

**Anita Sabat¹, Anna Jarocińska¹, Artur Magnuszewski², Łukasz Sławik³,
Bogdan Zagajewski¹, Adrian Ochtyra¹, Jan Niedzielko³**

¹Uniwersytet Warszawski, Wydział Geografii i Studiów Regionalnych,
Zakład Geoinformatyki, Kartografii i Teledetekcji
e-mail: anitasabat@o2.pl

²Uniwersytet Warszawski, Wydział Geografii i Studiów Regionalnych,
Zakład Hydrologii

³MGGP Aero Sp. z o.o

WYKORZYSTANIE TECHNIK HIPERSPEKTRALNYCH DO KARTOWANIA WÓD JEZIORA ZEGRZYŃSKIEGO

The use of hyperspectral techniques for waters mapping of the Zegrzyńskie Lake

Słowa kluczowe: mapy tematyczne, jakość wód, Jezioro Zegrzyńskie, dane
hiperspektralne

Key words: thematic maps, water quality, Zegrzyńskie Lake, hyperspectral data.

WPROWADZENIE

Jezioro Zegrzyńskie jest sztucznym zbiornikiem retencyjnym na Narwi, położonym około 30 km na północ od Warszawy. Zostało ono utworzone w 1963 roku w wyniku spiętrzenia dolnej Narwi zaporą w Dębem. Do jeziora wpływają dwie rzeki nizinne: Bug i Narew, które mają duży wpływ na jakość wód w tym zbiorniku. Zlewnie obu rzek są użytkowane rolniczo, dlatego ich wody zanieczyszczone są związkami fosforu, potasu i azotu pochodzącymi z nawozów sztucznych. Są to istotne elementy, gdyż wody Jeziora Zegrzyńskiego są wykorzystywane do zaopatrzenia w wodę pitną części mieszkańców Warszawy. Ponadto spełniają istotną rolę w rekreacji oraz hodowli ryb. Stąd opracowanie teledetekcyjnego monitoringu wód jest ważnym aspektem oceny jakości wód w tym zbiorniku (Choromański i in. 2013).

Teledetekcja zajmuje się zdalnym pozyskaniem, przetwarzaniem i analizowaniem informacji o obiektach za pomocą promieniowania elektromagnetycznego, magnetycznego i fal akustycznych (Zagajewski i in. 2010). Pasywne metody teledetekcyjne polegają na rejestrowaniu promieniowania odbijanego od obiektów. Obrazy hiperspektralne składają się z dziesiątek, a nawet setek obrazów zarejestrowanych w bardzo wąskich zakresach spektrum (od kilku do kilkunastu nanome-

trów), co umożliwia określenie parametrów jakości wód z dużą szczegółowością (Goetz 1985, Zagajewski 2010).

W badaniach jakości wód jezior coraz częściej stosuje się obrazy lotnicze i satelitarne, gdyż pozwalają one na jednoczesną analizę jakości wód wielu jezior o dużym zasięgu przestrzennym (Koponen i in. 2002). Do zalet zdalnej analizy jakości wody w zbiornikach wodnych należy zaliczyć także ciągły charakter danych oraz ukazywanie chwilowego stanu wód.

TELEDETEKCYJNE BADANIE JAKOŚCI WÓD JEZIOR

Rozkład parametrów fizykochemicznych wód jest możliwy do ustalenia na podstawie identyfikacji mikro- i makrofitów oraz substancji zawieszonych w wodach. Większość analiz bazuje na ocenie teledetekcyjnych wskaźników, które są obliczane na podstawie wzorów matematycznych absorpcji lub odbicia konkretnych długości fal (Jensen 1983, Gołdyn 2010, Osińska-Skotak 2010). Wskaźniki bazujące na obrazach hiperspektralnych pozwalają określić zawartość zawiesin, fosforu, rozpuszczonej materii organicznej, chlorofilu a i innych barwników roślinnych (Dekker i in. 1996, 2001, Mróz i in. 2011). Niemożliwe jest jednak określenie np. smaku, zapachu czy tlenu rozpuszczonego w wodzie, gdyż parametry te nie zmieniają właściwości spektralnych wody.

Jednym z najczęściej analizowanych parametrów jakości wód jest przezroczystość. Wskaźnik ten określa, jak głęboko światło słoneczne penetruje wodę (Beeton 1958). Jest to uzależnione od zawartości zawiesin i różnego typu zanieczyszczeń w wodzie. Uniwersalnym sposobem naziemnego określania przezroczystości jest pomiar głębokości krążka Secchiego. W analizach teledetekcyjnych natomiast wykorzystuje się zakresy promieniowania o długości fali około 490 nm, 520 nm i przedział od 670 do 750 nm (Osińska-Skotak 2010). Przykładem mogą być badania jakości wód jezior fińskich wykonane na podstawie danych hiperspektralnych AISA (Koponen i in. 2002). Autorzy do oceny widzialności krążka Secchiego wykorzystali algorytm:

$$SDD = -0,4298 + 1,0926[(\rho_{521nm} - \rho_{781nm})/(\rho_{700nm} - \rho_{781nm})]$$

gdzie: ρ_{521} nm – odbicie spektralne fali o długości 521 nm,

ρ_{700} nm – odbicie spektralne fali o długości 700 nm,

ρ_{781} nm – odbicie spektralne fali o długości 781 nm.

W wyniku analiz badacze uzyskali wysoką zależność pomiędzy pomiarami terenowymi a wartościami powyższego wskaźnika na obrazie hiperspektralnym ($r^2 = 0,926$, przy 102 punktach pomiarowych, Koponen i in. 2002).

Podobnie zespół P. Harma (2001) badając przezroczystość jeziora na podstawie danych satelitarnych MERIS oraz pomiarów *in situ* uzyskał wysoki współczynnik determinacji ($r^2 = \text{ok. } 0,83$) dla następującej formuły obliczeniowej:

$$SDD = (\rho_{490nm} - \rho_{754nm})/(\rho_{620nm} - \rho_{754nm})$$

gdzie: ρ_{490} nm – wartość odbicia dla fali o długości 490 nm,
 ρ_{620} nm – wartość odbicia dla fali o długości 620 nm,
 ρ_{754} nm – wartość odbicia dla fali o długości 754 nm.

Innym często mierzonym parametrem, określającym stan wód jest stężenie rozpuszczonej materii organicznej. Przy dużej zawartości tej substancji woda staje się żółtobrazowa. W wyniku badań przeprowadzonych przez C. Fan (2014) ustalono, że wzrost stężenia rozpuszczonej materii organicznej powoduje silną absorpcję promieniowania elektromagnetycznego w zakresie niebieskim i zielonym. Jako najlepszy wzór do wyznaczania tego wskaźnika (potwierdzony wysokim współczynnikiem determinacji formuły obliczeniowej wynoszącym $r^2 = 0,83$) wskazano algorytm:

$$\text{CDOM} = 0,89 \times \rho_{700\text{nm}} / \rho_{450\text{nm}} - 0,15$$

gdzie: ρ_{700} nm – odbicie spektralne fali o dł. 700 nm,
 ρ_{450} nm – odbicie spektralne fali o dł. 450 nm.

