

**TELEDETEKCYJNE MONITOROWANIE JAKOŚCI WÓD
W ZALEWIE WIŚLANYM**

**WATER QUALITY MONITORING OF VISTULA LAGOON
USING REMOTE SENSING**

Katarzyna Osińska-Skotak

Zakład Fotogrametrii, Teledetekcji i Systemów Informacji Przestrzennej,
Wydział Geodezji i Kartografii, Politechnika Warszawska

SŁOWA KLUCZOWE: obrazy superspektralne, CHRIS/PROBA, jakość wód, Zalew Wiślany

STRESZCZENIE: Badania nad możliwościami wykorzystania technik teledetekcyjnych do operacyjnego monitorowania stanu jakości wód Zalewu Wiślanego są prowadzone od roku 2006. Prace badawcze wykonywano w ramach trzech projektów międzynarodowych: SWANLAKE (projekt ESA Category-1 LBR), MONTRANSAT (projektu typu INTERREG dofinansowany ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Sąsiedztwa Litwa, Polska, Obwód Kaliningradzki Federacji Rosyjskiej) i VISLA (projekt dofinansowany ze środków Norweskiego Mechanizmu Finansowego). W prezentowanej pracy wykorzystano dane satelitarne rejestrowane przez skaner CHRIS/PROBA w trybie „Water”, pozyskującym dane w 18 kanałach spektralnych. Opracowaniu podlegało sześć bezchmurnych scen satelitarnych zarejestrowanych w latach 2007–2009. Obrazy satelitarne CHRIS/PROBA zostały poddane procesowi korekcji radiometrycznej, atmosferycznej i geometrycznej, a następnie dla tak przygotowanych danych przeprowadzono analizy statystyczne mające na celu otrzymanie formuł obliczeniowych umożliwiających uzyskanie rozkładów przestrzennych wybranych wskaźników jakości wody. Korekcję atmosferyczną wykonano przy zastosowaniu modelu ATCOR 2/3 w wersji 6.4.2. Dokonując analizy zależności między odbiciem spektralnym w punktach poboru wody a wartościami wskaźników jakości wody, określonymi metodami analitycznymi, otrzymano formuły empiryczne dla widzialności krążka Secchiego ($R^2=0.75$), zawartości zawiesiny ogółem ($R^2=0.88$) oraz zawartości chlorofilu-a ($R^2=0.73$). Wyniki jakie uzyskano dla obszaru badawczego „Zalew Wiślany” wskazują na możliwość zastosowania danych CHRIS do operacyjnego określenia m.in. przezroczystości wód, zawartości zawiesiny ogółem oraz zawartości chlorofilu-a.

1. WPROWADZENIE

W Polsce, monitoring wód powierzchniowych do roku 2006 prowadzono dla wybranych zbiorników wodnych w ramach Państwowego Monitoringu Środowiska poprzez pomiary *in-situ* różnych parametrów charakteryzujących stan wód powierzchniowych. W ostatnich latach podejście do oceny stanu jakości wód w Europie uległo znacznym zmianom. Obecne trendy europejskie dążą do stworzenia systemu monitoringu, oceny i klasyfikacji wód na podstawach ekologicznych, gdzie wody powierzchniowe traktowane są jako jeden z wielu elementów ekosystemu pozostających w zależności z innymi elementami środowiska (Soszka, 2002 za Richling, Solon, 1998; Magnuson, Kratz, 2000). W myśl Ramowej Dyrek-

tywy Wodnej (Dyrektywa 2000/60/WE z 23 października 2000 r.), ustanawiającej ramy wspólnotowego działania w dziedzinie polityki wodnej w Europie, ocenie ma podlegać stan ekosystemu wodnego a nie jedynie stan samej wody w konkretnym zbiorniku, tak jak to miało miejsce do tej pory. Podejście takie wymusza również zmianę w kwestii wykorzystania danych wieloźródłowych o charakterze przestrzennym, które umożliwiają przeprowadzenie kompleksowej oceny stanu oraz analizy zmian konkretnego ekosystemu wodnego.

