

## ZMIANY KIERUNKU WIATRU WRAZ Z WYSOKOŚCIĄ W CIĘŻKOWICACH

MONIKA LISOWSKA

Zakład Klimatologii, Wydział Geografii i Studiów Regionalnych, Uniwersytet Warszawski  
ul. Krakowskie Przedmieście 30, 00-927 Warszawa

**Abstract:** The aim of this paper is the investigation of vertical wind direction changes in Ciężkowice. In the study, data on wind speed and direction from the wind data collection tower in Ciężkowice for over a 2-year period (from June 2008 to May 2010) were used. Wind speed was measured at two heights, 10 and 40 m a.g.l. The location selected for this analysis is an upland landscape, typical of this part of Poland. Average wind direction at 40 m a.g.l. was deflected by 11° to the right. The studies revealed the influence of local conditions on wind speed and direction in Ciężkowice. Also shown is a domination of wind from the southern and western sectors at both heights.

**Keywords:** wind direction, Ciężkowice plateau, vertical wind profile

### WPROWADZENIE

W polskiej literaturze jest mało badań dotyczących zmian kierunku wiatru wraz z wysokością, opartych na danych empirycznych. Można znaleźć wiele opracowań teoretycznych na temat tego zagadnienia. Należą do nich między innymi prace Kopcewicz (1959), Parczewskiego (1969) czy Trepińskiej (2004–2005). Badania gradientowe prędkości wiatru były prowadzone na 200-metrowym maszcie w Żarnowcu. Dziesięcynomiesięczna seria pomiarowa (grudzień 1989–wrzesień 1990) była wykonywana na potrzeby Elektrowni Jądrowej-Żarnowiec. Niewiele jest prac, w których wykorzystano wyniki tych pomiarów. Należą do nich opracowania Uliasz (1987) i Lorenc (1996). Częściej spotykamy prace dotyczące rozkładu przestrzennego kierunku i prędkości wiatru. Odnoszą się one do całego kraju (Lorenc 1996, 2012) bądź wybranych obszarów (Bogucki 1994; Kossowska-Cezak; Bareja 1998; Bednorz, Kolendowicz 2010). W ostatnich latach pojawia się także dużo opracowań poświęconych modelowaniu prędkości wiatru (m.in. Pilarski i in. 2012; Czernecki 2013, 2014).

Wśród opracowań dotyczących wiatru w górach i na pogórzach najwięcej prac poświęconych jest zjawiskom fenowym, m.in.: Niedźwiedź (1984), Morawska-Horawska (1992), Ustrnul (1992a, b), Lorenc (1999), Trepińska, Bąkowski (2000), Franczak (2013) i Łapińska, Bednorz (2013). Skupiono się w nich na wyjaśnieniu fizyki samego zjawiska, warunkach synoptycznych sprzyjających występowaniu fenu w Polsce oraz skutkach wywołanym przez wiatr halny.

Przedmiotem analizy są zmiany kierunku wiatru w warstwie 10–40 m n.p.g. na obszarze o urozmaiconej rzeźbie terenu. Badania wpisują się w nurt prac poświęconych warstwie granicznej atmosfery. W latach 60. postęp technologiczny w zakresie prowadzenia obliczeń oraz pojawienie się nowych technik pomiarowych umożliwił rozwój badań nad procesami zachodzącymi w granicznej warstwie atmosfery. Zaowocowało to próbami opisanie jej struktury oraz przepływów w niej zachodzących (Garratt i in. 1996). Jedną z teorii powstałych w tamtym okresie jest teoria podobieństwa Monina-Obuchowa, wykorzystująca skalę długości ( $L$ ) Monina-Obuchowa. Znalazła ona praktyczne zastosowanie przy opisie dyspersji zanieczyszczeń czy szacowaniu zasobów energetycznych wiatru. Można ją wykorzystywać do opisu warunków wiatrowych do wysokości 80 m n.p.g. Wyniki są w dużym stopniu uzależnione od homogeniczności terenu, nawet niewielkie jej zaburzenia silnie wpływają na efekty analiz. Teoria Monina-Obuchowa zakłada, że grubość przypowierzchniowej warstwy atmosfery jest niezmienna, a strumienie ciepła są stałe w całym przekroju. Pojawienie się równowagi chwiejnej powoduje zaburzenie zakładanej stabilności, co jest kolejnym ograniczeniem w zastosowaniu tej metody (Gryning i in. 2007).

Do obliczenia długości Monina-Obuchowa ( $L$ ) wykorzystuje się między innymi pomiary gradientowe temperatury powietrza (najlepiej na wysokościach 2 i 10 m n.p.g.) oraz prędkości wiatru. Długość Monina-Obuchowa wraz z prędkością dynamiczną, tzw. prędkością tarcia ( $u_*$ ), skalą temperatury potencjalnej ( $\theta$ ) oraz parametrem szorstkości  $z_0$  pozwalają opisać strukturę przypowierzchniowej warstwy atmosfery z uwzględnieniem ruchów turbulencyjnych, które w niej występują (Holtslag 1984).

Jednym z wcześniejszych modeli charakteryzujących zmiany prędkości i kierunku wiatru wraz z wysokością jest model Ekmana. Jego graficznym obrazem jest spirala Ekmana, na której koniec wektora wiatru zakreśla krzywą obrazującą zmiany prędkości wiatru wraz z wysokością (Holton 1966). Są one w dużym stopniu uwarunkowane charakterem powierzchni czynnej – kąt między wiatrem geostroficznym a wiatrem na wysokości 10 m n.p.g. jest niemal dwukrotnie większy nad powierzchnią śnieżną niż nad wodą (Madsen 1997).