Natomiast D.C. Pierson i N. Strombeck (2000) za najlepszy algorytm do identyfikacji rozpuszczonej materii organicznej w szwedzkich jeziorach uznali wzór:

$$\text{CDOM} = (\rho_{675} \text{ nm}) / (\rho_{405} \text{ nm})$$

gdzie: ρ_{405} nm – odbicie spektralne fali o dł. 405 nm,
 ρ_{675} nm – odbicie spektralne fali o dł. 675 nm.

Powyższy iloraz odbicia promieniowania jest wysoko skorelowany ($r^2 = 0,8601$) z zakresem fali o długości 420 nm, również przydatnym do określania stężenia materii organicznej w wodach jeziornych.

Bardzo ważnym elementem badania stanu troficznego wód jest też analiza stężenia chlorofilu *a* i innych barwników roślinnych, które świadczą o zawartości fitoplanktonu w wodzie. Według K. Osińskiej-Skotak (2010) do określania zawartości chlorofilu *a* zazwyczaj wykorzystywane są zakresy spektralne związane z największą absorpcją (fale o długości ok. 420-520 nm) bądź maksymalną fluorescencją (długość fali ok. 660-690 nm) promieniowania elektromagnetycznego.

S. Koponen i in. (2002) kontynuując badania fińskich jezior uzyskali wysoką korelację ($r^2 = 0,937$, $N = 80$) badań terenowych i teledetekcyjnych wykorzystując nieco inne zakresy fal. Do analizy zawartości chlorofilu w wodach zbiorników wodnych na obrazie hiperspektralnym AISA wykorzystali wzór:

$$\text{Chl } a = 33,79 + 65,66 \times (\rho_{700\text{nm}} - \rho_{781\text{nm}}) / (\rho_{662} \text{ nm} - \rho_{781\text{nm}})$$

gdzie: ρ_{662} nm – odbicie spektralne fali o dł. 662 nm,
 ρ_{700} nm – odbicie spektralne fali o dł. 700 nm,
 ρ_{781} nm – odbicie spektralne fali o dł. 781 nm.

Obliczenia, przy użyciu wspomnianych wzorów polegają na wyodrębnieniu zakresów promieniowania o największych różnicach pomiędzy charakterystykami współczynnika odbicia dla czystej i zanieczyszczonej wody. Woda najsilniej

pochłaniania promieniowania w zakresie podczerwonym, a odbija promieniowanie widzialne (400-600 nm). Im wyższe jest odbicie spektralne dla wody, tym większe jest jej zanieczyszczenie. Analizując zakres współczynnika odbicia dla wody można również stwierdzić jaka substancja ma największy wpływ na zanieczyszczenie wody.

Dodatkowo badania nad jakością wody wzbogacić można o klasyfikację obrazu oraz wskaźników. Metodę klasyfikacji nadzorowanej wskaźnika przezroczystości wód wykorzystali M. Słapińska i in. (2014) podczas badania starorzeczy Biebrzy z użyciem obrazu hiperspektralnego AISA. Wyróżniono w ten sposób pięć klas o różnym poziomie przezroczystości starorzeczy, a całkowita dokładność wykonanej klasyfikacji wynosiła 79%. Sensor AISA wykorzystali również S. Koponen i in. (2002) wykonując klasyfikacje 11 jezior znajdujących się w południowej Finlandii metodą nienadzorowaną. Klasyfikację wykonano według trzech parametrów jakości wód: widzialności krążka Secchiego, mętności i zawartości chlorofilu *a*. Przeprowadzono zarówno badania lotnicze, jak i naziemne. Dokładność klasyfikacji nienadzorowanych wynosiła 90% dla trzech klas głębokości krążka Secchiego, 79% dla pięciu klas mętności i 78% dla pięciu klas zawartości chlorofilu *a*.

METODYKA BADAŃ

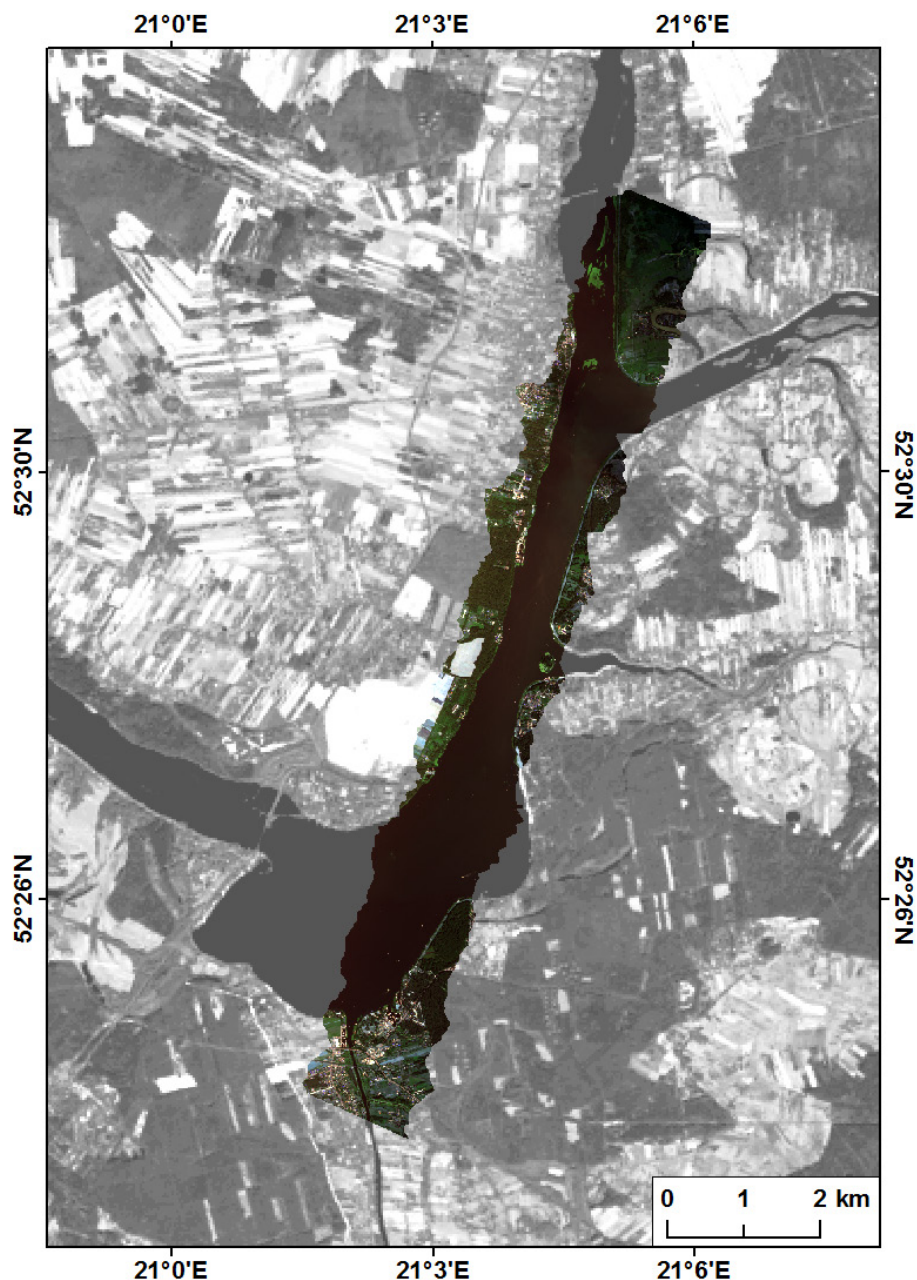
3 sierpnia 2013 roku firma MGGP Aero wykonała zobrazowanie hiperspektralne skanerem AISA Eagle (ryc. 1). Uzyskano obraz o rozdzielczości spektralnej¹ 129 kanałów zarejestrowanych w zakresie od 401 do 997 nm oraz rozdzielczości przestrzennej² 1 metra.

