

Reżim wiatru a rozwój wydym gwiaździstych ergu Chebbi (południowe Maroko)

Wind regime and development of star dune on Erg Chebbi (South Morocco)

Katarzyna Biejat

Instytut Geografii Fizycznej, Wydział Geografii i Studiów Regionalnych, Uniwersytet Warszawski, Warszawa
kbiejat@uw.edu.pl

Zarys treści: Wydmy gwiaździste (wydmy piramidalne, *demkhas, ghourds, rhourds, oghrouds*) są najmniej rozpoznanymi formami akumulacji eolicznej. Ich występowanie wiąże się z obszarami charakteryzującymi się złożonym reżimem wiatru – o co najmniej trzech kierunkach wiatru wydymotwórczego. Wykorzystując przestrzenne modele 16 form wydmych, wykonane na podstawie szczegółowych pomiarów terenowych, przeanalizowano kształt wydym ergu Chebbi. Położenie i przebieg ramion porównano z reżimem wiatru. Określono dominujące kierunki wiatru wydymotwórczego dla wydym gwiaździstych oraz wydym poprzecznych w różnych fazach rozwoju, od form inicjalnych do dojrzałych. Stwierdzono, że rozwój wydym gwiaździstych ergu Chebbi związany jest tylko z dwoma kierunkami wiatru wydymotwórczego: SW i NE. Uzyskane wyniki pozwalają wnioskować, że obszary, na których dominują dwa kierunki wiatru, stanowią potencjalne regiony tworzenia się wydym gwiaździstych.

Słowa kluczowe: wydmy gwiaździste, morfodynamika, reżim wiatru, procesy eoliczne, erg Chebbi, Maroko

Abstract: Star dunes (*pyramid dunes, demkhas, ghourds, rhourds, oghrouds*) are the least studied dune type. Their development is typically associated with multidirectional wind regime. The aim of the study was to analyze the star dunes shape and correlate it with wind regime. This was made on the basis of detailed field measurements conducted within the Erg Chebbi (S Morocco), which allow to create 3D models of 16 dune forms. The position and orientation of dune arms were compared with wind regime. This allow to determine the main wind directions, which influence the development of star and transverse dunes in this area. The analysis is made for dune in different stages, from initial to mature forms. The results show that development of star dune on Erg Chebbi is connected with two wind directions, SW and NE wind. This allows to conclude that the areas with two dominant wind directions (bimodal wind regime) are the potential regions of star dune development.

Key words: star dunes, morphodynamics, eolian processes, wind regime, Erg Chebbi, Morocco

Wstęp

Wydmy gwiaździste (wydmy piramidalne, *demkhas, ghourds, rhourds, oghrouds*), mimo że zajmują około 8,5% powierzchni wszystkich wydym, są najslabiej rozpoznanymi formami akumulacji eolicznej (Fryberger, Goudi 1981, Lancaster 1995). Wydmy te zaliczane są do form złożonych, swobodnych. Występują na większości pustyń, m.in. na Saharze, pustyni Namib, pustyni Rub' Al Khali, pustyni Gobi, pustyni Dumont (ryc. 1).

Opublikowane dotychczas informacje poświęcone wydymom gwiaździstym zawierają w większości wyniki badań dotyczące morfometrii wydym, cech teksturalnych materiału wydmych oraz charakterystykę wybranych cech środowiska przyrodniczego obszarów, na których formy te występują (Yang i in. 2003, Dong i in. 2004, Howard i in. 2007). Tylko w kilku opracowaniach przedstawiono wyniki badań uprawniające do wnioskowania na temat rozwoju tych form. Stwierdzono, że wydmy gwiaździste powstają na terenach charakteryzujących się dużą do-



Ryc. 1. Występowanie wydm gwiaździstych na świecie

1 – Wielki Erg Wschodni w Algierii, 2 – erg Fachi-Bilma w Nigrze, 3 – erg Chebbi w Maroku, 4 – Namib, 5 – SE Rub’ Al Khali w Arabii Saudyjskiej, 6 – Daszt-e Lut w Iranie, 7 – Ala Shan w Chinach, 8 – Magao Grottes w N Chinach, 9 – Gran Desierto w Meksyku, 10 – Dumont w Kalifornii

