy NECEP/NCAR (1951–2005)*. Prz. Geof., 53, 1, 27–41.
- Pryor S. C., Barthelmie R. J., 2003, *Long-term trends in near-surface flow over the Baltic*. Int. Jour. Climat., 23, 271–289.
- The BACC Author Team, 2008, *Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin*. Springer-Verlag, Berlin–Heidelberg.