Podczas naziemnych badań terenowych dokonano pomiaru charakterystyk spektralnych terenów otaczających jezioro do korekcji atmosferycznej oraz pobrano w ośmiu miejscach próbki wody z jeziora do analizy laboratoryjnej. Położenie miejsc poboru próbek zlokalizowano przy wykorzystaniu odbiornika GPS. Parametry jakości wód określono w laboratorium Pracowni Monitorowania Wód Powierzchniowych Centrum Wodnego SGGW w Warszawie. Były to: zawartość (w mg/dm³) chlorków, siarczanów, bromków, fluorków, sodu, amoniaku, potasu, magnezu oraz wapnia, a także barwa, tlen rozpuszczony i przewodność właściwa w 25°C. Wyniki analizy laboratoryjnej próbek przypisano odpowiednim lokalizacjom i na tej podstawie opracowano warstwę wektorową w programie ArcGIS.

Obraz poddany został próbie korekcji atmosferycznej w celu ograniczenia wpływu atmosfery na wartości współczynnika odbicia. Zastosowano metodę Empirical Line, która wykorzystuje wartości współczynnika odbicia uzyskane z pomiarów terenowych za pomocą spektrometru (Głowienka 2008). Jednak w przypadku analizy właściwości wody korekcja atmosferyczna na obrazie AISA generowała do-

¹ Rozdzielczość spektralna - liczba kanałów spektralnych zobrazowanych przez skaner oraz zakres promieniowania zarejestrowany przez czujnik

² Rozdzielczość przestrzenna - wielkość powierzchni terenu zobrazowanej jako pojedynczy piksel



Ryc. 1. Obraz hiperspektralny AISA wykorzystany w badaniach jakości wód Jeziora Zegrzyńskiego w kompozycji RGB 655, 553, 453 nm nałożony na obraz panchromatyczny Landsat 8 (źródło: earthexplorer.usgs.gov)

Fig. 1. Hyperspectral AISA image used in the analysis of water quality of the Zegrzyńskie Lake (RGB 655, 553, 453 nm) imposed on the panchromatic image of Landsat 8 (source: earthexplorer.usgs.gov)

datkowe błędy. Na części obszaru występowały wartości ujemne, co powodowało, że wskaźniki teledetekcyjne miały wartości przekraczające dopuszczalny zakres. Ten etap wstępnego przetwarzania został więc pominięty.

W celu wyodrębnienia do dalszych analiz sygnału pochodzącego jedynie od wód powierzchniowych, na obrazie hiperspektralnym AISA została utworzona maska eliminująca pozostałe elementy pokrycia terenu. Proces ten ułatwił wykrycie niewielkich zmian właściwości spektralnych wody spowodowanych zróżnicowaniem parametrów fizyczno-chemicznych wód. W tym celu zdefiniowano, że jedynie zakres odbicia spektralnego dla wody (wartości: 0-1288 w kanale 98 obrazu AISA) ma być widoczny na obrazie, a uzyskaną maskę nałożono na obraz wejściowy.

Kolejnym etapem było obliczenie wskaźników teledetekcyjnych, zarówno przeznaczonych do badania wód, jak i roślinności. W pracy wykorzystano wskaźniki:

- widzialności krążka Secchiego SDD (*Secchi Disk Depth*), o wzorze zaczerpniętym z pracy P. Harma i in. (2001):

$$SDD = (\rho_{490 \text{ nm}} - \rho_{754 \text{ nm}}) / (\rho_{620 \text{ nm}} - \rho_{754 \text{ nm}})$$

gdzie: $\rho_{490 \text{ nm}}$ - dla AISA: kanał 21, długość fali 489,71 nm

$\rho_{620 \text{ nm}}$ - dla AISA: kanał 49, długość fali 618,07 nm

$\rho_{754 \text{ nm}}$ - dla AISA: kanał 78, długość fali 754,73 nm

- rozpuszczonej materii organicznej CDOM (*Coloured Dissolved Organic Matter*), na podstawie pracy D.C. Pierson i N. Strombeck (2000):

$$CDOM = (\rho_{675 \text{ nm}}) / (\rho_{405 \text{ nm}})$$

gdzie: $\rho_{405 \text{ nm}}$ - dla AISA: kanał 2, długość fali 405,71 nm

$\rho_{675 \text{ nm}}$ - dla AISA: kanał 61, długość fali 674,29 nm

- wskaźnik zawartości karotenoidów CRI1 (*Carotenoid Reflectance Index 1*), który posłużył do wykrycia barwników ochronnych roślin w wodzie (Gitelson i in. 2002):

$$CRI1 = 1/(\rho_{510 \text{ nm}}) - 1/(\rho_{550 \text{ nm}})$$

gdzie: $\rho_{510 \text{ nm}}$ - dla AISA: kanał 26, długość fali 512,28 nm

$\rho_{550 \text{ nm}}$ - dla AISA: kanał 34, długość fali 548,73 nm

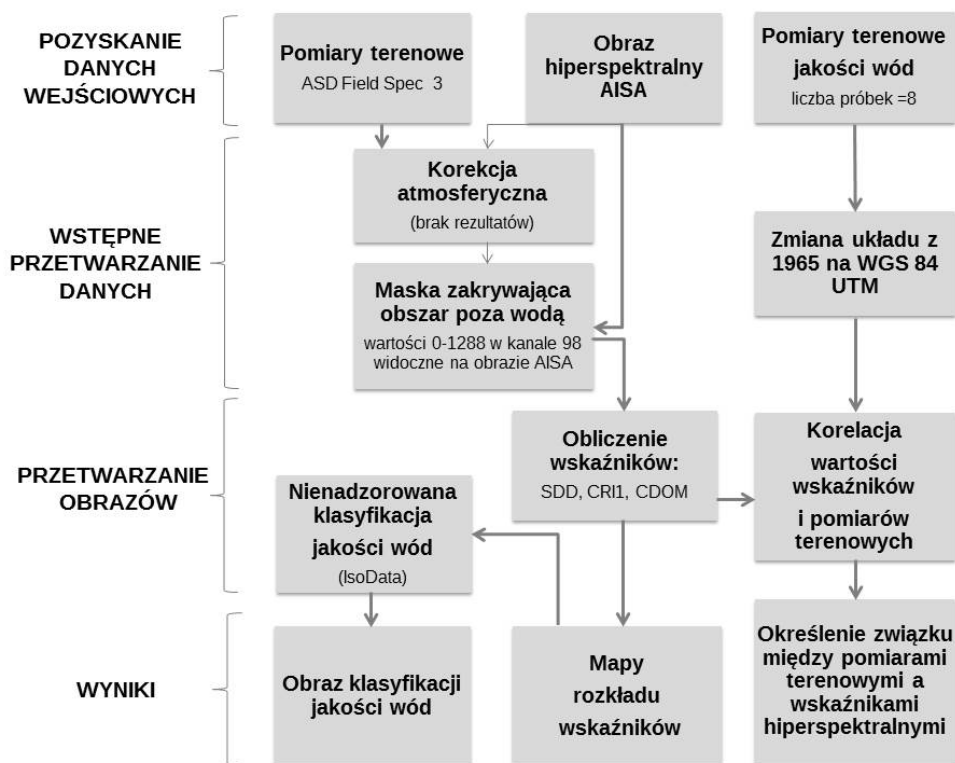
Po wymienionych obliczeniach za pomocą funkcji Band Math w programie ENVI, polegających na nakładaniu i odejmowaniu od siebie wybranych kanałów spektralnych, na podstawie każdego wzoru uzyskano obraz w odcieniach szarości. Następnie wartości otrzymane na obrazie grupowano w klasy, którym nadawane były barwy stosowne do badanego zjawiska. Uzyskane kartogramy zapisano w formacie TIFF i Esri BSQ. W programie ArcMap obrazy nałożono na podkład bazowy (ortofotomapa) oraz wykonano legendę i podziałkę liniową.