Fig. 1. Occurrence of star dunes in the world

1 – Grand Erg Oriental in Algeria, 2 – Erg Fachi-Bilma in Niger, 3 – Erg Chebbi in Morocco, 4 – Namib, 5 – SE Rub’ Al Khali in UAE, 6 – Daszt-e Lut in Iran, 7 – Ala Shan in China, 8 – Magao Grottes in N China, 9 – Gran Desierto in Mexico, 10 – Dumont in California

stępnością materiału dla procesów eolicznych, w których dominują co najmniej trzy kierunki wiatru aktywnego (Cooke, Warren 1973, Pietrow 1976, Fryberger 1979, Wasson, Hyde 1983). Wydmy gwiaździste mają średnio trzy lub cztery ramiona rozchodzące się koncentrycznie lub jedno ramie główne (I rzędu), od którego odchodzą ramiona II i III rzędu (Nielson i in. 1987, Lancaster 1995, Pye, Tsoar 2009). Wydmy gwiaździste stanowią jedne z najwyższych i największych form akumulacji eolicznej. Ich wysokość wynosi średnio około 100 m, dochodząc nawet do 350–500 m (formy takie występują na pustyni Namib czy pustyni Gobi) (Lancaster 1995, Wang i in. 2005). Ramiona wydm gwiaździstych mają przebieg sinusoidalny, ze zmiennym nachyleniem stoków. Zmienność ta związana jest z sezonową zmianą dominującego kierunku wiatru na obszarze występowania wydm gwiaździstych (Holm 1960, Nielson, Kocurek 1987, Lancaster 1989, 1995, Wang i in. 2005, Pye, Tsoar 2009). Uważa się, że wydmy gwiaździste powstają w wyniku połączenia wydm poprzecznych, wydm podłużnych lub poprzez modyfikację tych form spowodowaną sezonowymi zmianami kierunku wiatru aktywnego (Lancaster 1989, 1995, Wang i in. 2005).

Cel i obszar badań

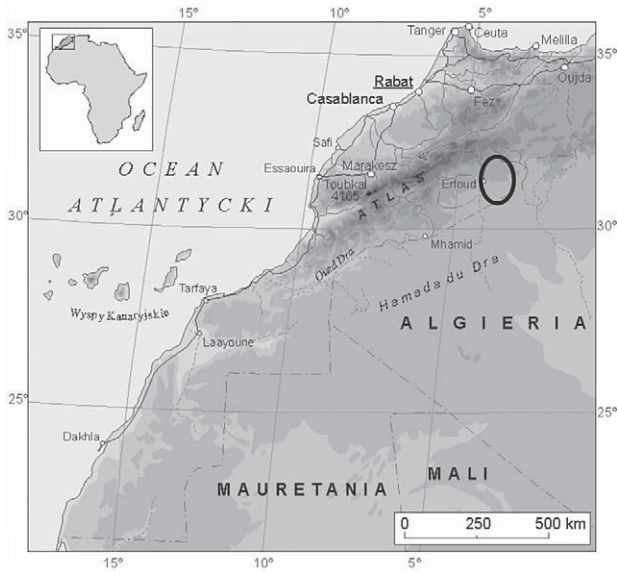
Rozwój wydm gwiaździstych zależy od cech środowiska przyrodniczego danego terenu. Głównymi czynnikami decydującymi o ich rozwoju są: reżim wiatru, dostępność materiału do transportu eolicznego oraz wilgotność osadów podłoża (Lancaster 1995, Thomas 2000, Pye, Tsoar 2009, Wojtanowicz

2010). Za najważniejszy czynnik w rozwoju wydm gwiaździstych uznaje się prędkość oraz kierunek wiatru wydmotwórczego.

Celem badań było określenie znaczenia reżimu wiatru dla rozwoju wydm gwiaździstych tworzących erg Chebbi. Cel ten został zrealizowany na podstawie analizy porównawczej przebiegu ramion wydm gwiaździstych (poszczególnych rzędów) z kierunkami oraz prędkością wiatru aktywnego. Badania umożliwiły ocenę wpływu danego kierunku wiatru na rozwój wydm gwiaździstych.

Zostały one przeprowadzone w południowym Maroku na obszarze ergu Chebbi (ryc. 2), którego powierzchnia wynosi około 110 km². Składa się on z 13 dużych, złożonych wydm gwiaździstych, których rozpiętość przy podstawie dochodzi do 2 km. Pozostałe formy akumulacji eolicznej budujące erg to mniejsze wydmy gwiaździste oraz wydm poprzeczne.

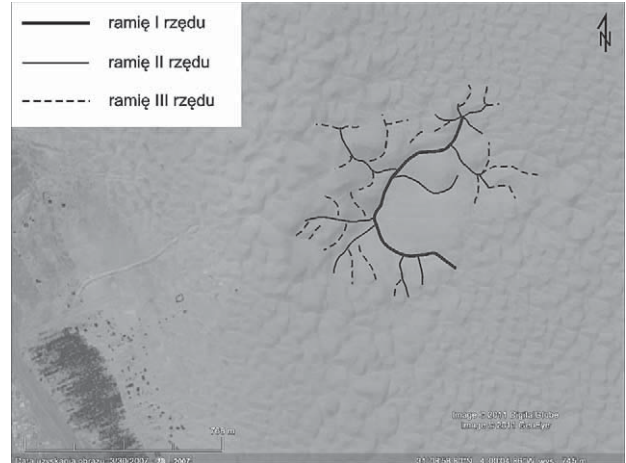
Erg Chebbi położony jest w środkowej części rozległego obniżenia wypełnionego w większości osadami zastoiskowymi. W jego otoczeniu występują regie oraz liczne, suche przez większą część roku koryta rzek epizodycznych będące potencjalnymi obszarami źródłowymi materiału wydmowego. Największym z nich jest koryto rzeki Ziz, które na skutek budowy w 1975 r. tamy w górnym biegu rzeki prowadzi wodę tylko po wystąpieniu ekstremalnych opadów, gdy powstały po wybudowaniu tamy zbiornik wypełni się całkowicie. Transportowany w korycie w czasie epizodycznych przepływów w przewodzie piaszczysty materiał może być obecnie dodatkowym źródłem osadów budujących akumulacyjne formy eoliczne rozwijające się na badanym obszarze (Barczuk i in. 2006).



Ryc. 2. Obszar badań
Fig. 2. Research area

Metody badań

Analizę przebiegu ramion wydym gwiaździstych oraz wydym poprzecznych przeprowadzono na podstawie zdjęć satelitarnych udostępnianych przez Google Earth. Analizie poddano 13 dużych, złożonych wydym gwiaździstych (wszystkie tego typu formy występujące na omawianym terenie), 10 pojedyn-