Nowe szanse w podejściu do monitoringu wód śródlądowych stwarzają także istniejące (m.in. MERIS/ENVISAT, HYPERION/EO-1, CHRIS/PROBA) oraz nowoprojektowane (m.in. EnMap, HERO) super- i hiperspektralne systemy teledetekcyjne. Przez wiele lat Rozwoju teledetekcji wypracowano algorytmy umożliwiające prowadzenie monitoringu jakości wód morskich i oceanicznych. W przypadku wód śródlądowych trudno mówić o wypracowanych metodach operacyjnego¹ monitorowania jakości wód, ale od kilku lat jest to jedno z ważniejszych zagadnień badawczych na świecie (Schneider, Mauser, 1996; Flink i in., 2001; Frauendorf J., 2002; Giardino i in., 2001; Harma i in., 2001; Kallio i in., 2001; Kloiber i in., 2002; Mannheim i in., 2004; Thiemann i in., 2002; Vos i in., 2003; Osińska-Skotak i in., 2005). Badania nad możliwościami wykorzystania danych super- i hiperspektralnych do operacyjnego monitorowania stanu jakości wód śródlądowych autorka prowadzi od 2003 roku. Prace te prowadzone były i są w ramach dwóch projektów naukowo-badawczych finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego (5 T12E 006, N520 007 31/1412) oraz trzech projektów międzynarodowych: SWANLAKE (projekt ESA Category-1 LBR), MONTRANSAT² (projektu typu INTERREG dofinansowany ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Sąsiedztwa Litwa, Polska, Obwód Kaliningradzki Federacji Rosyjskiej, koordynowany przez PWSZ Elbląg) i VISLA³ (projekt dofinansowany ze środków Norweskiego Mechanizmu Finansowego, a koordynowany przez Uniwersytet Warmińsko-Mazurski). Prace badawcze skupiały się głównie na wypracowaniu metodyki zastosowania danych satelitarnych pozyskiwanych przez skaner CHRIS/PROBA w dwóch trybach⁴: trybie „Water” (rejestrującym 18 zakresów spektralnych) oraz trybie „All” (rejestrującym 62 zakresy spektralne). Dodatkowo wykorzystywano dane ALI/EO-1, HYPERION/EO-1, SPOT5 oraz LANDSAT ETM+. Obszarami, jakie objęto badaniami były: fragment Pojezierza Mazurskiego oraz Zalew Wiślany.

2. OBSZAR BADAŃ

Zalew Wiślany jest akwenem położonym na terenie Polski i Federacji Rosyjskiej. Jest to zbiornik słonawowodny o powierzchni 838 km² i średniej głębokości wynoszącej zaledwie 2.6 m. W granicach Polski znajduje się jedynie 328 km² powierzchni Zalewu Wiślanego. Jego wody zasilane są rzekami: Pregoła, Pasłęka, Elbląg i Nogat, a wymiana wód z Morzem Bałtyckim odbywa się jedynie przez cieśninę Piławską, położoną w rosyjskiej

¹ Metody operacyjnego monitorowania jakości wód rozumiane są tu jako takie, które zastosowane do dowolnego obrazu satelitarnego, w krótkim czasie, pozwolą uzyskać rozkład przestrzenny określonego parametru jakości wód powierzchniowych z wymaganą dokładnością

² Strona internetowa projektu: www.zalew-wislany.pl

³ Strona internetowa projektu: visla.uwm.edu.pl

⁴ Opis trybów rejestracji danych CHRIS/PROBA można znaleźć m.in. na stronach internetowych <http://earth.esa.int/missions/thirdpartymission/proba.html>, <http://www.chris-proba.org.uk/>, a także w pracach Osińska-Skotak i in., 2005; Osińska-Skotak, 2010

części Zalewu (Rys. 1). Stan wód Zalewu Wiślanego charakteryzuje silna eutrofia i hipertrofia, do czego przyczyniły się m.in. wieloletnie zaniedbania w zakresie budowy oczyszczalni ścieków dla miejscowości nadzalewowych. Na szczęście w ostatnich latach sytuacja uległa zmianie, zbudowano kilkanaście oczyszczalni ścieków, w wyniku czego wody Zalewu Wiślanego ulegają bardzo powolnemu samooczyszczaniu.