Uzyskane w wyniku powyższych działań kartogramy wskaźników jakości wód tj. SDD, CDOM, CRI1 połączono w jeden obraz za pomocą funkcji Layer Stacking w programie ENVI. Następnie przeprowadzono na nim nienadzorowaną klasyfikację metodą IsoData (*Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique*), dzięki której piksele zostały automatycznie przydzielone do klas. Klasyfikacja nie wymagała określania poligonów treningowych o znanej jakości wód, lecz bazowała

jedynie na podobieństwie wartości pikseli. Ustalono jedynie minimalną i maksymalną liczbę klas wyjściowych ($\text{min}=5$, $\text{max}=8$), maksymalną liczbę pikseli zmieniających klasę (1000) w kolejnych iteracjach oraz liczbę iteracji wynoszącą 30, która definiowała zakończenie klasyfikacji. Celem klasyfikacji było wyznaczenie stref wód różniących się zawartością wybranych substancji. Obraz wyjściowy podzielony został na 5 klas jakości wód, które zdefiniowano po szczegółowej analizie wizualnej kartogramów wskaźników jakości wód oraz wartości pomiarów terenowych.

Weryfikacja wyników klasyfikacji odbyła się przez porównanie obrazu sklasyfikowanego z bezbłędnymi danymi pochodzącymi z badań terenowych oraz z wynikami wskaźników jakości wód. Rozmieszczenie klas jakości wód uzyskane w klasyfikacji było bardzo zbliżone do rozkładu przestrzennego parametrów jakości wód na podstawie badań terenowych i wartości wskaźników teledetekcyjnych.

Schemat przetwarzania obrazu w celu opracowania map tematycznych jakości wód Jeziora Zegrzyńskiego przedstawiono na poniższym obrazie (ryc. 2).

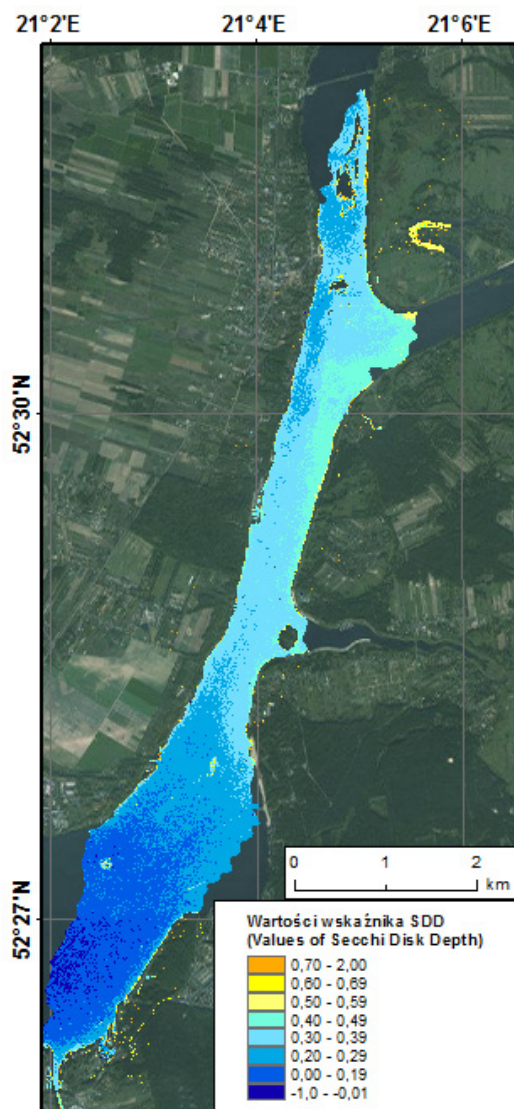


Ryc. 2. Schemat metodyki pracy

Fig. 2. Scheme of methodology

WYNIKI BADAŃ

Po zastosowaniu odpowiednich skal barwnych obrazy wskaźników teledetekcyjnych i klasyfikacji zostały poddane szczegółowej analizie. Interpretacja uzyskanych kartogramów jest zamieszczona poniżej.



Ryc. 3. Rozkład wskaźnika widzialności krążka (SDD) na Jeziorze Zegrzyńskim na tle mapy podkładowej ze strony www.esri.com

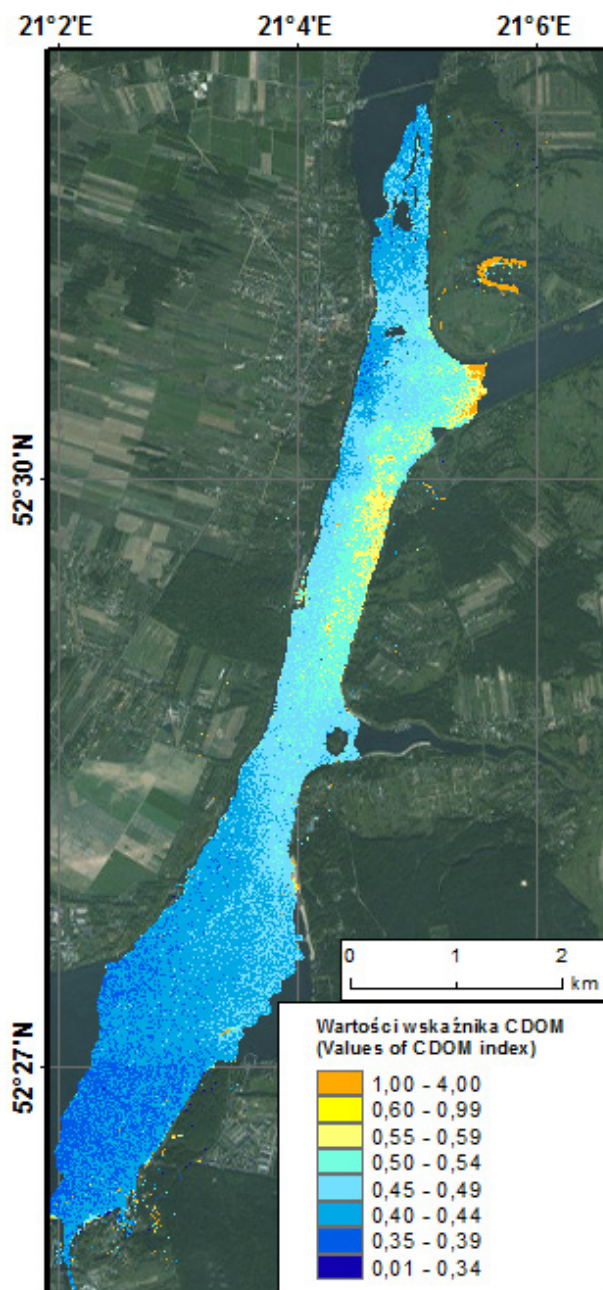
Fig. 3. Distribution of Secchi Disk Depth index (SDD) on the Zegrzyńskie Lake with background of base map from www.esri.com

