

ADAM WOJCIECHOWSKI

## REKONSTRUKCJA KIERUNKÓW PRZYZIEMNYCH STRUG POWIETRZA ZA STOKIEM ODWIETRZNYM WYDMY NA PODSTAWIE ANALIZY ROZMIESZCZENIA ZMARSZCZEK EOLICZNYCH

### ZARYS TREŚCI

Na podstawie pomiarów orientacji zmarszczek eolicznych za stokiem odwiertnym wydmy dokonano rekonstrukcji kierunków przemieszczania się przyziemnych strug powietrza w różnych sytuacjach aerodynamicznych. Przedstawiono współzależności statystyczne między prędkością wiatru, wysokością wydmy a szerokością strefy zawirowań powietrza, a także określono kierunki transportu materiału i wyznaczono miejsca akumulacji i deflacji. Wysłunięto sugestię, że zrekonstruowany obraz kierunków strug powietrza na obszarze wydm współcześnie rozwijających się może stanowić materiał porównawczy z rozkładem kierunków upadów lamin w wydmach kopalnych.

### ZARYSOWANIE PROBLEMU

Badania współczesnych procesów eolicznych wiele miejsca poświęcają zagadnieniom dotyczącym ruchu powietrza, jego siły oraz zmianom kierunków w warstwie przypowierzchniowej. Mają one niewątpliwie podstawowe znaczenie w określeniu warunków aerodynamicznych, decydujących w rozwoju rzeźby wydmowej.

W literaturze, zagadnienie zmian kierunków przyziemnych strug powietrza za stokiem odwiertnym rozpatrywane jest zarówno dla wydm jak i zmarszczek eolicznych, za którymi powstają zawirowania powietrza o kierunku przeciwnym względem głównego przepływu (J. R. L. Allen 1968, 1969, R. A. Bagnold 1954, R. K. Borówka 1976, V. Cornish 1914, L. G. Dobrin 1959, M. P. Pietrow 1948, R. P. Sharp 1963, W. Stankowski 1963, S. Wiejisow 1966, 1968, R. Więckowski 1961 i in.).

Według R. A. Bagnolda (1954), za stokiem odwiertnym, w strefie przypowierzchniowej, występuje szereg drobnych zawirowań, przeciwnych względem głównego kierunku wiatru. Ten pogląd podzielają również V. Cornish (1914), M. P. Pietrow (1948), R. P. Sharp (1963) oraz S. Wieji-

sow (1966). Odmiennego zdania jest W. Stankowski (1963) stwierdzając, że za stokiem odwietrzonym istnieją dwie strefy „chaosu aerodynamicznego”; jedna w strefie krawędziowej, w której dochodzi do zbijania się strumieni powietrza związanych z ogólną cyrkulacją i kontrprądów stoku odwietrznego, druga na przedpolu stoku. Badania J. R. L. Allena (1968, 1969) potwierdzają tezę o przeciwnym kierunku strug powietrza w komórce wirowej, z tym, że autor ten rozpatruje rodzaj i wielkość zawirowań w zależności od kąta natarcia kierunku wiatru. Dla kierunku prostopadłego względem krawędzi wydmy wyróżnia on zawirowania walcowe (stacjonarne) oraz dla skośnego — wiry śrubowe (wędrujące).

Zagadnienie zmian kierunków wiatru w płaszczyźnie poziomej przedstawiane jest jako opływanie formy od góry i z jej boków. W wyniku tego, stwierdza się skręcanie strug powietrza dośrodkowo w stronę stoku wydmy. W tym układzie, przyziemne strugi powietrza mają zasadniczo dwa kierunki: główny, zgodny z głównym przepływem powietrza i wtórny, wymuszony wpływem samej formy (J. R. L. Allen 1968, R. A. Bagnold 1954, R. K. Borówka 1976, V. Cornish 1914, L. G. Dobrin 1959, M. P. Pietrow 1948, R. P. Sharp 1963, W. Stankowski 1963, S. Wiejisow 1968, R. Więckowski 1961).

Zmienność kierunków strug powietrza, ich efektywność i zależności od kierunku i prędkości przepływu rozpatrywane z punktu widzenia dynamiki przepływów (J. R. L. Allen 1968, L. Prandtl 1956, A. E. Scheidegger 1974) i oparte na badaniach eksperymentalnych (J. R. L. Allen 1968, R. A. Bagnold 1954) potwierdzają tezę o istnieniu strefy z odmienną cyrkulacją powietrza za stokiem wydmy.

Przedstawiona wyżej koncepcja wiąże się z rozkładem kierunków wiatru w wydmach barchanowych. Wydaje się, że zmienność kierunków strug za stokiem możliwa jest również w wydmach poprzecznych, a nawet, jak to podkreśla B. Nowaczyk (1976), może mieć miejsce również w przypadku wydmy łukowych i parabolicznych. Tę zmienność wykazał już wcześniej W. Stankowski (1963), wyznaczając szereg stref odkształceń kierunku wiatru dla wydmy różnych typów.

Dotychczasowe badania, mimo stwierdzeń wskazujących na duże zróżnicowanie w rozkładzie strug wiatru, nie dają jednak jednoznacznej odpowiedzi na pytanie: jaki jest przestrzenny rozkład przyziemnych strug powietrza dla różnych kierunków wiatru. Dlatego też, celem niniejszego artykułu jest próba rekonstrukcji kierunków przyziemnych strug powietrza w niektórych warunkach aerodynamicznych, a także wykazanie związku między szerokością strefy zawirowań a prędkością wiatru oraz określenie kierunków transportu materiału i wyznaczenie miejsc akumulacji i deflacji.

Rozwiązanie tych zagadnień możliwe jest przez dokładne określenie przestrzennego rozkładu zmarszczek eolicznych i powiązanie go z roz-

kładem prędkości i kierunków wiatru. Uzyskany tą drogą obraz przestrzennego zróżnicowania strug wiatru będzie jednocześnie wyrażał kierunek transportu materiału, a także pozwoli na dokładniejsze poznanie sytuacji aerodynamicznej panującej za stokiem odwietrzonym wydmy.

Panu doc. dr hab. Karolowi Rotnickiemu wdzięczny jestem za wskazanie tematu oraz dziękuję za kierowanie pracą, cenne uwagi i przejrzenie całości tekstu. Dziękuję również dr R. K. Borówce za pomoc w trakcie prowadzonych badań terenowych oraz za liczne uwagi i dyskusje w czasie opracowywania wyników.

#### METODY BADAŃ

Badania terenowe przeprowadzono na obszarze wydym ruchomych Mierzei Łebskiej w czerwcu i lipcu 1975 r. Objęły one obserwacje dotyczące określenia rozkładu zmarszczek eolicznych, rozkładu i prędkości wiatru w strefie przypowierzchniowej za stokiem odwietrzonym wydym oraz kierunków transportu i wyznaczenia miejsc akumulacji i deflacji materiału.

W pierwszym etapie badań wyznaczone zostały stałe punkty pomiarowe, oznaczone palikami, w których wykonywano pomiary prędkości i kierunku wiatru oraz biegu i kierunku przemieszczania się zmarszczek eolicznych. Pomiary prędkości wiatru wykonano anemometrem Robinsona umieszczonym na wysokości 1 m nad powierzchnią gruntu, przy czym dla silnego wiatru czas obserwacji był krótszy i trwał 3 minuty, natomiast dla słabszego — 5 minut.

Badając aktualne warunki aerodynamiczne, wpływające na rozwój wydmy, niezbędne było przeprowadzenie badań orientacji samych zmarszczek eolicznych, będących wiernym odbiciem średniego kierunku przyziemnych strug powietrza. Pomiary ich biegu i kierunku przemieszczania się wykonane zostały busołą geologiczną zarówno na przedpołu stoku odwietrznego, jak i na płaskim stoku dowietrznym przy górnej krawędzi wydmy. Zmienność kierunków wiatru rejestrowana przez zmiany biegu zmarszczek, wywołana jest opływaniem strug powietrza wokół formy, a także jest związana, jak twierdzi R. P. Sharp (1963), ze zmianami ciśnienia atmosferycznego wywołanymi przez lokalne konfiguracje podłoża.

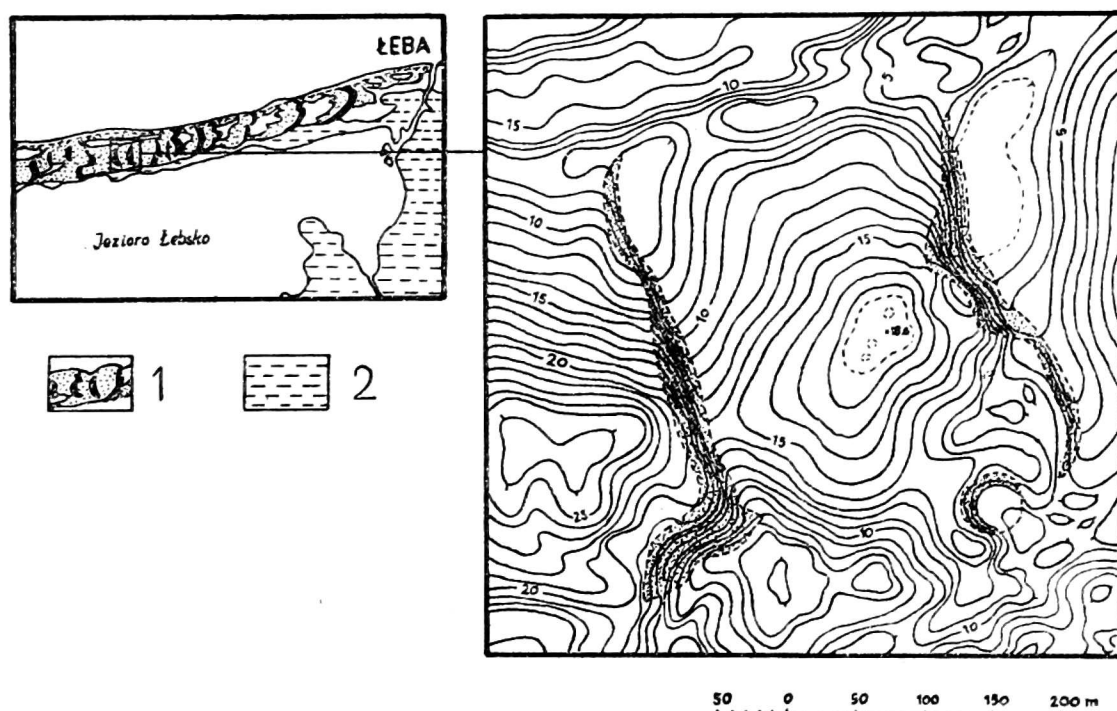
Znając stąd kierunki przyziemnych strug powietrza, a także kierunki przemieszczania się zmarszczek eolicznych, można określić jednocześnie kierunki transportu materiału; natomiast wyznaczenie miejsc oraz miąższości akumulowanego materiału i miejsc jego ubytku było możliwe przez okresowe pomiary wysokości palików umieszczonych na przedpołu stoku. Bardzo pomocne okazały się tu również okresowe kartowania stoku odwietrznego wydmy i jego przedpoła. Na ich podstawie można było bowiem

określić całościowe zmiany w rozwoju stoku i jego przedpola pod wpływem wiatrów wiejących z różnych kierunków.

