Rozprzestrzenianie się pól wydmowych jako skutek pustynnienia*

Maciej Dłużewski

Instytut Nauk Fizycznogeograficznych, Wydział Geografii i Studiów Regionalnych, Uniwersytet Warszawski e-mail: dluzewski@uw.edu.pl

Badania rozprzestrzeniania się akumulacyjnych form eolicznych prowadzone są na dużą skalę od początku XX wieku na różnych obszarach należących do suchej lub półsuchej strefy klimatycznej.

Wykazano dotychczas, że głównymi czynnikami mającymi wpływ na szybkość procesu deflacji – procesu stanowiącego główną przyczynę powstawania akumulacyjnych form wydmowych – są: cechy teksturalne osadów podłoża, rzeźba oraz spoistość podłoża, wilgotność powietrza i podłoża, siła i kierunek wiatru, pokrycie powierzchni przez szatę roślinną (Bagnold 1941, Chepil 1945, Zingg 1951, Borsy 1972, Tsoar, Illenberger 1998, Lóki 2000, Lóki 2001, Dubis, Dłużewski 2002, i in.). Niektórzy badacze za ważny czynnik uznają również podatność podłoża na proces korazji – erozji mechanicznej podłoża powodowanej przez ziarna mineralne transportowane przez wiatr (Blackwelder 1934).

Na podstawie przeprowadzonych wieloletnich obserwacji obszarów północnego obrzeżenia Sahary stwierdzono, że w ciągu ostatnich stu lat powstała znaczna liczba nowych pól wydmowych, które rozprzestrzeniają się bardzo dynamicznie. Powstaje pytanie: czy tak duża dynamika procesu rozprzestrzeniania się wydm związana jest tylko z globalnymi zmianami klimatycznymi, czy też proces ten zależny jest przede wszystkim od czynników antropogenicznych o zasięgu lokalnym? Aby odpowiedzieć na tak postawione pytanie przeprowadzono badania, które w szczególności miały scharakteryzować dynamikę rozprzestrzeniania się pól wydmowych na obszarze Coude du Dra (ryc. II).

Metody badań

W badaniach terenowych korzystano z systemu GPS oraz taśmy mierniczej i busoli geologicznej. Badania te miały na celu określenie morfometrii wybranych wydm. Pomiary GPS pozwoliły na wyznaczenie aktualnego zasięgu pól wydmowych na badanym obszarze, a także na określenie wielkości obszarów międzywydmowych. Badania terenowe pozwoliły również na określenie cech metrycznych rzeźby podłoża, która jest jednym z podstawowych czynników wpływających na tempo rozprzestrzeniania się pól wydmowych. Obserwacje terenowe pozwoliły ponadto na określenie charakteru i zasięgu występowania zbiorowisk roślinnych oraz ocenę ich wpływu na przebieg procesów eolicznych.

Ocenę stopnia eolizacji osadu tzn. stopnia przekształcenia osadów źródłowych w osady eoliczne (Mycielska-Dowgiałło 1992, 1993) budujące badane formy wydmowe, przeprowadzono na podstawie analizy cech teksturalnych¹ tego osadu. W tym celu pobrano próbki z wybranych akumulacyjnych form eolicznych oraz z potencjalnych obszarów źródłowych.

W celu określenia charakteru utworów powierzchniowych, a w szczególności w celu oceny podatności podłoża na proces deflacji i określenia źródła materiału wydmowego, pobrano próbki z osadów podłoża.

Badania laboratoryjne polegały na analizie cech teksturalnych osadów wydmowych i osadów podłoża (Mycielska-Dowgiałło, Rutkowski 1995):

^{*} Artykuł publikowany w książce pt.: Współczesna ewolucja środowiska przyrodniczego regionu Coude du Dra (Maroko) i jej wpływ na warunki życia ludności pod redakcją Macieja Dłużewskiego, Wydawnictwo Akademickie Dialog, Warszawa 2003, s. 77–101

¹ Termin "tekstura osadów" rozumiany jest jako uziarnienie, obróbka i zmatowienie ziaren oraz skład mineralny i petrograficzny osadów (Mycielska-Dowgiałło 1992, 1993).

• Wykonano analizę sitową oraz, dla niektórych osadów o znacznym udziale procentowym frakcji ilastej, analizę areometryczną (Dobrzański, Uziak 1970). Do analizy uziarnienia osadów podłoża zbudowanych w zdecydowanej większości z osadów drobnoziarnistych wykorzystano urządzenie firmy Fritsch – "Analysette 22".

• Określono mikromorfologię ziaren kwarcowych w skaningowym mikroskopie elektronowym (SEM) (Mycielska-Dowgiałło 1988, Woronko 2001b, Woronko 2003).

• Dokonano analizy składu mineralno-litologicznego osadów, pozwalającej na określenie ich źródła, charakteru środowiska sedymentacji oraz zróżnicowania odporności osadu na procesy niszczące podczas transportu materiału (Barczuk 1992, Barczuk, Dłużewski 2001, Barczuk, Dłużewski 2003).

• Dokonano analizy składu minerałów ciężkich, pozwalającej na określenie obszarów alimentacyjnych osadów wydmowych oraz na oszacowanie czasu trwania procesu (Barczuk 1992, Barczuk, Dłużewski 2001, Barczuk, Dłużewski 2003.).

Prace kameralne polegały na analizie wyników badań laboratoryjnych oraz analizie map archiwalnych, prowadzonej w celu wyznaczenia zmian zasięgu pól wydmowych w czasie.

Znaczenie wybranych cech teksturalnych osadów jako wskaźnika dynamiki rozprzestrzeniania się pól wydmowych

Stopień eolizacji osadów wydmowych badanego obszaru oraz dynamikę środowiska transportującego określono na podstawie analizy takich cech teksturalnych jak: uziarnienie i skład mineralno-litologiczny. Wyniki badań składu mineralno-litologicznego przedstawiono w artykule A. Barczuka i M. Dłużewskiego (w tym tomie).

Zmatowienie ziaren kwarcowych, jak wykazały dotychczasowe badania w skaningowym mikroskopie elektronowym (SEM), nie musi być związane z procesem abrazji ziaren w czasie transportu eolicznego, lecz może być wynikiem trawienia chemicznego i oskorupienia, procesów osiągających bardzo dużą intensywność w gorącym klimacie pustynnym (Kuenen, Perdok 1961, Goździk, Mycielska-Dowgiałło 1988, Woronko 2001b). Dlatego też istnieje uzasadnione przypuszczenie, że procesy te mogą istotnie wpływać na zmatowienie ziaren kwarcowych, co podważa uniwersalne znaczenie tej cechy jako wskaźnika stopnia eolizacji osadów.

Krzywe częstości, wyznaczone na podstawie analizy uziarnienia osadów, pozwalają na określenie wysortowania danej frakcji: im wyższa jest wartość częstości tym lepsze jest wysortowanie tej frakcji. Z przebiegu krzywych można wnioskować także o charakterze uziarnienia i stopniu przekształcenia osadów źródłowych oraz o sile ośrodka transportującego.

Krzywe kumulacyjne uziarnienia wykreśla się stosując na osi odciętych skalę logarytmiczną (w jednostkach Φ), a na osi rzędnych – skalę prawdopodobieństwa. Przebieg krzywych kumulacyjnych wskazuje na stopień wysortowania osadów w czasie transportu, tym większy im większe jest nachylenie krzywej. Można tu wyróżnić trzy odcinki A, B i C odpowiadające udziałom procentowym poszczególnych frakcji, charakteryzujące dynamikę i rodzaj transportu (Visher 1969). Najlepiej wysortowana jest zawsze frakcja pośrednia (odcinek A), która odpowiada transportowi ziaren w procesie saltacji. Słabiej wysortowana frakcja drobniejsza (odcinek B) odpowiada ziarnom transportowanym poprzez unoszenie w zawiesinie, natomiast frakcja grubsza (odcinek C), również słabiej wysortowana, odpowiada ziarnom transportowanym przez toczenie i wleczenie.

Na podstawie krzywych kumulacyjnych można obliczyć wskaźniki uziarnienia wg wzorów Folka i Warda: średnią średnicę ziaren (M_z), odchylenie standardowe (s_1) i skośność (Sk_1) (Folk, Ward 1957). Średnia średnica ziaren wskazuje na siłę środowiska transportującego: im większa jest jej wartość (wyrażona w jednostkach Φ) tym mniejsza była energia środowiska. Odchylenie standardowe charakteryzuje stopień wysortowania osadu świadczący o zmienności dynamiki transportu: im jest ono mniejsze tym osad jest lepiej wysortowany, co odpowiada małej zmienności dynamiki transportu. Skośność, podobnie jak średnia średnica ziaren, wskazuje na siłę ośrodka transportującego. Skośność dodatnia świadczy o większym udziale drobniejszej frakcji w stosunku do frakcji o maksymalnej częstości, a skośność ujemna, o większym udziale frakcji grubszej. Ponadto, porównanie wartości skośności osadów wydmowych i osadów podłoża może wskazywać na charakter procesu akumulacji (Mycielska-Dowgiałło 1995). Przedstawienie wyników jako zależności między średnią średnicą ziaren i odchyleniem standardowym pozwala na wnioskowanie o dynamice transportu i procesie akumulacji materiału w obrębie określonego środowiska.

Charakterystyka utworów powierzchniowych oraz szaty roślinnej

Współczesne pola wydmowe zajmują przeważający obszar równinnej części regionu Coude du Dra. Większość wydm osiąga wysokość od kilku do kilkunastu metrów w części centralnej badanego obszaru oraz od 1 do 3 metrów na krańcach zachodnich – w rejonie jeziora Iriqui i wschodnich – w rejonie oazy Mhamid. Są to głównie barchany lub wydmy barchanoidalne, których tworzenie się związane jest z przeważającym, północno-zachodnim kierunkiem wiatru. Barchany te charakteryzują się stosunkowo stromym stokiem dowietrznym o nachyleniu od 10° do 20° i długości do kilkudziesięciu metrów oraz typowym dla większości saharyjskich form wydmowych stokiem zawietrznym o długości dochodzącej zaledwie do kilkunastu metrów i nachyleniu równym kątowi naturalnego zsypu wynoszącemu od 33° do 35°. Na obszarach najdłużej pokrytych przez pola wydmowe (Erg Sedrar, Erg Smer, Erg Mhazil i in.) występują formy o kilkudziesięciometrowej wysokości względnej, osiągające maksymalną wysokość 111 m (Erg Souar). Są to w przewadze złożone wydmy barchanoidalne o stokach dowietrznych charakteryzujących się dużą zmiennością nachylenia i osiągających kilkaset metrów długości oraz ponad stumetrowej długości stokach zawietrznych o stałym nachyleniu, nie odbiegającym od nachylenia form małych.

Sporadycznie można natrafić na inicjalne wydmy gwiaździste charakteryzujące się kilkoma liniami grzbietowymi. Ich położenie praktycznie nie zmienia się – podczas zmiany kierunku wiatru przemodelowaniu ulegają jedynie ramiona tych form.

Lokalnie obserwuje się również wydmy poprzeczne, których powstanie związane jest z okresowym występowaniem przeciwnych kierunków wiatru, jak również z lokalnym, nieco powszechniejszym występowaniem zbiorowisk roślinnych. Ta zmienność kierunku wiatru, jak również występująca jeszcze do niedawna wzdłuż ouedu Dra większa wilgotność podłoża, powoduje wahadłowo-postępowy sposób przemieszczania się wydm o stosunkowo niewielkiej wartość wypadkowej przemieszczenia. Taki sposób przemieszczania może być przyczyną szczególnej asymetrii niektórych wydm, charakteryzującej się zmiennym nachyleniem zarówno w obrębie stoku dowietrznego jak i zawietrznego. Dodatkowym czynnikiem ograniczającym tempo przemieszczania się wydm, a także wpływającym na ich kształt jest, obserwowana często na badanym obszarze, stosunkowo niewielka powierzchnia obszarów międzywydmowych.

Podłoże obszaru Coude du Dra, będącego obniżeniem pomiędzy wzniesieniami Jebel Bani i wyżynną powierzchnią Hamady du Dra, zbudowane jest w większości ze słabo spoistego, różnoziarnistego materiału zakumulowanego w formie plejstoceńskich lub holoceńskich stożków aluwialnych. Wzmożona działalność erozyjna na obszarach górskich spowodowała, w okresach pluwialnych, wyerodowanie mniej odpornych skał. Materiał ten był wynoszony na przedpole Jebel Bani i akumulowany w postaci kilku poziomów stożków aluwialnych budujących rozległą równinę.

Podłoże centralnej część badanego obszaru – szerokiej doliny ouedu Dra, tworzą osady fluwialne budujące powierzchnie terasowe, zakumulowane w okresach pluwialnych. Różnoziarniste, a miejscami wyłącznie żwirowe osady tej doliny, której szerokość dochodzi do kilkunastu kilometrów, związane są z roztokowymi, żwirodennymi, licznymi korytami typowymi dla rzek o bardzo dużej zmienności przepływu, jakim charakteryzowała się w przeszłości rzeka Dra mająca swoje źródła w górach Atlasu Wysokiego.

W części zachodniej badanego terenu, na obszarze misy jeziora Iriqui, podłoże zbudowane jest z drobnoziarnistych ilastych i pylastych osadów jeziornych. Charakteryzują się one dużą spoistością, jednakże w wielu miejscach występują spękania powierzchni tworzące poligony z wysychania, które w swojej dojrzałej formie tworzą zwitki błotne bardzo podatne na proces deflacji. Tego typu osady można spotkać lokalnie na obszarze całej równiny wchodzącej w skład badanego regionu. Powstawały one w lokalnych zagłębieniach terenu wypełnianych przez wodę dostarczaną epizodycznie przez liczne koryta rozcinające południowe stoki Jebel Bani.

Morfometrycznie, zasadnicza część podłoża badanego obszaru stanowi równinę o płaskiej powierzchni, położoną na wysokości od 450 m do 550 m n.p.m. Północną granicę równiny stanowią południowe stoki Jebel Bani i erozyjne krawędzie plejstoceńskich stożków aluwialnych, natomiast granicę południową – kilkusetmetrowej wysokości krawędź Hamady du Dra. Wschodnia część równiny ograniczona jest morfometrycznie częściowo przez pasmo Beni Selmane, a zachodnia – częściowo przez krawędź wzniesień Mejahma.

Szata roślinna badanego obszaru jest ogólnie bardzo uboga. Tylko nieliczne fragmenty obszarów wydmowych porastają zbiorowiska rzadko rosnących traw. Na podłożu o wysokim zasoleniu spotyka się miejscami kępy roślinności słonolubnej. Nieco bardziej zwartą szatą roślinną odznaczają się koryta rzek epizodycznych, gdzie oprócz roślin trawiastych występują sporadycznie różne odmiany akacji. Szata roślinna tego typu jest charakterystyczna dla obszarów przykorytowych ouedu Dra oraz obszarów podsto-kowych Jebel Bani. Zwartą szatę roślinną można spotkać jedynie w obrębie sztucznie nawadnianej oazy Mhamid.

Rozprzestrzenianie się pól wydmowych

Badania rozprzestrzeniania się pól wydmowych przeprowadzono na podstawie analizy map z lat 1948 (kartowanie 1932), 1953, 1989 oraz własnych pomiarów przy wykorzystaniu systemu lokalizacji satelitarnej GPS (ryc. 1, tab. 1).

Mapa topograficzna tego obszaru przedstawiająca zasięg pól wydmowych w 1932 roku, których powierzchnia była około 30 razy mniejsza niż obecnie, pozwala wnioskować o znacznej dynamice rozprzestrzeniania się wydm w tym regionie. Wzrost dynamiki rozprzestrzeniania się wydm zauważalny jest zwłaszcza w latach trzydziestych i czterdziestych XX wieku oraz od roku 1980 do dzisiaj (ryc. 1, tab. 1).

Rok	Powierzchnia pól wydmowych (km ²)	Źródło
1932	85	Carte Topographique du Maroc. Skala 1:200 000. Institut Géographique National – l'Annexe du Maroc, Rabat 1948 (na podstawie pomiarów z 1932 roku). Arkusz Coude du Dra.
1954	873	Carte Générale du Maroc. Skala 1:500 000. Wykonana we współpracy: Service Géologique du Maroc i l'Annexe de Institut Géographique National, Rabat 1953, Institut Géographique National, Paris 1954. Arkusz Ouarzazate.
1989	1291	Carte Géologique du Maroc. Skala 1:200 000. Ministère de l'Energie et des Mines. Direction de la Géologie, Rabat 1989. Arkusz: Zagora – Coude du Dra – Hamada du Dra.
1999/2001	2576	Badania własne przeprowadzone w kwietniu 1999 i marcu 2001.

Tabela 1. Powierzchnia pól wydmowych na obszarze Coude du Dra w latach 1932, 1954, 1989, 1999/2001.

Zasięg wydm wyznaczony na podstawie kartowania z roku 1932 wskazuje, że był to okres inicjacji procesu akumulacji eolicznej na badanym obszarze. Potwierdzają to rekonesansowe badania geomorfologiczne przeprowadzone w latach dwudziestych ubiegłego stulecia (Piegot 1929). Zasięg pól wydmowych w latach pięćdziesiątych był już zdecydowanie większy. Wydmy obejmowały obszary zbudowane z osadów holoceńskich stożków aluwialnych położonych na północ od doliny Dra oraz obszary wyższych teras nadzalewowych znajdujących się po obu stronach ouedu. Obszary położone wzdłuż dna doliny były w większości pozbawione form akumulacji eolicznej. Mogło to wynikać z ograniczenia procesu deflacji lokalnego materiału z uwagi na wyższy w tym okresie poziom wód gruntowych i, związaną z nim ściśle, bogatszą szatę roślinną. Brak występowania do lat osiemdziesiątych form wydmowych na obszarach terasów zalewowych może być również skutkiem usuwania materiału wydmowego przez powodzie, występujące raz na kilka lat. Te epizodycznie występujące zalewy powodowały przejście przez tereny należące do doliny fali powodziowej, której siła mogła być wystarczająca do zniszczenia form zbudowanych z luźnego materiału piaszczystego. Zanik tych zalewów w następstwie wybudowania tamy w Ouarzazate spowodował rozprzestrzenianie się wydm także na terasy zalewowe, co można stwierdzić na mapie opracowanej na podstawie kartowania wykonanego w latach osiemdziesiątych. Północna granica powierzchni pól wydmowych zbliżyła się do wyraźnych krawędzi morfologicznych związanych z plejstoceńskimi rozcięciami powierzchni stożków napływowych. Na południu badanego obszaru pola wydmowe znajdowały się na przedpolu Hamady du



Ryc. 1. Mapa zasięgu pól wydmowych obszaru Coude du Dra w latach 1932, 1935, 1989 i 1999/2001.

Dra. Pozbawione form wydmowych pozostawały jedynie obszary, okresowego w latach osiemdziesiątych, jeziora Iriqui oraz obszary ujściowe ouedu Dra do tego jeziora.

Obecny zasięg pól wydmowych jest aż dwukrotnie większy niż ten z lat osiemdziesiątych, co dowodzi bardzo dużego w ostatnim okresie wzrostu dynamiki rozprzestrzeniania się pól wydmowych na badanym obszarze.

Współcześnie, północna granica pól wydmowych wyznaczona jest, w części północno-zachodniej badanego obszaru, przez podnóże południowych stoków Jebel Bani oraz przez krawędzie plejstoceńskich stożków napływowych w części północno-wschodniej. Dodatkowo, w części północno-wschodniej, piaski wydmowe wypełniają ujściowe odcinki den dolin rzek epizodycznych, wypływających z Jebel Bani.

Zasięg pól wydmowych od strony wschodniej ograniczony jest przez południowo-zachodnie stoki Jebel Beni Selmane oraz oazę Mhamid. Należy tu podkreślić, że oaza nie stanowi już obecnie bezwzględnej bariery dla przemieszczania się wydm. W czasie prowadzenia badań zauważono liczne wydmy lub grupy wydm wkraczające na obszary uprawne, a nawet zagrażające bezpośrednio budynkom mieszkalnym i gospodarczym.

Od strony południowej zasięg pól wydmowych ograniczony jest przez wyraźną, dochodzącą miejscami do kilkuset metrów wysokości, krawędź strukturalną Hamady du Dra.

Znaczny wzrost zasięgu pól wydmowych w ciągu ostatnich kilkunastu lat można odnotować w zachodniej części badanego obszaru. Pozbawione wydm są jedynie rejony niewielkiego pasma górskiego Hadeban El Grar, obszaru czynnego epizodycznie odpływu wód z jeziora Iriqui oraz część równinnej, płaskiej powierzchni dna tego jeziora.

Wydaje się, że od strony północnej i południowej badanego obszaru rozprzestrzenianie się pól wydmowych zostało obecnie ograniczone ze względu na barierę morfometryczną jaką stanowią stoki Jebel Bani na północy i krawędź Hamady du Dra na południu. Od strony wschodniej rozprzestrzenianie wydm jest częściowo ograniczone również ze względu na morfometrię (Jebel Beni Selmane), natomiast, jak już wspomniano, oaza Mhamid mimo wysiłków miejscowej ludności zmierzających do zatrzymania wydm, nie stanowi obecnie skutecznej bariery dla rozprzestrzeniania się pól wydmowych. Od strony zachodniej rozprzestrzenianie się pól wydmowych nie jest współcześnie istotnie ograniczane. Morfometrycznie płaska powierzchnia misy jeziornej, pozbawiona roślinności i od kilkunastu lat sucha, sprzyja zarówno intensyfikacji deflacji jak i procesowi rozprzestrzeniania się wydm.

Jak już wspomniano, jednym z najważniejszych czynników wpływających na dynamikę rozprzestrzeniania się wydm jest wilgotność podłoża. Na podstawie dotychczasowych badań stwierdzono, że czynnik ten jest wiodącym, szczególnie w odniesieniu do badanego obszaru (Barczuk, Dłużewski w tym tomie). Dotyczy to zwłaszcza współczesnych, słabo skonsolidowanych, aluwialnych osadów teras rzecznych i stożków akumulacyjnych, form występujących na przeważającej części badanego obszaru. Wydaje się, że współczesne przesuszenie utworów powierzchniowych, spowodowane obniżeniem zwierciadła wód gruntowych, sprzyja intensyfikacji procesu deflacji, co z kolei wydaje się być głównym czynnikiem wpływającym na gwałtowny wzrost dynamiki rozprzestrzeniania się pól wydmowych.

Wyniki badań wybranych cech teksturalnych osadów oraz ich interpretacja

Krzywe częstości osadów wydmowych są, w znaczącej większości, krzywymi jednomodalnymi, co oznacza występowanie jednego przedziału frakcyjnego o dominującej częstości (ryc. 2a,b). Zdecydowana większość wydm ma ziarna zawierające się w przedziałe 0,25 mm – 0,2 mm (2 Φ – 2,32 Φ), natomiast drobniejszą frakcją dominującą oraz większym zróżnicowaniem frakcjonalnym 0,25 mm – 0,08 mm (2 Φ – 3,64 Φ) charakteryzują się osady wydm nr 7 i 13 (ryc. 2). Są to wydmy o niewielkiej wysokości położone w północnym obrzeżeniu badanego obszaru wydmowego, u podnóża stoków Jebel Bani, na obszarach ujściowych epizodycznych cieków. Przesunięcie maksymalnych częstości w kierunku drobniejszych frakcji związane jest z charakterem lokalnych obszarów alimentacyjnych, zbudowanych z drobnoziarnistego materiału akumulowanego w wypełnianych epizodycznie wodą obniżeniach terenu. Ponadto, znacznym zróżnicowaniem frakcjonalnym i zdecydowanie większym udziałem drobniejszego materiału charakteryzują się inicjalne formy wydmowe nr 12: 0,315 mm – 0,08 mm (1,67 Φ – 3,64 Φ) i nr 14: 0,2 mm – 0,045 mm (2,32 Φ – 4,47 Φ), położone w zachodniej części badanego regionu na obszarze misy jeziora Iriqui

(ryc. II). Należy również zaznaczyć, że nieco drobniejszy i bardziej zróżnicowany materiał buduje partie wierzchowinowe niektórych najwyższych wydm (ryc. 2b – wydma nr 8 i 10). Zestawiając wartości i przebieg krzywych częstości osadów pobranych z wydm wyższych (o wysokości ponad 10 m) oraz niższych (o wysokości do 10 m) można zaobserwować nieznacznie lepsze wysortowanie osadów wydm wyższych, co może świadczyć o nieco dłuższym procesie ich formowania.

Interesujące prawidłowości można zaobserwować analizując krzywe częstości sporządzone dla materiału pobranego w profilu podłużnym najwyższej wydmy (ryc. 3). W miarę wzrostu wysokości wydmy zwiększa się wartość częstości dominującej frakcji osadu 0,2 mm (2,32 Φ), czyli następuje wzrost jednorodności uziarnienia. Bardziej zróżnicowane pod względem uziarnienia, z przewagą frakcji drobniejszych 0,1 mm (3,32 Φ), są jedynie partie dolne, znajdujące się w zasięgu oddziaływania osadów nawiewanych bezpośrednio z przedpola wydmy. Podłoże tej wydmy charakteryzuje się znaczną różnorodnością osadów, zarówno pod względem zróżnicowania uziarnienia 0,5 mm – 0,063 mm (1 Φ – 3,99 Φ), jak i frakcji dominującej 0,1 mm – 0,08 mm (3,32 Φ – 3,64 Φ).

Osady podłoża badanego obszaru charakteryzują się dużą zmiennością uziarnienia, zależnie od rodzaju środowiska sedymentacyjnego (ryc. 4). Większość osadów podłoża związana jest z akumulacją materiału w wodzie stojącej, w jeziorach, a nawet w niewielkich zagłębieniach bezodpływowych. Są one zbudowane z drobnoziarnistych osadów frakcji pylastej i ilastej (< 0,032mm (> 5 Φ)). Dotyczy to, jak już wspomniano, osadów akumulowanych w jeziorze Iriqui oraz w lokalnych zagłębieniach bezodpływowych, położonych w północnej części obszaru badań. Podłoże związane z osadami akumulowanymi w wodach rzek okresowych zbudowane jest z materiału o dużym zróżnicowaniu uziarnienia, wynikającym ze zmienności dynamiki środowiska transportującego. Zaznaczające się, w wielu przypadkach, drugorzędne maksimum krzywej częstości dla frakcji około 0,25 mm (2 Φ) może wskazywać na częściową dostawę materiału eolicznego do środowiska, w którym powstawał osad podłoża.

Na podstawie przebiegu krzywych częstości można wnioskować o wyraźnym związku występującym lokalnie między uziarnieniem osadów podłoża i osadów wydmowych, co wskazuje na miejscowe źródło badanego materiału wydmowego.

Większość krzywych kumulacyjnych badanych piasków wydmowych charakteryzuje przewaga odcinka A, co wskazuje na znaczny udział ziaren podlegających transportowi przez saltację (ryc. 5a,b). Zbliżone nachylenie poszczególnych krzywych na tym odcinku wskazuje natomiast na podobny stopień wysortowania materiału wydmowego. Odcinek C, odpowiadający większym ziarnom transportowanym przez wleczenie i toczenie, zaznacza się wyraźnie jedynie w przypadku materiału budującego najniższe formy wydmowe (ryc. 5a), natomiast trudno jest wyróżnić odcinek B, odpowiadający transportowi ziaren w zawiesinie.

Krzywe kumulacyjne wykreślone w skali prawdopodobieństwa dla materiału położonego na różnych wysokościach wzdłuż profilu podłużnego najwyższej wydmy (wydma nr 8) mają wzrastający z wysokością wydmy kąt nachylenia, co odpowiada wzrostowi stopnia wysortowania materiału (ryc. 6). Można również stwierdzić, że materiał wydmy transportowany był głównie przez saltację oraz częściowo przez toczenie i wleczenie. Przebieg krzywych kumulacyjnych materiału pobranego ze stoku zawietrznego, z zaznaczającym się odcinkiem B, pozwala na stwierdzenie, że część materiału budującego ten stok była transportowana w zawiesinie. Jego akumulacja była prawdopodobnie związana z gwałtownym spadkiem siły nośnej wiatru po zawietrznej stronie wydmy.

Zdecydowanie odmienny przebieg mają krzywe kumulacyjne osadów podłoża (ryc. 7). Mają one mniejsze nachylenie, świadczące o dużo gorszym wysortowaniu materiału podłoża w porównaniu z materiałem budującym wydmy. Przeważa tu transport przez saltację, z zaznaczającym się jednak, w większości badanych próbek, znacznym udziałem transportu przez unoszenie.

Na podstawie krzywych kumulacyjnych obliczono wskaźniki uziarnienia wg wzorów Folka i Warda (1957) (tab. 2a,b). Wartości średniej średnicy ziaren (M_z) osadów wydmowych można uznać za zbliżoną. Osiągane wartości poniżej 0,25 mm (> 2 Φ) wskazują na przewagę drobniejszego materiału budującego badane pola wydmowe. Są one wyższe (czyli osad jest drobniejszy) niż w przypadku wydm większości regionów saharyjskich, dla których wartości te wynoszą powyżej 0,25 mm (< 2 Φ) (czyli osad jest grubszy) (Pietrow 1976, Coque 1962, Barczuk, Dłużewski 2001). Świadczy to o stosunkowo małej sile eolicznego środowiska transportującego na badanym obszarze, jak również o związku osadów wydmowych z osadami podłoża zbudowanymi w przewadze z drobnoziarnistego materiału (tab. 3).



Ryc. 2a. Krzywe częstości osadów wydmowych (wydmy o wysokości poniżej 10 m).



Ryc. 2b. Krzywe częstości osadów wydmowych (wydmy o wysokości powyżej 10 m).



Ryc. 3. Krzywe częstości osadów pobranych z profilu podłużnego – wydma nr 8.



Ryc. 4. Krzywe częstości materiału pobranego z wybranych osadów podłoża.



Ryc. 5a. Krzywe kumulacyjne uziarnienia w skali prawdopodobieństwa osadów wydmowych (wydmy o wysokości poniżej 10 m).



Ryc. 5b. Krzywe kumulacyjne uziarnienia w skali prawdopodobieństwa osadów wydmowych (wydmy o wysokości powyżej 10 m).



