Wykorzystanie satelitarnych danych obrazowych w badaniach regionu Coude du Dra

Krzysztof Skocki Centrum Badań Kosmicznych PAN e-mail: skocki@astercity.net

Wstęp

Pierwsze prace związane z wykorzystaniem materiałów teledetekcyjnych, początkowo zdjęć z balonów, wykonywano już w XIX wieku. Rozwój lotnictwa w wieku XX nasilił prace interpretacyjne z wykorzystaniem materiałów obrazowych (Ciołkosz i in. 1999). Zdjęcia lotnicze są z powodzeniem wykorzystywane do dziś w wielu dziedzinach badań, nie tylko geograficznych. Jednak dopiero wprowadzenie na orbitę pierwszych satelitów teledetekcyjnych w latach siedemdziesiątych XX wieku (seria Landsat) spowodowało wyraźny wzrost zainteresowania tego typu materiałami (Ciołkosz, Kęsik 1989). Ostatnie lata przyniosły znaczne rozszerzenie liczby dostępnych satelitów obserwacyjnych, z najbardziej znanymi systemami optycznymi (pracującymi w zakresie widzialnym i w podczerwieni): Landsat, SPOT, IRS, EOS, IKONOS, QuickBird. Ostatnie dwa systemy to systemy wysokorozdzielcze o terenowej wielkości piksela rzędu jednego metra i poniżej. Dostępne są także systemy radarowe, wykorzystujące zakres mikrofalowy i pozwalające na obserwację terenu niezależnie od pory doby i zachmurzenia, a dostarczające informacji o innym charakterze, związanym z interakcjami promieniowania elektromagnetycznego w zakresie mikrofalowym z powierzchnią (parametry szorstkości, wilgotności i stałej dielektrycznej).

Siła optycznych systemów satelitarnych tkwi w wykorzystaniu obrazowania wielospektralnego, tj. obserwacji powierzchni w waskich kanałach obejmujących tylko fragment widma. Pozwala to na analizę odpowiedzi spektralnej w określonych fragmentach widma i tym samym, przy znajomości charakterystyki spektralnej różnego typu obiektów i rodzajów materiału, na wydzielanie obiektów i badanie zmienności rodzajów pokrycia powierzchni. W przypadku systemu Landsat dostępnych jest w sumie 7 kanałów spektralnych obejmujących zakres widzialny oraz podczerwieni fotograficznej i termalnej (Ciołkosz, Kesik 1989). W przypadku nowszych satelitów, np. EOS czy Envisat, możliwa jest rejestracja obrazu w kilkudziesięciu (lub nawet kilkuset) wąskich zakresach, co pozwala na precyzyjną charakterystykę obserwowanych obiektów i rozpoznanie np. wychodni skalnych z dokładnością do rodzaju skał, a nawet określenie składu mineralnego tych skał (Siegal 1980, Smith 1977). Stwarza to ogromne możliwości interpretacyjne dla potrzeb nauk o Ziemi. Ogromnym atutem systemów satelitarnych jest dostępność zobrazowań dla całego globu (niektóre z systemów) w jednolitej skali i wykonywanych w sposób jednolity. Pojedyncza scena może obejmować duży obszar, w przypadku satelity Landsat jest to 185 na 185 km, co zapewnia uchwycenie stanu w danej chwili na rozległych obszarach. Dodatkowo systemy optyczne z reguły operują na orbitach heliosynchronicznych, co oznacza, że nad danym obszarem Ziemi satelita przelatuje zawsze o tej samej godzinie czasu lokalnego słonecznego. Ułatwia to późniejszą interpretację oraz porównywanie obrazów.

Ostatnie lata przyniosły znaczne rozszerzenie wachlarza dostępnych danych satelitarnych, w tym wysokorozdzielczych. Od pewnego czasu dostępne są także nowe źródła historyczne w postaci zdjęć satelitarnych programu CORONA. Są to zdjęcia wysokorozdzielcze obejmujące okres od 1961 r. do 1980 r. (Skocki 2004). Mogą one posłużyć do rozszerzenia analiz na analizę i charakterystykę zmienności pojedynczych form wydmowych w okresie ponad 40 lat.