Wyniki badań terenowych zostały przedstawione graficznie na mapach sytuacyjnych, odzwierciedlających zrekonstruowaną strukturę przestrzenną strug powietrza dla wiatrów wiejących z różnych kierunków.

#### CHARAKTERYSTYKA OBSZARU BADAŃ

Badania terenowe prowadzone były na obszarze wydm ruchomych Mierzei Łebskiej na przedpolach stoku odwieztrznego dwóch sąsiadujących ze sobą wydm barchanopodobnych o długości ok. 200 m i rozpiętości ramion ok. 150 m (rys. 1). Ich wysokości względne (w zależności od kie-



Rys. 1. Szkic hipsometryczny obszaru badań (wg J. Miszalskiego, 1973)

1. wydmy nadmorskie 2. dna dolin rzecznych i przybrzeżnych nizin pojeziernych

runku wiatru) wahały się od 12 do 15 m w częściach środkowych. Cechą charakterystyczną opisywanych wydm jest zróżnicowanie wysokości ramion północnych i południowych. Ramię północne jest wyższe niż południowe. Podobnie zróżnicowane są długości ramion wydm mierzone wzdłuż ich osi morfologicznej; ramię północne jest dłuższe niż południowe. Asymetryczne wydłużenie ramion północnych jest rezultatem największej częstotliwości wiatrów południowo-zachodnich (J. Miszalski, 1973). Przedstawione wydmy odznaczają się stromymi stokami odwieztrznymi o nachyleniu ok. 20 - 25°, oraz łagodnymi, wypukłymi stokami dowietrznymi o przeciętnym nachyleniu 5 - 8°.

## SKŁAD MECHANICZNY MATERIAŁU

Osady wydmowe Mierzei Łebskiej zbudowane są głównie z piasków kwarcowych, które stanowią blisko 99,5% sumy materiału piaszczystego (R. K. Borówka, 1977). Pozostałą część tworzą ziarna skaleniowe oraz minerałów ciężkich, które często tworzą oddzielne laminy zarówno na dowietrznym jak i odwietrznym stoku wydmy. W obrębie zmarszczek grupują się w obniżeniach między nimi (J. Müller, 1968).

Dominującym materiałem budującym wydme jest piasek drobnoziarnisty zawierający się w przedziale 2,00 - 3,00 phi. Stanowi on ok. 85,8%. Na piasek średnioziarnisty przypada 13,6% a pozostałą część tworzy piasek bardzo drobnoziarnisty (ok. 0,6%) i gruboziarnisty (0,01%). Średnia średnica tego materiału wynosi 2,31 phi, natomiast wskaźnik wysortowania materiału 0,262 phi (R. K. Borówka, 1977). Niska jego wartość charakteryzuje materiał bardzo dobrze wysortowany.

Tabela 1 – Table 1

Procentowy skład materiału piaszczystego Wydm Łebskich (według R. K. Borówki, 1977)

Percentage of grain size composition of sand material of Łeba Dunes (after R. K. Borówka, 1977)

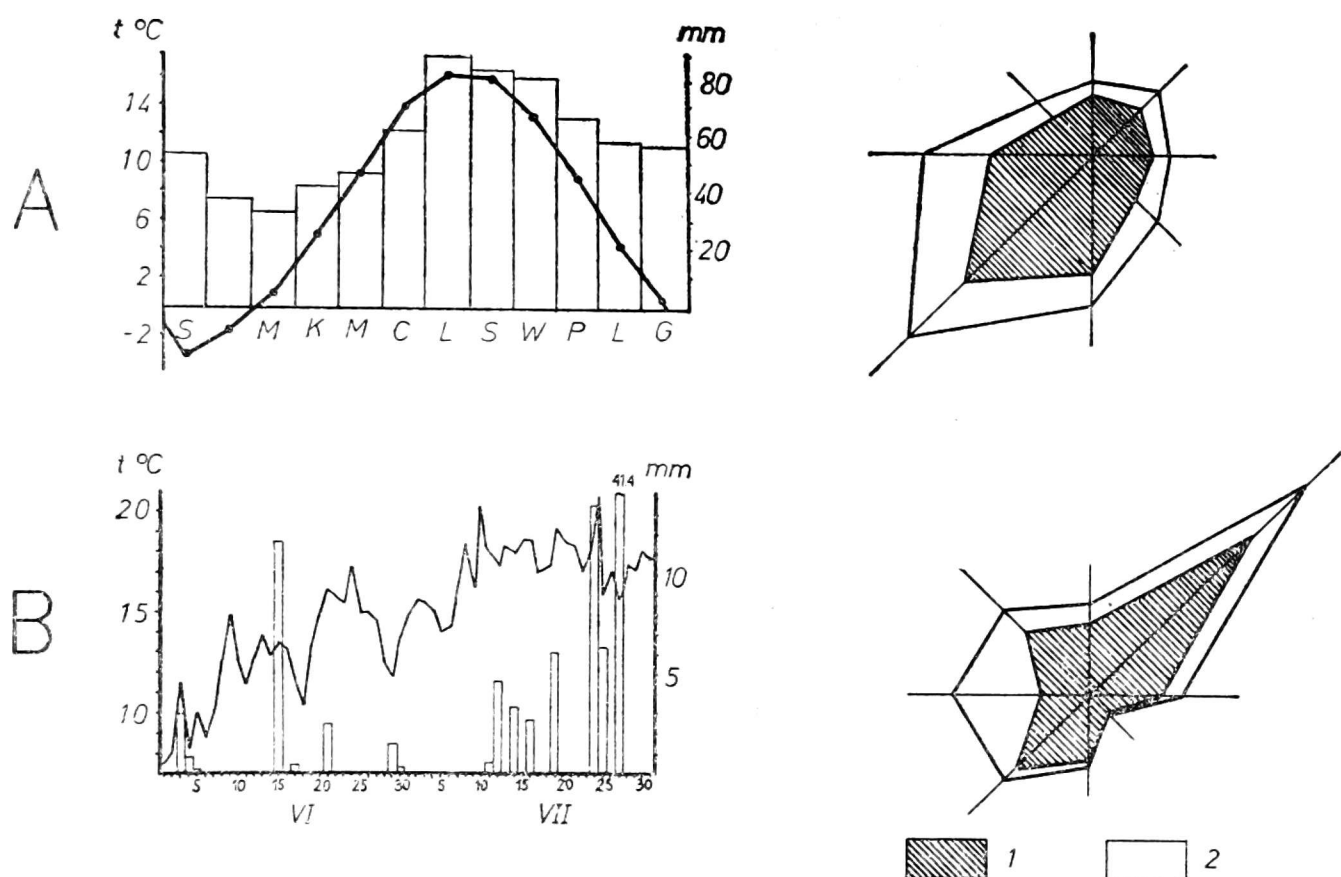
frakcja podstawowa basal fraction	przedziały phi phi interval	%
piasek gruboziarnisty coarse-grained sand	1,00	0,01
	1,00 - 1,25	0,07
piasek średnioziarnisty medium-grained sand	1,25 - 1,50	0,34
	1,50 - 1,75	4,58
	1,75 - 2,00	8,57
	2,00 - 2,25	17,53
piasek drobnoziarnisty fine-grained sand	2,25 - 2,50	48,53
	2,50 - 2,75	17,07
	2,75 - 3,00	2,64
piasek bardzo drobnoziarnisty very fine-grained sand	3,00 - 3,25	0,50
	3,25	0,10

wartości średnie z 40 prób  
mean values of 40 samples

## WARUNKI POGODOWE

Warunki pogodowe mają istotny wpływ na przebieg procesów eolicznych. Najważniejszymi czynnikami są tutaj temperatura powietrza, wielkość opadów oraz występowanie określonego reżimu wiatrów. Podstawą dla ich określenia były dane stacji IMiGW w Łebie za okres 1951 - 1970 oraz własne pomiary wykonane w czerwcu i lipcu 1975 r.

Średnia roczna temperatura powietrza w okresie 1951 - 1970 wynosiła 7,1°C, natomiast jej wartości ekstremalne przypadają na lipiec 16,3°C