Powyższe wyniki uzyskano dzięki wykryciu różnic w odbiciu spektralnym wody w odpowiednich zakresach promieniowania widzialnego (niebieskim i czerwonym). Czysta woda odbija wspomniane promieniowanie w około 10%, jeśli jednak współczynnik odbicia jest wyższy w określonych zakresach spektrum, wody można uznać za zanieczyszczone i mniej przezroczyste.

W wyniku zastosowania opisanego wcześniej wzoru na oszacowanie przezroczystości wód otrzymano obraz (ryc. 3) będący jednocześnie mapą rozkładu wskaźnika głębokości krążka Secchiego na Jeziorze Zegrzyńskim. Wskaźnik SDD przyjmuje wartości od -1 do 2. Im większa jest jego wartość, tym mniejsze jest zanieczyszczenie zbiornika wodnego. Duża głębokość widzialności krążka Secchiego oznaczona została kolorem ciemnoniebieskim, a wraz ze zmniejszającą się przezroczystością wody barwa na obrazie staje się coraz jaśniejsza.

Najwyższą widzialność krążka Secchiego mają wody w południowej części zbiornika. Jest to spowodowane głównie opadaniem zawiesin w głąb jeziora przy małej prędkości przepływu. Wody Narwi, choć czyste, mają umiarkowaną przezroczystość ze względu na dużą zawartość fitoplanktonu (ryc. 5). Natomiast wody pochodzące z rzeki Bug charakteryzują się małą przezroczystością, co jest związane z wysoką zawartością zawiesin i zanieczyszczeń chemicznych. W strefie mieszanania wód obu rzek prawdopodobnie dochodzi do zjawiska upwellingu, w wyniku którego w warstwie przypowierzchniowej znajdują się rozcieńczone wody Bugu, a pod nimi wody Narwi. Należy jednak zwrócić uwagę, że obraz teledetekcyjny pozwala na badanie jedynie wierzchniej warstwy wody. Uzyskany rozkład wskaźnika przezroczystości wód porównano z badaniami terenowymi. Ze względu na brak terenowych pomiarów głębokości krążka Secchiego, przezroczystość wód skorelowano m.in. z parametrami barwy ($R_s = -0,51$) i przewodności ($R_s = -0,69$). Wykazano w ten sposób, że wraz ze wzrostem przejrzystości wody zmniejsza się elektroprzewodność wód, czyli pośrednio też ilość związków chemicznych rozpuszczonych w wodzie, natomiast woda absorbuje większą ilość promieniowania, więc barwa wody wydaje się ciemniejsza. Uzyskane w badaniach silne zależności między tymi parametrami (tab.1) potwierdzają poprawność obliczeń. Niestety liczba punktów pomiarowych ($N=8$) jest niewielka, co zmniejsza wiarygodność uzyskanych współczynników korelacji. W przyszłości planowane są więc kolejne pomiary *in situ* jakości wód Jeziora Zegrzyńskiego.

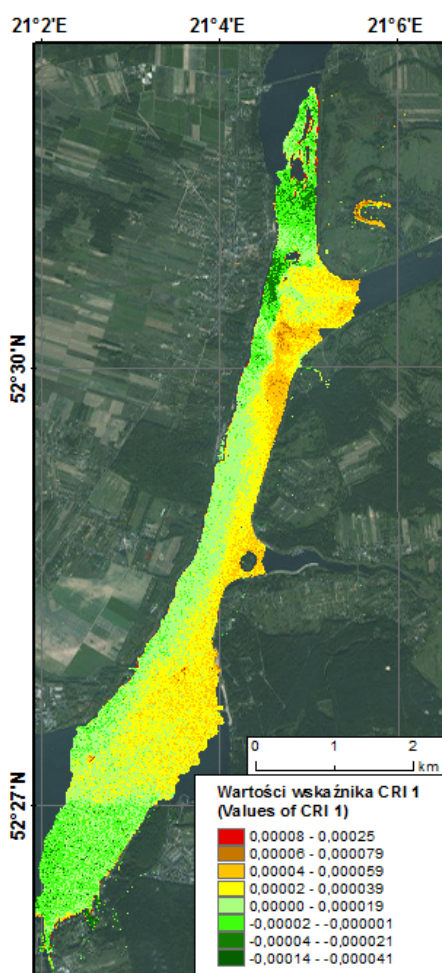
Wskaźnik CDOM wizualizuje rozkład parametru stężenia rozpuszczonej materii organicznej w Zbiorniku Zegrzyńskim. Powyższy obraz uzyskano po podzieleniu wartości odbić spektralnych w kanale czerwonym i niebieskim. W miejscach, gdzie odbicie spektralne wody w zakresie czerwonym było wyższe niż w zakresie promieniowania niebieskiego wywnioskowano wyższą zawartość materii organicznej. Wartości wskaźnika CDOM wahają się od 0 do 4 i zwiększają się wraz ze wzrostem stężenia rozpuszczonej materii organicznej. Wysoka wartość wskaźnika rozpuszczonej materii organicznej została na mapie oznaczona kolorem żółtym, niska zaś barwą ciemnoniebieską.



Ryc. 4. Rozkład wskaźnika zawartości materii organicznej (CDOM) na Jeziorze Zegrzyńskim na tle mapy podkładowej ze strony www.esri.com

Fig. 4. Distribution of Colored Dissolved Organic Matter index (CDOM) on the Zegrzyńskie Lake with background of base map from www.esri.com

Względnie najwyższy poziom stężenia rozpuszczonej materii organicznej znajduje się na niewielkim obszarze wód w pobliżu ujścia Bugu do Zbiornika Zegrzyńskiego. Wynika to prawdopodobnie z zanieczyszczenia tej rzeki ściekami gospodarczymi i przemysłowymi z miast znajdujących się w jej zlewni. Substancja ta szybko jednak się rozprzestrzenia i opada na dno. Niskie wartości uzyskano w południowej części zbiornika i w wodach Narwi. Obliczenia zostały potwierdzone badaniami terenowymi, gdyż uzyskano wysokie współczynniki korelacji pomiędzy wartościami wskaźnika CDOM a wieloma organicznymi związkami chemicznymi, np. chlorkami ($R_s=0,59$), siarczanami ($R_s=0,67$) oraz z wapniem ($R_s=0,76$) czy potasem ($R_s=-0,67$). Ze względu na niewielką ilość punktów pomiarowych badania terenowe zostaną powtórzone w najbliższym czasie.



Ryc. 5. Rozkład wskaźnika CRI 1 na Jeziorze Zegrzyńskim na tle mapy podkładowej ze strony www.esri.com

Fig. 5. Distribution of Carotenoid Reflectance Index 1 (CRI1) on the Zegrzyńskie Lake with background of base map from www.esri.com

Do wykrycia zawartości barwników roślinnych w wodzie wykorzystano wskaźnik CRI1. Jest on zwykle stosowany do określania zawartości pigmentów ksantofilu (karotenoidów) w liściach roślin (Gitelson i in. 2002). Zawartość pigmentów ksantofilu (karotenoidów) w liściach roślin zwiększa się wraz ze wzrostem ilości światła wykorzystanego w procesie fotosyntezy oraz szybkością pochłaniania dwutlenku węgla przez roślinę. Do obliczenia wskaźnika CRI1 wykorzystano różnicę pomiędzy współczynnikami odbicia wody w odpowiednich zakresach promieniowania zielonego.

Wskaźnik CRI1 na obrazie AISA osiąga wartości w zakresie od -0,00014 do 0,00025. Wraz ze wzrostem wartości wskaźnika zwiększa się stosunek karotenoidów do chlorofilu. Odcienie koloru zielonego oznaczają wysoką zawartość chlorofilu w wodach zbiornika, natomiast barwy od żółtego do pomarańczowego oznaczają wysoką zawartość karotenoidów a niską chlorofilu.

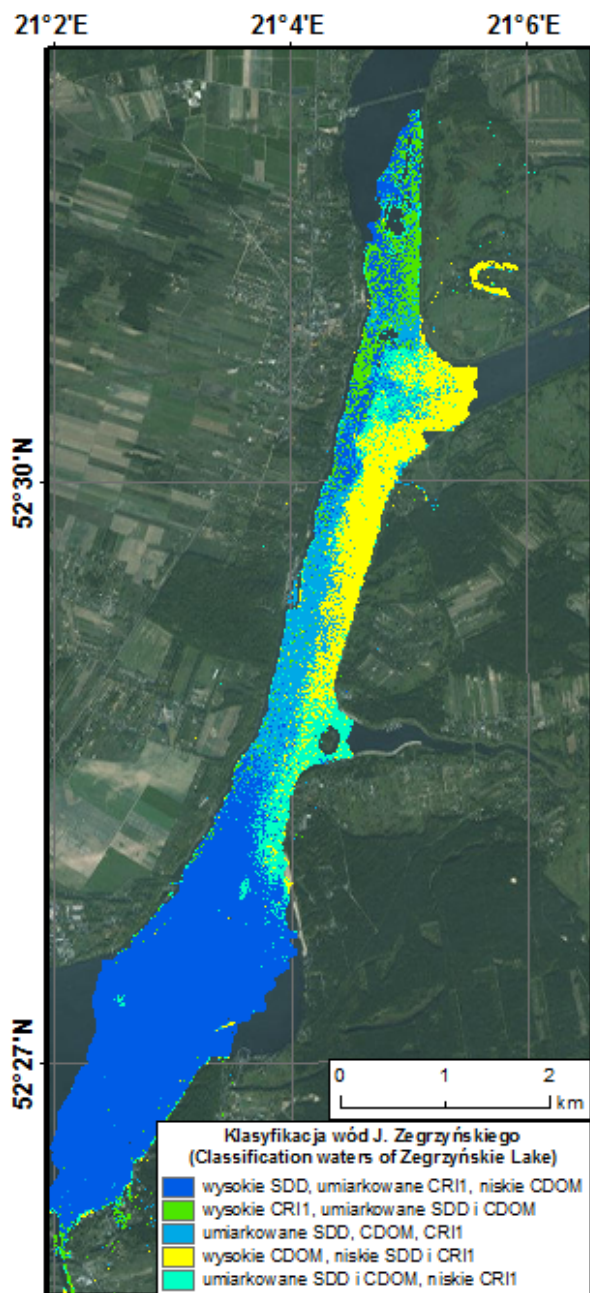
Niskie wartości CRI1 zaobserwowano przy ujściu Narwi do Jeziora Zegrzyńskiego oraz w południowej części zbiornika, co świadczy o wysokiej zawartości chlorofilu w stosunku do karotenoidów. Wysokie stężenie chlorofilu w wodach Narwi wynika z rolniczego charakteru zlewni i niewielkiego zanieczyszczenia tej rzeki. Dodatkowo niewielka prędkość wód w Narwi oraz w południowej części zbiornika sprzyja rozwojowi roślinności wodnej (Bok 1994, Dojlido i in. 2006). Natomiast strumień wód Bugu charakteryzuje się najniższym stężeniem chlorofilu i najwyższą zawartością karotenoidów, co jest spowodowane wysokim zanieczyszczeniem wód tej rzeki zawiesinami mineralnymi oraz dużą prędkością wód (Dojlido i in. 2006).

Poprawność wynikowej mapy rozkładu wskaźnika CRI1 potwierdzono na podstawie informacji uzyskanych w cytowanych powyżej publikacjach.

Klasyfikacja jakości wód Jeziora Zegrzyńskiego

Klasyfikacja teledetekcyjnych wskaźników jakości wód pozwoliła zlokalizować wody o wysokiej koncentracji materii organicznej i barwników roślinnych na obszarze Jeziora Zegrzyńskiego. Nadając odpowiednie barwy wyróżnionym klasom opracowano mapę tematyczną substancji występujących w wodzie. Klasy interpretowano na podstawie analizy kartogramów wskaźników, które wykorzystano do klasyfikacji oraz wartości uzyskanych z badań terenowych (ryc. 6).

Wody oznaczone kolorem żółtym charakteryzują się wysoką zawartością materii organicznej i znacznie ograniczonymi przez tą substancję wskaźnikami wiązalności krążka Secchiego. Kolorem zielonym wyróżniono wody o wysokim stężeniu barwników roślinnych i umiarkowanych wartościach wskaźników materii organicznej i przezroczystości. Natomiast odcieniami niebieskiego zaprezentowano strefy wód bez znaczącej koncentracji materii organicznej i roślinnej: kolor błękitny oznacza wody o małej zawartości karotenoidów, kolor niebieski strefę mieszania o umiarkowanych wartościach wszystkich wskaźników, a barwa granatowa odpowiada wodzie o największej przezroczystości.