Metodyka badań

W badaniach z wykorzystaniem obrazów satelitarnych stosuje się różnego rodzaju skanery, zarówno panchromatyczne (jednobarwne – skala szarości) jak i wielospektralne, dostarczające obrazów rejestrowanych w wąskich kanałach spektralnych. Grupę obrazów rejestrowanych w pojedynczych kanałach spektralnych obejmującą jeden obszar określa się nazwą sceny. Taka scena może więc składać się z kilku (7 dla skanerów serii Landsat TM) lub nawet kilkuset kanałów (skanery hiperspektralne). Możliwości interpretacyjne zobrazowań satelitarnych tkwią właśnie w mnogości kanałów, w których obserwowany jest badany obszar. Już sama możliwość tworzenia obrazu barwnego przez złożenie trzech dowolnych kanałów przypisanych barwom czerwonej, zielonej i niebieskiej, pozwala na zwiększenia czytelności komponentów środowiska przyrodniczego i tym samym ułatwia ich interpretację.

Prezentowane poniżej obrazy powstały z kompozycji RGB kanałów 7, 5 i 2 przetwarzanej sceny. Kanały 7 oraz 5 to kanały rejestrujące obraz w zakresie bliskiej podczerwieni fotograficznej, kanał 2 obejmuje zakres zielono-żółty widma. Kompozycja 752 jest jedną z częściej wykorzystywanych w badaniach teledetekcyjnych strefy suchej, ze względu na dużą czytelność elementów geologicznych oraz możliwość łatwego wydzielania obszarów pokrytych odmiennym materiałem. Taka kompozycja może być podstawą wizualnej interpretacji obrazu.

Bardziej zaawansowaną metodą analizy i interpretacji wielokanałowych danych satelitarnych jest wykonywanie klasyfikacji obrazu. Możliwe jest wykorzystywanie klasyfikacji spektralnej, gdy pojedyncze piksele przyporządkowywane są do określonych grup pikseli na podstawie ich jasności w wybranych kanałach lub też innych metod klasyfikacji (np. klasyfikacja obiektowa), które nie będą tu opisywane.

Najpowszechniej wykorzystuje się klasyfikację nienadzorowaną oraz nadzorowaną w oparciu o różnorodne algorytmy przyporządkowujące piksele do klas. Klasyfikacja nienadzorowana wykorzystuje algorytmy bazujące jedynie na zmiennej jasności pikseli. Nie stosuje się tutaj żadnych obszarów testowych.

Klasyfikacja nadzorowana wykorzystuje wstępną wiedzę o badanym terenie, która powinna być uzyskana podczas badań terenowych. Wykorzystuje się tutaj metodykę zbliżoną do metodyki interpretacji zdjęć lotniczych opisywanej przez wielu autorów (Stone 1951). Ten proces nazywany jest fotointerpretacją polową (Ciołkosz i in. 1999) i powinien poprzedzać właściwą interpretację zdjęć. W przypadku wykonywania klasyfikacji nadzorowanej obserwacje terenowe stanowią podstawę do wydzielenia charakterystycznych obszarów testowych, których sygnatury spektralne są następnie podstawą dla algorytmu przyporządkowującego piksele do odpowiednich klas. Ten rodzaj klasyfikacji daje z reguły znacznie lepsze rezultaty niż klasyfikacja nienadzorowana. Stosuje się rozmaite algorytmy klasyfikacji nadzorowanej, z których najczęściej stosowane są: Parallellepaided, Minimum Distance, Mahalanobis Distance oraz Maximum Likelihood. Różnice między tymi algorytmami dotyczą przede wszystkim sposobu liczenia odległości w wielowymiarowej przestrzeni między centrum klastra (n-wymiarowej chmury grupującej piksele należące do danej klasy) a analizowanym pikselem.

Poza klasyfikacją nienadzorowaną oraz nadzorowaną istnieją jeszcze inne techniki klasyfikacji spektralnej. Jedną z tych technik jest algorytm Spectral Angle Mapping (SAM), wydzielający w pierwszym etapie charakterystyczne, "najczystsze" piksele reprezentujące widma obiektów (np. minerałów lub ich mieszanin) jako tzw. "endmembers". Ten rodzaj klasyfikacji nie był wykorzystywany w niniejszej pracy.

Na końcowym etapie prac stosuje się często dodatkowe filtrowanie obrazu poklasyfikacyjnego, mające na celu "wygładzenie" obrazu poprzez eliminację pojedynczych pikseli należących do innej klasy w grupie pikseli jednej klasy. Jednym ze stosowanych tutaj algorytmów jest metoda Majority/Minority Analysis, która eliminuje przypadkowe piksele należące do innych klas przez filtrację oknem o zadanej wielkości i przyznawaniem pikselom centralnym wartości najczęściej występującej w oknie. Stosowane są tutaj różne wielkości okna, najczęściej 3 na 3 piksele lub 5 na 5 pikseli. W niniejszej pracy zastosowano okno o wymiarze 5 pikseli, co znacznie zwiększyło czytelność obrazu poklasyfikacyjnego nie powodując jednocześnie dużych zmian w statystyce klas.