Pod koniec lat 70. ubiegłego wieku rozpoczęły się także projekty badań opartych na pomiarach wiatru, prowadzonych na wysokich masztach. Kilka takich przedsięwzięć podjęto w Stanach Zjednoczonych, do największych należą badania w Boulder (Schotz, Panofsky 1980; Korrell i in. 1982) oraz Askervein Hill (Taylor, Teunissen 1987). W Europie podobne badania przeprowadzono w Holandii, w okolicach Cabauw (Nieuwstadt 1981; Verkaik, Holtslag, 2006). Projekty miały na celu skonfrontowanie rzeczywistych procesów zachodzących w warstwie granicznej atmosfery z założeniami teoretycznymi oraz wskazanie czynników ich determinujących.

## CEL I METODY BADAŃ

Celem opracowania jest charakterystyka zmian kierunku wiatru wraz z wysokością w Ciężkowicach. Obliczono wielkość odchylenia kierunku wiatru wraz z wysokością w zależności od prędkości wiatru, pory doby i pory roku. Dodatkowo scharakteryzowano zmienność roczną kierunku wiatru na obu wysokościach, a wyniki zaprezentowano na kierunkowo-prędkościowych różach wiatru.

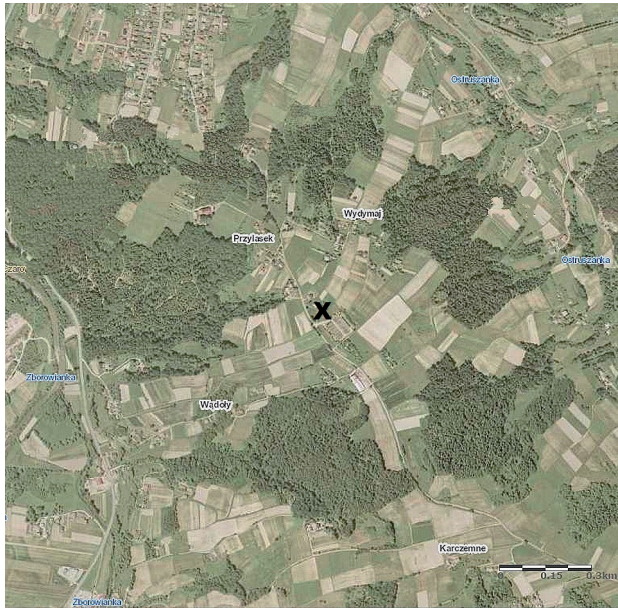
Średnie godzinowe kierunki wiatru porównano z danymi pochodzącymi z pobliskich stacji meteorologicznych w Tarnowie, Nowym Sączu i Krośnie. Poszukując zależności między pomiarami z powyższych lokalizacji, wyliczono współczynnik korelacji Spearmana. Do analiz wybrano ten typ korelacji ze względu na to, że wykorzystane dane nie mają rozkładu normalnego. Zostało to sprawdzone testem Kołmogorowa-Smirnowa z poprawką Lillieforsa.

W badaniach wykorzystano dane z okresu VI 2008–V 2009 r., pochodzące z masztu pomiarowego w Ciężkowicach. Kierunek i prędkość wiatru były mierzone na dwóch poziomach – 10 i 40 m n.p.g. i uśredniane z krokiem 10-minutowym. Pomiary na maszcie prowadzono zgodnie z czasem lokalnym (UTC+2 lub UTC+1). Prędkość i kierunek wiatru były mierzone przez wiatromierz zespolony (połączony anemometr czasowy z czujnikiem kierunku wiatru) zamontowany na specjalnym wsporniku, który eliminuje oddziaływania aerodynamiczne między czujnikami a elementami konstrukcji masztu. Wykorzystany sprzęt pomiarowy nie jest identyczny z wyposażeniem w standardowych stacjach meteorologicznych, ale spełnia wymagania prowadzenia gradientowych pomiarów wiatru. W celu uniknięcia błędów pomiarowych związanych z funkcjonowaniem sprzętu z analizy wykluczono dane z pierwszych tygodni funkcjonowania masztu. Sprawdzono także ich kompletność i usunięto terminy z niepełnymi pomiarami. Dodatkowo do obliczenia współczynnika korelacji Spearmana użyto średnich godzinowych kierunków wiatru z trzech stacji Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej w Tarnowie, Krośnie i Nowym Sączu.

## OBSZAR BADAWCZY

Ciężkowice położone są w województwie małopolskim w powiecie tarnowskim. Miejscowość znajduje się około 25 km na południe od Tarnowa. Zgodnie z klasyfikacją Kondrackiego (1998) jest to obszar Pogórza Ciężkowickiego. Ten mezoregion budują płaskie garby, których wysokość dochodzi do 320–440 m n.p.m. Przez jego środek biegnie równoleżnikowo zalesiony grzbiet o długości 25 km. Ma on dwie kulminacje – Liwocz (561 m n.p.m.) i Brzanka (538 m n.p.m.).

Maszt pomiarowy zlokalizowany był na niezalesionej wierzchołynie na wysokości 370 m n.p.m. (ryc. 1). Stoki wzniesień w najbliższej okolicy są albo porośnięte lasem, albo wykorzystywane rolniczo (ryc. 2). W odległości około kilometra na zachód biegnie dolina rzeki Białej, jej dno znajduje się na wysokości 250 m n.p.m.