Ryc. 6. Klasyfikacja substancji występujących w wodach Jeziora Zegrzyńskiego na tle mapy podkładowej ze strony www.esri.com

Fig. 6. Classification of different substance content in water of the Zegrzyńskie Lake with background of base map from www.esri.com

Najwyższe współczynniki korelacji osiągnięto dla pomierzonych w terenie parametrów jakości wód ze wskaźnikiem rozpuszczonej materii organicznej (do $R_s = -0,83$ dla zawartości amoniaku) (tab. 1). Wraz ze wzrostem ilości bromków w wodzie wzrasta stężenie siarczanów, sodu, wapnia, potasu, jak również zmienia się barwa wody, jej przewodność i zawartość tlenu rozpuszczonego. Widzialność krążka Secchiego jest w większości ujemnie skorelowana z wartościami pomiarów terenowych, co oznacza, że wraz ze wzrostem stężenia badanych pierwiastków maleje przezroczystość wód. Korelacje wskaźnika CRI1 i pomiarów terenowych wykazały niewielką zmianę stężenia barwników roślinnych wraz ze zmianą zawartości pierwiastków.

DYSKUSJA WYNIKÓW

Wykonana analiza wskaźników teledetekcyjnych oraz klasyfikacji wykazała, że wody Bugu i Narwi, wpływające do Zbiornika Zegrzyńskiego, ze względu na różnice prędkości przepływu i różny ładunek substancji zawieszonych płyną przez dużą część Zbiornika Zegrzyńskiego oddzielnymi strumieniami. Pełnemu wymieszaniu ulegają dopiero w południowej części jeziora zwanej Plosem Dużym. Analiza dotyczy jednak tylko górnej warstwy wody, widocznej na obrazowaniu, a mieszanie wód może zachodzić dużo wcześniej na pewnych głębokościach.

Wody Narwi charakteryzują się niewielką prędkością przepływu, wysoką przezroczystością, dużą ilością fitoplanktonu i niskim stężeniem rozpuszczonej materii organicznej. Natomiast w wodach Bugu ze względu na dużą prędkość i wysoką zawartość zanieczyszczeń chemicznych ograniczony jest rozwój roślin wodnych. Wyższe stężenie materii organicznej i mniejsza przezroczystość spowodowane są rolniczym charakterem zlewni oraz wylewem do wód rzeki ścieków komunalnych i przemysłowych.

Rozkłady parametrów zawartości materii organicznej i barwników roślinnych są zgodne z wynikami badań hydrologicznych przeprowadzonych na Jeziorze Zegrzyńskim przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej w latach 1994-2003 (Dojlido i in. 2006), a różnice w zawartości poszczególnych substancji mają swoje potwierdzenie w publikacjach dotyczących Narwi i Bugu (Bok 1994, Lubelska Fundacja Ochrony Środowiska Naturalnego w Lublinie 1997).

Otrzymany na obrazie AISA rozkład wskaźnika przezroczystości wody jest zbliżony do wyniku rozmieszczenia przestrzennego głębokości krążka Secchiego w Jeziorze Zegrzyńskim na podstawie modelu hydrodynamicznego, które przedstawiono na konferencji pt. „Środowisko informacji” (Ślapińska i in. 2014). W obu pracach wskazano, że największą przezroczystością charakteryzują się wody na południu Jeziora Zegrzyńskiego, nieco mniejszą - wody Narwi, a najniższą wartość widzialności krążka Secchiego mają wody wpływające do zbiornika z rzeki Bug.

Metodyka przetwarzania danych hiperspektralnych została zaczerpnięta z pracy K. Osińskiej-Skotak (2010), która prowadziła podobne badania na obszarze jezior

mazurskich oraz Zalewu Wiślanego na podstawie obrazów ze skanera CHRIS.

Wyniki korelacji uzyskane w pracy są zbliżone do współczynników determinacji uzyskanych przez innych badaczy (Koponen i in. 2002, Kallio i in. 2003). Podawali oni korelacji wskaźniki przezroczystości i zawartości barwników w wodzie pomierzone zdalnie i w terenie, lecz liczba pomiarów terenowych była zdecydowanie większa, a otrzymane zależności bardziej wiarygodne.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Celem pracy była analiza jakości wód Jeziora Zegrzyńskiego z zastosowaniem obrazu hiperspektralnego AISA. Wykorzystano zarówno naziemne pomiary jakości wód i odbicia spektralnego, jak i lotniczą kampanię pomiarową. Na podstawie obrazu ze skanera AISA obliczono teledetekcyjne wskaźniki jakości wód: widzialność krążka Secchiego, zawartość rozpuszczonej materii organicznej oraz wskaźnik CRI1. Następnie na połączonych kartogramach wskaźników teledetekcyjnych przeprowadzono klasyfikację nienadzorowaną. Ostatnim etapem pracy było określenie związków między wartościami wskaźników z obrazu AISA a pomiarami terenowymi jakości wód (stężenie chlorków, siarczanów, bromków, fluorków, sodu, amoniaku, potasu, magnezu, wapnia, zawartość tlenu, barwa oraz przewodność właściwa w 25°C).

Na podstawie uzyskanych rozkładów przestrzennych wskaźników teledetekcyjnych można stwierdzić, że wody Jeziora Zegrzyńskiego wpływające do zbiornika z Bugu i Narwi różnią się znacznie pod względem parametrów fizykochemicznych. Wody Narwi mają wysoką zawartość barwników roślinnych oraz dużą przejrzystość. Natomiast wody Bugu zawierają więcej materii organicznej, która ogranicza penetrację wody przez promienie słoneczne, a zawartość fitoplanktonu jest niska. Wskaźniki teledetekcyjne obliczone na zdjęciach hiperspektralnych są wysoko skorelowane z naziemnymi pomiarami hydrologicznymi. Można więc stwierdzić, że dane hiperspektralne AISA są przydatne w badaniu jakości wód jezior i umożliwiają zdalne określenie względnej zawartości poszczególnych składników wody. Dzięki ukazaniu przestrzennego rozkładu parametrów fizykochemicznych wód jezior i chwilowego stanu wody możliwy jest monitoring wielu zbiorników wodnych jednocześnie. Rozdzielczość przestrzenna danych była wystarczająca do tak bardzo szczegółowych badań.

Teledetekcja hiperspektralna jest coraz częściej stosowana w badaniach stanu wód jezior. Jej główną zaletą jest ciągły charakter uzyskiwanych danych, co ułatwia analizę zmienności parametrów fizykochemicznych wód. Podczas badań terenowych próbki pobierane są w niewielu punktach pomiarowych, więc stworzenie wiarygodnej mapy tematycznej jakości wód zbiornika jest bardzo trudne. Wykorzystanie interpolacji pomiędzy tymi punktami nie zawsze daje precyzyjne wyniki, szczególnie jeśli do jeziora dopływają rzeki. Do innych zalet zdalnej analizy jakości wody w zbiornikach wodnych należy zaliczyć możliwość pozyskania

danych zarówno w skali lokalnej, jak i globalnej, a także dość dużą powtarzalność obserwacji, która pozwala na monitoring sezonowych zmian jakości wód. Jedynym problemem w szerzeniu się tej metody badań są wysokie koszty pozyskania danych hiperspektralnych.

Podziękowania

Pragniemy wyrazić serdeczne podziękowania firmie MGGP Aero za wykonanie i udostępnienie do badań obrazu hiperspektralnego AISA obejmującego obszar Jeziora Zegrzyńskiego oraz pracownikom Zakładu Hydrologii i Zasobów Wodnych Wydziału Budownictwa i Inżynierii Wodnej SGGW w Warszawie za wykonanie oznaczenia parametrów jakości wody.