Badane obrazy i wstępna interpretacja wizualna

Przygotowując badania terenowe postanowiono wykorzystać satelitarne dane teledetekcyjne dla wykonania analiz zmienności materiału pokrywającego badany obszar. Przeanalizowano dostępne



Ryc. 1. Zdjęcie satelitarne obszaru Coude du Dra (część wschodnia), satelita Landsat 5 TM, 7 października 1987r.



Ryc. 2. Zdjęcie satelitarne obszaru Coude du Dra (część wschodnia), satelita Landsat 7 ETM, 31 marca 2000r.



Ryc. 3. Wynik klasyfikacji nadzorowanej sceny z 1987r. (algorytm Mahalanobis Distance) – obszar Coude du Dra (część wschodnia).



Ryc. 4. Wynik klasyfikacji nadzorowanej sceny z 2000r. (algorytm Mahalanobis Distance) – obszar Coude du Dra (część wschodnia).



Ryc. 6. Wynik klasyfikacji nadzorowanej sceny z 1987r. w oparciu o badania terenowe (algorytm Mahalanobis Distance) – obszar Coude du Dra (część wschodnia).



Ryc. 7. Wynik klasyfikacji nadzorowanej sceny z 2000r. w oparciu o badania terenowe (algorytm Mahalanobis Distance) – obszar Coude du Dra (część wschodnia).

zobrazowania dla badanego obszaru typując do wykorzystania w pierwszej kolejności obrazy wielospektralne pozyskane przez satelity serii Landsat oraz historyczne zobrazowania panchromatyczne pozyskane przez satelity programu CORONA. W niniejszej pracy wykorzystano zobrazowania satelitarne satelitów serii Landsat jako najłatwiej dostępne dla badanego obszaru (ryc. 1, 2):

- scenę zarejestrowaną przez skaner TM satelity Landsat 5 z 7 października 1987 r., a więc w trakcie okresu suchego w dolinie,
- scenę zarejestrowaną przez skaner ETM+ satelity Landsat 7 z 31 marca 2000 r., pod koniec okresu wilgotnego, który może oznaczać obecność wody w korycie, a nawet możliwość wylewów poza koryto oraz powodzi.

Obie sceny zostały zgeometryzowane w układzie współrzędnych UTM słup 30N na elipsoidzie WGS--84. Wynikowa wielkość piksela otrzymanych zobrazowań wynosi 28,5 metra. Pozwala to na analizę obiektów o wielkości około 50 metrów (wymiary w planie) co odpowiada wydmom średniej wielkości na tym obszarze.

Wyraźnie widoczny jest przebieg koryta ouedu, Jebel Bani Selmane (boczne ramię Jebel Bani) oraz charakterystyczny stożek napływowy ouedu Dra uformowany za wyraźnym przewężeniem widocznym we wschodniej części obrazu. Materiał stożka zajmuje całą południowo-wschodnią część badanego obszaru. W centralnej części obrazu widoczne są jasne smugi związane z występowaniem w dużych ilościach materiału drobnego naniesionego przez epizodyczne wylewy powodziowe obejmujące znaczne powierzchnie badanego obszaru. Bardziej na wschód, przy korycie ouedu, jako ciemnozielone fragmenty obrazu widoczna jest oaza Mhamid. Kolejna oaza, Tagounite, widoczna jest na północno-wschodnim skraju zdjęcia.

Obszary wydmowe na badanym terenie cechują się ogromnym zróżnicowaniem spektralnym. Wyraźnie widoczne są pola wydmowe w zachodniej części zdjęcia (tony brązowe). Są to duże pola wydmowe pokryte układami wydm poprzecznych oraz miejscami wydm gwiaździstych. Druga populacja wydm widoczna jest w okolicy oazy Mhamid i na zachód od niej. Obejmuje znacznie mniejsze wydmy, o wysokości nie przekraczającej 10 metrów. Wśród tych wydm występują miejscami niewielkie kępy suchej roślinności. Trzecia populacja wydm występuje na północny-wschód od Mhamid i obejmuje formy cechujące się jasnożółtym tonem. Zespoły tych wydm są słabo widoczne na obrazie.