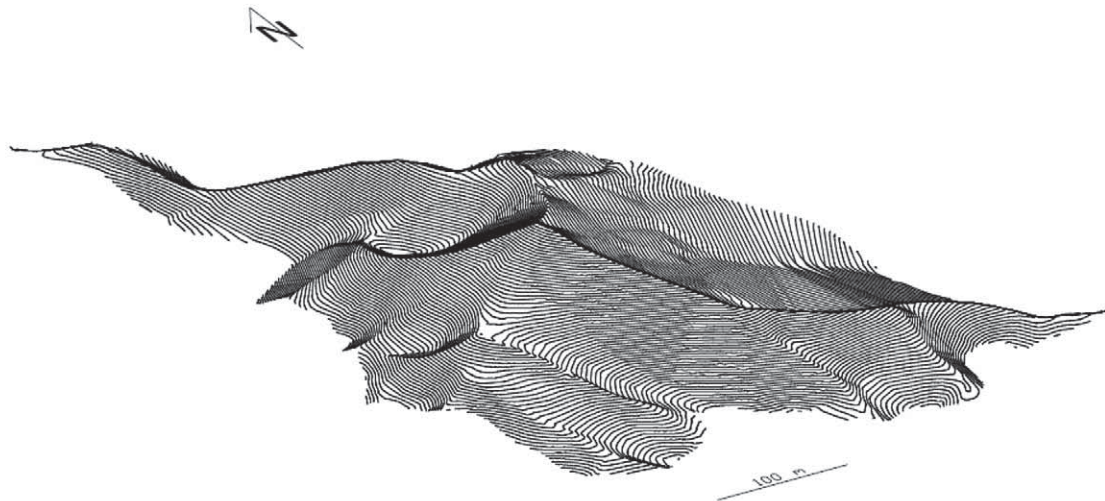
Ryc. 3. Przebieg ramion złożonej wydmy gwiaździstej wchodzącej w skład ergu Chebbi (na podstawie obrazów Google Earth)

Fig. 3. Arms orientation of complex star dunes on Erg Chebbi (based on Google Earth satellite images)

czych wydym gwiaździstych oraz 95 wydym poprzecznych wchodzących w skład czterech obszarów położonych na obrzeżu ergu. Przebieg linii grzbietowej wydym poprzecznych na obrzeżu ergu Chebbi jest bardzo dobrym wskaźnikiem kierunku wiatru wydmotwórczego, dlatego też wybór terenów, na których wykonano analizy tych form, związany był z reżimem wiatru. Pomiary przebiegu linii grzbietowej wydym poprzecznych wykonano na południowo-zachodnim i północno-wschodnim obrzeżu ergu,



Ryc. 4. Wydmy gwiaździste ergu Chebbi
Fig. 4. Star dunes of Erg Chebbi



Ryc. 5. Model 3D wydmy gwiaździstej, poziomice co 50 cm
Fig. 5. 3D model of star dunes, levels at 50 cm

co wynikało z dominacji takich kierunków aktywnego wiatru. Pomiar przeprowadzono również po dwóch przeciwstawnych stronach – północno-zachodniej oraz południowo-wschodniej.

Na podstawie analizy zdjęć satelitarnych wyznaczono przebieg ramion wydmy gwiaździstej oraz podzielono je na ramiona I, II i III rzędu. Ramiona II rzędu są ramionami bezpośrednio odchodzącymi od ramienia I rzędu (ramienia głównego), natomiast ramiona III rzędu bezpośrednio odchodzą od ramion II rzędu (ryc. 3). Określono kierunek przebiegu 52 ramion I rzędu, 254 ramion II rzędu, 353 ramion III rzędu wydmy gwiaździstej oraz kierunek przebiegu linii grzbietowej 95 wydmy poprzecznych.

W celu weryfikacji przebiegu ramion, a także oceny prawidłowości kategoryzacji ramion w marcu 2011 r. wykonano pomiary terenowe kształtu form wydmy na różnych etapach rozwoju wchodzących w skład ergu Chebbi (ryc. 4). Pomiary wykonano przy użyciu GPS RTK z dokładnością ± 10 mm. Zmierzono 5 wydmy gwiaździstej będących w różnych fazach rozwoju oraz 11 wydmy poprzecznych. Na podstawie uzyskanych wyników stworzono trójwymiarowe modele wydmy (ryc. 5), które umożliwiły analizę przebiegu ramion oraz określenie cech metrycznych form.