Ryc. 1. Najbliższe otoczenie masztu w Ciężkowicach. Symbolem X oznaczono położenie masztu <[www.geoportal.gov.pl](http://www.geoportal.gov.pl)>

Fig. 1. Surrounding area of Ciężkowice tower. Mast location is indicated by the mark X <[www.geoportal.gov.pl](http://www.geoportal.gov.pl)>



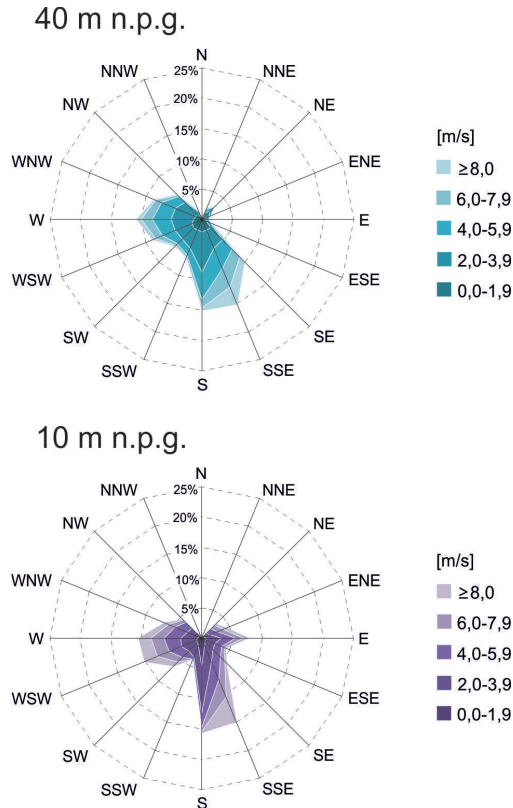
Ryc. 2. Widok horyzontu w kierunku zachodnim (fot. M. Lisowska)

Fig. 2. View of the horizon in the west (fot. M. Lisowska)

W odległości około 1,5 km na północ od masztu jest centrum Ciężkowic. To niewielkie miasto o charakterze rolniczo-turystycznym. Dominuje tu niska zabudowa jednorodzinna, dosyć gęsta w centrum i luźna na obrzeżach miejscowości.

## ZMIENNOŚĆ ROCZNA KIERUNKU WIATRU W CIĘŻKOWICACH

Na kierunkowo-prędkościowych różach wiatru (ryc. 3) widać istotne różnice między rozkładem częstości kierunków wiatru na wysokości 10 i 40 m n.p.g. Na niższym poziomie wyraźnie zaznaczają się trzy dominujące kierunki – południowy, zachodni i wschodni. Na wyższym częstość wiatru z sektora wschodniego jest znacznie mniejsza. Średnie miesięczne prędkości wiatru na



Ryc. 3. Częstość [%] kierunków wiatru w przedziałach prędkości w Ciężkowicach na wysokości 10 i 40 m m.p.g. (2008–2010)

Fig. 3. Frequency [%] of wind directions in speed classes in Ciężkowice at 10 and 40 m a.g.l. height in Ciężkowice (2008–2010)

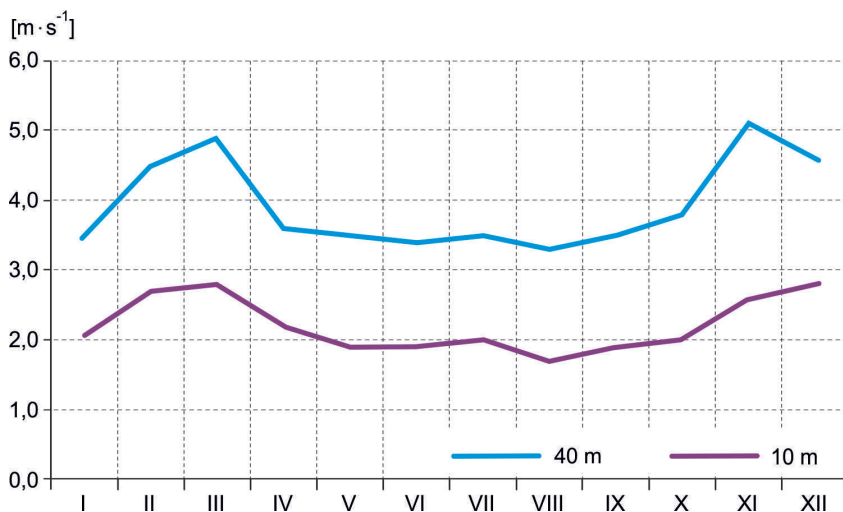


obu wysokościach osiągają większe prędkości w chłodnej niż w ciepłej połowie roku (ryc. 4).

Na rycinie 5 zaprezentowano zmienność roczną kierunku wiatru na poziomie 10 m n.p.g. W ciągu całego roku zaobserwowano wyraźną dominację wiatru z kierunku południowego i południowo-południowo-wschodniego. W styczniu, lutym, kwietniu i maju drugim najczęstszym kierunkiem był wiatr zachodni, w marcu, czerwcu i lipcu natomiast wiatr zachodnio-południowo-zachodni. W pozostałych miesiącach (oprócz listopada) częstość występowania wiatru z kierunku zachodniego i zachodnio-południowo-zachodniego była zbliżona. Trzecim co do częstości występowania był wiatr z sektora wschodniego (NE, ENE, E). W listopadzie częstość wiatru z zachodu i wschodu była bardzo mała w porównaniu z pozostałymi miesiącami, a wyraźnie zaznaczyła się dominacja sektora południowego. Należy podkreślić, że przez cały badany okres nie wystąpił wiatr z kierunku północnego.