Klasyfikacja treści obrazowej

W celu otrzymania informacji o przestrzennej zmienności osadów powierzchniowych wykonano serię klasyfikacji w oparciu o sześć kanałów rejestrowanych przez skaner. Wykorzystano kanały 1–5 i kanał 7, które obejmują zakres promieniowania leżący w zakresie widzialnym i bliskiej podczerwieni (do 2 μ m). Klasyfikacje przeprowadzono kilkoma metodami: metodą klasyfikacji nienadzorowanej oraz klasyfikacji nadzorowanej (z różnymi zestawami poligonów testowych).

W pierwszym etapie badań wykonano serię próbnych klasyfikacji nienadzorowanych w celu oceny wyników automatycznego przyporządkowywania pikseli do klastrów (grup pikseli o zbliżonych parametrach statystycznych). Stosowano algorytmy ISODATA oraz K-mean, jednak oba te algorytmy generowały obrazy klasyfikacyjne o dużej częstości zmian (mała czytelność wydzieleń) i słabej wiarygodności. Liczba wydzielanych klas wahała się od 5 do 20. W związku z niesatysfakcjonującymi rezultatami tych klasyfikacji zastosowano klasyfikację nadzorowaną. W tym celu wydzielono na obrazie (kompozycja barwna w kanałach 7, 5, 2) 11 poligonów testowych:

- pojedyncze wydmy barchanoidalne oraz wydmy poprzeczne o wysokości do 6 metrów na północ od Mhamid (0,27 km²),
- 2. ciemne wydmy o wysokości w przewadze powyżej 6 m, tworzące rozległe pola wydmowe (2,21 km²),
- pojedyncze i złożone wydmy podłużne i barchanoidalne na obszarach zalewowych ouedu Dra (0,33 km²),
- 4. gruboziarniste osady koryt rzecznych (żwiry, piaski, głazy) (0,15 km²),
- 5. osady dolin rzecznych (piaski, iły, żwiry) (0,29 km²),
- 6. roślinność $(0,40 \text{ km}^2)$,
- 7. osady piaszczysto-ilaste w dolinie ouedu Dra (2,21 km²),

- 8. materiał stożków napływowych powstających u podnóża południowych stoków Jabel Bani $(1,34 \text{ km}^2),$
- 9. pola piasków przewianych, nie tworzące form wydmowych (0,86 km²),
- 10. hamada (0,70 km²),

11. stożek napływowy poniżej przełomu ouedu Dra przez Jebel Bani Selmane (2,00 km²).

Rozpoznanie powyższych obszarów na zdjęciach satelitarnych wykonano na podstawie obserwacji terenowych przeprowadzonych w lutym 2005 roku.

Następnie przystąpiono do przeprowadzania klasyfikacji nadzorowanej w oparciu o stworzone poligony testowe. Początkowo zastosowano algorytm Minimum Distance w oparciu o wszystkie 6 kanałów. Wyniki takiej klasyfikacji nie były satysfakcjonujące, wykonano więc ponowną klasyfikację nadzorowaną w oparciu o istniejące poligony testowe z wykorzystaniem algorytmu Mahalanobis Distance. Rezultaty okazały sie satysfakcjonujące – obraz poklasyfikacyjny odpowiadał zasiegom obserwowanym w terenie. W celu zwiększenia czytelności obrazu wykonano dodatkowo agregację pikseli w oparciu o okno 5 na 5 pikseli i wagę piksela centralnego równą 1. Powstały obraz poklasyfikacyjny jest dzięki temu czytelny, a jego przydatność do dalszych badań, w tym do określania źródeł dostawy materiału do wydm, duża.

Otrzymano następujące statystyki powierzchni pokrytej odpowiednimi klasami:

Number of Pixels: 2,893,805 Unclassified: 0 points (0.0000%) Region #1 [Red] 330 points: 99,924 points (3.4530%) Region #2 [Green] 2721 points: 160,767 points (5.5556%) Region #3 [Blue] 406 points: 224,554 points (7.7598%) Region #4 [Yellow] 188 points: 109,331 points (3.7781%) Region #5 [Cyan] 357 points: 348,114 points (12.0296%) Region #6 [Magenta] 487 points: 44,633 points (1.5424%) Region #7 [Maroon] 2725 points: 66,473 points (2.2971%) Region #8 [Sea Green] 1650 points: 235,810 points (8.1488%) Region #9 [Purple] 1053 points: 205,023 points (7.0849%) Region #10 [Coral] 856 points: 539,323 points (18.6372%)

Region #11 [Aquamarine] 2463 points: 859,853 points (29.7136%)

W szczególności warto zauważyć, że powierzchnie pokryte wydmami stanowią w sumie niemal 17% badanej powierzchni, a łącznie z piaskami przewianymi jest to prawie 24% powierzchni. Utwory rzeczne, a więc materiał korytowy, osady dolinne oraz osady ilaste stanowią ponad 18% powierzchni. Obszary pokryte roślinnością to tylko 1,5% powierzchni klasyfikowanego obrazu.

Dysponując porównawczym materiałem obrazowym w postaci zobrazowania satelitarnego tego samego obszaru wykonanego w 2000 roku można było przeprowadzić analogiczna klasyfikacje na badanym obszarze w oparciu o stan z 2000 r. Wykorzystano te same poligony testowe i takie same parametry klasyfikacji oraz późniejsze przetworzenia (agregacja danych). Uzyskano następujące wyniki:

Number of Pixels: 2,893,805 Unclassified: 0 points (0.0000%) Region #1 [Red] 330 points: 71,490 points (2.4704%) Region #2 [Green] 2721 points: 509,022 points (17.5901%) Region #3 [Blue] 406 points: 232,572 points (8.0369%) Region #4 [Yellow] 188 points: 82,017 points (2.8342%) Region #5 [Cyan] 357 points: 328,013 points (11.3350%) Region #6 [Magenta] 487 points: 68,600 points (2.3706%) Region #7 [Maroon] 2725 points: 221,561 points (7.6564%) Region #8 [Sea Green] 1650 points: 287,801 points (9.9454%) Region #9 [Purple] 1053 points: 244,402 points (8.4457%) Region #10 [Coral] 856 points: 520,571 points (17.9892%) Region #11 [Aquamarine] 2463 points: 327,756 points (11.3261%)

Wyraźnie widać bardzo duży przyrost powierzchni zajmowanej przez klase 21 (ciemne wydmy o wysokości powyżej 6 m) (tab. 1) (ryc. 5). Jest to związane z zaklasyfikowaniem przez algorytm do tej klasy dużych terenów położonych na południowym wschodzie badanego obszaru (zmiana przyporządkowania z hamady ciemnej na wydmy ciemne). Może to być efekt rzeczywisty związany ze zwydmieniem materiału na tym obszarze lub wynik bliskiej wydmom ciemnym sygnatury spektralnej hamady ciemnej na tym obszarze w 2000 r. Bardzo interesujący jest wyraźny przyrost powierzchni pokrytej wydmami ciemnymi w południowo-zachodniej części badanego obszaru.

Klasy pokrycia terenu	powierzchnia klas		zmiana
	1987 [%]	2000 [%]	powierzchni
duże wydmy	3,45	2,47	-0,98
duże wydmy ciemne	5,56	17,60	12,04
jasne wydmy	7,76	8,04	0,28
materiał korytowy	3,78	2,83	-0,95
osady dolinne	12,03	11,33	-0,70
roślinność	1,54	2,37	0,83
osady piaszczysto-ilaste	2,30	7,65	5,35
stożki napływowe północnych stoków Jabel Bani	8,14	9,94	1,80
pola piasków przewianych	7,08	8,45	1,37
hamada	18,64	17,99	-0,65
stożek napływowy ouedu Dra	29,72	11,33	-18,39
SUMA	100,00	100,00	0,00

Tab. 1. Wyniki klasyfikacji nadzorowanej.

Duże obszary zostały pokryte rozprzestrzeniającymi się dynamicznie wydmami. W przypadku pozostałych wydm obserwuje się niewielki przyrost powierzchni zajmowanej przez wydmy jasne, a nawet zmniejszenie powierzchni pokrytej wydmami wysokimi.



Ryc. 5. Zmiana udziału procentowego powierzchni klas.

Niewielki spadek zaobserwowano dla powierzchni pokrytej materiałem żwirowym koryt rzecznych. Jest to zapewne związane ze zmianą przyporządkowania do klas rozległej powierzchni w południowej części badanego obszaru.

Gwałtowny spadek powierzchni hamady ciemnej związany jest bezpośrednio ze wzrostem powierzchni wydm ciemnych (zmiana przyporządkowania pikseli).

Widać także wzrost powierzchni stożków napływowych oraz pól piasków przewianych. Łącznie powierzchnia obszaru pokrytego akumulacyjnymi formami eolicznymi (klasy 1, 2, 3, 9) wzrosła z 24% do blisko 37%, co stanowi wzrost o blisko 65%! Uwzględniając potencjalne przeszacowanie powierzchni form wydmowych w klasie 3 można ostrożnie oszacować, że wzrost powierzchni pokrytej materiałem eolicznym w badanym okresie 13 lat jest wyraźny i przekracza zapewne 20%. Wskazuje to na dużą intensyfikację procesów eolicznych na tym obszarze.

Klasyfikacja nadzorowana z wykorzystaniem analiz terenowych

W dalszym etapie prac wykorzystano przeprowadzone w sezonie 2005 wstępne badania terenowe w okolicach oazy Mhamid. W terenie rozpoznano różne rodzaje powierzchni i opisano charakter ich pokrycia. Na tej podstawie wyróżniono 13 rodzajów powierzchni, których lokalizacja przestrzenna wykonana przy użyciu systemu GPS pozwoliła na naniesienie ich na podkładową mapę satelitarną. Umożliwiło to wydzielenie w otoczeniu punktów testowych granic zasięgów obserwowanych rodzajów powierzchni i stworzenie zestawu poligonów testowych dla procedury klasyfikacji nadzorowanej. Wykorzystano algorytm Mahalanobis Distance. Obraz poklasyfikacyjny, podobnie jak we wcześniejszych analizach, poddano następnie działaniu algorytmu Majority/Minority, który agreguje powstałe wydzielenia korzystając z okna o wymiarze 5 pikseli, znacznie zwiększając czytelność wydzieleń.

Dla zobrazowania z roku 1987 uzyskano następujący obraz poklasyfikacyjny (ryc. 6).

Wyznaczono w sumie 13 klas, które scharakteryzowano poniżej:

Class Stats Summary Report Number of Pixels: 2,893,805 Unclassified: 0 points (0.0000%) roślinność [Green] 110 points: 29,499 points (1.0194%) zabudowa [Red] 235 points: 71,014 points (2.4540%) oued piaski [Blue] 121 points: 91,267 points (3.1539%) oued żwiry [Cvan] 178 points: 57,795 points (1.9972%) hamada [Sienna] 1258 points: 662,505 points (22.8939%) serir [Orchid] 849 points: 234,196 points (8.0930%) duże wydmy gwiaździste i barchanoidalne w NE części badanego obszaru [Orange1] 530 points: 15,214 points (0.5257%) wydmy poprzeczne i barchanoidalne na N od oazy Mhamid [Yellow1] 1292 points: 76,869 points (2.6563%)piaski przewiane i niewielkie wydmy piaszczyste [Yellow] 657 points: 83,016 points (2.8687%) wydmy na południe od oazy Mhamid [Yellow2] 426 points: 131,287 points (4.5368%) osady piaszczysto-ilaste [Thistle1] 947 points: 748,294 points (25.8585%) stożek napływowy ouedu Dra [Maroon3] 6049 points: 550,970 points (19.0396%) wydmy Ergu Mhazil [Yellow3] 7717 points: 141,879 points (4.9029%)

Dla zobrazowania z roku 2000 otrzymano następujący obraz poklasyfikacyjny (ryc. 7).

Wykorzystano taki sam sposób przyporządkowania barw do klas rodzajów powierzchni. Otrzymano następujące statystyki wyników klasyfikacji:

Class Stats Summary Report Number of Pixels: 2,893,805 Unclassified: 0 points (0.0000%) roślinność [Green] 110 points: 51,198 points (1.7692%) zabudowa [Red] 235 points: 84,385 points (2.9161%) oued_piaski [Blue] 121 points: 40,534 points (1.4007%) oued_żwiry [Cyan] 178 points: 125,507 points (4.3371%) hamada [Sienna] 1258 points: 684,803 points (23.6644%) serir [Orchid] 849 points: 185,193 points (6.3996%)

duże wydmy gwiaździste i barchanoidalne w NE części badanego obszaru [Orange1] 530 points: 18,283 points (0.6318%)

wydmy poprzeczne i barchanoidalne na N od oazy Mhamid [Yellow1] 1292 points: 71,017 points (2.4541%)

piaski przewiane i niewielkie wydmy piaszczyste [Yellow] 657 points: 77,352 points (2.6730%) wydmy na południe od oazy Mhamid [Yellow2] 426 points: 159,765 points (5.5209%) osady piaszczysto-ilaste [Thistle1] 947 points: 665,863 points (23.0099%)

stożek napływowy ouedu Dra [Maroon3] 6049 points: 626,971 points (21.6660%)

wydmy Ergu Mhazil [Yellow3] 7717 points: 102,934 points (3.5570%)

Wyniki zestawiono w tabeli 2.

Klasy pokrycia	powierzchnia klas		zmiana	zmiana
	1987 [%]	2000 [%]	powierzchni	[%]
roślinność	1,02	1,77	0,75	73,53
zabudowa	2,45	2,92	0,47	19,18
oued_piaski	3,15	1,40	-1,75	-55,56
oued_żwiry	2,00	4,34	2,34	117,00
hamada_jasna	22,89	23,66	0,77	3,36
serir	8,09	6,40	-1,69	-20,89
wydmy_duże	0,53	0,63	0,10	18,87
wydmy_małe	2,66	2,45	-0,21	-7,89
piaski	2,87	2,67	-0,20	-6,97
wydmy_oaza	4,54	5,52	0,98	21,59
piaski i iły	25,86	23,01	-2,85	-11,02
hamada_ciemna	19,04	21,67	2,63	13,81
wydmy_zachodnie	4,90	3,56	-1,34	-27,35
SUMA	100,00	100,00	0,00	

Tab. 2. Wyniki klasyfikacji nadzorowanej z poligonami testowymi.

Analiza zmienności pomiędzy terminami zobrazowań wyraźnie pokazuje kilka charakterystycznych zależności.

Roślinność

Wyraźnie widać jej zagęszczenie w okolicach oaz Mhamid oraz Tagounite. Poza tymi obszarami roślinność nie występuje. Wydzielenie roślinności można traktować jako pewne ze względu na bardzo charakterystyczną odpowiedź spektralną, szczególnie w kanale podczerwonym sceny.

Zabudowa

Na obrazie poklasyfikacyjnym zabudowa zajmuje prawie 3% powierzchni badanego obszaru. W rzeczywistości jej udział jest znacznie mniejszy i ograniczony do wspomnianych powyżej dwóch oaz. Pozostałe obszary sklasyfikowane na południu, w dolnej partii ouedu oraz na stokach Jebel Bani to wynik podobieństwa spektralnego specyficznych wychodni skalnych do sygnatury zabudowy, która jest mało charakterystyczna i w większości klasyfikacji stwarza wiele problemów.

Oued_piaski

Nastąpiło zmniejszenie powierzchni tego wydzielenia, co może być związane z powodzią, jaka nawiedziła badany obszar w końcu lat osiemdziesiątych. Podłoże pokryte w dużej mierze piaskami, widoczne na obrazie poklasyfikacyjnym z roku 1987 w części zachodniej, mogło zostać wzbogacone w drobny materiał ilasty (poprzez bezpośrednie zalanie bądź w wyniku nawiania materiału akumulowanego bliżej koryta ouedu) powodując zmianę sygnatury spektralnej. To spowodowało zapewne częściowe przeniesienie tych pikseli do klasy piasków i iłów w klasyfikacji z roku 2000. Duża zmiana obserwowana jest w obrębie koryta ouedu. Tutaj zmniejszenie powierzchni klasy oued_piaski związane może być z erozją drobniejszego materiału przez powódź i zwiększeniem udziału frakcji grubszej (klasa oued_żwiry).

Oued_żwiry

Wyraźny wzrost powierzchni, szczególnie w części zachodniej badanego obszaru oraz w korycie ouedu. Może to być związane z powodzią z końca lat osiemdziesiątych, w trakcie której duże przepływy w obrębie koryta usunęły drobniejszy materiał nawiany do koryta i osadziły gruby materiał żwirowo-piaszczysty. Powód znacznego zwiększenia powierzchni w zachodniej części badanego obszaru nie jest znany.

• Hamada

Nie zaobserwowano dużych zmian w powierzchni tej klasy.

• Serir

Nie zaobserwowano dużych zmian w powierzchni tej klasy.

- Duże wydmy gwiaździste i barchanoidalne w NE części badanego obszaru Zaobserwowano niewielkie zwiększenie powierzchni zajętych przez te formy w północnej części badanego obszaru.
- Wydmy poprzeczne i barchanoidalne na N od oazy Mhamid Zaobserwowano niewielkie zmniejszenie powierzchni, jednak na południe od oazy Mhamid udział tej klasy zwiększył się. Na tym obszarze odbyło się to kosztem wydm zaliczonych do klasy wydmy zachodnie. Może to wynikać z niewielkich zmian odpowiedzi spektralnej materiału nie związanej z gwałtowną zmianą charakteru osadów.
- Piaski przewiane i niewielkie wydmy piaszczyste Zaobserwowano niewielkie zmniejszenie powierzchni tego wydzielenia. Zmiany w tej klasie wynikają z jednej strony z przyrostu powierzchni na południowych stokach Jebel Bani (trudno ocenić prawdziwość tego wydzielenia na podstawie dotychczasowych prac) oraz z wyraźnego zmniejszenia powierzchni tej klasy w południowej części obrazu (rejon krawędzi Hamady du Dra).
- Wydmy na południe od oazy Mhamid Wyraźnie zwiększyła się powierzchnia zaklasyfikowana jako wydmy otaczające oazę Mhamid. Może to być związane z obserwowanym w terenie procesem pustynnienia samej oazy i zwiększaniem się pola wydm zasypujących w coraz większym stopniu uprawy i zabudowania oazy.
- Osady piaszczysto-ilaste Zaobserwowano niewielkie zmniejszenie powierzchni. Obserwowane zmiany postępują na korzyść obszarów pokrytych materiałem eolicznym, należącym do klas wydmy oaza i wydmy zachodnie.
- Stożek napływowy ouedu Dra Obszar ten jest w większości powierzchnią stożka napływowego związanego z ouedem Dra i rozpoczynającego się w przewężeniu Jebel Beni Selmane (boczne ramię Jebel Bani skręcające na południowy wschód). Powierzchnia tej klasy nieco się zwiększyła obejmując w sposób bardziej zwarty obszar na południe od oazy Mhamid. Powody tych zmian nie sa znane.

• Wydmy Ergu Mhazil

Zaobserwowano zmniejszenie sumarycznej powierzchni tego wydzielenia. Jednocześnie wyraźnie widoczne jest zwiększenie się powierzchni pokrytej tymi wydmami w zachodniej części badanego obszaru, gdzie przyrost powierzchni jest szczególnie wyraźny. Zmniejszenie pokrycia tym materiałem miało natomiast miejsce w części wschodniej, w obrębie stożka napływowego Dra (klasa stożek napływowy ouedu Dra). Może to być związane z niewielką zmianą sygnatury spektralnej materiału tam występującego, a jego zaliczenie do klasy wydmy_zachodnie w klasyfikacji dla roku 1987 mogło być efektem występowania pikseli na granicy obu klas.

Wnioski i zakończenie

W przedstawionych powyżej analizach wykorzystano wstępne badania terenowe oraz wstępne wyniki analiz teledetekcyjnych zobrazowań satelitów Landsat. Przedstawione kierunki zmian wymagają dalszych studiów dla ich potwierdzenia. Wyraźnie widoczny jest jednak postępujący proces rozprzestrzeniania się wydm oraz wyraźne modyfikacje charakteru materiału związane z katastrofalnymi powodziami na tym obszarze. Być może kolejna powódź spowoduje istotną zmianę charakteru osadów w obrębie koryta oraz w jego otoczeniu. Wykorzystanie materiałów i technik teledetekcyjnych umożliwiło obserwację zmian na obszarze całego Coude du Dra w okolicy oazy Mhamid. Wyniki tych analiz posłużą planowaniu kolejnych prac, które pozwolą upewnić się w kierunkach i charakterze zmian na badanym obszarze.

Literatura

Ciołkosz A., Kęsik A., 1989, Teledetekcja satelitarna. PWN, Warszawa.

Ciołkosz A., Miszalski , Olędzki J.R, 1999, Interpretacja zdjęć lotniczych. PWN, Warszawa.

Siegal B.S., 1980, Remote Sensing In Geology. John Wiley & Sons.

Skocki K., 2004, Analiza pojemności informacyjnej i przydatności obrazów satelitarnych programu CORONA do badań stanu środowiska przyrodniczego Polski i jego zmian. Teledetekcja Środowiska, 33.

Smith W.L., 1977, *Remote Sensing applications for mineral exploration*. Dowden, Hutchinson & Ross. Stone K.N., 1951, *Geographical air photo interpretation*. Photogramm. Engin., XVII, 5.

W pracy wykorzystano zobrazowania satelitarne pozyskane poprzez Global Land Cover Facility Earth Science Data Interface (GLCF ESDI).