Rys. 1. Zalew Wiślanym – zdjęcie satelitarne LANDSAT TM zarejestrowane 29 kwietnia 2009 r. Położenie obszarów badawczych Vistula Lagoon – E i Vistula Lagoon – W oraz przykładowe rozmieszczenie punktów poboru prób wody (19 sierpnia 2008 r.)

Ze uwagi na graniczne położenie Zalewu Wiślanego monitoring jego wód nigdy nie miał charakteru całościowego i systemowego a brak jednorodnego podejścia do monitorowania jakości wód utrudnia transgraniczną współpracę w zakresie jego ochrony i użytkowania. Zmianę podejścia do monitorowania wód Zalewu wymusza wprowadzona w Polsce wspomniana już Ramowa Dyrektywa Wodna, ale jej wdrożenie obejmuje jedynie polską część Zalewu Wiślanego. Z całą pewnością, przy ocenie stanu jakości wód zbiorników transgranicznych, takich jak Zalew Wiślanym pomocne są dane teledetekcyjne, które po odpowiednim przetworzeniu dają informację przestrzenną o stanie jakości wody. Na podstawie danych satelitarnych możliwe jest uzyskanie informacji m.in. o przezroczystości i mętności wód, zawartości zawiesiny ogółem, zawartości chlorofilu-a i innych barwników roślinnych.

Ze względu na powierzchnię Zalewu Wiślanego i wielkość sceny satelitarnej rejestrowanej przez skaner CHRIS zdefiniowane zostały dwa pola testowe (Rys. 1): Vistula Lagoon – W, obejmujące zachodnią część Zalewu Wiślanego, i Vistula Lagoon – E, obejmująca część wschodnią polskiej części Zalewu.

3. METODYKA BADAŃ

3.1. Dane źródłowe

W latach 2006–2009, w ramach projektu Europejskiej Agencji Kosmicznej Category-1 LBR „SWANLAKE”, projektu typu INTERREG „MONTRANSAT” oraz projektu polsko-norweskiego „VISLA”, zarejestrowanych zostało 16 zestawów danych satelitarnych CHRIS/PROBA dla obszaru testowego „Zalew Wiślany”. Dane te pozyskano w trybie „Water”, który jest ukierunkowany specjalnie na badania wód powierzchniowych. W tym trybie skaner rejestruje 18 wąskich kanałów spektralnych w zakresie 405÷1035 nm, z czego większość to zakresy rejestrujące promieniowanie zielone i czerwone. Jedyne trzy ostatnie kanały spektralne to bliska podczerwień (Tabela 1). Nominalna rozdzielczość przestrzenna obrazów CHRIS w trybie „Water” wynosi 18×18 m.

Tab. 1. Zakresy spektralne rejestrowane przez skaner CHRIS w trybie „Water”

Oznaczenie kanału	Zakres spektralny nm	dλ nm
W1	405.6 – 415.2	9.6
W2	438.0 – 446.8	8.8
W3	485.6 – 494.8	9.2
W4	504.5 – 514.8	10.3
W5	525.6 – 534.2	8.6
W6	556.1 – 566.3	10.2
W7	566.3 – 573.4	7.7
W8	584.6 – 596.4	11.8
W9	617.5 – 626.6	9.0
W10	645.7 – 655.8	10.1
W11	666.3 – 677.2	10.9
W12	677.2 – 682.8	5.6
W13	682.8 – 688.5	5.7
W14	700.2 – 712.4	12.2
W15	751.9 – 758.9	7.0
W16	773.4 – 788.4	15.0
W17	863.1 – 881.3	18.3
W18	1002.7 – 1035.5	32.9

Po dokonaniu szczegółowej analizy pozyskanych danych satelitarnych oraz warunków pogodowych panujących w chwili rejestracji danych okazało się, że dziewięć z szesnastu zarejestrowanych zestawów scen satelitarnych CHRIS/PROBA pozyskano praktycznie przy bezchmurnym niebie (Tabela 2). Miejscami występują pojedyncze obłoki, które nie mają wpływu na proces przetwarzania danych satelitarnych. Niestety trzy zestawy danych zostały zarejestrowane podczas silniejszego wiatru, co uwidacznia się wyraźnie na obrazach satelitarnych. Dane te na ogół są praktycznie bezużyteczne dla dalszych prac badawczych, ze względu na sile sfalowanie powierzchni wody. Nie mniej jednak podjęto próbę zastosowania danych satelitarnych z 9 czerwca 2007 r., gdzie stopień sfalowania jest najmniejszy, do określenia kilku wskaźników, charakteryzujących jakość wód, m.in. przezroczystości wód (Rys. 2), zawartości zawiesiny ogółem i zawartości chlorofilu-a.

Tab. 2. Zestawienie parametrów technicznych scen satelitarnych CHRIS/PROBA pozyskanych dla obszaru „Zalew Wiślany”

Data rejestracji, warunki pogodowe	Data kampanii	Wysokość platformy	MZA	OZA	OAA	SZA	Data rejestracji, warunki pogodowe	Data kampanii	Wysokość platformy	MZA	OZA	OAA	SZA
30.09.2006 ☉	-	594 km	2°	8.79°	141.17°	51°	01.08.2008 ☉ +silny wiatr	-	649 km	3°	4.77°	153.28°	40°
01.04.2007 ☉	-	564 km	-15°	14.85°	315.11°	51°	18.08.2008 ☉	18.08.2008	664 km	11°	11.13°	138.92°	45°
08.06.2007 ☉	28.05.2007	665 km	12°	12.02°	139.01°	33°	19.08.2008 ☉	19.08.2008	663 km	-4°	5.26°	223.77°	44°
09.06.2007 ☉ +silny wiatr	28.05.2007	665 km	-4°	4.7°	222.67°	33°	21.04.2009 ☉	23.04.2009	589 km	14°	14.81°	138.24°	47°
17.06.2008 ☉	17.06.2008	552 km	23°	23.49°	137.14°	35°	04.06.2009 ☉	26.05.2009, 15.06.2009	592 km	16°	16.54°	138.14°	37°
18.06.2008 ☉	17.06.2008	551 km	5°	6.07°	148.32°	34°	06.06.2009 ☉ +silny wiatr	26.05.2009, 15.06.2009	598 km	-19°	19.12°	315.28°	35°
27.06.2008 ☉	17.06.2008	554 km	2°	4.38°	168.32°	34°	18.07.2009 ☉	21.07.2009	651 km	16°	16.07°	137.58°	40°
22.07.2008 ☉	15.07.2008	621 km	23°	22.96°	136.74°	39°	31.08.2009 ☉	12.08.2009	551 km	21°	20.99°	137.31°	51°

Teledetekcyjne monitorowanie jakości wód w Zalewie Wiślanym

Oznaczenia: MZA – minimalny kąt zenitalny satelity, OZA – obserwowany kąt zenitalny satelity, OAA – obserwowany kąt azymutalny satelity
SZA – kąt zenitalny Słońca

Równoległe z pozyskiwaniem danych satelitarnych odbywały się comiesięczne naziemne kampanie pomiarowe⁵, w ramach których dokonywano pomiarów m.in. widzialności krążka Secchiego⁶, temperatury wody, jak również pobierano próby wody do analiz laboratoryjnych⁷, m.in. stężenie chlorofilu-a i feofityny, stężenie zawiesiny, stężenie fosforu całkowitego, stężenie azotu ogólnego. Poboru prób dokonywano w polskiej części Zalewu Wiślanego, co najmniej w 20 punktach⁸ (Rys. 1), z których 5 punktów zawsze znajdowało się w tych samych miejscach, a pozostałe zlokalizowane były w zależności od stanu wód w chwili wykonywania pomiarów. Współrzędne punktów poboru każdorazowo były wyznaczane za pomocą odbiornika GPS. Przykładowo, zmienność zawartości chlorofilu-a w wodach Zalewu Wiślanego w sezonie wegetacyjnym waha się od kilku do nawet 150 µg/l, natomiast w przypadku konkretnego terminu pomiarowego rozpiętość wartości stężeń chlorofilu-a waha się od ok. 20 do 50–60 µg/l. Jak pokazało 6 lat prowadzonych badań, zsynchronizowanie rejestracji danych satelitarnych oraz pomiarów naziemnych jest niezwykle trudne. Dlatego też w projekcie VISLA najpierw zostały zaplanowane comiesięczne kampanie pomiarowe a w zależności od panujących warunków pogodowych programowano rejestrację danych satelitarnych CHRIS/PROBA. Kierowano się tu również wynikami, jakie otrzymali Kloiber i in. (2002), które wykazały, że wykorzystując dane satelitarne zarejestrowane do 7 dni przed lub po kampanii naziemnej nie popełnimy dużego błędu przy oszacowaniu wskaźników jakości wód powierzchniowych. Oczywiście stwierdzenie to jest prawdziwe jedynie w przypadku występowania dość stabilnych warunków pogodowych. Tego rodzaju podejście znacznie obniża koszty prowadzenia badań i nie wymaga dokładnej synchronizacji kampanii naziemnej z rejestracją zdjęć satelitarnych.

3.2. Przetwarzanie danych satelitarnych

Do przeprowadzenia dalszych etapów prac badawczych wykorzystano jedynie sceny satelitarne o najmniejszym stopniu zachmurzenia. Były to dane zarejestrowane w dniach: 8 i 9 czerwca 2007 r., 22 lipca 2008 r., 18 sierpnia 2008 r., 21 kwietnia 2009 r. oraz 4 czerwca 2009 r. Kolejne kroki przetwarzania cyfrowego miały na celu uzyskanie odbicia spektralnego, wynikającego z rzeczywistego odbicia promieniowania przez obiekt, na podstawie pomierzonej przez skaner tzw. spektralnej radiancji energetycznej na poziomie satelity i zostały wykonane zgodnie z wypracowaną metodyką (Osińska-Skotak, 2010). Najpierw dla każdego rozważanego obrazu satelitarnego wykonana została korekcja radiometryczna usuwająca błędne piksele i linie oraz ograniczająca szum instrumentalny. Szum został usunięty przy zastosowaniu algorytmu opracowanego przez Jeff'a Settle'a (Garcia, Moreno, 2004). Niestety algorytm ten nie zawsze daje zadowalające rezultaty. Wynika to

⁵ Kalendarium naziemnych kampanii pomiarowych znajduje się na stronie internetowej projektu VISLA: http://visla.uwm.edu.pl/menu_dir/6_kronika_projektu/kronika.htm#Kampanie%20pomiarowe%20w%20ramach%20projektu%20%C2%A0VISLA

⁶ Widzialność krążka Secchiego określa głębokość w metrach, przy której biały krążek Secchiego – o średnicy 30 cm – przestaje być widoczny. Jest to najczęściej stosowana metoda oceny przezroczystości wód powierzchniowych

⁷ Zastosowane metody i instrumenty pomiarowe są wymienione na stronie internetowej projektu VISLA: http://visla.uwm.edu.pl/menu_dir/4_gis/4_1_dane_eco/ECO_DATA.html

⁸ Położenie wszystkich punktów poboru prób wody można zobaczyć na stronie internetowej projektu VISLA: <http://www.visla.uwm.edu.pl/VISLA%20Project%20measurement/>

z faktu starzenia się detektorów skanera CHRIS, co powoduje, iż z roku na rok charakter szumu ulega pewnym zmianom. Skaner CHRIS charakteryzuje się specyficznym rodzajem szumu i jego usunięcie za pomocą standardowo stosowanych metod nie daje dobrych wyników.

Następnym krokiem było wykonanie korekcji radiometrycznej i atmosferycznej, uwzględniających geometrię rejestracji zdjęcia satelitarnego (położenie Słońca, satelity względem powierzchni Ziemi) oraz warunki atmosferyczne panujące w czasie rejestracji. Korekcję atmosferyczną wykonano przy pomocy modułu ATCOR 2/3 w wersji 6.4.2., definiując wszystkie wymagane parametry (m.in. kąt zenitalny i azymutalny Słońca, wysokość satelity, kąt zenitalny i azymutalny satelity, odchylenie od nadiru, wysokość terenu n.p.m., współczynniki kalibracji skanera CHRIS) zgodnie z danymi zawartymi w metainformacji, dołączonej do poszczególnych scen satelitarnych. Korekcja radiometryczna i atmosferyczna stanowią kluczowy etap przetwarzania wstępnego zdjęć satelitarnych podczas prowadzenia analiz ilościowych, stąd wymagają wyjątkowej staranności przy ich wykonywaniu.

W wyniku przeprowadzenia kolejnych etapów korekcji radiometrycznej oraz atmosferycznej została uzyskana wartość odbicia spektralnego nie obciążonego wpływem warunków atmosferycznych i geometrycznych, występujących w chwili rejestracji. Wartości odbicia spektralnego w kanałach spektralnych posłużyły następnie do analizy zależności między pomiarami satelitarnymi a wskaźnikami jakości wód powierzchniowych. Aby tego rodzaju analiza była możliwa do przeprowadzenia, konieczne było nadanie układu współrzędnych wszystkim analizowanym scenom satelitarnym. Jednak ze względu na fakt, iż próbkowanie obrazu (z ang. resampling), towarzyszące transformacji geometrycznej, zmienia wartości pikseli, wykorzystano opcję *Image registration*, znajdującą się w systemie ERDAS Imagine, która pozwala na nadanie żądanego układu współrzędnych bez ponownego próbkowania obrazu. Polega to na określeniu parametrów transformacji geometrycznej i obliczeniu współrzędnych geodezyjnych dla każdego piksela obrazu. Najbardziej pracochłonnym etapem prac jest poszukiwanie zależności pomiędzy danymi satelitarnymi a pomierzonymi w terenie wskaźnikami jakości wód. Do tego celu zastosowano przede wszystkim analizę regresji, poprzedzoną analizą właściwości spektralnych poszczególnych składników wody.

W świetle analizy literatury światowej (Giardino i in., 2001; Harma i in., 2001; Kallio i in., 2001; Osińska-Skotak, 2010) można stwierdzić, że do oszacowania przeźroczystości wód najczęściej stosowanymi zakresami spektralnymi są: zakres niebieski o długości fali ok. 490 nm, zielone o długości fali około 520 nm, czerwone o długości fali około 670, 700 i 750 nm. W przypadku zawartości zawiesiny ogółem do obliczenia jej rozkładu wykorzystuje się również zakresy promieniowania widzialnego, głównie zielonego i czerwonego. Wynika to z faktu rozpraszania i absorpcji tych zakresów promieniowania przez cząsteczki zawieszone w wodzie. Analizując charakterystyki spektralne wody o różnej zawartości cząstek nieorganicznych zauważa się duży wzrost współczynników odbicia spektralnego dla fal o długości 500–700 nm wraz ze wzrostem zawartości zawiesin w wodzie.

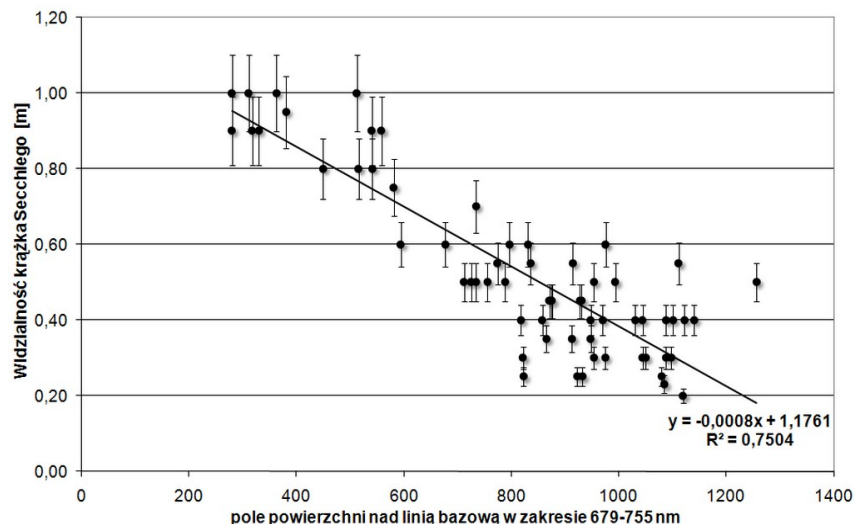
Do oszacowania zawartości chlorofilu-a w wodzie najczęściej są wykorzystywane zakresy promieniowania, które są związane z maksimum bądź minimum pochłaniania przez chlorofil-a. Są to zakresy spektralne o długości fali ok. 670–680 nm oraz 706 nm, a także 490 nm i 750 nm (Giardino i in., 2001; Harma i in., 2001; Kallio i in., 2001; Mannheim i in., 2004; Thiemann, Kaufmann, 2002; Osińska-Skotak, 2010). W przypadku szacowania zawartości chlorofilu-a na podstawie danych satelitarnych bardzo często jest stosowany wskaźnik $\rho_{706\text{ nm}} / \rho_{675\text{ nm}}$.

Zakresy spektralne najbardziej korzystne do oszacowania poszczególnych parametrów jakości wód powierzchniowych określono dzięki: 1. analizie przebiegu charakterystyk spektralnych wód w punktach poboru prób wody (z okna 3×3 piksele), 2. analizie korelacji pomiędzy wartością odbicia spektralnego a wybranymi parametrami jakości wód oraz 3. analizie korelacji między wskaźnikami, obliczonymi na podstawie danych satelitarnych, a parametrami jakości wód określono. Dalsze etapy objęły analizy regresji wielorakiej, które pozwoliły na uzyskanie zależności empirycznych (w postaci funkcji liniowej lub eksponencjalnej), umożliwiających obliczenie rozkładów przestrzennych poszczególnych parametrów charakteryzujących jakości wód.

4. OMÓWIENIE WYNIKÓW

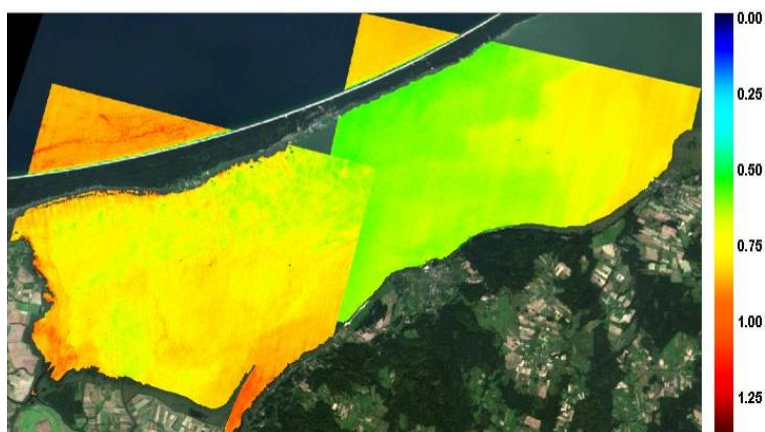
Przezroczystość wód w Zalewie Wiślanym, mierzona krążkiem Secchiego, generalnie wahała się w granicach $0.25 \div 0.5$ m w terminach letnich oraz $0.7 \div 1.0$ m późną wiosną (Osińska-Skotak, 2010). Z powodu małego zróżnicowania przezroczystości wód w Zalewie Wiślanym (ok. 0.25 m w konkretnym terminie) oraz występowania śladowych szumów na obrazie satelitarnym CHRIS zależności uzyskane dla pojedynczego terminu wykazują bardzo niskie współczynniki determinacji. Analiza regresji wykonana łącznie dla wszystkich terminów również charakteryzuje się niższymi wartościami współczynników determinacji niż miało to miejsce w przypadku analogicznych analiz dla obszaru testowego „Mazury” (wyniki prac badawczych dla tego obszaru opublikowano m.in. w Osińska-Skotak, 2009).

W przypadku wykorzystania do obliczenia rozkładu przezroczystości wody pola powierzchni pod krzywą spektralną w zakresie fal o długości $679 \div 755$ nm, współczynnik determinacji dla uzyskanej formuły obliczeniowej wyniósł 0.75 (Rys. 2). