

Maciej Dłużewski*

**WPŁYW CECH TEKSTURALNYCH NA TRANSPORT EOLICZNY
PIASKU W WYBRANYCH OBSZARACH WYDMOWYCH
PÓŁNOCNEJ SAHARY**

**Influence of textural features on aeolian transport
in selected dune fields of northern Sahara**

Abstract: The aim of the study was to determine the influence of textural features of sand on aeolian transport in six designated fields in northern Sahara. An analysis of textural features such as: mineral composition, grain shape, mean grain size diameter and sorting were performed during a multi-year research on dune sediments. Information on the movement of small landforms (1.5m) in areas of similar physico-geographical environments was taken under consideration. It was revealed that the fastest movement, of about 90 my^{-1} , is characteristic for barchans on dune field no. 4. (where gypsum sand dominates). Barchans on dune field no. 1 are slower, with 50 my^{-1} (where limestone dominates), and the slowest are those on dune field 6 (where quartz dominates), with about 30 my^{-1} . The result of the study proves that textural features have a significant influence on aeolian transport.

Key words: aeolian sand transport, barchans, textural features, Sahara

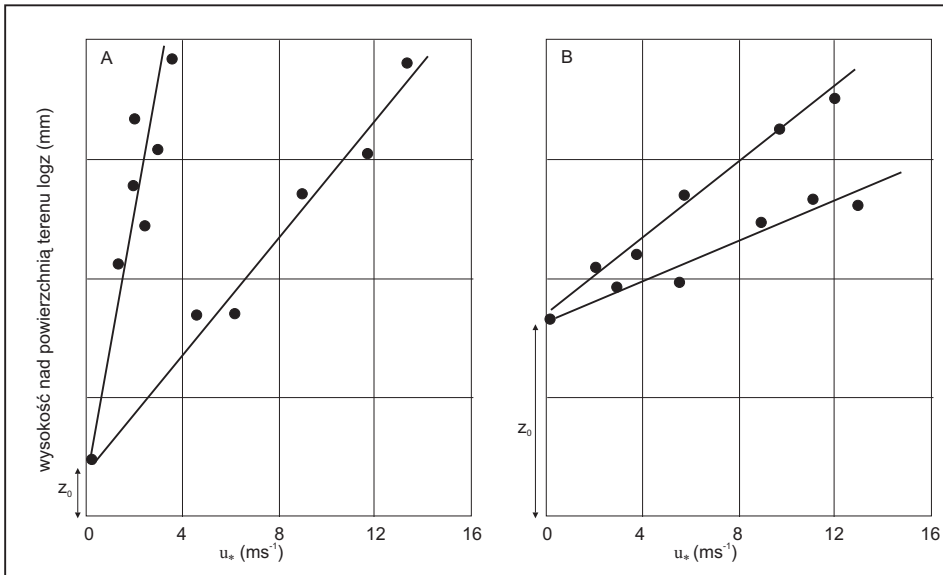
Słowa kluczowe: transport eoliczny piasku, barchany, cechy teksturalne, Sahara

WPROWADZENIE

W obszarach suchych, gorących pustyń tempo erozji i szybkość transportu związane z działalnością procesów eolicznych zależy głównie od siły wiatru oraz cech teksturalnych materiału, jak również cech podłoża. Transport materiału zostaje zapoczątkowany, gdy siła wiatru odpowiedzialna za erozję jest większa niż siły utrzymujące ziarno w spoczynku. Ścinająca prędkość progowa wiatru, niezbędna do zainicjowania ruchu ziarna zależy od chwilowej powierzchniowej

* Wydział Geografii i Studiów Regionalnych UW, Zakład Geomorfologii, e-mail: dluzewski@uw.edu.pl

siły poderwania oraz cech teksturalnych materiału (Oke 1987). Siła podrywająca ziarna uwarunkowana jest szorstkością podłoża będącego głównym czynnikiem wpływającym na sposób przepływu powietrza, który zależy ponadto od prędkości wiatru, a w znacznie mniejszym stopniu od gęstości i lepkości powietrza. Przepływ powietrza, w przeciwieństwie do przepływu wody, jest prawie zawsze turbulentny, dzięki czemu następuje dużo szybsza wymiana cząstek powietrza w znacznie bardziej miększej warstwie przypowierzchniowej. Im szorstkość podłoża jest większa, tym większa jest siła podrywająca ziarna (ryc. 1), znacznie większa niż w przypadku przepływu laminarnego (Bagnold 1941).



Ryc. 1. Półlogarytmiczne wykresy prędkości ścinającej (u_s) w przepływie turbulentnym nad powierzchnią terenu o mniejszej (A) i większej (B) szorstkości z zaznaczoną miąższością warstwy zerowej prędkości aerodynamicznej (z_0). Prędkość ścinająca rośnie szybciej nad podłożem o większej (B) niż mniejszej (A) szorstkości (Wiggs 2000).

Fig. 1. Semilogarithmic charts of shear velocity (u_s) in turbulent flows over the surface area with lesser (A) and greater (B) coarseness, with marked thickness of zero stratum of aerodynamic velocity (z_0). The shear velocity increases faster over a stratum with greater (B) than lesser coarseness (Wiggs 2000).

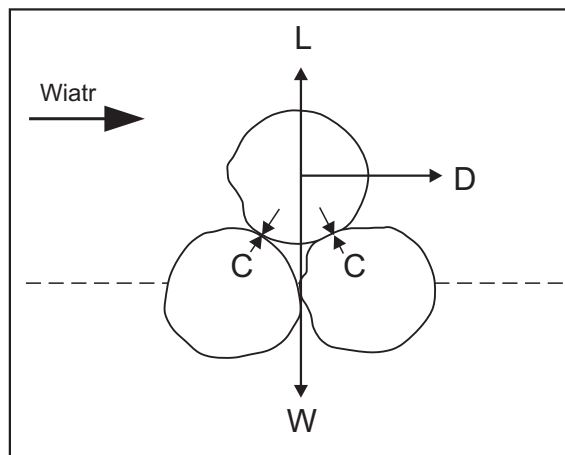
Bardzo istotnym elementem wpływającym na intensywność transportu eolicznego jest także miąższość warstwy zerowej prędkości aerodynamicznej wynikająca z szorstkości. W wyznaczeniu tej wartości bierze się pod uwagę nie tylko szorstkość podłoża, ale także wielkość ziarn, jak również odległość między nimi (Lancaster i in. 1991). Gdy powierzchnia podłoża staje się bardziej szorstka, miąższość warstwy zerowej prędkości aerodynamicznej i siła podrywająca

ziarna gwałtownie wzrasta. Gdy powierzchnia jest gładsza, maleje prędkość progowa wiatru podrywająca ziarna, ale nie znaczy to, że wzrasta intensywność transportu eolicznego. Ziarna małe mogą bowiem znajdować się w warstwie, w której prędkość wiatru jest równa zero (ryc. 1) (Greeley, Iversen 1985).

Główną siłą utrzymującą ziarno w spoczynku jest siła ciężkości (ryc. 2), której wartość związana jest z wielkością ziarna oraz z jego składem mineralogicznym, wpływającym na gęstość materiału. Ziarno utrzymywane jest w spoczynku także przez siły tarcia wynikające z kształtu ziarn, zróżnicowania ich wielkości (wysortowania materiału) oraz szorstkości podłoża, a także przez siły międzycząsteczkowe wynikające z kohezji, której wartość związana jest z wielkością przestrzeni międzycząsteczkowych, a więc również z kształtem i zróżnicowaniem wielkości ziarn. Podnoszenie ziarna związane jest z oddziaływaniem powietrza ponad ziarnem, które formuje tam obszar niskiego ciśnienia. Prędkość progowa wiatru inicjująca transport ziarn wynosząca około 4–9 m/s (Bagnold 1941, Sharp 1963) została określona wzorem (Bagnold 1941):

$$v_p = A \sqrt{\frac{\sigma - Q}{Q}} g \cdot d$$

$A \approx 0.1$, σ – gęstość ziarna, Q – gęstość powietrza, g – przyspieszenie ziemskie, d – średnica ziarna

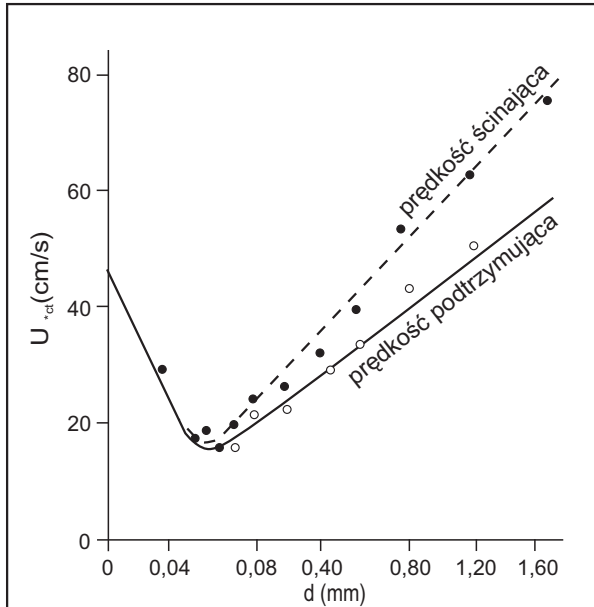


Ryc. 2. Rozkład sił występujących w czasie oddziaływania wiatru na ziarno
L – składowa unosząca, D – składowa wlekąca, W – siła ciężkości, C – siły międzycząsteczkowe wynikające z kohezji.

Fig. 2. Distribution of forces occurring when the wind affects the grain.

L – raising component, D – dragging component, W – gravity, C – intermolecular forces resulting from cohesion.

Przyjmując stałą gęstość powietrza można uznać, że wg Bagnold'a (1941) ścinająca prędkość wiatru zależna jest głównie od średnicy ziarna, a także od gęstości materiału budującego ziarno. W rozważaniach nie uwzględniono jednak zróżnicowania ziarn pod względem kształtu. Na podstawie badań laboratoryjnych stwierdzono, że najszybciej uruchamiane są ziarna o średnicy około 0,06 mm (ryc. 3) (Chepil 1945). Zainicjowaniu transportu większych ziarn przeciwstawia się zwiększająca się siła ciężkości, a mniejszych wzrastające siły międzycząsteczkowe wynikające ze zwiększających się sił kohezji między ziarnami. Dodatkowo ziarna, których średnica jest mniejsza niż 0,06 mm, czyli w przybliżeniu ziarna drobniejsze niż piaszczyste, stają się bardziej podatne na retencję wilgoci w obszarze międzycząsteczkowym. Ich mniejsza zdolność ruchu może również wynikać z faktu, że średnica części z nich jest mniejsza niż miąższość warstwy, w której prędkość wiatru wynosi zero (Wiggs 2000).



Ryc. 3. Zależność pomiędzy średnicą ziarna (d) a progową prędkością ścinającą i prędkością podtrzymującą wiatru (u_{ct}) (Chepil 1945).

Fig. 3. Correlation between the grain diameter (d) and threshold shear velocity and wind sustaining velocity (u_{ct}) (Chepil 1945).

W rozważaniach dotyczących intensywności transportu eolicznego ważny jest nie tylko proces inicjujący transport ziarn, ale również proces utrzymujący ziarno w ruchu (ryc. 3). Ocenia się, że podtrzymująca prędkość progowa wiatru, gdy część ziaren jest już w ruchu, jest mniejsza o około 20% od ścinającej prędkości progowej wiatru w przypadku, gdy proces transportu materiału eolicznego

go dopiero się zaczyna (Anderson, Haff 1988). Podstawowymi elementami wpływającymi na rozkład sił utrzymujących ziarno w powietrzu są cechy teksturalne ziarna oraz prędkość i sposób przepływu powietrza. Do najistotniejszych cech teksturalnych wpływających na ten proces zaliczyć należy wielkość ziarna oraz skład mineralogiczny wpływające na siłę ciężkości oraz kształt ziarna, który może bardzo istotnie zwiększać zarówno siły unoszenia jak i oporu.

Transport eoliczny ziarn poniżej 0,06 mm odbywa się głównie w zawieszynie. Ziarna frakcji (0,06–0,5 mm) transportowane są w saltacji. Ich udział w procesie eolicznym może dochodzić nawet do 90%. Reptacja (pełznięcie z chwilową saltacją) polega na zapoczątkowaniu ruchu ziarn będących w spoczynku przez silne uderzenie szybko przemieszczającego się w procesie saltacji pojedynczego ziarna. Traci ono około 40% energii wybijając na niską wysokość nawet 10 ziarn, które poruszają się z prędkością równą 1/10 prędkości ziarna inicjującego transport, najczęściej za małą, aby wprowadzić je w proces saltacji. Ziarna takie wykonują najczęściej jeden skok (Anderson, Haff 1988). Grubsze ziarna (0,5–2 mm) transportowane są głównie przez wleczenie i toczenie. Ich udział w procesie eolicznym nie przekracza na ogół 25% (Willetts, Rice 1985).

Na intensywność transportu eolicznego wpływa w istotny sposób także trajektoria lotu ziarna w procesie saltacji. Zależy ona w dużej mierze od wysokości skoku ziarna. Im wyżej podskoczy ziarno tym większą siłę uzyska od wiatru, którego prędkość rośnie logarytmicznie wraz z odległością od podłoża (Willetts 1983). Długość skoku ziarna jest około 12–15 razy większa niż jego wysokość (Livingstone, Warren 1996). Na długość skoku ziarna wpływa kształt, wielkość oraz gęstość materiału, z którego zbudowane jest ziarno. Płaskie i lekkie ziarna mają niższe, ale dłuższe skoki niż ziarna cięższe i bardziej okrągłe (Willetts 1983). Większa długość skoku może być związana z ruchem obrotowym ziarna dochodzącym do 400 obr/s (tzw. efekt Magnusa) (White, Schultz 1977) zależnym od kształtu oraz ciężaru ziarna. Miąższość warstwy, w której zachodzi saltacja zależy od prędkości wiatru, cech teksturalnych ziarn oraz charakteru podłoża. Jest ona większa, gdy proces zachodzi na sprężystym skalistym lub kamienistym podłożu, a mniejsza na luźnym piasku (Pye, Tsoar 1990). W przypadku zwiększenia miąższości warstwy maleje jednak znacznie masa ziarn podlegających temu procesowi. Liczne eksperymenty terenowe i laboratoryjne wykazały, że zależnie od cech teksturalnych ziarn wysokość saltacji może wynosić nawet 2–3 m (Pye, Tsoar 1990), choć dla zdecydowanej większości materiału wysokość ta nie przekracza wartości 10 cm (Bagnold 1941) lub 20 cm (Sharp, Saunders 1978, Pye, Tsoar 1990), a według niektórych nawet 2 cm (Butterfield 1991). Liczba ziarn poderwanych w wyniku uderzenia opadającego z saltacji ziarna jest proporcjonalna do kwadratu prędkości opadającego ziarna, która może wynosić 5 razy więcej niż prędkość ziarna na początku drogi saltacyjnej (Anderson, Haff 1988).

CEL I METODY BADAŃ

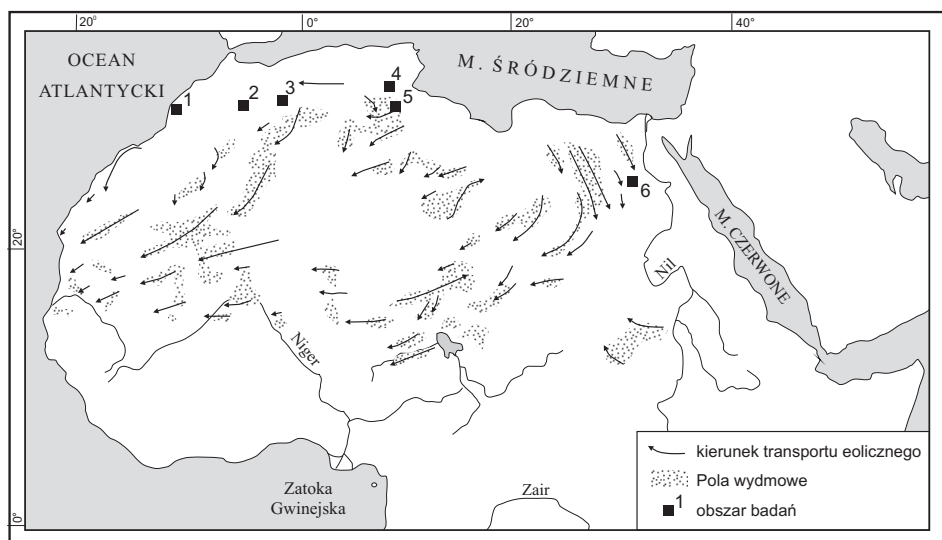
Celem opracowania jest określenie wpływu cech teksturalnych materiału frakcji piaszczystej na transport eoliczny w wybranych obszarach północnej Sahary (ryc. 4). Do analizy wykorzystano wyniki uzyskane podczas wieloletnich badań dotyczące podstawowych cech teksturalnych osadów wydmowych, które są istotne dla transportu eolicznego: skład mineralogiczny, kształt ziarna oraz średnią średnicę ziarn i wysortowanie materiału wydmowego.

Prezentowane wyniki otrzymano na podstawie standardowych analiz laboratoryjnych średnio kilkudziesięciu próbek dla każdego pola wydmowego. Analizę uziarnienia wykonywano metodą sitową na sucho (zestaw sit firmy Fritsch) (Mycielska-Dowgiałło 1995) lub metodą dyfrakcji optycznej w zawiesinie z zastosowaniem laserowego miernika cząstek Analysette 22 Comfort firmy Fritsch. Wskaźniki uziarnienia obliczono wg wzorów Folka i Warda (1957). Określenie składu mineralno-litologicznego przeprowadzono na podstawie analizy mikroskopowej tzw. preparatów proszkowych. Preparaty proszkowe wykonane z próbek materiału wydmowego analizowano pod kątem struktury, tekstury i składu mineralnego przy zastosowaniu różnorodnych technik mikroskopii polaryzacyjnej (Borkowska, Smulikowski 1973).

WYNIKI

W tabeli (tab.1) przedstawiono wyniki cech teksturalnych osadów, najważniejszych dla oceny podatności materiału na transport eoliczny otrzymane dla 6. pól wydmowych, położonych na obszarze północnej Sahary (ryc. 4).

Pole wydmowe nr 1 (Tarfaya-Laayoune) położone na obszarze Sahary Zachodniej charakteryzuje się materiałem zróżnicowanym pod względem mineralno-litologicznym, umiarkowanie dobrze wysortowanym, o typowej dla dojrzałych pól wydmowych średnicy ziarn. Spośród cech teksturalnych czynnikiem mającym największe znaczenie dla transportu eolicznego wydaje się być zróżnicowanie mineralogiczne osadu (dość równy udział w badanych osadach wapieni, kwarcu i klastów Fe-ilastych). Składniki te cechuje duża odmienność kształtu, co wpływa niewątpliwie na wzrost kohezji i tarcia, a więc na wzrost sił utrzymujących ziarno w spoczynku. Może to skutkować wyższą ścinającą prędkością progową wiatru w tym regionie. Wpływ cech teksturalnych na transport ziarn w powietrzu jest również zróżnicowany. Węglany czy klasty Fe-ilaste, ze względu na dość nieregularny kształt trudniej podlegają uruchomieniu, a większa powierzchnia tych ziarn zwiększa siłę oporu powietrza, co dodatkowo spowalnia transport materiału.



Ryc. 4. Rozmieszczenie pól wydmywanych wybranych do badań w obszarze północnej Sahary na tle kierunków transportu eolicznego.

Fig. 4. Distribution of dune fields selected for research in the northern Sahara and directions of aeolian transport.

Pole wydmywane nr 2 (Coude du Dra) położone w południowym Maroku charakteryzuje się dwoma typami ziarn: kwarcowymi lub klastami Fe-ilastymi. Materiał budujący pola wydmywane w tym regionie podlegał procesom eolicznym stosunkowo krótko, dlatego też ziarna kwarcu są stosunkowo słabo obtoczone, co zwiększa siły kohezji i tarcia zwiększając siłę potrzebną do uruchomienia ziarna.

Ziarna zbudowane z agregatów Fe-ilastych mają bardzo zróżnicowany kształt i ciężar, co utrudnia ocenę wpływu tych czynników na transport eoliczny. Znaczna część ziarn ma budowę płytkową i tabliczkowaty kształt. Taki kształt znacznie zwiększa tarcie o podłoże, ale sprzyja tworzeniu się niskiego ciśnienia ponad ziarnem, zwiększając powierzchniową siłę poderwania. Agregaty lekkie (montmorylonit) ulegają poderwaniu łatwiej, w procesie saltacji wykonują niższe, lecz z uwagi na ułatwiający unoszenie kształt, dłuższe skoki. Nie są to jednak ziarna, które mają dużą energię kinetyczną. Siła z jaką uderzają w ziarno będące w spoczynku jest zapewne mniejsza niż w przypadku np. ziarn kwarcowych. Agregaty ciężkie (np. hematyt) podlegają uruchomieniu zdecydowanie trudniej, posiadają jednak znacznie większą energię kinetyczną, która sprzyja zwiększeniu transportu eolicznego. Pola wydmywane w regionie Coude du Dra charakteryzują się nieco drobniejszym materiałem, co zmniejsza ich ciężar, ale część najmniejszych ziarn, zależnie od miąższości warstwy zerowej prędkości aerodynamicznej, może nie zostać uruchomiona.

Tab. 1. Wybrane cechy teksturalne osadów 6. pól wydmywanych położonych w obszarze północnej Sahary.
Table 1. Selected textural features of sediments in six dune fields in the northern Sahara.

Nr pola wydmywowego	1	2	3	4	5	6
Pole wydmywowe	Tarfaya-Laayoune (Sahara Zachodnia)	Coude du Dra (Maroko)	Erg Chebbi (Maroko)	Szott Dzerid (Tunezja)	Wielki Erg Wschodni (Tunezja)	Obniżenie Khargi (Egipt)
Dominujący składnik	wapienie	Kwarc	kwarc	gips	kwarc	kwarc
średni udział (%)	32 (badania własne 2007)	59 (Barczuk, Dłużewski 2003)	91 (Barczuk, Dłużewski, Dubis 2008)	54 (Barczuk, Dłużewski 2006)	94 (Barczuk, Dłużewski 2006)	71 (Barczuk, Dłużewski 2001)
ciężar właściwy (g/cm ³)	2.7–2.95	2.55–2.64	2.55–2.64	2.3–2.37	2.55–2.64	2.55–2.64
dominujący kształt (dla ziarn kwarcowych stopień obtoczenia wg skali Krumbeina 1941)	b. różnicowany, izometryczny, zależny od pierwotnej struktury	0.4 (Woronko 2003)	0.7 (badania własne 2006)	tabliczkowaty, słupki, pręciki, częściowej wydłużony niż owalny	0.7 (Dłużewski 2002)	0.6 (Barczuk, Dłużewski 2001)
Drugorzędny składnik	kwarc	kalsty Fe-ilaste	nieistotny	kwarc	nieistotny	wapienie
średni udział (%)	29 (badania własne 2007)	32 (Barczuk, Dłużewski 2003)	x	37 (Barczuk, Dłużewski 2006)	x	7.1 (Barczuk, Dłużewski 2001)

Nr pola wydmowego	1	2	3	4	5	6
ciężar właściwy (g/cm ³)	2.55–2.64	1.7–3.6	x	2.55–2.64	x	2.7–2.95
dominujący kształt (dla ziarn kwarcowych stopień obtoczenia wg skali Krumbeina 1941)	b.d.	b. zróżnicowany, izometryczny, tabliczkowaty, zależny od pierwotnej struktury	x	0.5 (Dłużewski 2002)	x	b. zróżnicowany, izometryczny, zależny od pierwotnej struktury
średnia wartość średniej średnicy ziarn [M _x] (wg wzorów Folk i Warda 1957) (Phi)	1.61 (badania własne 2007)	2.31 (Dłużewski 2003)	1.46 (Barczuk, Dłużewski, Dubis 2008)	3.10 (Barczuk, Dłużewski 2006)	3.22 (Barczuk, Dłużewski 2006)	1.59 (Barczuk, Dłużewski 2001)
średnia wartość wysortowania [σ ₁] (wg wzorów Folk i Warda 1957)	0.65 (badania własne 2007)	0.52 (Dłużewski 2003)	0.51 (Barczuk, Dłużewski, Dubis 2008)	0.25 (Barczuk, Dłużewski 2006)	0.23 (Barczuk, Dłużewski 2006)	0.57 (Barczuk, Dłużewski 2001)

Pole wydmowe nr 3 (Erg Chebbi) położone w południowo-wschodnim Maroku zbudowane jest z materiału cechującego się dużym stopniem eolizacji, charakterystycznego dla dojrzałych ergów pustyń gorących. Są to w zdecydowanej większości dobrze obtoczone, dość duże i dobrze wysortowane ziarna kwarcu. Oceniając rozkład sił wpływających na ścinającą prędkość progową wiatru należy stwierdzić, że dobrze obtoczone i wysortowane ziarna ograniczają siły wynikające z kohezji i siły tarcia. Z uwagi na kształt wartość siły unoszenia jest również mniejsza niż w przypadku ziarn o kształcie tabliczkowym. Na wartość podtrzymującej prędkości progowej wiatru wpływa w tym przypadku trajektoria transportu. Ziarna, z uwagi na większą wielkość, a w związku z tym nieco większy ciężar, charakteryzują się wyższymi (z uwagi na większą energię kinetyczną), ale krótszymi skokami. Ziarna największe (>0,05 mm) nie będą transportowane w saltacji lecz toczone po powierzchni, co zwiększa bardzo siłę tarcia i w rezultacie ogranicza sumaryczną wartość transportu eolicznego.

Pole wydmowe nr 4 (Szott Dżerid) położone w środkowej Tunezji zbudowane jest głównie z materiału gipsowego i kwarcowego. Jednoczesne występowanie tak zróżnicowanych pod względem odporności na abrazję mechaniczną minerałów w materiale wydmowym wskazuje na różne źródło materiału oraz krótkotrwały proces formowania się wydm. Dość lekki gips, często tworzący ziarna o kształcie tabliczkowatym, jest dobrze unoszony, choć także bardzo podatny na rozpadanie w czasie transportu. Jego uruchomieniu przeciwstawia się większa siła tarcia oraz siły wynikające z kohezji związane z kształtem. Tylko nieznacznie cięższy i dość dobrze obtoczony kwarc cechują mniejsze siły tarcia na powierzchni i oporu podczas transportu, może on być zatem łatwiej transportowany przez wiatr. Mimo mniejszej średniej średnicy ziarn parametr ten nie powinien mieć istotnego wpływu na wzrost sił wynikających z kohezji utrzymujących ziarno w spoczynku, ponieważ analizowany materiał jest również bardzo dobrze wysortowany, a zdecydowana większość ziarn jest większa niż 0,06 mm. Zależnie od szorstkości podłoża (miąższości warstwy zerowej prędkości aerodynamicznej) część materiału może jednak nie zostać uruchomiona. Wielkość materiału wpływa w istotny sposób także na mniejszy ciężar ziarn, a w konsekwencji na mniejszą wartość ścinającej oraz podtrzymującej prędkości progowej wiatru.

Pole wydmowe nr 5 (Wielki Erg Wschodni) położone w południowej Tunezji składa się w przeważającej większości z dobrze obtoczonych i bardzo dobrze wysortowanych, stosunkowo małych ziarn kwarcu. Cechy te powinny wpływać na znaczne zmniejszenie prędkości progowej wiatru zarówno w przypadku uruchamiania ziarna jak i w przypadku transportowania w powietrzu, co w konsekwencji powinno sprzyjać dużej intensywności transportu eolicznego. Jedynym ograniczeniem wydaje się być czynnik związany z miąższością warstwy zerowej

prędkości aerodynamicznej, która w przypadku dużej szorstkości podłoża może ograniczyć uruchomienie mniejszych ziarn.

Pole wydmore nr 6 (obszar obniżenia Khargi) położone w południowym Egipcie zbudowane jest z dość dobrze obtoczonych, umiarkowanie dobrze wysortowanych, stosunkowo dużych, w przewodzie kwarcowych ziarn. Ich charakterystyka i podatność na transport eoliczny jest podobna do materiału budującego pole wydmore nr 3. Materiał wydm wchodzących w skład pola nr 6 zawiera jednak zdecydowanie większy udział domieszek (głównie wapieni i klastów Fe-ilastych). Powoduje to, że część materiału ma zdecydowanie inne cechy teksturalne niż materiał mający udział dominujący, a w konsekwencji zróżnicowaną (opisaną odpowiednio dla pola nr 1 i pola nr 2) podatność na transport eoliczny.

DYSKUSJA I WNIOSKI

Wpływ cech teksturalnych na transport eoliczny materiału piaszczystego nie był dotychczas przedmiotem szczegółowych badań prowadzonych w warunkach naturalnych, a wyniki badań wykonywanych w warunkach laboratoryjnych nie są uznawane za satysfakcjonujące. Sprawia to, że w przypadku konkretnych pól wydmy ocena przedstawionego zagadnienia nie jest łatwa. Niewątpliwie jednak cechy teksturalne materiału należy uznać za jeden z istotnych czynników wpływających na transport eoliczny. Wśród nich za najważniejsze dla tego procesu od dawna uważa się wielkość oraz skład mineralny (gęstość ziarna) wpływające na jego ciężar. Nieco później zaczęto brać pod uwagę zróżnicowanie wielkości (wysortowanie) materiału. Zdaniem autora, rola kształtu ziarn w transporcie eolicznym była długo niedoceniana. Nawet współczesne opracowania poświęcone temu zagadnieniu są nieliczne. W przypadku materiału piaszczystego kształt ziaren wpływa niewątpliwie na siłę tarcia, siły międzycząsteczkowe wynikające z kohezji, a przede wszystkim na siły unoszenia oraz oporu działające na ziarno w trakcie ruchu w powietrzu. Ziarna o budowie tabliczkowej (np. gipsowe) podlegają transportowi w powietrzu znacznie łatwiej niż porównywalnej wielkości ziarna okrągłe.

Choć, jak wspomniano, trudno jest bezpośrednio potwierdzić stawiane w niniejszym opracowaniu wnioski, to wyniki badań dotyczące szybkości przemieszczania się barchanów w obrębie analizowanych pól wydmy umożliwiają pewne odniesienie. Oczywiście jest również, że na szybkość przemieszczania się wydm wpływa szereg czynników nie związanych z cechami materiału, który je buduje. W ocenie niniejszego zagadnienia wzięto jednak pod uwagę informacje dotyczące przemieszczania się form podobnych pod względem wielkości (1,5 m wysokości) w obszarach o zbliżonych cechach fizycznogeograficznych:

stałym kierunku i porównywalnej sile wiatru, pozbawionym roślinności, gładkim, równinnym podłożu (najczęściej genezy jeziornej), niskiej wilgotności powietrza i podłoża, dużych przestrzeniach międzywydmowych. Stwierdzono, że najszybciej przemieszczają się barchany na polu wydmowym nr 4 (dominującym składnikiem jest gips) – około 90 m/rok (Dłużewski 2000), wolniej barchany na polu wydmowym nr 1 (dominującym składnikiem są wapienie) – około 50 m/rok (Oulehri 1992), a najwolniej barchany na polu wydmowym nr 6 (dominującym składnikiem jest kwarc) – około 30 m/rok (Dłużewski 2002). Wyniki te wydają się potwierdzać słuszność tezy dotyczącej istotnego wpływu cech teksturalnych na transport eoliczny.

Literatura

- Anderson R.S., Haff P.K., 1988. Simulation of eolian saltation. *Science*, 241, 820–823.
- Bagnold, R. A. 1941. *The physics of blown sand and desert dunes*. London, Chapman and Hall.
- Barczuk A., Dłużewski M., 2001. Źródło osadów eolicznych w obniżeniu Khargi (południowy Egipt) na podstawie ich cech teksturalnych, [w:] J. Pełka-Gościński, T. Szczypek (red.), *Dynamiczne aspekty geomorfologii eolicznej*. WNoZ UŚ, SGP, Sosnowiec, 51–61.
- Barczuk A., Dłużewski M., 2003. Skład mineralno-litologiczny jako podstawa do określenia źródła i wskaźnik stopnia eolizacji osadów wydmowych, [w:] M. Dłużewski (red.), *Współczesna ewolucja środowiska przyrodniczego regionu Coude du Dra (południowe Maroko) i jej wpływ na warunki życia ludności autochtonicznej*. Wyd. Akad. Dialog, Warszawa, 103–120.
- Barczuk A., Dłużewski M. 2006. Znaczenie Wielkiego Ergu Wschodniego jako źródło osadów wydmowych obszaru Szott Dżerid, [w:] M. Dłużewski (red.), *Formy i procesy rzeźbotwórcze Tunezji*. *Prace i Studia Geogr.* 37, WGiSR UW, Warszawa, 99–124.
- Barczuk A., Dłużewski M, Dubis L. 2008. Natural and anthropogenic factors of the development of Erg Chebbi, [w:] S. Skiba, K. Krzemień (red.), *Contemporary evolution of the natural environment of the region between Antiatlas and Sahara (Morocco)*. *Prace Geogr.* 118, IGiGP UJ, Kraków, 79–92.
- Borkowska M., Smulikowski K., 1973. *Minerały skałotwórcze*. Wyd. Geol., Warszawa.
- Butterfield G.R., 1991. Grain transport rates in steady and unsteady turbulent airflows. *Acta Mechanica, Supplement* 1, 97–122.
- Chepil W.S., 1945: Dynamics of wind erosion: 1. Nature of movement of soil by wind, *Soil Science* 60, 305–320.
- Dłużewski M., 2000. Evolution of selected dune fields in Southern Tunisia as an example of the Sahara northern borders, [w:] R. Dulias, J. Pełka-Gościński (red.), *Aeolian processes in different landscape zones*. WNoZ UŚ, SGP, Sosnowiec, 179–189.
- Dłużewski M., 2002. Rozprzestrzenianie się pól wydmowych jako efekt pustynnienia północnego obrzeżenia Sahary (na przykładzie okolic Szotu El Jerid – południowa

- Tunezja, [w:] L. Andrzejewski, P. Molewski (red.), *Geografia XXXII. Acta Univ. Nicolai Copernici* 109, Toruń, 57–68.
- Dłużewski M., 2003. Rozprzestrzenianie się pól wydmowych jako skutek pustynnienia, [w:] M. Dłużewski (red.), *Współczesna ewolucja środowiska przyrodniczego regionu Coude du Dra (południowe Maroko) i jej wpływ na warunki życia ludności autochtonicznej*, Wyd. Akad. Dialog, Warszawa, 77–102.
- Finkel H. J., 1959. The barchans of southern Peru, *J. of Geol.* 67, 614–647.
- Folk R.L., Ward W. 1957. Brazos River bar: A study in the significance of grain size parameters. *J. Sed. Petrol.* 29, 3–27.
- Greeley R., Iversen T.D., 1985. *Wind as a geological process on Earth, Mars, Venus and Titan*. Cambridge University Press, Cambridge
- Krumbein W.C., 1941. Measurment and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles. *Jour. Sed. Petrol.* 11.
- Lancaster N., Greeley R., Rasmussen K.R., 1991. Interaction between unvegetated desert surfaces and the atmospheric boundary layer: a preliminary assessment. *Acta Mechanica, Supplement 2*, 89–102.
- Livingstone I., Warren A., 1996. *Aeolian geomorphology: an introduction*. Longman, London
- Mycielska-Dowgiałło E. 1995. Wybrane cechy teksturalne osadów i ich wartość interpretacyjna, [w:] E. Mycielska-Dowgiałło, J. Rutkowski (red.), *Badania osadów czwartorzędowych*. WGiSR UW, PiG, PAN, Warszawa, 29–105.
- Oke T.R., 1987. *Boundary layer climates*. Methuen, New York.
- Ouelehri T., 1992. *Etude géodynamique des migrations de sables éoliens dans la région de Laâyoune – Nord du Sahara Marocain*. PhD thesis, l'Université Paris 6, nr 92–12, Paris.
- Pye K., Tsoar H., 1990. *Aeolian sand and sand dunes*. Unwin Hyman, London.
- Sharp, Robert P. 1963. Wind ripples. *J. of Geol.* 71, 5, 617–36.
- Sharp, R. P., Saunders, R. S. 1978. Eolian activity in westernmost Coachella Valley and at Garnet Hill, [w:] R. Greeley, M. Womer, R. Papson and P. Spudis (red.) *Aeolian Features of Southern California: A Comparative Planetary Geology*. Washington, NASA, 9–22.
- White B.R., Schultz J.C., 1977. Magnus effect in saltation. *J. of Fluid Mechanics* 81, 497–512.
- Wiggs G.F.S., 2000. Sediment mobilisation by the wind, [w:] D.S.G Thomas (red.) *Arid zone geomorphology, Process, Form and Change in Drylands*. Wiley.
- Willetts B.B., Rice M.A., 1985. Inter-saltation collisions, [w:] *Proceeding of International Workshop on the Physics of Blown Sand, Memoirs 8*. Department of Theoretical Statistics, Aarhus University, Denmark, 83–100.
- Willetts B.B., 1983. Transport by wind of granular materials of different grain shapes and densities. *Sedimentology* 30, 669–679.
- Woronko B., 2003. Charakter powierzchni ziaren jako wskaźnik stopnia eolizacji osadów wydmowych, [w:] M. Dłużewski (red.), *Współczesna ewolucja środowiska przyrodniczego regionu Coude du Dra (Maroko) i jej wpływ na warunki życia ludności*. Wyd. Akad. Dialog, WGiSR UW, Warszawa, 121–134.