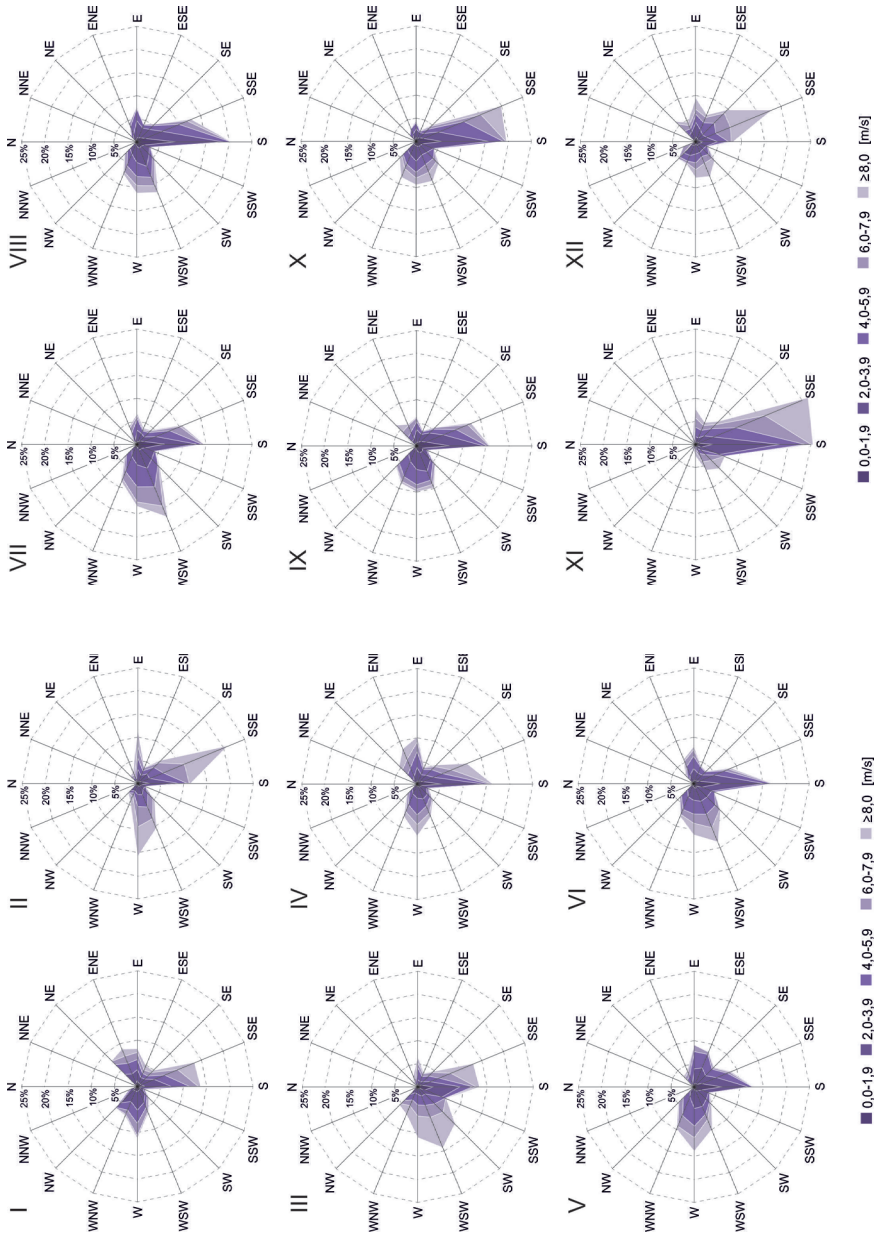
Wiatr o największych prędkościach (powyżej  $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) najczęściej występował z kierunku południowo-południowo-wschodniego i zachodnio-południowo-zachodniego. Wzrost częstości silnego wiatru z pierwszego z kierunków zaznaczył się od października do marca, a z drugiego kierunku od maja do lipca.

Na poziomie 40 m n.p.g. (ryc. 6) nadal była wyraźna dominacja wiatru z kierunku południowego i południowo-południowo-wschodniego, ale nie we wszystkich miesiącach. W maju, czerwcu i lipcu wiatr z tego kierunku występował z podobną częstością jak z sektora zachodniego. W porównaniu z poziomem 10 m n.p.g. rzadziej występował wiatr z kierunku północno-wschodniego. Jedynie w styczniu, kwietniu, listopadzie i grudniu jego częstość osiągnęła 5%.