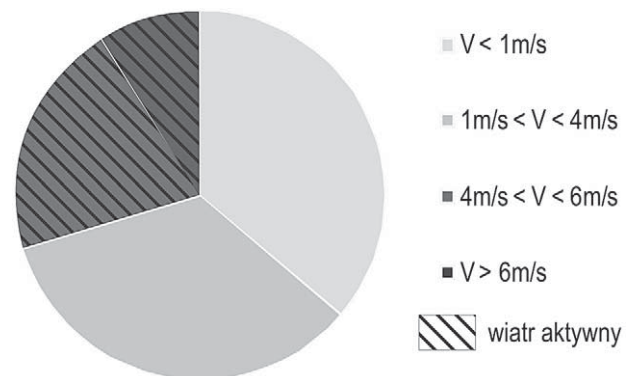
Analizę reżimu wiatru dla ergu Chebbi wykonano na podstawie danych ze stacji meteorologicznej w Rissani, położonej około 15 km na północny zachód od badanego obszaru. Na stacji tej wykonuje się ciągły pomiar prędkości i kierunku wiatru na dwóch wysokościach – 10 i 12 m. Wykorzystano dane z lat 1988–1997: częstość występowania wiatru w danym przedziale prędkości (<1 m s⁻¹, 1–4 m s⁻¹, 4–6 m s⁻¹, >6 m s⁻¹), miesięczne zróżnicowanie średniej prędkości wiatru oraz częstość występowania wiatru aktywnego (>4 m s⁻¹) dla poszczególnych kierunków wiatru.

W celu oceny wpływu reżimu wiatru na rozwój wydmy gwiaździstej ergu Chebbi porównano wyniki analiz przebiegu ramion wydmy gwiaździstej oraz linii grzbietowej wydmy poprzecznych z wynikami analizy reżimu wiatru występującego na badanym obszarze.

Wyniki

Obszar ergu Chebbi charakteryzuje się równomiernym rozkładem występowania wiatru bardzo słabego (<1 m s⁻¹), słabego (1–4 m s⁻¹) oraz wiatru silnego – aktywnego (>4 m s⁻¹) (ryc. 6). Do analizy wpływu zróżnicowania kierunku wiatru na rozwój wydmy gwiaździstej ergu Chebbi wykorzystano dane charakteryzujące wyłącznie wiatr aktywny. W latach 1988–1997 wiatr >4 m s⁻¹ występował ze średnią częstością 29,7% w ciągu roku (Benmohammadi 2001).

Na podstawie analizy częstości występowania wiatru aktywnego dla poszczególnych kierunków



Ryc. 6. Rozkład prędkości wiatru dla stacji meteorologicznej w Rissani w latach 1988–1997

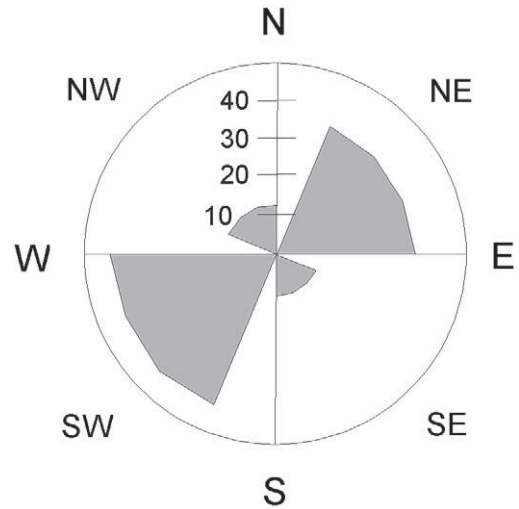
Fig. 6. The distribution of wind speeds at Rissani meteorological station (1988–1997)

stwierdzono, że na obszarze ergu Chebbi dominują tylko dwa kierunki wiatru (ryc. 7). 42% wiatru aktywnego to wiejący z południowego zachodu, a 35,7% – aktywny z północnego wschodu. Wiatry aktywne z południowego wschodu oraz północnego zachodu stanowią zaledwie 10,8% i 11,4% (Benmohammadi 2001).