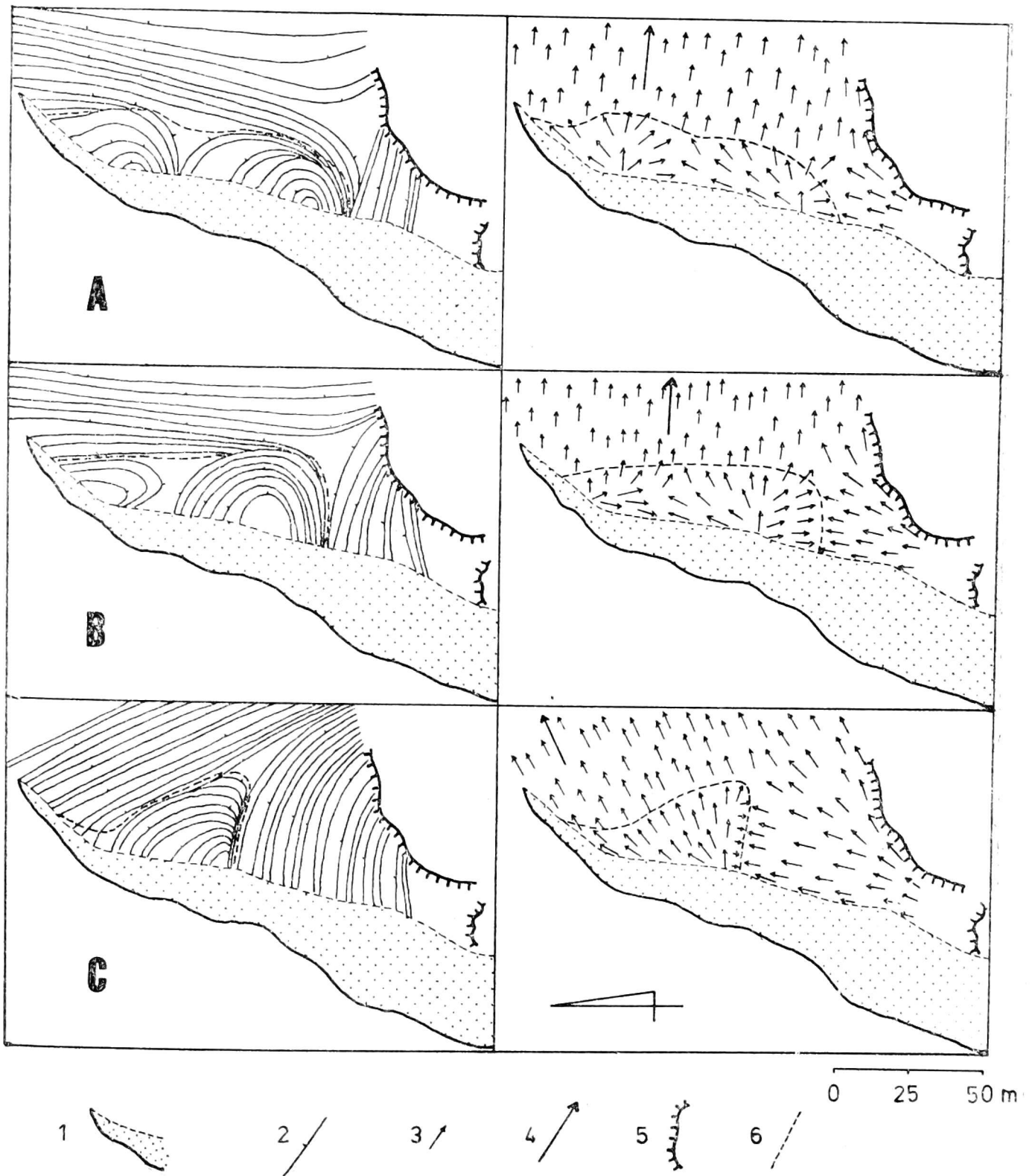


Rys. 2. Przebieg wartości wybranych elementów meteorologicznych dla obszaru wydm nadmorskich Mierzei Łebskiej (danej stacji IMiGW Łeba)  
 A. w okresie 1951-1970 B. w czerwcu i lipcu 1975 prędkość wiatru 1. 0-5 m/s  
 2. ponad 5 m/s

i styczeń  $-3,4^{\circ}\text{C}$ . Dokładny ich przebieg ilustruje rysunek 2. Dla całego obszaru badań rozkład częstotliwości kierunków wskazuje na znaczną przewagę wiatrów SW — 25,8%, W — 16,7% i S — 15,4%. Wiatry z tych kierunków mają jednocześnie największy odsetek wiatrów z prędkościami powyżej 10 m/s, a zatem wiatrów mających największe znaczenie morfologiczne. Średnia prędkość wiatru dla obszaru wydm nadmorskich za okres 1951 - 1970 wynosi 4,3 m/s.

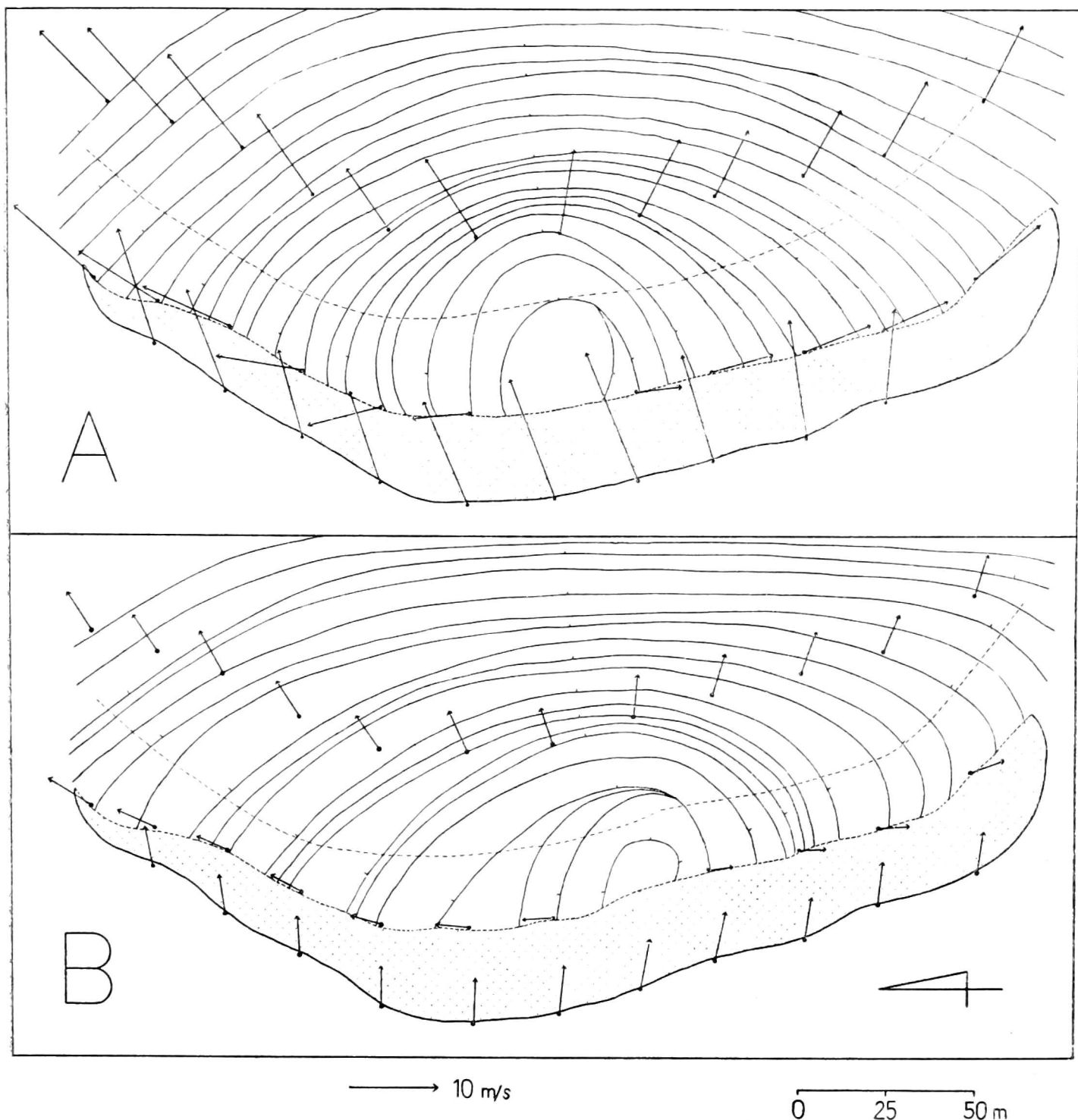
Największe opady na obszarze Mierzei Łebskiej przypadają na lipiec, sierpień i wrzesień, przy wiatrach SW, W, i NW (J. Miszalski, 1973). Ich roczna wielkość w okresie 1951 - 1970 wynosiła 760 mm. Opady, jak to podkreśla W. Stankowski (1963) „nie eliminują działalności eolicznej, lecz jedynie ją utrudniają i ograniczają”, stąd też można obserwować działanie tych procesów nawet na piaskach wilgotnych.

Warunki klimatyczne w okresie badań terenowych, tzn. w czerwcu i lipcu 1975 w zasadzie odbiegały od poziomu średniego okresu 1951 - 1970. Niższa była temperatura czerwca —  $12,7^{\circ}\text{C}$ , natomiast wyższa lipca —  $17,3^{\circ}\text{C}$  (za dwudziestolecie odpowiednio  $14,1^{\circ}\text{C}$  i  $16,3^{\circ}\text{C}$ ). Podobnie zanotowano niskie ilości opadów: w czerwcu tylko 20,9 mm, w lipcu 78,3 mm, gdy tymczasem średnie ich ilości w tych miesiącach okresu 1951 - 1970 wynosiły 61,5 mm i 90,0 mm. Największe jednak różnice zanotowano



Ryc. 3. Orientacja zmarszczek i kierunki przemieszczania się przyziemnych strug powietrza dla wiatrów zachodnich o prędkości A. 6,25 m/s B. 8,5 m/s C. 10 m/s  
 1 — stok odwietrzny wydmy, 2 — bieg i kierunek przemieszczania się zmarszczek eolicznych, 3 — kierunek przyziemnych strug powietrza, 4 — główny kierunek wiatru, 5 — krawędź ostańca deflacyjnego, 6 — granica strefy zawirowań strug powietrza

w rozkładzie wiatrów. Blisko 40% wiatrów było z kierunków NE i E. Tak duży udział wiatrów kontynentalnych o tej porze roku spowodował zapewne różnice w wysokości temperatury, a szczególnie w ilości opadów w stosunku do lat poprzednich.



Rys. 4. Orientacja zmarszczek i kierunki przemieszczania się przyziemnych strug powietrza dla wiatrów zachodnich o prędkości A. 12 m/s B. 4,5 m/s

1 — stok odwietrzny wydmy, 2 — bieg i kierunek przemieszczania się zmarszczek eolicznych, 3 — kierunek przyziemnych strug powietrza, 4 — główny kierunek wiatru, 5 — krawędź ostańca deflacyjnego, 6 — granica strefy zawirowań strug powietrza

#### CHARAKTERYSTYKA STRUKTURY PRZESTRZENNEJ PRZYZIEMNYCH STRUG POWIETRZA ZA STOKIEM ODWIETRZNYM WYDMY

Bezpośrednim odbiciem zmian w rozkładzie przyziemnych strug powietrza są zmarszczki eoliczne. Sposób ich ułożenia i kierunek przemieszczania się będzie odpowiadał rozkładowi kierunków wiatru w jego strefie przypowierzchniowej. Z przeprowadzonych badań na obszarze wydmy ruchomej Mierzei Łebskiej wynika jasno, że za stoki odwietrzny wydmy występuje strefa zaburzeń kierunków strug powie-



trza wywołana samą formą. Za nią, a także na płaskim stoku dowietrznym przed górną krawędzią wydmy, kierunki strug powietrza są zgodne z głównym kierunkiem wiatru.

Niewątpliwie, największe zaburzenia w rozkładzie strug przyziemnych wywołane są przez wiatry wiejące po stoku dowietrznym, prostopadle do jego krawędzi. Na obszarze wydm łebskich są to wiatry zachodnie. One też stanowią główny przedmiot rozważań niniejszej pracy. Pozostałe kierunki, jak to zostanie dalej wyjaśnione, mają znaczenie wyłącznie przekształcające i hamujące rozwój wydmy.

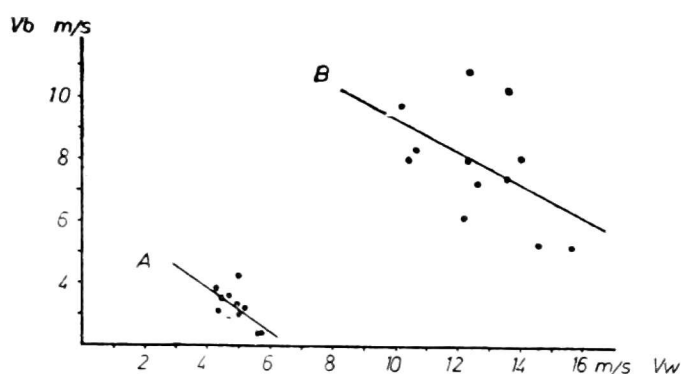
Rysunki 3 i 4 przedstawiają rozkład przestrzenny strug i kierunki ich przemieszczania się dla wiatrów zachodnich wiejących z różnymi prędkościami. We wszystkich pomierzonych sytuacjach na obu wydmach rozkład przyziemnych strug, związanych z zachodnim kierunkiem wiatru, wskazuje na odśrodkowy spływ strumieni znad stoku wydmy. Najlepiej jest on widoczny za wydumą wschodnią (rys. 4). Rozkład strug powietrza za wydumą zachodnią (rys. 3) jest, w jej południowej części, zaburzony wpływem ostańca deflacyjnego. Między nim a stokiem wydmy wytwarza się bowiem strefa o charakterze tunelu aerodynamicznego, w której następuje zwiększenie prędkości wiatru i reorientacja kierunków strug. Mimo to, za środkową częścią stoku odwietrznego widoczna jest główna struktura kierunków strug, charakterystyczna dla tego typu form.

Odśrodkowy spływ powietrza charakterystyczny jest dla wszystkich pomierzonych prędkości wiatru, z tym, że wielkość spływu i szerokość strefy w której następuje zaburzony przepływ powietrza zwiększa się wraz ze zwiększaniem się prędkości wiatru.

Pomiary kierunku i prędkości wiatru przy powierzchni ziemi wykonane w niektórych punktach, potwierdzają rozkład strug przyziemnych uzyskany na podstawie analizy rozkładu zmarszczek eolicznych. Przedstawione na rysunku 4 A-B wskazują, że maksymalne prędkości występują na krawędzi górnej wydmy, natomiast minimalne przy dolnej. O ile jednak na krawędzi górnej prędkości wzrastają w stronę kulminacji w części środkowej, tak przy dolnej maleją. W części środkowej wydmy, występują więc obszary maksymalnych (na krawędzi górnej) i przy dolnej minimalnych prędkości.

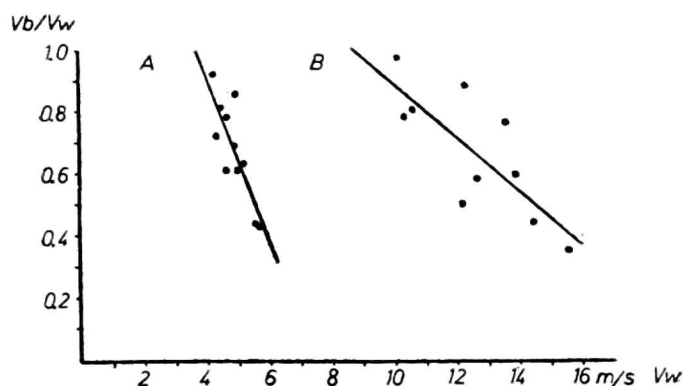
Relację między prędkością wiatru na obu krawędziach wydmy przedstawiono w postaci zależności, określonych równaniem regresji (rys. 5). Dla wysokich prędkości ( $Vw_{\text{sr.}} = 12$  m/s) zależność ta ma postać:  $Vb = -0,524 Vw + 14,588$ , dla niskich ( $Vw_{\text{sr.}} = 4,5$  m/s)  $Vb = -0,717 Vw + 6,754$  gdzie  $Vw$  — prędkość wiatru na krawędzi górnej,  $Vb$  — prędkość wiatru na krawędzi dolnej.

Stosunek prędkości wiatru na krawędzi dolnej do prędkości na górnej ( $Vb/Vw$ ) zawiera się w granicach od 0,35 do 0,97 dla prędkości wiatru 12 m/s i od 0,43 do 0,92 dla  $Vw = 4,5$  m/s. Wartości te w odniesieniu do odpowiadających im prędkości wiatru przedstawiają równania:  $Vb/Vw =$



Rys. 5. Związek między prędkością wiatru na krawędzi górnej ( $V_w$ ) a prędkością na krawędzi dolnej ( $V_b$ )

A. dla średniej prędkości wiatru 4,5 m/s  
B. dla średniej prędkości wiatru 12 m/s



Rys. 6. Związek między prędkością wiatru na krawędzi górnej ( $V_w$ ) a ilorazem  $V_b/V_w$

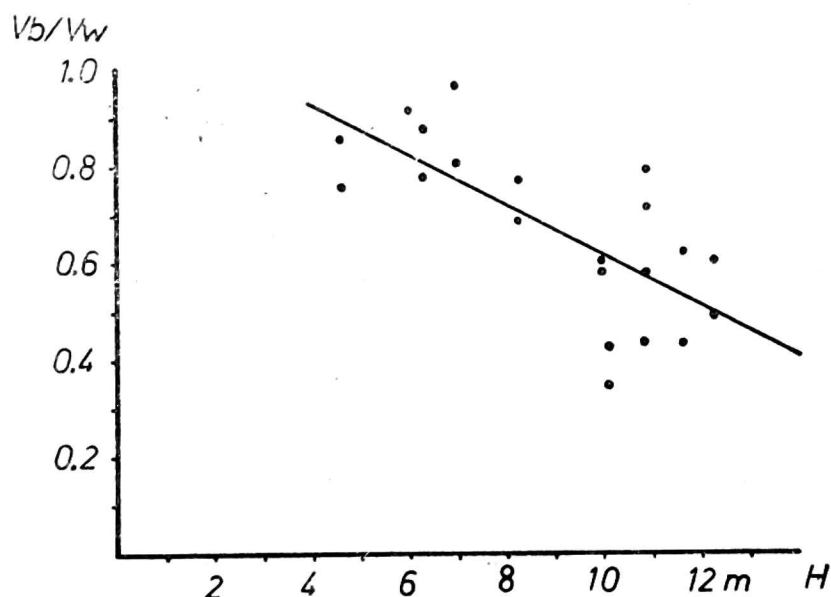
średnia prędkość wiatru A. 4,5 m/s B. 12 m/s

$= -0,087 V_w + 1,754$  i  $V_b/V_w = -0,272 V_w + 2$  (rys. 6). Średnia wartość  $V_b/V_w$  dla wysokich prędkości wynosi 0,64 natomiast dla niskich 0,67; stąd też można napisać, że różnica prędkości na obu krawędziach wydmy wynosi analogicznie

$$V_b = 0,64 V_w \quad \text{i} \quad V_b = 0,67 V_w$$

Jednak, jak się wydaje, wielkość współczynnika  $V_b/V_w$  w przekroju całej wydmy zależy przede wszystkim od jej wysokości. Tę zależność przedstawia równanie  $V_b/V_w = -0,051 H + 1,129$  (rys. 7). Przedstawione równanie wskazuje, że istotnie największe różnice wysokości wydmy powodują największe różnice w prędkości wiatru na obu krawędziach.

Za stokiem odwietrznym obu badanych wydmy nie stwierdzono wyraźnych śladów wskazujących na przeciwny (względem głównego kierunku przepływu) kierunek strug powietrza. W świetle powyższego dyskusyjne staje się twierdzenie o istnieniu za stokiem zawirowań powie-



Rys. 7. Związek między wysokością wydmy ( $H$ ) a ilorazem prędkości ( $V_b/V_w$ )

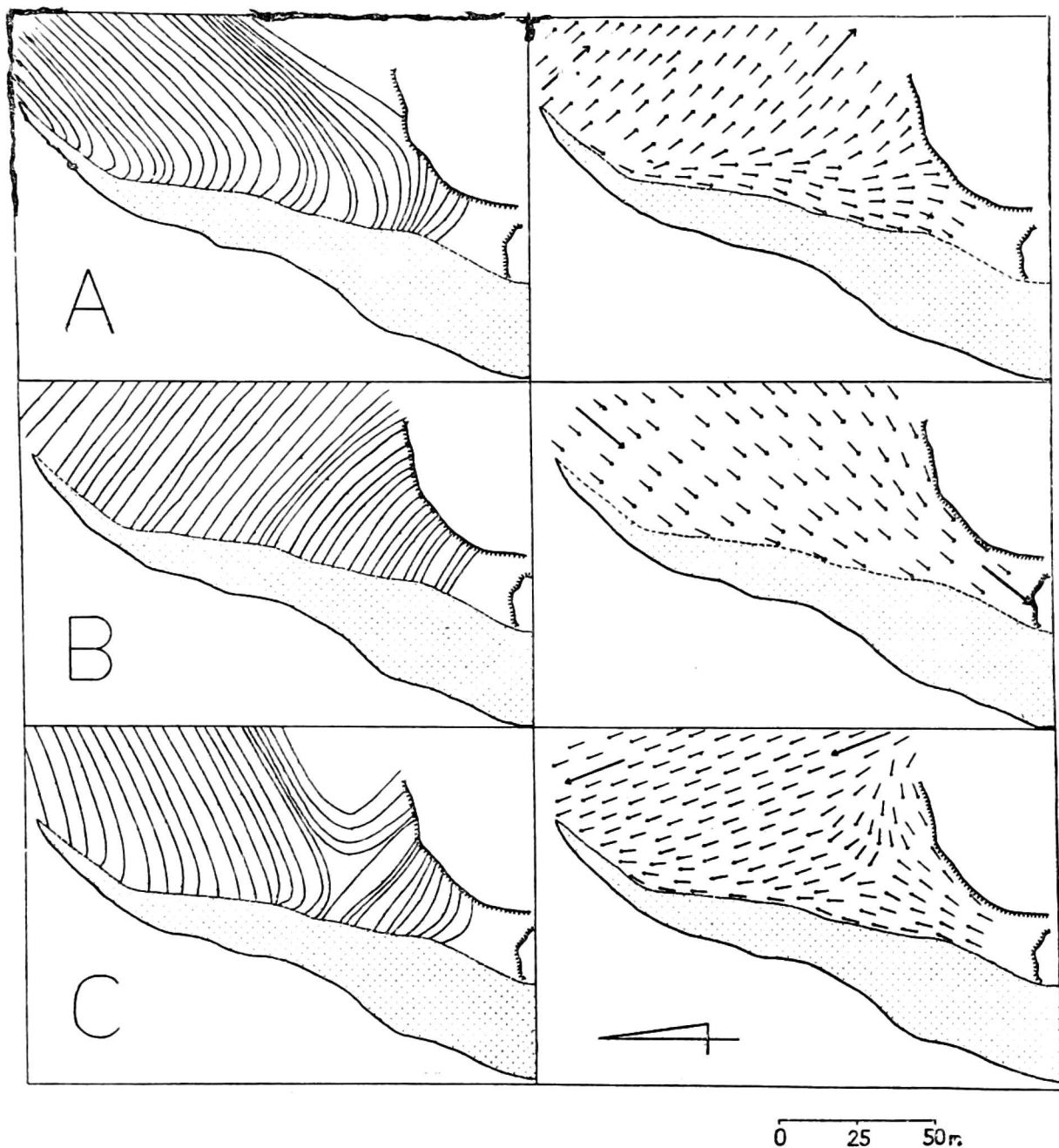
trza z powrotnymi kierunkami strug wiatru (R. A. Bagnold 1954, V. Cornish 1914, M. R. Pietrow 1948, R. P. Sharp 1963, W. Stankowski 1963, S. Wiejisow 1966 i in.). Świadczy o tym sam rozkład zmarszczek oraz kierunki i prędkości wiatru (rys. 3 - 4).

Wydaje się, że zagadnienie prądów powrotnych istniejących za stokiem, należy rozpatrywać przede wszystkim z punktu widzenia charakteru zawirowań. W koncepcji R. A. Bagnolda (1954), a także V. Cornisha (1914), M. P. Pietrowa (1948), W. Stankowskiego (1963), S. Wiejisowa (1966) i in., model zawirowania powietrza i związany z tym kierunek strug przyziemnych jest niezmiernie statyczny, w którym na całej powierzchni stoku odwietrznego wydmy rozwijają się regularne wiry z występującymi prądami powrotnymi. W komórce wirowej tymczasem, jak to podkreśla J. R. L. Allen (1968) charakter zawirowań i związany z tym przebieg strug powietrza, zależy przede wszystkim od kąta natarcia kierunku wiatru. Stąd też, dla wiatrów wiejących prostopadle do krawędzi wydmy zawirowania powietrza mają charakter wiru walcowego, natomiast skośny kierunek wiatru powoduje śrubowy przepływ strug powietrza (J. R. L. Allen, 1968).

Przedstawiony powyżej (rys. 3, 4) rozkład strug powietrza za stokiem wydmy spowodowany jest zatem, śrubowym przepływem powietrza gdzie ten charakter zawirowań wymuszony jest ukształtowaniem stoku wydmy; stąd też, brak jest kierunków przemieszczania się zmarszczek w stronę stoku. Połączenie wirów śrubowych przebiegających po stoku wzdłuż ramion wydmy w konsekwencji daje obraz odśrodkowego spływu powietrza. Schemat takiego rozkładu będzie analogiczny dla wszystkich form, zbliżonych kształtem do badanej wydmy. Potwierdzeniem tego jest podobny rozkład strug dla zmarszczek półksiężycowatych i łańcuchowych (lunate ripple, catenary ripple) przedstawiony przez J. R. L. Allena (1968, 1969).

Wiatry wiejące po stoku dowietrznym skośnie do jego krawędzi (reprezentowane przez wiatry NW) tworzą zasadniczo dwa kierunki strug wzajemnie się uzupełniających. Jeden z nich, główny, odpowiada dominującemu kierunkowi wiatru, natomiast drugi system, genetycznie związany z opływaniem formy, przebiega wzdłuż stoku wydmy (rys. 8A, 9B). Odpowiadające temu kierunkowi wiatru strugi powietrza spływające ze stoku, ze względu na skośny kierunek wiatru mają charakter wirów śrubowych (J. R. L. Allen, 1968), wiążąc się przy dolnej krawędzi wydmy ze strugami opływającymi wydme. Siła strumienia wtórnego, jak uważa S. Wiejisow (1968) będzie się zwiększać wraz ze zwiększaniem się kąta natarcia głównego kierunku wiatru. Rozkład zmarszczek reprezentujących ten kierunek wiatru, całkowicie odpowiada przedstawionej strukturze i zgodny jest z rozkładem uzyskanym przez R. K. Borówkę (1976), M. P. Pietrowa (1948), R. P. Sharpa (1963) i S. Wiejisowa (1966, 1968).

Podczas wiania wiatrów z tych kierunków następuje wywiewanie

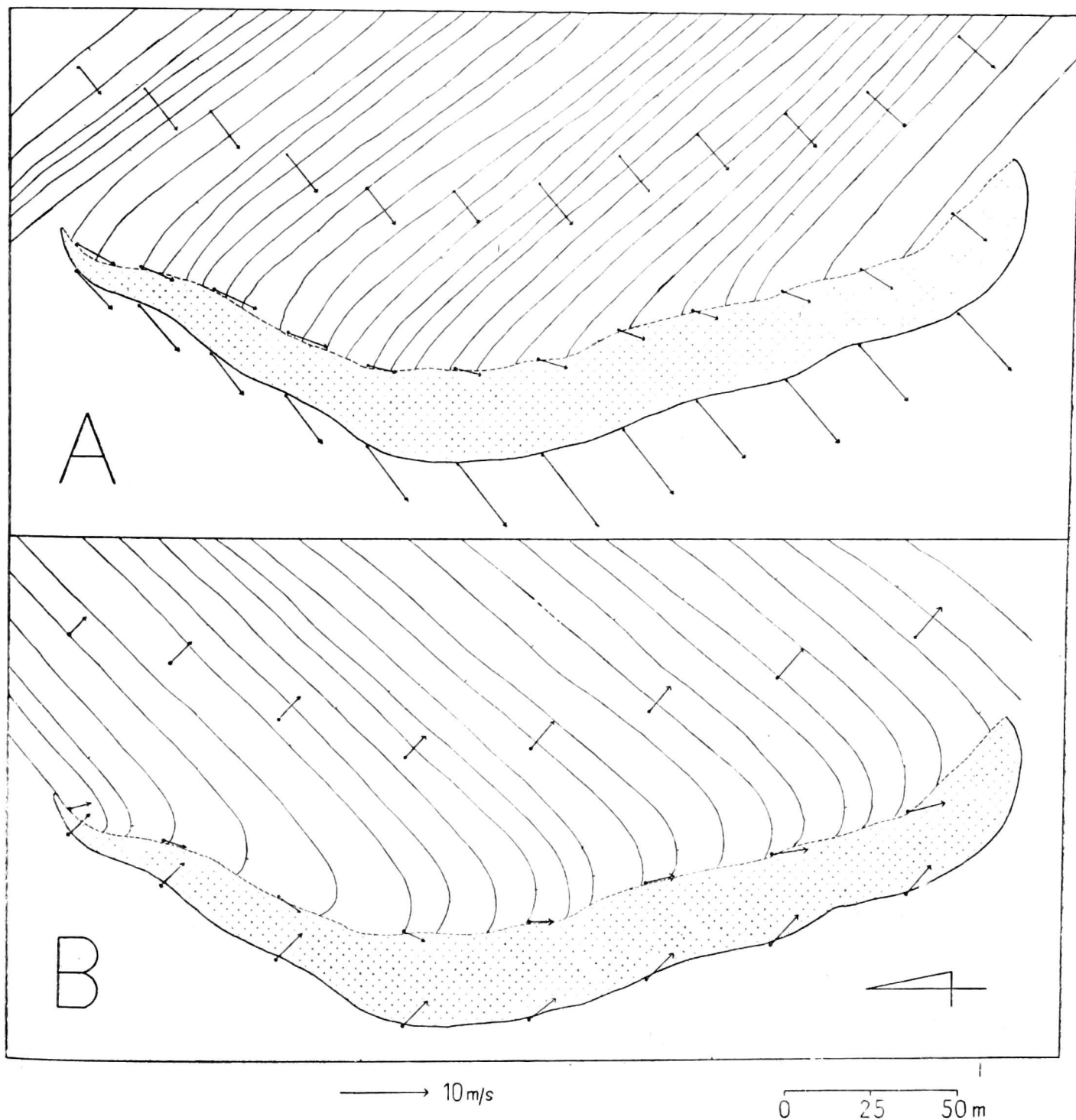


Rys. 8. Orientacja zmarszczek i kierunki przemieszczania się przyziemnych strug powietrza dla wiatrów A. NW — 10 m/s B. NE — 4 m/c C. SSE — 4 m/s

1 — stok odwietrzny wydmy, 2 — bieg i kierunek przemieszczania się zmarszczek eolicznych, 3 — kierunek przyziemnych strug powietrza, 4 — główny kierunek wiatru, 5 — krawędź ostańca deflacyjnego, 6 — granica strefy zawirowań strug powietrza

materiału z powierzchni stoku, co w konsekwencji może doprowadzić do zmniejszenia się tempa przemieszczania wydmy. Intensywność tego procesu będzie zależała od prędkości wiatru (R. K. Borówka 1976, S. Wiejśow 1966).

Przy wiatrach wiejących skośnie w stronę stoku wydmy (wiatry NE i SE), zmarszczki przemieszczają się równolegle na całej powierzchni w tym kierunku (rys. 8B, 9A). Przy samej krawędzi wydmy, ze względu na istnienie przeszkody jaką stanowi stok, następuje ich skrócenie o ok.  $45^\circ$  w stosunku do głównego kierunku. Wykonane pomiary prędkości wia-



Rys. 9. Orientacja zmarszczek i kierunki przemieszczania się przyziemnych strug powietrza dla wiatrów A. NE — 9 m/s B. NW — 4 m/s

1 — stok odwietrzny wydmy, 2 — bieg i kierunek przemieszczania się zmarszczek eolicznych, 3 — kierunek przyziemnych strug powietrza, 4 — główny kierunek wiatru, 5 — krawędź ostańca deflacyjnego, 6 — granica strefy zawirowań strug powietrza

tru wskazują, że maksymalne prędkości występują na krawędzi górnej wydmy, natomiast minimalne przy dolnej. Związane jest to ze spiętrzeniem się strug przed przeszkodą (L. Prandtl, 1956). Wynikiem spiętrzenia jest wzrost ciśnienia na krawędzi dolnej wydmy o ok. 1-2 mb (hPa) w zależności od prędkości wiatru.

Przedstawiony wyżej rozkład kierunków przyziemnych strug powietrza, wykazuje wyraźną zależność od kierunku głównego przepływu. Prze-

prorowadzone pomiary orientacji zmarszczek eolicznych wykazały bowiem dużą zgodność azymutów wektorów z kierunkami odpowiadających im wiatrów. Podstawową metodą w określeniu kierunków transportu materiału jest analiza rozkładu zmarszczek eolicznych. Wykorzystuje ona bowiem, przede wszystkim te cechy zmarszczek, które dają informacje o kierunku przepływu wiatru. Wykonanie pomiarów dla tych celów wymaga jednak starannego określenia miejsc, a także równomiernego rozmieszczenia punktów pomiarowych ze względu na porównywalność materiału dowodowego zebranego w różnych okresach i sytuacjach aerodynamicznych.

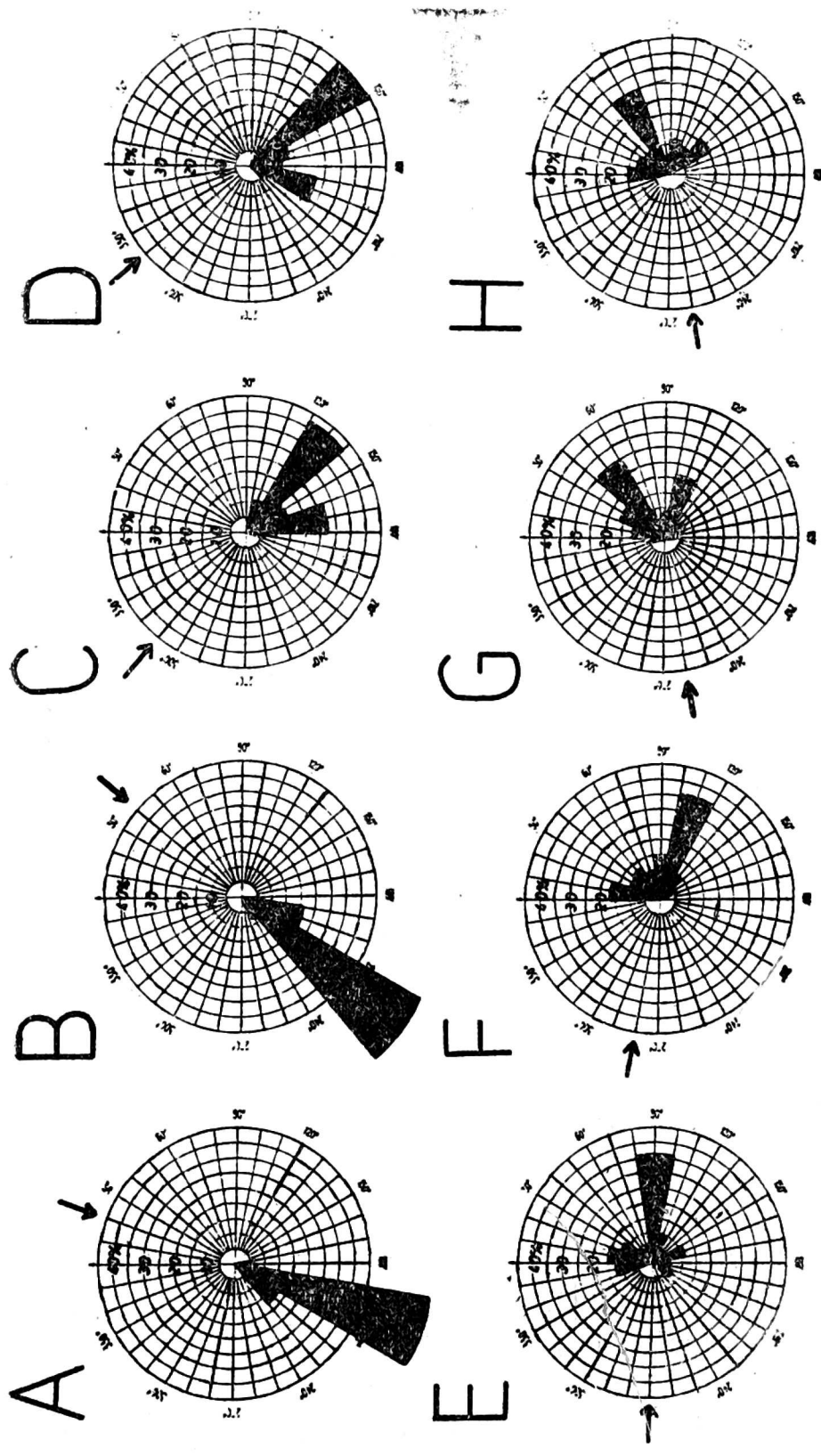
Wyniki tych pomiarów dokonane na płaszczyźnie, odwzorowane są na siatce równopowierzchniowej w postaci róży kierunków, na których poszczególne wartości zaznaczone są w przedziałach dwudziestopniowych. Rozkład kierunków strug powietrza za stokiem odwiecznym przedstawiony w tej formie, wykazuje kilka charakterystycznych, powtarzających się typów układów (rys. 10). Najprostszym typem jest układ unimodalny, odpowiadający wiatrom NE (oraz prawdopodobnie SE), skierowanym skośnie w stronę stoku (rys. 10 A-B). W tym przypadku główny kierunek strug powietrza stanowi ponad 70% sumy wszystkich kierunków. Pozostała część odpowiada strugom wiejącym już po stoku wydmy. We wszystkich tych przypadkach, obserwowane maksimum rozkładu strug odpowiada głównemu kierunkowi wiatru.

Bimodalne układy kierunków reprezentują północno-zachodnie (i prawdopodobnie południowo-zachodnie) kierunki wiatrów (rys. 10 C-D), gdzie jeden kierunek pokrywa się z głównym przepływem powietrza, natomiast drugi odpowiada kierunkom związanym z opływaniem ramienia wydmy.

Trzecim typem jest polimodalny rozkład kierunków, charakterystyczny dla wiatrów zachodnich (rys. 10 E-H), zawarty w przedziale  $220^\circ$  (od  $350^\circ$  przez  $0^\circ$  do  $210^\circ$ ).

Przedstawiona wyżej analiza kierunków przyziemnych strug wiatru w wydmach współcześnie rozwijających się, może stanowić materiał porównawczy z rozkładem kierunków upadów lamin w wydmach kopalnych. Jak bowiem należy sądzić, układ zmarszczek na powierzchni w znacznym stopniu będzie korelował ze strukturą wewnętrzną wydmy. W interesującym nas przypadku wylania się problem: czy i w jakim stopniu zachowuje się warstwowanie na obszarze przedpola wydmy, oraz czy ewentualny rozkład kierunków upadów lamin odpowiada powyższej strukturze wiatru.

Dotychczasowe badania nie dostarczają jednak informacji na ten temat. Należy jednak przypuszczać, że istnieje zależność między rozkładem kierunków strug powietrza a upadem lamin, oraz drobnieniem ziarna wydmy za stokiem. Pewne argumenty, przemawiające na korzyść po-



Rys. 10. Rozkład kierunków przyziemnych strug powietrza dla wiatrów A. NE — 4 m/s B. NE — 9 m/s C. NW — 4 m/s  
 D. NW — 10 m/s E. W — 8.5 m/s F. W — 6.25 m/s G. W — 12 m/s H. W — 10 m/s

wyższej hipotezy przedstawili już K. Rotnicki (1970) oraz B. Nowaczyk (1976).

Wysunięte tu sugestie, należy jednak sprawdzić i udokumentować przeprowadzając badania zarówno zmienności uziarnienia jak i kierunków upadów lamin w wydmach kopalnych o podobnym kształcie.

#### ZAGADNIENIE SZEROKOŚCI STREFY CYRKULACJI W ZALEŻNOŚCI OD KIERUNKU I PRĘDKOŚCI WIATRU

Określenie szerokości strefy zawirowań za stokiem odwietrznym jest zagadnieniem dość skomplikowanym, lecz jednocześnie bardzo istotnym w określeniu warunków aerodynamicznych panujących po stronie odwietrznej. Istnienie tej strefy podkreśla się w badaniach teoretycznych i eksperymentalnych (I. R. L. Allen 1968, R. A. Bagnold 1954, L. Prandtl 1956, A. E. Scheidegger 1974), wiążąc je głównie z oderwaniem strumienia od powierzchni i w konsekwencji powstaniem komórki wirowej.

W dotychczasowych badaniach dotyczących wydm, szerokość strefy cyrkulacji nie była przedstawiana. Pewne stwierdzenia ogólne wniesione przez R. A. Bagnolda (1954), R. K. Borówkę (1976), V. Cornisha (1914), M. P. Pietrowa (1948), R. P. Sharpa (1963), W. Stankowskiego (1963) i S. Wiejisowa (1968) wskazują wyłącznie na jej istnienie, nie określają jednak żadnych zależności w stosunku do prędkości wiatru oraz wysokości formy. Jedynie J. R. L. Allen (1968, 1969) w badaniach nad zmarszczkami prądowymi przedstawia pewne zależności określające długość komórki wirowej w stosunku do prędkości przepływu, głębokości oraz wysokości zmarszczki.

W określeniu szerokości strefy przyjęto kryterium zmiany orientacji azymutu zmarszczek eolicznych o  $90^\circ$  i więcej stopni w stosunku do głównego przepływu powietrza. Analizie poddano tylko sytuacje związane z zachodnim kierunkiem wiatru, natomiast zmiany orientacji zmarszczek związane z pozostałymi kierunkami potraktowano jako mniej istotne, wychodząc z założenia, że są one niewielkie (jak np. dla wiatrów NE) lub nie decydują o rozmiarach całej strefy, lecz mają wpływ na zmiany kierunków tylko w samej strefie ramienia wydmy (wiatry NW).

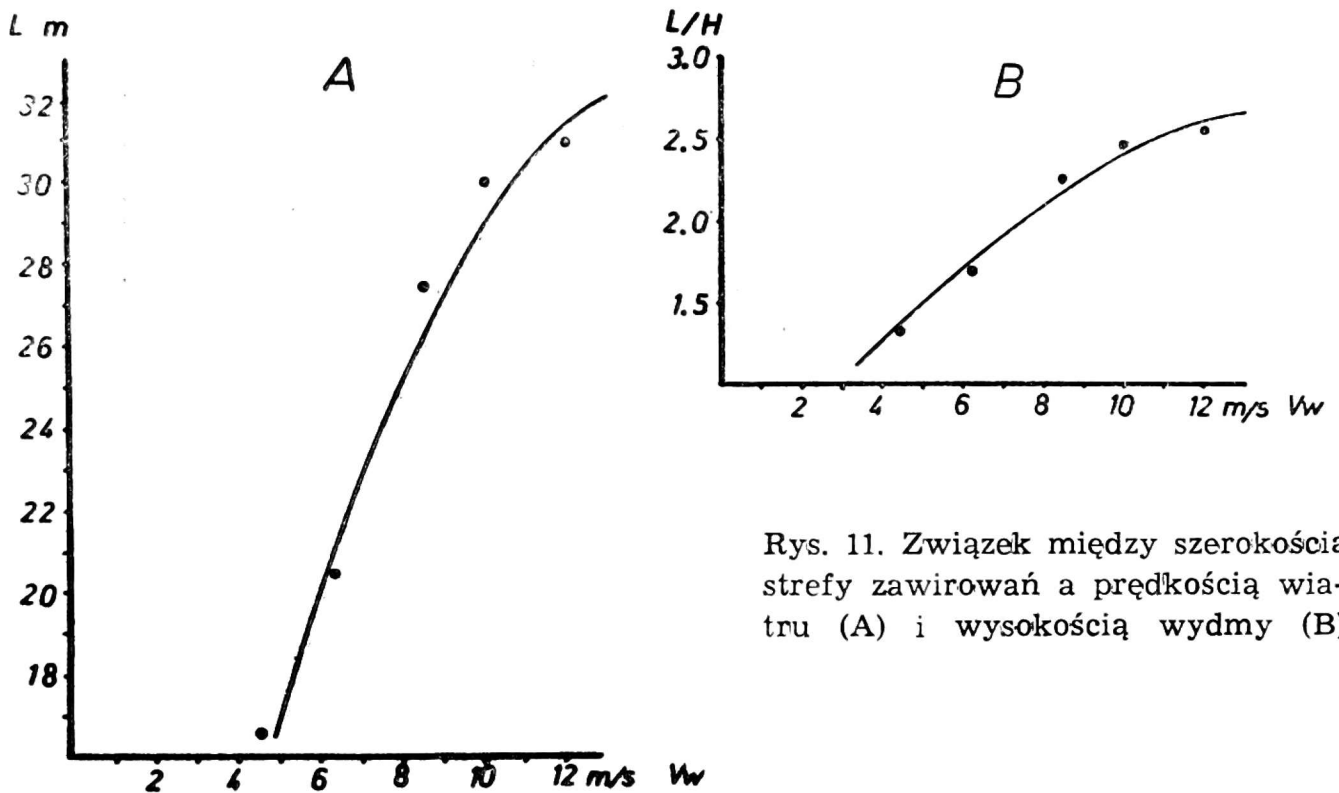
Szerokość strefy cyrkulacji dla poszczególnych prędkości wiatru otrzymano z pomiaru odległości między dolną krawędzią stoku a linią graniczną wykreśloną uprzednio na planie (oznaczającą zmiany azymutu zmarszczek eolicznych). Ten związek przedstawiono w postaci zależności (rys. 11 A) w przedziałach badanych prędkości.

Określa ją równanie

$$L = 5,916 V w^{0,69} \quad (1)$$

Wykładniczy charakter krzywej, a zatem mniejszy przyrost wartości  $L$  powyżej prędkości wiatru 10 - 12 m/s wiąże się z ogólnymi prawidłami





Rys. 11. Związek między szerokością strefy zawirowań a prędkością wiatru (A) i wysokością wydmy (B)

ruchu turbulencyjnego za przeszkodą (L. Prandtl, 1956). W miarę oddalania się od niej, zmniejsza się jej wpływ, a co za tym idzie, następować będzie wygasanie zawirowań powietrza związanych z występowaniem przeszkody.

Powyższy wzór (1) wskazuje wyłącznie, że szerokość strefy jest proporcjonalna do prędkości wiatru. Należy jednak przypuszczać, że jest ona również ściśle związana z wysokością formy za którą powstaje. Tę zależność przedstawia (rys. 11 B) równanie:

$$L/H = 0,494 V_w^{0,69} \quad (2)$$

po przekształceniu

$$L = 0,494 H V_w^{0,69} \quad (3)$$

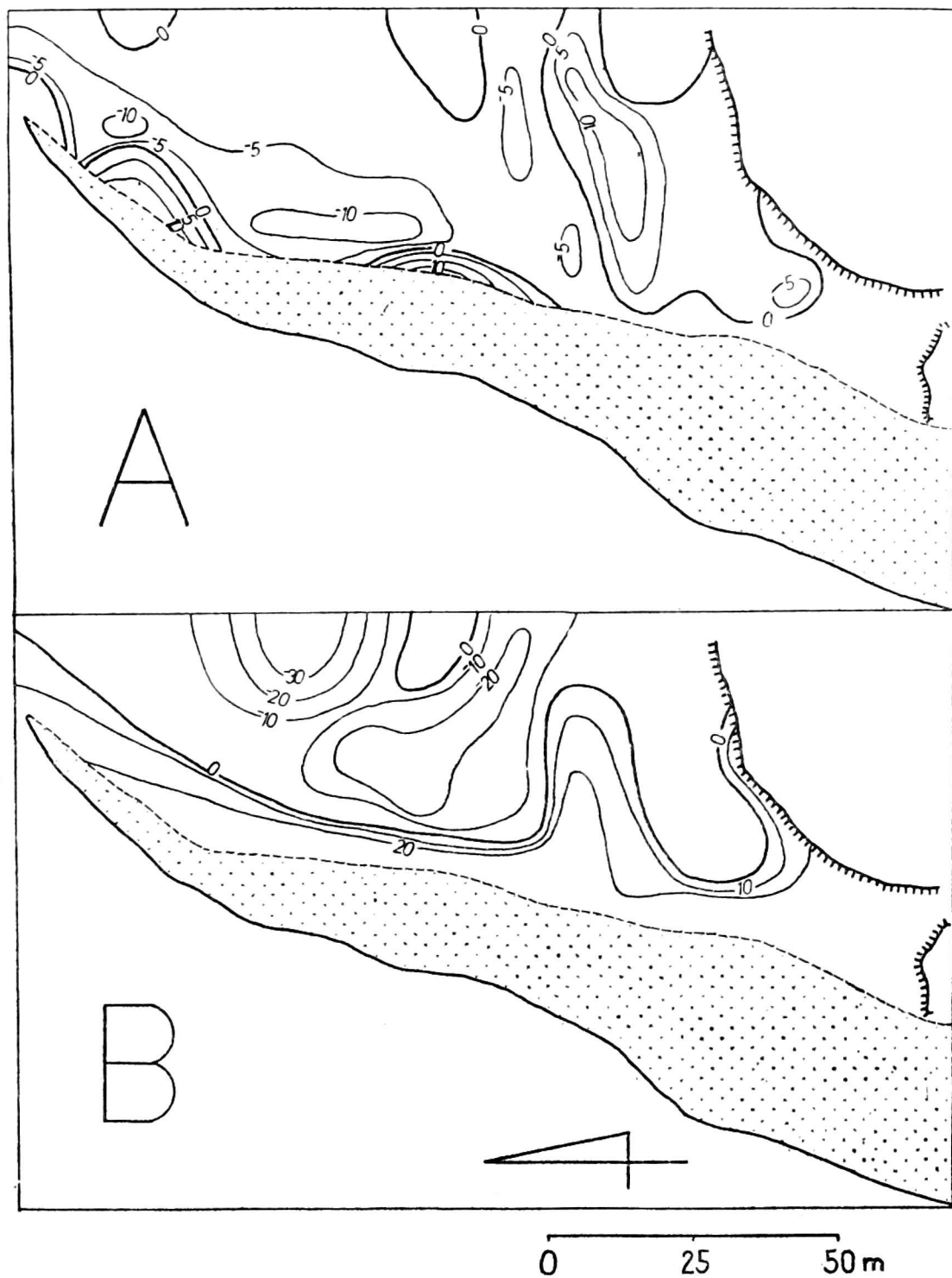
gdzie  $L$  — szerokość strefy cyrkulacji,  $H$  — wysokość wydmy, a  $V_w$  — prędkość wiatru na krawędzi górnej.

Porównanie wzorów (1) i (3) wskazuje, że szerokość strefy cyrkulacji zależy od 0,69 potęgi prędkości wiatru oraz od 0,494 wysokości wydmy.

Przedstawiona zależność odnosi się jednak wyłącznie do powyższej formy o wysokości 12 m, stąd też, uogólnioną zależność szerokości strefy od prędkości wiatru i wysokości można przeprowadzić dokonując pomiarów w obrębie wydmy różnych kształtów i wysokości.

#### AKUMULACJA I DEFLACJA MATERIAŁU ZA STOKIEM ODWIETRZNYM WYDMY

Omawiane w tej pracy kwestie wielkości i charakteru przepływu strug powietrza za stokiem wydmy są istotne nie tylko dla samej analizy warunków aerodynamicznych, lecz także dla określenia zmian w rozwoju



Rys. 12. Akumulacja i deflacja materiału za stokiem odwietrznym wydmy A. w okresie 30 VI - 1 VIII B. w okresie 1 VIII - 17 XI

rzeźby eolicznej. Zmienność tych procesów jest spowodowana częstymi zmianami kierunków i prędkości wiatru transportującego materiał. W ich wyniku, stok wydmy i obszar położony bezpośrednio za nim jest modelowany w zależności od aktualnych warunków aerodynamicznych.

Przeprowadzone pomiary wysokości palików umieszczonych na przedpolu stoku odwietrznego wyraźnie wskazują, że powstanie form akumulacyjnych i deflacyjnych, oraz miejsc ich występowania uzależnione jest od kierunku przepływu przyziemnych strug powietrza. Rysunek 12A przedstawia występowanie tych form, powstałych w okresie 1 miesiąca (od 30 czerwca do 1 sierpnia) podczas, najpierw wiatrów północno-wschodnich, a następnie zachodnich. W ich wyniku powstała podłużna forma aku-

mulacyjna w części środkowej badanego obszaru. W późniejszym okresie obserwacji (1 sierpnia do 17 listopada) nabrzmienie akumulacyjne stało się załączkiem podłużnego wału (rys. 12 B). Jego powstanie należy wiązać z wiatrami zachodnimi, podczas których strugi powietrza opływające formę od góry, „zderzają się” ze strugami wymuszonymi wpływem ostańca deflacyjnego (por. rys. 3).

W wyniku działania wiatrów z różnych kierunków zmienia się jednocześnie masa materiału zakumulowanego i wywianego. Ich wartości przedstawia tabela 2.

Tabela 2 – Table 2

Powierzchnia i objętość materiału zakumulowanego i wywianego  
Surface and volume of the accumulated and deflated material

30 VI - 1 VIII					1 VIII - 17 XI				
przedział interval [cm]	powierzchnia surface [m <sup>2</sup> ]		masa volume [m <sup>3</sup> ]		przedział interval [cm]	powierzchnia surface [m <sup>2</sup> ]		masa volume [m <sup>3</sup> ]	
-15 - -10	150,0	3775,0	18,75	147,50	-40 - -30	125,0	3450,0	43,75	377,50
-10 - -5	762,5		37,19		-30 - -20	500,0		125,00	
-5 - 0	2862,5		71,56		-20 - -10	675,0		101,25	
0 - 5	1287,5	32,19	-10 - 0	2150,0	107,50				
5 - 10	425,0	1925,0	31,88	91,26	0 - 10	587,5		2250,0	
10 - 15	200,0		25,00		10 - 20	687,5	103,13		
15 - 20	12,5		2,19		20 - 30	975,0	243,75		
5700,0					5700,0				

W okresie od 30 czerwca do 1 sierpnia zaznacza się wyraźny wzrost procesów deflacji spowodowany głównie wiatrami północno-wschodnimi i północnymi. W okresie tym, objętość materiału wywianego wynosiła 147,5 m<sup>3</sup>, natomiast zakumulowanego 91,26 m<sup>3</sup>. Od 1 sierpnia do 17 listopada natomiast, przy wiatrach zachodnich, obserwuje się już równowagę tych procesów wyrażającą się wartościami 377,5 m<sup>3</sup> ubytku i 376,26 m<sup>3</sup> przyrostu materiału.

*Instytut Geografii  
Uniwersytetu im. A. Mickiewicza w Poznaniu*

#### LITERATURA

- Allen J. R. L., 1968, Current ripples, North — Holland Publ. Co, Amsterdam.  
— —, 1969, On the geometry of current ripples in relation to stability of fluid flow, Geogr. Annaler vol. 51A, 1 - 2.  
Bagnold R. A., 1954, The physics of blown sand and desert dunes, London, Methuen and Co (2nd ed.).  
Borówka R. K., 1976, Wpływ stoku dystalnego na rozkład kierunków wiatru w strefie przypowierzchniowej, Spraw. PTPN nr 91.

- —, 1977, Współczesne procesy transportu i sedymentacji piasków eolicznych oraz ich uwarunkowania i skutki na obszarze wydym nadmorskich (w druku).
- Cornish V., 1914, *Waves of sand and snow*, London, T. F. Univin.
- Dobrin L. G., 1959, *Еоłowaja piesczanaja riab, jej strojenie i dwiżenie*, Izv. AN Turkm. SSR, wyp. 5, nr 4.
- Miszalski J., 1973, *Współczesne procesy eoliczne na Pobrzeżu Słowińskim, Studium fotointerpretacyjne*, (sum. Present-day aeolian processes on the Slovenian Coastline, A study of Photo-interpretation), Dokum. Geogr. IG PAN.
- Müller J., 1968, *Struktury eolicznych osadów piaszczystych z charakterystycznych obszarów wybrzeża Bałtyku i Polski Centralnej*, (maszynopis pracy doktorskiej).
- Nowaczyk B., 1976, *Geneza i rozwój wydym śródlądowych w zachodniej części Pradoliny Warszawsko-Berlińskiej w świetle badań struktury uziarnienia i stratygrafii budujących je osadów*, (sum. The genesis and development of inland dunes in the western part of the Warsaw—Berlin Pradolina in the light of examination of structure, granulation and stratigraphy of the deposits which built them), PTPN Prace Kom. Geogr. — Geol. T. 16.
- Pietrow M. P., 1948, *Relief barchannych pieskow pustyń i zakonomiernosti jego formirowania*, Trudy Inst. Geogr. wyp. 39, *Problemy geomorfologii*, Moskwa—Leningrad.
- Prandtl L., 1956, *Dynamika przepływów*, PWN Warszawa.
- Rotnicki K., 1970, *Główne problemy wydym śródlądowych w Polsce w świetle badań wydmy w Węglewicach* (sum. Main Problems of inland dunes in Poland based on investigations of the dune at Węglewice), PTPN Prace Kom. Geogr.-Geol. t. 11 z. 2.
- Scheidegger A. E., 1974, *Geomorfologia teoretyczna*, PWN Warszawa.
- Sharp R. P., 1963, *Wind ripples*, Jour. of Geol. vol. 71 no 5.
- Stankowski W., 1963, *Rzeźba eoliczna Polski północno-zachodniej na podstawie wybranych obszarów* (sum. Eolian relief of north — west Poland on the ground of chosen regions), PTPN Prace Kom. Geogr.-Geol. t. 4 z. 4.
- Wiejisow S., 1966, *O miechanizmie formirowania barchannych cepiej (po eksperymentalnym danym)*, Izv. AN SSSR, ser, geogr. 3.
- —, 1968, *Metodika izuczzenia pierwicznych stadij eołowogo reliefa podwiżnych pieskow*, Izv. AN SSSR, ser. geogr. 3.
- Więckowski R., 1961, *Proces powstawania i rozwoju zmarszczek eolicznych*, W: *Prace o Plejstocenie Polski Środkowej*, wyd. pośw. VI Kongr. INQUA w Warszawie.

ADAM WOJCIECHOWSKI

RECONSTRUCTION OF THE DIRECTIONS OF GROUND-NEAR AIR STREAMS  
BEHIND THE LEE SLOPE OF A DUNE ON THE BASIS OF THE DISTRIBUTION  
OF EOLIAN RIPPLE MARKS

Summary

On the basis of field investigations it has been attempted to reconstruct directions of ground-near air streams under some aerodynamic conditions. The relation between the width of whirlwind zone and wind velocity has been indicated and directions of the material transport have been determined.

Figs. 3 and 4 present a spatial distribution of streams and directions of their dislocations for westerly winds of various velocity. In all the situations the distribution of air streams points out to the centrifugal flow of streams from above the dune slope. Measurements of the direction and velocity of wind made 1 m above ground confirm the obtained distribution of wind streams and point to the occurrence of maximum velocities at the upper edge and the minimum ones at the lower. The ratio of these velocities is expressed by the formulae:

$$V_b = 0.64 V_w$$

$$V_b = 0.67 V_w \quad (\text{Fig. 6})$$

No traces have been found behind the dune slope which would show the opposite direction of air streams. The presented distribution of streams seems to be connected with the spiral flow of air (J. R. L. Allen 1968, 1969) forced by the shape of the dune slope. A scheme of such a distribution will be analogous for all forms shaped similarly to the investigated dune. This is confirmed by a similar distribution of streams for lunate and catenary ripples described by J. R. L. Allen (1968, 1969).

North-westerly winds make two completing systems of stream directions. The main one corresponds to the prevailing wind direction, whereas the other, being genetically associated with the flowing around the forms, runs along the dune slope (Figs. 8B, 9B). According to S. Wiejisow (1968) the secondary stream will grow in force with the angle of the main wind direction.

During north-easterly and south-easterly winds the marks dislocate parallel to the wind direction (Figs. 8A, 9A).

The results of measurements of eolian ripples orientation which correspond to particular wind directions and are plotted on a diagram display some characteristic types of patterns. The simplest of them is represented by a unimodal pattern corresponding to northeasterly winds (Figs. 10A, 10B). Bimodal patterns are characteristic of north-westerly wind directions (10 C-D). The third type is constituted by a polymodal pattern of air stream directions, which are typical of westerly winds (Fig. 10 E-H).

The presented analysis of the directions of air streams in dunes under development may be used of comparisons with the pattern of directions of laminae dips and variability of grain-size composition in fossil dunes. The above should be checked by investigations in similarly shaped fossil dunes.

The determination of the width of whirlwind zone is of great significance when defining aerodynamic conditions prevailing on the lee side. The presence of this zone has been stressed in theoretical and experimental investigations (J. R. L. Allen 1968, 1968, R. A. Bagnold 1954, L. Prandtl 1956, A. E. Scheidegger 1974) and is associated mainly with the separation of the stream from the surface and thus subsequently with the formation of a whirlwind cell. Fig. 11 presents the relation between the width of whirlwind zone and wind velocity as well as dune height, which is presented by the equation:

$$L = 0.494 H V_w^{0.69}$$

This relation refers, however, entirely to a dune of 12 m height.

Changes of wind direction and velocity in the ground-near belt considerably influence changes in the development of eolian relief. Due to these changes the dune slope and the area directly covering it are shaped according to the actual aerodynamic conditions.

Fig. 12 presents the formation of accumulation and deflation sediments whose development was affected by north-easterly (Fig. 12A) and westerly (Fig. 12B) winds.

As a result of the activity of winds from various directions the amount of the accumulated and blown out material also changes. Their values are presented in Tab. 2.

*Institute of Geography  
Adam Mickiewicz University in Poznań*

### EXPLANATION OF FIGURES

- Fig. 1. Hipsometric outline of the investigation area (after J. Miszalski, 1973)  
1. wandering dunes, 2. valley river floors and post-lacustrine plains
- Fig. 2. Course of the selected values of the meteorological elements for the area of coastal dunes at Łeba Bar (data from IMiGW Łeba station)  
A. 6.25 m/s B. 8.5 m/s C. 10 m/s  
wind velocity 1. 0 - 5 m/s 2. above 5 m/s
- Fig. 3. Orientation of the ripple marks and ground-near air streams directions for the westerly winds  
A. 6.25 m/s B. 8.5 m/s C. 10 m/s  
1. lee slope, 2, strike and shift direction of the ripple marks, 3. streamlines directions, 4. main wind direction, 5. deflation remnant crest, 6. whirlwind zone boundary
- Fig. 4. Orientation of the ripple marks and ground-near air streams directions for the westerly winds  
A. 12 m/s B. 4.5 m/s  
Explanations as fig. 3.
- Fig. 5. Relation between wind velocity on the upper crest ( $V_w$ ) and velocity on the lower ( $V_b$ )  
A. for mean wind velocity 4.5 m/s  
B. for mean wind velocity 12 m/s
- Fig. 6. Relation between wind velocity on the upper crest ( $V_w$ ) and quotient  $V_b/V_w$  mean wind velocity A. 4.5 m/s B. 12 m/s
- Fig. 7. Relation between dune height ( $H$ ) and quotient of the velocity ( $V_b/V_w$ )
- Fig. 8. Orientation of the ripple marks and ground-near air streams directions for the winds  
A. NW — 10 m/s B. NE — 4 m/s C. SSE — 4 m/s  
Explanation as fig. 3
- Fig. 9. Orientation of the ripple marks and ground-near air streams directions for the winds  
A. NE — 9 m/s B. NW — 4 m/s  
Explanations as fig. 3
- Fig. 10. Distribution of the ground-near air streams directions for winds  
A. NE — 4 m/s B. NE — 9 m/s C. NW — 4 m/s D. NW — 10 m/s E. W — 8.5 m/s F. W — 6.25 m/s G. W — 12 m/s H. W — 10 m/s
- Fig. 11. Relation between whirlwind zone width, and wind velocity (A) and dune height (B)
- Fig. 12. Accumulation and deflation of the eolian material behind lee slope in the periods  
A. 30 VI - 1 VIII  
B. 1 VIII - 17 XI