Literatura

- Beetona A., 1958, Relationship Between Secchi Disc Readings and Light Penetration in Lake Huron, *Transactions of the American Fisheries Society*, 87, 73-79
- Bok G. (red.), 1994, Ocena jakości wód rzeki Narew w profilu granicznym w latach 1977-1993 oraz jakości wód Zbiornika Siemianówka w latach 1991-1993, Państwowa Inspekcja Ochrony Środowiska, Ministerstwo Zasobów Naturalnych i Ochrony Środowiska Republiki Białorusi, Biblioteka Monitoringu Środowiska, Białystok, 29 s.
- Canadian Council of Ministers of the Environment, 1999, Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life: Total particulate matter, Winnipeg.
- Choromański K., Kamiński I., Wawer K., Wiszniewska A., 2013, Analiza funkcjonalna Zbiornika Zegrzyńskiego, opracowanie przygotowane przez Biuro Konsultacyjne KO-BIKO Sp. z o.o. udostępnione na stronie Lokalnej Grupy Rybackiej Zalewu Zegrzyńskiego <http://lgrzz.pl/>.
- Dekker A.G., Zamurović-Nenad Ž., Hoogenboom H. J. Peters S. W., 1996, Remote sensing, ecological water quality modelling and in situ measurements: a case study in shallow lakes, *Hydrological Sciences Journal*, 41, 531-547.
- Dekker A.G., Vos R. J., Peters, S., 2001, Comparison of remote sensing data, model results and in situ data for total suspended matter (TSM) in the southern Frisian lakes, *Science of The Total Environment* 268, 197-214.
- Dojlido J., Taboryska B., Dmitruk U., 2006, Analiza zmian jakości wód Zbiornika Zegrzyńskiego, Zmiany jakości wody wybranych zbiorników wodnych, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa, 56-90.
- Fan C., 2014, Spectral Analysis of Water Reflectance for Hyperspectral Remote Sensing of Water Quality in Estuarine Water, *Journal of Geoscience and Environment Protection* 2, 19-27.
- Gitelson, A.A., Y. Zur, O.B. Chivkunova, and M.N. Merzlyak, 2002, Assessing Carotenoid Content in Plant Leaves with Reflectance Spectroscopy, *Photochemistry and Photobiology*, 75, 272-281.
- Głowienka E., 2008, Porównanie metod korekcji atmosferycznej dla danych z sensorów hiperspektralnych, *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 18, 121-130
- Goetz A.F.H., Vane G., Solomon J.E., Rock B.N., 1985, Imaging Spectrometry for Earth Remote Sensing, *Science*, 228: 4704, 1147-1153.

- Gołdyn R., Messyas B., Kowalczevska-Madura K., Cerbin S., 2010, Stan jakości wód jeziora Durowskiego latem w roku 2010, Wydawnictwo Uniwersytetu Adama Mickiewicza, Poznań, 44 s.
- Harma P., Vepsäläinen J., Hannonen T., Pyhälä T., Kamari J., Kallio K., Eloheimo K., Koponen S., 2001, Detection of water quality using simulated satellite data and semi-empirical algorithms in Finland, *The Science of the Total Environment* 268, 107-121.
- Jensen J. R., 1983, Biophysical Remote sensing – Review Article, *Annals of the Associations of American Geographers*, 73: 1, 111-132
- Kallio, K., Koponen, S., Pulliainen, J., 2003, Feasibility of airborne imaging spectrometry for lake monitoring—a case study of spatial chlorophyll a distribution in two meso- eutrophic lakes, *International Journal of Remote Sensing*, 24: 19, 3771- 3790.
- Koponen S., Pulliainen J., Kallio K., Hallikainen M., 2002, Lake water quality classification with airborne hyperspectral spectrometer and simulated MERIS data, *Remote Sensing of Environment*, 79, 1, 51–59.
- Lubelska Fundacja Ochrony Środowiska Naturalnego w Lublinie (red.), 1997, Charakterystyka wód granicznego odcinka rzeki Bug w latach 1990-1996, Państwowa Inspekcja Ochrony Środowiska, Biblioteka Monitoringu Środowiska, Chełm, 68 s.
- Magnuszewski, A. S., 2014, Procesy korytowe w Jeziorze Zegrzyńskim, *Monografie Komitetu Gospodarki Wodnej*, tom XX, 299- 306
- Mróz M., Osińska-Skotak K., Mleczko M., 2011, Teledetekcja pasywna w badaniu ekosystemów wód przybrzeżnych. Zdjęcia satelitarne Zalewu Wiślanego, [w:] M. Kruk, A. Rychter, M. Mróz (red.), *Zalew Wiślany- środowisko przyrodnicze oraz nowoczesne metody jego badania na przykładzie projektu VISLA*, Wyd. Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej, 129-163.
- Osińska-Skotak K., 2010, Metodyka wykorzystania super i hiperspektralnych danych satelitarnych w analizie jakości wód śródlądowych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 153 s.
- Pierson D. C., Strombeck N., 2000, A modelling approach to evaluate preliminary remote sensing algorithms: use of water quality data from Swedish Great Lakes, *Geophysica*, tom 36, nr 1-2, 177-202
- Ślapińska M., Berezowski T., Chormański J., Zagajewski B., Magnuszewski A., Sławik Ł., 2014, Nowe metody badań jakości wód wykorzystujące technikę teledetekcji lotniczej- przykłady zastosowań, materiały z konferencji „Środowisko informacji” opublikowane przez Ministerstwo Ochrony Środowiska, Warszawa <http://www.mos.gov.pl/drukuj/kategoria1615733.html>.
- Zagajewski B., 2010, Ocena przydatności sieci neuronowych i danych hiperspektralnych do klasyfikacji roślinności Tatr Wysokich, *Teledetekcja Środowiska* 43, 113 s.
- Zagajewski B., Jarocińska A., Olesiuk D., 2010, Metody i techniki badań geoinformatycznych, Warszawa, 118 s.
- Strona internetowa: Jezioro Zegrzyńskie – od przygody do zwycięstwa <http://www.jeziorozegrzynskie.info/>

Summary

The paper presents a possibility of an application of Imaging Spectroscopy to acquire thematic maps of water quality. Thanks to very high spectral, radiometric and spatial resolution of AISA hyperspectral images, which allow to identify zones of water with different properties. An analysis of the spatial distribution of physico-chemical parameters of water was made in 2014 for the Zegrzyńskie Lake. A hyperspectral image was acquired by the MGGP Aero aircraft and the Finnish AISA Eagle scanner. Remote sensing indices of water quality (Secchi Disk Depth (SDD), Colored Dissolved Organic Matter (CDOM)) and vegetation index – Carotenoid Reflectance Index 1 (CRI1), which determines the content of chlorophyll and other plant pigments in the water, was calculated on the image. Based on spatial distribution of water quality indices the IsoData classification was performed. The result was a set of maps with five zones of concentrations of different substances in of the Zegrzyńskie Lake. The verification was made based on in-situ acquired samples of water during airborne data imaging. Due to differences in suspended substances load and different water velocity Bug and Narew water flow in separate streams and mix in the middle of the artificial lake. Following research showed a high correlation between the calculated indices and field measurements. They also confirmed the usability of AISA hyperspectral images to create thematic maps of water quality.