Weryfikacja sposobu wyznaczenia przebiegu oraz kategoryzacji ramion wykonana na podstawie analizy przestrzennych modeli form i zdjęć satelitarnych okazała się pozytywna. Przebieg i kategoria ramion przeanalizowane obydwoma metodami na 5 wydmach gwiaździstych oraz 11 wydmach poprzecznych były zgodne. Weryfikację przeprowadzono na 16 ramionach I rzędu (razem z wydhami poprzecznymi), 19 ramionach II rzędu oraz 12 ramionach III rzędu.

Przebieg ramion wydmy gwiaździstych oraz przebieg linii grzbietowej wydmy poprzecznych określony na podstawie zdjęć satelitarnych porównano z kierunkami wiatru aktywnego występującymi na obszarze ergu Chebbi. Na podstawie przeprowadzonej analizy stwierdzono, że przebieg ramion I rzędu wydmy gwiaździstych (ryc. 8), jak również przebieg linii grzbietowej wydmy poprzecznych (ryc. 9) niezależnie od stopnia rozwoju wydmy, jest bardzo zbliżony. Uzyskane wyniki wskazują, że przebieg ten jest prostopadły do dominujących kierunków wiatru aktywnego – północno-wschodniego oraz południowo-wschodniego. Oznacza to, że ramiona I rzędu oraz wydmy poprzeczne powstały w wyniku oddziaływania wiatru z tych dwóch kierunków.

Przebieg ramion II i III rzędu jest bardzo zróżnicowany. Analiza rozkładu przebiegu tych ramion wskazuje, że w przeciwieństwie do rozkładu przebiegu ramion I rzędu i wydmy poprzecznych, ich przebieg jest niezależny od dominujących na terenie ergu Chebbi kierunków wiatru wydmotwórczego (ryc. 10, 11).

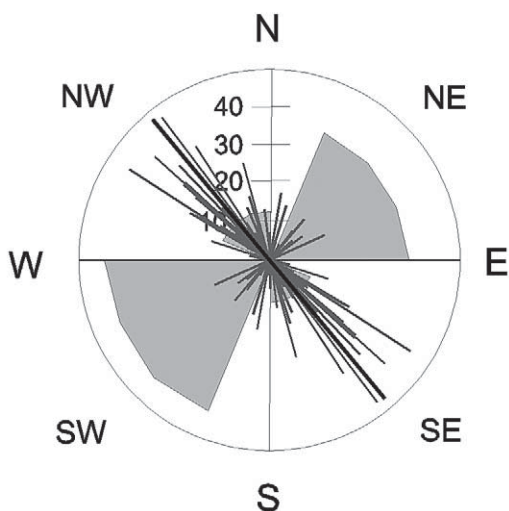


Ryc. 7. Częstość występowania wiatru aktywnego ($>4 \text{ m s}^{-1}$) dla poszczególnych kierunków na stacji meteorologicznej w Rissani (1988–1997)

Fig. 7. Frequency of active wind ($>4 \text{ m s}^{-1}$), for each wind direction, at Rissani meteorological station (1988–1997)

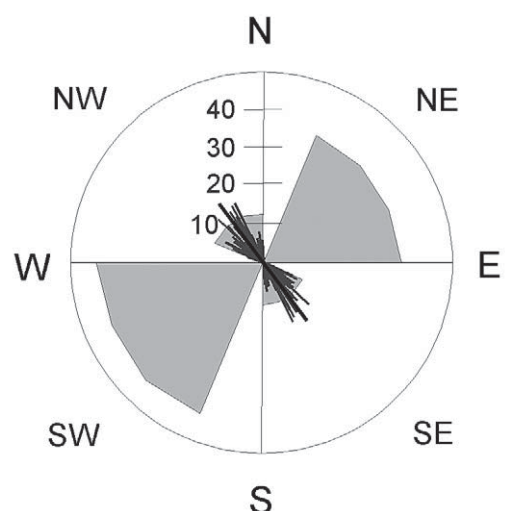
Wnioski

Wyniki uzyskane na podstawie analiz przeprowadzonych na obszarze ergu Chebbi jednoznacznie wskazują, że dotychczasowa teza o konieczności dominacji co najmniej trzech kierunków wiatru wydmotwórczego niezbędnych do tworzenia się wydmy gwiaździstych nie została potwierdzona. Stwierdzono, że rozwój tego typu wydmy może być związany również z oddziaływaniem wyłącznie dwóch dominujących kierunków wiatru aktywnego. Taki reżim wiatru przyczynia się do powstawania wydmy poprzecznych o zmiennych sezonowo stokach zsypanych. Przy odpowiednio dużej dostawie materiału lub gdy występuje