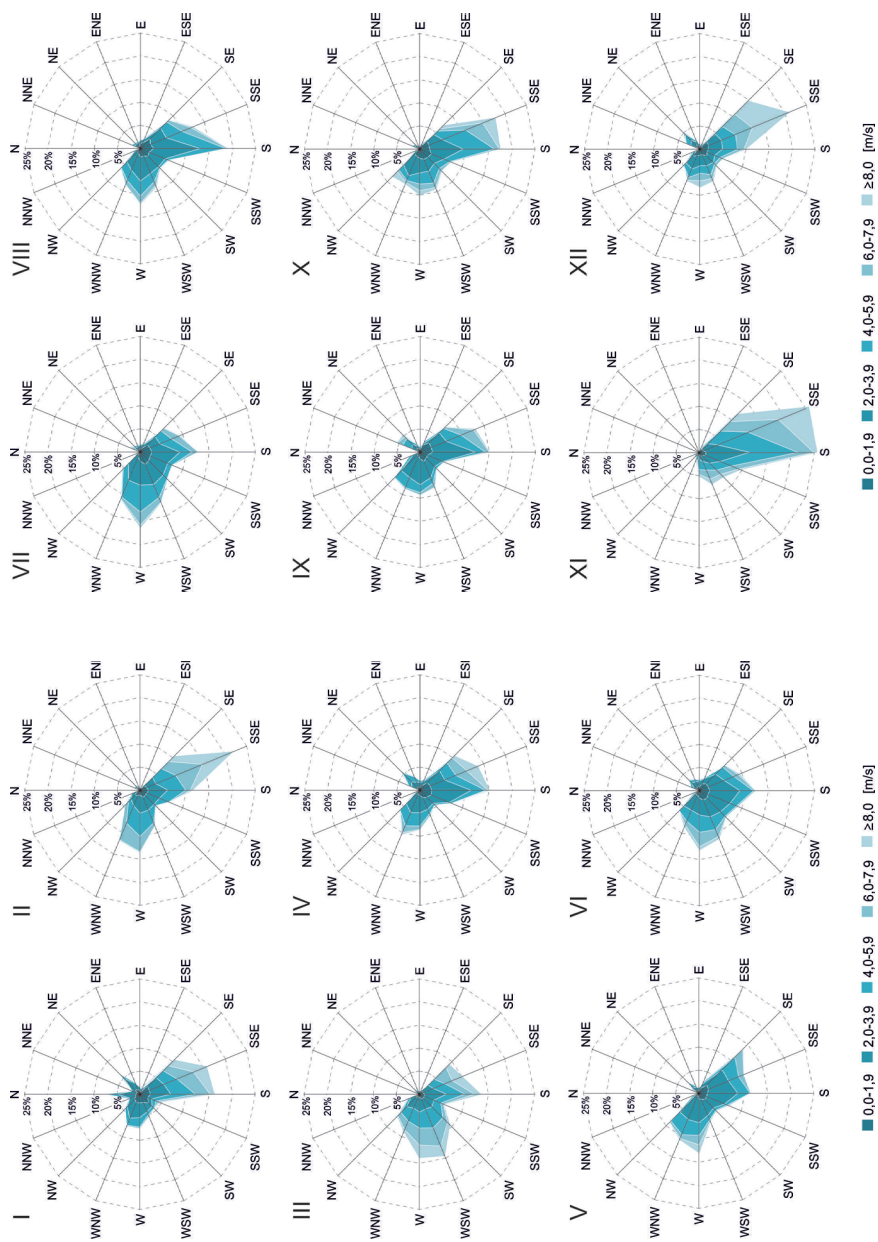


Ryc. 4. Przebieg roczny średniej prędkości wiatru na wysokości 10 i 40 m n.p.g. (2008–2010)

Fig. 4. The annual variation in the mean wind speed at 10 and 40 m a.g.l. (2008–2010)

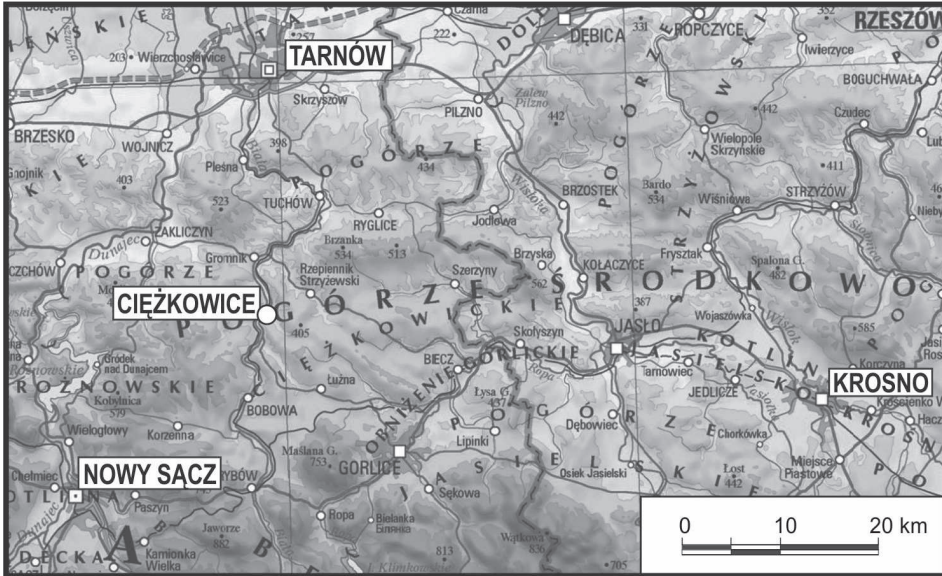


Ryc. 5. Przebieg roczny częstości [%] kierunków wiatru w przedziałach prędkości w Ciężkowicach na wysokości 10 m n.p.g.  
 Fig. 5. Monthly frequency [%] of wind direction variations in Ciężkowice at 10 m a.g.l.



Ryc. 6. Przebieg roczny częstości [%] kierunków wiatru w przedziałach prędkości w Ciężkowicach na wysokości 40 m n.p.g.  
 Fig. 6. Monthly frequency [%] of wind direction variations in Ciężkowice at 40 m a.g.l.





Ryc. 7. Położenie Cieżkowic, Nowego Sącza, Tarnowa i Krosna <[www.google.maps.pl](http://www.google.maps.pl)>  
 Fig. 7. Location of Cieżkowice, Nowy Sącz, Tarnów and Krosno <[www.google.maps.pl](http://www.google.maps.pl)>

Wiatry z kierunku wschodniego i wschodnio-północno-wschodniego występowały jeszcze rzadziej. Kolejną różnicą w porównaniu z poziomem 10 m n.p.g. było występowanie wiatru północnego. W styczniu jego częstość przekroczyła 5%, w pozostałych miesiącach były to pojedyncze wypadki.