Ryc. 6. Krzywe kumulacyjne uziarnienia w skali prawdopodobieństwa osadów pobranych z profilu podłużnego – wydma nr 8.



Ryc. 7. Krzywe kumulacyjne uziarnienia w skali prawdopodobieństwa materiału pobranego z wybranych osadów podłoża.



Ryc. 8. Współzależność średniej średnicy ziaren (M_z) i odchylenia standardowego (s_1) osadów wydmowych.

Nr wydmy	2	4	5	7	8B	9	11	12	13	14	16	17	19	20	21	22
Wysokość wydmy (m)	3	3	2	2	1	4	2,5	1	4	0,3	2,5	8	1	2,5	3	4
σ1	0,47	0,69	0,49	0,46	0,52	0,65	0,45	0,81	0,43	0,43	0,72	0,49	0,63	0,47	0,63	0,51
Mz	2,22	2,06	2,38	2,65	2,29	2,16	2,13	2,41	2,70	3,23	2,44	1,95	2,07	2,03	2,14	2,22
Sk ₁	0,36	0,32	0,23	0,09	0,09	0,42	0,36	-0,07	0,12	0,05	0,53	0,24	0,20	0,23	0,41	0,66

Tabela 2. Wskaźniki uziarnienia wybranych osadów wydmowych: M_z – średnia średnica ziaren, σ_1 – odchylenie standardowe, Sk_1 – skośność; wg wzorów Folka i Warda (1957). a. wydmy o wysokości poniżej 10 m; b. wydmy o wysokości powyżej 10 m.

a.

D.										
Nr wydmy	1	3	6	8	10	15	18			
Wysokość wydmy (m)	20	30	30	111	33	12	10			
σ_1	0,61	0,42	0,49	0,31	0,37	0,60	0,36			
M_z	2,09	1,83	2,11	2,29	2,49	2,21	2,00			
Sk_1	0,45	0,23	0,30	0,25	0,17	0,54	0,50			

Tabela 3. Wskaźniki uziarnienia wybranych osadów podłoża: M_z – średnia średnica ziaren, σ_1 – odchylenie standardowe, Sk₁ – skośność; wg wzorów Folka i Warda (1957).

Nr wykopu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
σ_1	1,03	1,54	0,53	1,00	1,04	0,82	0,48	0,58	0,68	0,95	1,37	1,16	0,92
Mz	4,11	3,11	1,18	4,26	2,42	1,93	5,06	1,67	4,64	2,96	2,41	1,30	2,40
Sk ₁	-0,62	0,14	0,01	-0,91	0,20	0,21	-0,39	-0,07	-0,89	-0,04	0,34	0,64	0,04

Na podstawie wartości odchylenia standardowego (σ_1) można stwierdzić, że badany osad większości wydm jest średnio lub dobrze wysortowany. Wysortowanie materiału badanych wydm można uznać za nieco gorsze w porównaniu z wysortowaniem charakteryzującym materiał większości obszarów wydmowych pustyń gorących, równym np.: Pustyni Zachodniej (Egipt) – od 0,28 do 0,39 (El-Baz i in. 1982), północnego obrzeżenia Wielkiego Ergu Wschodniego (Tunezja) – od 0,35 do 0,53 (Dłużewski 1997), pustyń Azji południowo-zachodniej – od 0,2 do 0,45 (Dymowska i in. 1984). Jedynie wysortowanie materiału budującego partie wierzchowinowe najwyższych wydm jest bardzo dobre – porównywalne z wysortowaniem dojrzałych wydm, których proces tworzenia trwa co najmniej kilkaset lat (Coque 1962). Ponadto stwierdzono, że średnie wysortowanie osadów wydm o wysokości poniżej 10 m ($\sigma_1 = 0,55$) jest gorsze od wysortowania osadów wydm o wysokości powyżej 10 m ($\sigma_1 = 0,45$), co może być kolejną przesłanką wskazującą na nieco dłuższy proces ich formowania.

Dodatnie wartości skośności (Sk₁) wskazują, że w osadzie przeważa udział drobniejszej frakcji w stosunku do frakcji o maksymalnej częstości. Jest to związane, podobnie jak w przypadku wydm innych obszarów gorących pustyń, z dostawą pyłów z atmosfery podczas końcowej fazy okresu akumulacji materiału wydmowego.

Jednoczesna analiza wartości odchylenia standardowego (σ_1) i średniej średnicy ziaren (M_z) wykazała, że przy zbliżonym stopniu wysortowania i dość zróżnicowanej średniej średnicy ziaren, układ punktów zbliżony jest do trzeciej tendencji ich układu (Mycielska-Dowgiałło 1980) (ryc. 8). Taki układ punktów pozwala na przypisanie środowisku transportującemu materiał wydmowy małej dynamiki i małej zmienności siły transportującej.

Analiza wartości poszczególnych wskaźników uziarnienia pozwala również na stwierdzenie, że wielkość ziaren budujących wierzchowiny wydm jest niezależna od ich wysokości, co wg Coque'a (1962) świadczy o młodym stadium form wydmowych. W przypadku nielicznych wydm, wartości wskaźników uziarnienia różnią się od wartości przedstawionych w powyższej analizie, które można uważać za reprezentatywne dla form wydmowych występujących na obszarze badań. Może to świadczyć o zróżnicowanym charakterze lokalnych obszarów alimentacyjnych. Szczególnie formy wydmowe występujące na obszarze misy jeziornej suchego obecnie jeziora Iriqui (ryc. II) (wydmy nr 12, 14) oraz na obszarze lokalnych obniżeń bezodpływowych stanowiących ujścia epizodycznych rzek spływających z Jebel Bani (wydmy nr 7, 10, 13, 16), charakteryzują się nieco drobniejszym materiałem i gorszym wysortowaniem związanym z rodzajem podłoża, na powierzchni którego występują (tab. 2a). Ponadto, bliskie zeru wartości skośności osadów wydmowych położonych na obszarze misy jeziornej wskazują na ich równomierny rozkład frakcjonalny.

Wartości wskaźników uziarnienia osadów podłoża (tab. 3) znacznie odbiegają od wartości wskaźników uziarnienia osadów wydmowych. Średnia średnica ziaren podłoża jest w przewadze znacznie mniejsza, ich wysortowanie jest słabe lub średnie, a skośność, w dużej części, ujemna. Znaczna różnica wartości wskaźników uziarnienia osadów podłoża i osadów wydmowych może świadczyć o dłuższym czasie trwania procesów eolicznych, biorąc jednak pod uwagę przedstawione powyżej wyniki badań innych cech teksturalnych, może ona świadczyć również o dużej intensywności procesu eolicznego. Ponadto, wartości wszystkich trzech wskaźników charakteryzujących osady podłoża są bardzo zróżnicowane. Jest to związane, jak już wspomniano, z różnym rodzajem transportu jakiemu te osady podlegały.

Analizując zmienność wskaźników uziarnienia w profilu podłużnym najwyższej wydmy występującej na badanym obszarze (wydma nr 8) (tab. 4) można stwierdzić, że stok dowietrzny oraz zawietrzny charakteryzują się wzrostem wysortowania materiału wraz z wysokością względną, osiągając bardzo dobre wysortowanie w partii wierzchowinowej. Wartości średniej średnicy ziaren materiału tej wydmy są dość zbliżone, choć partie wierzchowinowe budują ziarna nieco drobniejsze, a dół stoku zawietrznego – ziarna nieco grubsze. Po stronie dowietrznej wydmy wskaźnik skośności wzrasta wraz z wysokością. Odpowiada to wzrostowi udziału drobniejszej frakcji w stosunku do frakcji o maksymalnej częstości. Wskaźnik ten ma maksymalną wartość, dla całej wydmy, po stronie zawietrznej. Na podstawie zmienności powyższych wskaźników można wnioskować o zdecydowanym spadku siły transportującej po stronie zawietrznej wydmy.

Położenie	Reg – strona do- wietrzna	Podstawa stoku do- wietrznego	Środek stoku do- wietrznego	Wierzcho- wina	Góra stoku zawietrz- nego	Środek stoku za- wietrznego	Dół stoku zawietrz- nego	Reg – strona za- wietrzna
σ1	0,83	0,54	0,39	0,33	0,37	0,37	0,62	1,27
Mz	2,30	2,02	2,54	2,32	2,39	2,58	1,84	1,74
Sk ₁	0,00	-0,12	0,20	0,26	0,33	0,26	0,33	-0,39

Tabela 4. Wskaźniki uziarnienia osadów wydmowych pobranych z profilu podłużnego – wydma nr 8: M_z – średnia średnica ziaren, σ_1 – odchylenie standardowe, Sk₁ – skośność; wg wzorów Folka i Warda (1957).

Powyższa charakterystyka, oparta na analizie wskaźników uziarnienia, potwierdza wnioski z analizy krzywych częstości i krzywych kumulacyjnych uziarnienia.

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonej analizy materiałów kartograficznych można stwierdzić, że szybkość rozprzestrzeniania się pól wydmowych na obszarze Coude du Dra jest bardzo duża.

Wyniki analiz sedymentologicznych wskazują na związek rozprzestrzeniania się pól wydmowych z lokalnym źródłem materiału wydmowego oraz na dość niski stopień eolizacji osadu. Świadczą o tym w szczególności:

- nieco gorsze wysortowanie badanych osadów od wysortowania osadów wydmowych innych pustyń gorących,
- dodatnie wartości skośności, wskazujące na częstą dostawę lokalnego materiału źródłowego,
- lokalna współzależność między przebiegiem krzywych częstości osadów wydmowych i osadów podłoża, potwierdzająca tezę o miejscowym źródle badanego materiału wydmowego.

Na związek źródła materiału badanych form wydmowych z lokalnym podłożem, zbudowanym z materiału akumulowanego w środowisku wodnym, wskazują także wyniki analiz składu mineralno-litologicznego (Barczuk, Dłużewski – w tym tomie).

Widoczne różnice w przebiegu krzywych częstości, krzywych kumulacyjnych uziarnienia oraz w stopniu wysortowania osadów wydm wyższych i niższych, pozwalają na stwierdzenie, że proces formowania się wydm wyższych był nieco dłuższy niż wydm niższych.

Na podstawie badań można ponadto stwierdzić, że głównym czynnikiem wpływającym na szybkość rozprzestrzeniania się wydm jest rodzaj podłoża oraz jego zmniejszająca się wilgotność, co ma bezpośredni związek z podatnością lokalnych obszarów alimentacyjnych na proces deflacji. Wydaje się również, że pozostałe czynniki nie miały dotychczas istotnego wpływu na ten proces. Skąpa szata roślinna, czy równinna powierzchnia podłoża, nie spowodowały znaczących zmian dynamiki rozprzestrzeniania się wydm. Wydaje się, że dopiero teraz wyraźne granice morfometryczne, zwłaszcza na północy i na południu badanego obszaru, ograniczą dalsze rozprzestrzenianie się badanego pola wydmowego w tych kierunkach. Kurcząca się systematycznie, z powodu obniżenia poziomu wód gruntowych, szata roślinna może mieć natomiast tylko nieznaczny wpływ na wzrost dynamiki rozprzestrzeniania się pól wydmowych.

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że częściowa zmiana czynników pustynnienia z klimatycznych na czynniki związane z lokalnym środowiskiem, w znacznej mierze przyczyniła się do zmiany sposobu oraz szybkości rozprzestrzeniania się pól wydmowych na obszarze Coud du Dra. Zmiana charakteru środowiska związana była, jak już wspomniano, z przesuszeniem utworów powierzchniowych wskutek obniżenia poziomu wód gruntowych. Wydaje się, zgodnie z informacjami zawartymi w ogólnej charakterystyce środowiska przyrodniczego regionu Coude du Dra (Dłużewski, Krzemień w tym tomie), że proces obniżania się poziomu wód gruntowych spowodowany został przez wybudowanie zapór na zasilającej je rzece Dra.

Można zatem wnioskować, że zaznaczający się obecnie wzrost dynamiki rozprzestrzeniania się pól wydmowych związany jest w znaczący sposób ze wzrostem astrefowego sposobu rozprzestrzeniania się wydm, którego przyczyn należy upatrywać w działalności człowieka.

Literatura

Bagnold R.A., 1941, The physics of blown sand and desert dunes. Methuen Co., London.

- Barczuk A., 1992, Petrology of the Precambrian Clastics and the Evolution of the Midcontinent Rift System (USA). Arch. Miner. T. XLVIII, 1-2, 123–204.
- Barczuk A., Dłużewski M., 2001, Źródło osadów eolicznych w obniżeniu Khargi (południowy Egipt) na podstawie ich cech teksturalnych, [w:] J. Pełka-Gościniak, T. Szczypek (red), Dynamiczne aspekty geomorfologii eolicznej, 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 (Maroko) i jej wpływ na warunki życia ludności. Wyd. "Dialog", Warszawa, 121–134.
 Plachwolden F., 1024. Vandange, Pul. of the Cool. Soc. of America, 45, 150, 166.

Blackwelder E., 1934, Yardangs. Bul. of the Geol. Soc. of America, 45, 159–166.

- Borsy Z., 1972, Studies on wind erosion in the wind-blown sand areas of Hungary. Acta Geogr., Debrecina, 125–134.
- Chepil W.S., 1945, Dynamics of Wind erosion, I-III. Soil Sci., 60, 305-480.
- Coque R., 1962, La tunisie présaharienne. Etude géomorphologique. Armand Colin, Paris.
- Dłużewski M., 1997, Ewolucja wybranych pól wydmowych w południowej Tunezji w świetle cech teksturalnych osadów. Maszynopis pracy magisterskiej, Warszawa.
- Dłużewski M., Krzemień K., 2003, *Charakterystyka fizycznogeograficzna regionu Coude du Dra*, [w:] M. Dłużewski (red.) Współczesna ewolucja środowiska przyrodniczego regionu Coude du Dra (Maroko) i jej wpływ na warunki życia ludności. Wyd. "Dialog", Warszawa, 11–44.
- Dobrzański B., Uziak S., 1970, Rozpoznanie i analiza gleb. PWN, Warszawa.
- Dubis L., Dłużewski M., 2002, *Erozyjne formy ostańcowe jardangi jako wskaźnik tempa deflacji*, [w:] Warsztaty geomorfologiczne, Egipt 5–22. 04. 2002. WGiSR UW, SGP Mat. Konf., Warszawa.

- Dymowska T., Dymowski W., Mityk J., Mycielska-Dowgiałło E., 1984, *Cechy teksturalne osadów wydmowych pustyń Azji południowo-zachodniej.* Ann. Soc.Geol. Pol., Kraków.
- El-Baz F., Slezak M.H., Maxwell T.A., 1982, Preliminary Analysis of Color Variations of Sand Deposits in the Western Desert of Egypt, [w:] Desert Landforms of Southwest Egypt: A Basis for Comparison with Mars. Nat. Aero. and Space Adm., Washington, DC.
- Folk R.L., Ward W., 1957, Brazos River bar: A study in the significance of grain size parameters, J. Sed. Petrol.
- Goździk J., Mycielska-Dowgiałło E., 1988, *Geneza zmatowienia powierzchni dobrze zaokrąglonych ziarn kwarcu w świetle badań w mikroskopie elektronowym*, [w:] E. Mycielska-Dowgiałło (red.), Geneza osadów i gleb w świetle badań w mikroskopie elektronowym. UW, 57–64, 162–165.
- Kuenen Ph.H., Pedrok W.G., 1961, *Experimental abrasion 5: frosting and defrosting of quartz grains*. Journal of Geology, 70, 648–658.
- Lóki J., 2000, *The study of wind erosion on different soil by wind tunnel*, [w:] J. Lóki, J. Szabó, (red.), Anthropogenic Aspect of Landscape Transformation, 1. University of Debrecen, Debrecen, 37–44.
- Lóki J., 2001, *Mathematical Correlations of the Erodability of the Genetic Soils*, [w:] J. Pełka-Gościniak, T. Szczypek (red.), Dynamiczne aspekty geomorfologii eolicznej, WnoZ UŚ, SGP, Warszawa, 51–61.
- Mycielska-Dowgiałło E., 1980, Wstęp do sedymentologii (dla geografów). WSP w Kielcach, Kielce.
- Mycielska-Dowgiałło E., 1988, Cechy urzeźbienia powierzchni ziarn kwarcu z wydm różnych regionów świata, [w:]
 E. Mycielska-Dowgiałło (red.), Geneza osadów i gleb w świetle badań w mikroskopie elektronowym. UW.
 Warszawa, 47–54.
- Mycielska-Dowgiałło E., 1992, Desertification in the light of sedimentological features of dune deposits, Geogr. Pol.
- Mycielska-Dowgiałło E., 1993, Estimates of Late Glacial and Holocene aeolian activity in Belgium, Poland and Sweden. Boreas, 22, 165–170.
- Mycielska-Dowgiałło E., 1995, Selected textural features of deposits and their interpretation value, [w:] Researches of Quaternary sediments, some method and interpretation of the results. WGiSR UW, Warsaw, 29–105.
- Mycielska-Dowgiałło E., Rutkowski J., (red.), 1995, Badania osadów czwartorzędowych. Wybrane metody i interpretacja wyników, WGiSR UW, Warszawa.
- Piegot L., 1929, Carte de reconnaissance de l'Iquidi et des régions à l'Ouest de Tabelbala et du Sud de l'Oued Dra (Sahara occidental). Rev. Géogr. phys. et Géol. dyn., Paris, vol. 2, fasc. 4, 253–263.
- Pietrow M.P., 1976, Pustynie kuli ziemskiej. PWN. Warszawa.
- Tsoar H., Illenberger W., 1998, Reevaluation of sand dunes mobility indices. Jour. of Arid Land Studies, 7S, 265–268.
- Visher G. S., 1969, Grain size distribution and depositional processes, J. Sed. Petrol., 39.
- Woronko B., 2001b, Znaczenie analizy obtoczenia i zmatowienia powierzchni ziarn kwarcowych frakcji piaszczystej w interpretacji genetycznej osadów czwartorzędowych, [w:] E. Mycielska-Dowgiałło (red.), Eolizacja osadów jako wskaźnik stratygraficzny czwartorzędu, Warszawa, 21–33.
- 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. "Dialog", Warszawa, 121–134.
- Zingg A. S., 1951, Evaluation of the erodibility of field surface with a portable wind tunnel. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 15, 11–17.