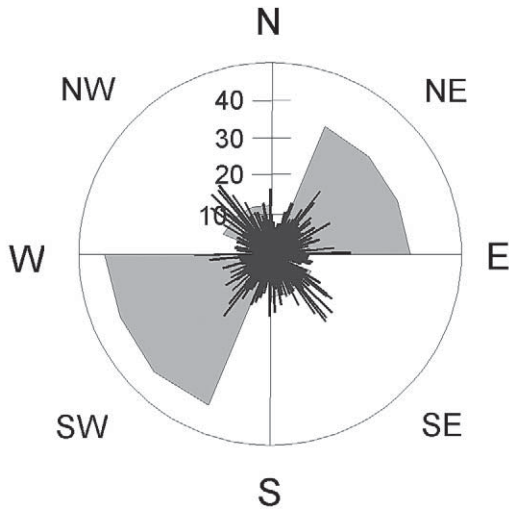
Ryc. 8. Przebieg ramion I rzędu wydmy gwiaździstych na tle róży wiatru

Fig. 8. Orientation of star dunes main arms on wind rose background



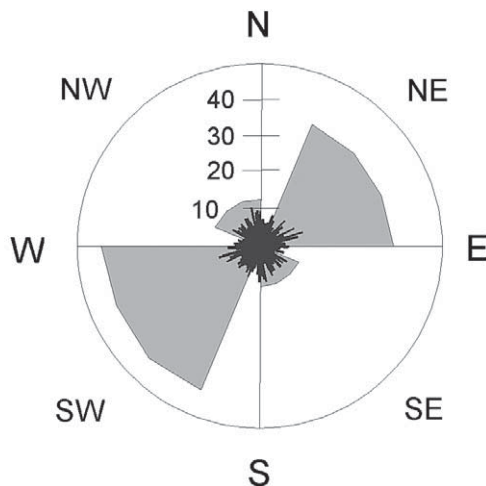
Ryc. 9. Przebieg linii grzbietowej wydmy poprzecznych na tle róży wiatru

Fig. 9. Orientation of crestline of transverse dunes, on wind rose background



Ryc. 10. Przebieg ramion II rzędu wydmy gwiaździstych na tle róży wiatru

Fig. 10. Orientation of star dunes subsidiary arms on wind rose background



Ryc. 11. Przebieg ramion III rzędu wydmy gwiaździstych na tle róży wiatru

Fig. 11. Orientation of star dunes tertiary arms, on wind rose background

czynnik stymulujący akumulację (zwiększona gęstość szaty roślinnej lub wilgotność podłoża), izolowane wydmy poprzeczne znajdujące się na obrzeżach ergu ulegają dalszemu rozwojowi, w wyniku którego łączą się, tworząc równoległe do siebie wały wydmore. Gdy wiatr wieje prostopadle do ich linii grzbietowej, tworzy się pomiędzy nimi lokalny wiatr o kierunku równoległym do ich linii grzbietowych. Gdy dostawa materiału jest wystarczająco duża, wiatr ten buduje nowe wydmy poprzeczne, których linia grzbietowa jest prostopadła do linii grzbietowych dotychczasowych wydmy poprzecznych. Miejsce, w którym obydwa grzbiety łączą się, staje się wierzchołkiem nowo powstającej wydmy gwiaździstej. Możliwość wystąpienia lokalnej zmiany cyrkulacji powietrza zależy od odległości pomiędzy wałami wydmy poprzecznych (wielkości powierzchni regu), a w przypadku dal-

szych etapów rozwoju wydmy gwiaździstych – odległość pomiędzy ramionami danej wydmy. Im mniejsza odległość, tym oddziaływanie wiatru lokalnego ma większe znaczenie. Lokalny wiatr umożliwia powstawanie ramion II i III rzędu.

Podsumowując, należy stwierdzić, że w rozwoju wydmy gwiaździstych bardzo istotny jest nie tylko reżim wiatru na danym obszarze, ale także cyrkulacja lokalna. Można przypuszczać, że wraz ze zwiększaniem się wysokości akumulacyjnych form eolicznych stanowiących barierę dla przepływu mas powietrza, ich rola w kształtowaniu wydmy gwiaździstych znacząco wzrasta. Weryfikacja tej tezy wymaga przeprowadzenia szczegółowych badań. Wyniki badań pozwalają również na rozszerzenie zasięgu potencjalnego tworzenia się wydmy gwiaździstych o obszary, na których występują dwa dominujące kierunki wiatru wydmotwórczego.

Literatura

- Barczuk A., Dłużewski M., Dubis L., Skocki K., 2006. Rozwój pól wydmy Ergu Chebbi. W: M. Dłużewski, I. Tsermegas (red.), Geograficzne i geologiczne uwarunkowania rozwoju rzeźby Maroka. Warsztaty geomorfologiczne. WGiSR UW, SGP: 187–216.
- Benmohammadi A., 2001. Ensablement et désertification au sud-est Marocain: Trajectoires éoliennes et origine du sable des vallées de Drâa, Ziz et Rhéris. Thèse de Doctorat d'Etat. Université Ibn Tofial, Faculté des Sciences, Kenitra.
- Cooke R.U., Warren A., 1973. Geomorphology in Deserts. Batsford, London.
- Dong Z., Wang T., Wang X., 2004. Geomorphology of the megadunes in the Badain Jaran Desert. Geomorphology 60: 191–203.
- Fryberger S.G., 1979. Dune forms and wind regime. W: E.D. McKee (red.), A Study of Global Sand Seas. US Geol. Surv. Prof. Pap. 1052: 137–169.
- Fryberger S.G., Goudie A.S., 1981. Arid geomorphology. Prog. Phys. Geogr. 5: 409–428.
- Holm D.A., 1960. Desert geomorphology in the Arabian Peninsula. Science 123: 1369–1379.
- Howard F., Baghdady A., Goodell P., 2007. Mineralogical and geomorphological characterization of sand dunes in the eastern part of United Arab Emirates using orbital remote sensing integrated with field investigations. Geomorphology 83: 67–81.
- Lancaster N., 1989. Star dunes. Prog. Phys. Geogr., 13: 67–91.
- Lancaster N., 1995. Geomorphology of Desert Dunes. Routledge, London–New York.
- Nielson J., Kocurek G., 1987. Surface processes, deposits, and development of star dunes: Dumont

- dune field, California. *Bull. Geol. Soc. Am.* 99: 177–186.
- Pietrow M.P., 1976. *Pustynie kuli ziemskiej*. PWN, Warszawa.
- Pye K., Tsoar H., 2009. *Aeolian Sand and Sand Dunes*. Springer.
- Thomas D., 2000. *Arid Zone Geomorphology. Process, Form and Change in Drylands*. Wiley.
- Wang T., Zhang W., Dong Z., Qu J., Jing Z., Wang W., Feng J., 2005. The dynamic characteristics and migration of a pyramid dune. *Sedimentology* 52: 4229–4440.
- Wasson R.J., Hyde R., 1983. Factors determining desert dune type. *Nature* 304: 227–578.
- Wojtanowicz J., 2010. *Współczesne procesy eoliczne*. Wyd. Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej, Lublin, s. 1–116.
- Yang X., Liu T., Xiao H., 2003. Evolution of megadunes and lakes in Badain Jaran Desert, Inner Mongolia, China during last 31,000 years. *Quaternary International* 104: 99–112.