W odróżnieniu od wysokości 10 m n.p.g., na poziomie 40 m n.p.g. największa częstość występowania wiatru o najwyższych prędkościach (powyżej  $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) była z kierunku południowo-południowo-wschodniego i zachodniego. Wzrost częstości występowania silnego wiatru z SSE zaobserwowano od października do lutego, a z W od maja do lipca.

## ZMIANY KIERUNKU WIATRU WRAZ Z WYSOKOŚCIĄ

Badając zmiany kierunku wiatru wraz z wysokością, obliczono różnicę między kierunkiem wiatru na poziomie 10 i 40 m n.p.g. We wszystkich miesiącach oprócz stycznia różnica jest ujemna, co oznacza odchylenie kierunku wiatru w prawo (tab. 1a). Najmniejsze różnice, poniżej  $10^\circ$ , wystąpiły w listopadzie, grudniu i czerwcu. Z kolei największa,  $20^\circ$ , w lutym. W pozostałych miesiącach różnice były zbliżone do średniej rocznej, która wyniosła  $11^\circ$ .

W przebiegu dobowym różnic kierunku wiatru można zaobserwować pewną

prawidłowość (tab. 1b). Od godziny 8.00 czasu lokalnego wielkość różnic spadała, osiągając swoje minimum około godziny 13.00 ( $6^\circ$ ). Od godziny 17.00 czasu lokalnego następował wzrost różnic kierunku wiatru, osiągając swoje maksimum o godzinie 23.00 ( $15^\circ$ ).

Zbadano także zależność między wielkością różnic kierunku wiatru a prędkością wiatru (tab. 1c). Można stwierdzić, że wraz ze wzrostem prędkości wiatru wzrastają różnice kierunku wiatru między poziomem 10 i 40 m n.p.g. Największe różnice ( $25^\circ$ ) wystąpiły w przedziale  $6,0\text{--}7,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Jednak w wypadku największych prędkości, powyżej  $8,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , nastąpił spadek wielkości różnic do  $16^\circ$ .

Tabela 1a. Średnie miesięczne różnice [w stopniach] między kierunkiem wiatru na wysokości 10 i 40 m n.p.g.

Table 1a. The annual variation in the differences [in degrees] of wind direction between 10 and 40 m a.g.l.

Miesiąc	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	ROK
Różnica [ $^\circ$ ]	5	-20	-14	-12	-13	-9	-11	-12	-8	-11	-13	-9	-11

Tabela 1b. Średnie dobowe różnice (w stopniach) między kierunkiem wiatru na wysokości 10 i 40 m n.p.g.

Table 1b. The diurnal variation in the differences (in degrees) of wind direction between 10 and 40 m a.g.l.

Godzina	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11
Różnica [ $^\circ$ ]	-12	-12	-13	-12	-13	-13	-12	-10	-9	-9	-10	-9
Godzina	12	13	14	15	16:	17	18	19	20	21	22	23
Różnica [ $^\circ$ ]	-9	-6	-7	-7	-9	-11	-12	-12	-13	-12	-13	-15

Tabela 1c. Różnice (w stopniach) między kierunkiem wiatru na wysokości 10 i 40 m n.p.g. w przedziałach prędkości

Table 1c. Differences (in degrees) of wind direction between 10 and 40 m a.g.l. in speed classes

Przedział prędkości [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]	0,0–1,9	2,0–3,9	4,0–5,9	6,0–7,9	$\geq 8,0$
Różnica [ $^\circ$ ]	-7	-12	-19	-25	-16

Korzystając z danych z najbliższych stacji IMGW w Krośnie, Tarnowie i Nowym Sączu (ryc. 7), obliczono współczynnik korelacji Spearmana z kierunkiem wiatru w Ciężkowicach. Wyniki przedstawiono w tabeli 2. Wszystkie są istotne statystycznie na poziomie 0,05. Można stwierdzić, że wraz ze wzrostem wysokości wartość współczynnika korelacji maleje. Najwyższe wartości korelacji wystąpiły z Krosnem, a najniższe z Nowym Sączem.

Tabela 2. Współczynnik korelacji Spearmana  
Table 2. Spearman correlation coefficient

	Krosno	Nowy Sącz	Tarnów
Ciężkowice 40 m	0,592	0,287	0,450
Ciężkowice 10 m	0,613	0,334	0,456

## WNIOSKI

Na obu wysokościach pomiarowych dominował wiatr z kierunku południowego i południowo-południowo-wschodniego. Na wysokości 10 m n.p.g. drugim co do częstości występowania był wiatr z sektora zachodniego. Na wysokości 40 m n.p.g. ten kierunek wiatru pojawiał się częściej. W całym okresie pomiarowym na niższym poziomie nie zaobserwowano wiatru z kierunku północnego, podczas gdy na wysokości 40 m n.p.g. ten kierunek wiatru występował.

Taka struktura kierunku wiatru wynika z ukształtowania terenu Pogórza Ciężkowickiego. Na północy znajduje się rozległy garb o wysokości ponad 500 m n.p.m., który może stanowić przeszkodę dla napływających mas powietrza. Jak zauważyła Lorenc (1996), większa częstość wiatrów z kierunku południowego w tej części Polski jest wynikiem występowania wiatru halnego.

Badania prowadzone w terenie o urozmaiconej rzeźbie wskazują na duży wpływ podłoża na profil wiatru. Prędkość i kierunek wiatru są kształtowane w skali lokalnej przez najbliższe otoczenia masztu pomiarowego i dodatkowo modyfikowane przez przepływy zachodzące w skali regionalnej (Kustas, Brutsaert, 1986). Z tego powodu obserwuje się duże zróżnicowanie prędkości wiatru w zależności od jego kierunku, co odnotowano także w Ciężkowicach. Wiatr o najwyższych prędkościach na poziomie 10 m n.p.g. był z kierunków SSE i WSW, a na poziomie 40 m n.p.g. z SSE i W.

Średnie odchylenie kierunku wiatru na wysokości 40 m n.p.g. wynosi  $-11^\circ$ . We wszystkich miesiącach, oprócz stycznia, różnica jest ujemna (odchylenie kierunku w prawo). Najmniejsze ujemne różnice występują w czerwcu, wrześniu i grudniu, a największe w lutym. Odchylenie wiatru w prawo jest charakterystyczne dla półkuli północnej i wynika z tego, że siła tarcia (zewnątrznego i wewnętrznego, wywołanych turbulencyjnością ruchu powietrza) jest skierowana przeciwnie do ruchu mas powietrznych (Kopcewicz 1959). W rozkładzie dobowym największe różnice kierunku wiatru występują w godzinach nocnych, a najmniejsze w południowych.

Wielkość skrętu wiatru wraz z wysokością uzależniona jest przede wszystkim od rodzaju podłoża, krzywizny izobar i prędkości wiatru geostroficznego (Parczewski 1969). Z badań empirycznych prowadzonych na masztach w Cabauw i Boulder wynika, że zmiany kierunku i prędkości wiatru z wysokością

są w dużym stopniu uzależnione od stratyfikacji atmosfery (Verkaik, Holtslag, 2006). Przy dużej niestabilności atmosfery następuje szybkie mieszanie się mas powietrza na różnych wysokościach, co skutkuje wyhamowaniem prędkości i małym jej gradientem (Lisowska 2014). W takiej sytuacji również zmiany kierunku wiatru z wysokością są niewielkie. Przy równowadze stałej i obojętnej nie rozwijają się ruchy pionowe powietrza, co powoduje, że gradienty prędkości i kierunku wiatru są większe.

Zaobserwowane zmiany kierunku wiatru z wysokością w Ciężkowicach związane są z chwiejnością atmosfery. W Polsce w chłodnej połowie roku i nocą rozwija się równowaga stała i obojętne (duże gradienty kierunku wiatru), w ciągu dnia i w cieplej połowie roku przeważa równowaga chwiejna (małe gradienty kierunku wiatru).

W Ciężkowicach zaobserwowano wzrost różnic kierunku wiatru wraz ze wzrostem prędkości wiatru, największe ( $-25^\circ$ ) były w zakresie  $6,0-7,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Badania teoretyczne oparte na spirali Ekmana (Madsen 1977), empiryczne odwołujące się do teorii Monina-Obuchowa (Holtslag 1984), świadczą o odwrotnej zależności, czyli spadku wielkości skrętu wiatru wraz ze wzrostem jego prędkości. Jednak należy zaznaczyć, że były one przeprowadzane w obszarze homogenicznym przy ściśle określonej stratyfikacji atmosfery i ograniczone do wybranych sektorów wiatru. W wypadku Ciężkowic nie stosowano takich ostrych dotyczących warunków atmosferycznych, także ukształtowanie obszaru jest bardzo urozmaicone. Powoduje to rozwój skomplikowanych i trudnych do opisanie przepływów w warstwie granicznej. Z tego powodu niemożliwe jest jednoznaczne wskazanie przyczyn wzrostu gradientu kierunku wiatru wraz z jego prędkością.

Porównując dane pomiarowe z masztu z danymi z pobliskich stacji meteorologicznych, obliczono współczynnik korelacji Spearmana. Najmniejszy, korelacja słaba, wystąpił z kierunkiem wiatru w Nowym Sączu. Nowy Sącz jest położony około 26 km od Ciężkowic, na wysokości 292 m n.p.m., ale w zupełnie innym otoczeniu – pomiędzy wzgórzami, które mogą modyfikować przepływ powietrza. Największy współczynnik korelacji wystąpił z danymi z Krosna. Jest ono oddalone o ponad 50 km od Ciężkowic, ale położone na podobnej wysokości (326 m n.p.m.). Również okoliczne wzgórza wykazują podobny przebieg jak w okolicach Ciężkowic.

Wraz ze wzrostem wysokości maleje współczynnik korelacji z pobliskimi stacjami. Może to oznaczać spadek oddziaływania warunków lokalnych na wiatr na poziomie 40 m n.p.m. Niewielkie wartości współczynnika korelacji na niedużym obszarze, ale o urozmaiconej rzeźbie świadczą o silnej modyfikacji regionalnych przepływów powietrza przez cyrkulację lokalną.

## LITERATURA

- Bednorz E., Kolendowicz L., 2010: *Lokalne zróżnicowanie parametrów wiatru na Mierzei Łebskiej (Słowiński Park Narodowy)*, Bad. Fizjograf. nad Pol. Zach., Ser. A – Geografia Fizyczna, R. I, 119–127.
- Bogucki J., 1994: *Dobowa zmienność kierunku wiatru na Mierzei Łebskiej*, Bad. Fizjograf. nad Pol. Zach., Ser. A – Geografia Fizyczna, 45, 6–24.
- Czernecki B., 2013: *Creating wind field time-series over the Southern Baltic area using a dynamical downscaling approach*, Meteorologische Zeitschrift 22(5), 587–593.
- Czernecki B., 2014: *The application of probability density function in modeling of wind speed on the Polish Baltic Coast. Meteorology Hydrology and Water Management, Res. and Operational Applications* 2(2), 23–33.
- Franczak P., 2013: *Wpływ silnego wiatru na zmianę krajobrazu i rzeźby terenu na przykładzie wiatrowalów z południowych stoków pasma Policy (Beskid Żywiecki)*, Zarządzanie Ochroną Przyrody w Lasach, t. 7, 273–285.
- Garratt J.R., Hess G.D., Physick W.L., Bougeault P., 1996: *The Atmospheric Boundary Layer – Advances in Knowledge and Application*, Boundary-Layer Meteorology 78, 9–37.
- Gryning S.E., Batchvarova E., Brümmer B., Jørgensen H., Larsen S., 2007: *On the extension of the wind profile over homogeneous terrain beyond the surface boundary layer*, Boundary-Layer Meteorology 124, 251–268.
- Holton J.R., 1966: *The diurnal boundary layer wind oscillation above sloping terrain*, Tellus, 19, 199–205.
- Holtslag A.A.M., 1984: *Estimates of diabatic wind speed profiles from near-surface weather observations*, Boundary-Layer Meteorology 29, 225–250.
- Kondracki J., 1998: *Geografia regionalna Polski*, Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.
- Kopcewicz T., 1959: *Fizyka atmosfery*, t. III, PWN, Warszawa.
- Korrell A., Panofsky H.A., Rossi R.J., 1982: *Wind profiles at the Boulder tower*, Boundary-Layer Meteorology 22, 295–312.
- Kossowska-Cezak U., Bareja P., 1998: *Wpływ zabudowy miejskiej Warszawy na kierunek i prędkość wiatru*, Acta Universitatis Lodzensis, Folia Geographica Physica 3, 463–465.
- Kustas W.P., Brutsert W., 1986: *Wind profile constants in a neutral atmospheric boundary layer over complex terrain*, Boundary-Layer Meteorology 34, 35–54.
- Lisowska M., 2014: *Zależność zmian prędkości wiatru wraz z wysokością od cyrkulacji atmosferycznej na przykładzie Żeńska (2008–2009)*, Pr. i Stud. Geogr. 56, 189–203.
- Lorenc H., 1996: *Struktura i zasoby energetyczne wiatru w Polsce*, Materiały Badawcze, Ser. Meteorologia 25, IMGW, Warszawa.
- Lorenc H., 1999: *Wiatr jako element zagrożenia*, Wiadomości Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej, t. 22, 43–58.
- Lorenc H., 2012: *Maksymalne prędkości wiatru w Polsce*, Wyd. IMGW-PIB, Warszawa.
- Łapińska M., Bednorz E., 2013: *Występowanie wiatrów fenowych w Karpatach i Sudetach na przykładzie dwóch stacji meteorologicznych – Kasprowego Wierchu i Śnieżki*, Bad. Fizjogr., Ser. A – Geografia Fizyczna, R. IV, s. 121–135.
- Madsen O.S., 1977: *A Realistic Model of the Wind-Induced Ekman Boundary Layer*, Journ. of Physical Oceanography 7, 248–255.
- Morawska-Horawska M., 1992: *Warunki powstawania wiatru halnego i próba oceny jego zasięgu*, Folia Geographica, Ser. Geographica Physica, t. 23, 73–79.
- Niedźwiedz T., 1984: *O pogodzie i klimacie gór polskich*, Wyd. PTTK, Kraków.
- Nieuwstadt F.T.M., 1981: *The steady-state height and resistance laws of the nocturnal boundary layer: theory compared with Cabauw observations*, Boundary-Layer Meteorology 20, 3–17.
- Parczewski W., 1969: *Pogoda a zanieczyszczenia przemysłowe atmosfery*, Centralny Urząd Go-



- spodarki Wodnej i Państwowy Instytut Hydrologiczno-Meteorologiczny, Wyd. Komunikacji i Łączności, Warszawa.
- Pilarski M., Jakusik E., Marosz M., Owczarek M., Miętus M., 2012: *Zastosowanie metod statystycznego downscalingu do analizy prędkości wiatru na polskich stacjach brzegowych*, Przegl. Geofiz. 57, 59–71.
- Scholtz S., Panofsky H.A., 1980: *Wind characteristics at the Boulder Atmospheric Observatory. A Preliminary Report*, Boundary-Layer Meteorology 19, 155–164.
- Taylor P.A., Teunissen H.W., 1987: *The Askervein Hill Project: overview and background data*, Boundary-Layer Meteorology 39, 15–39.
- Trepińska J., 2004–2005: *Pionowy profil prędkości wiatru przyziemnego*, Folia Geographica, Ser. Geographica-Physica, 153–166.
- Trepińska J., Bąkowski R., 2000: *The case of the foehn wind in Zakopane and Cracow from November 6–9, 1997*, Pr. Geograf. 105, 193–201.
- Uliasz M., 1987: *Application of the spectral analysis of the terrain to atmospheric boundary layer modelling in the Zarnowiec lake area*, Zeitschrift für Meteorologie 37(4), 190–192.
- Ustrnul Z., 1992a: *Potencjalne warunki występowania wiatrów fenowych w Karpatach Polskich*, Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Jagiellońskiego, Pr. Geograf. 88, 97–112.
- Ustrnul Z., 1992b: *Influence of Foehn Winds on Air Temperature and Humidity in the Polish Carpatians*, Theoretical and Applied Climatology 45, 43–47.
- Verkaik J.W., Holtslag A.A.M., 2006: *Wind profiles, momentum fluxes and roughness at Catbauw Revisited*, Boundary-Layer Meteorology 118, 1–23.
- <[www.google.maps.pl](http://www.google.maps.pl), [dostęp: 15.04.2015]>.
- <[www.geoportal.gov.pl](http://www.geoportal.gov.pl), [dostęp: 16.08.2015]>.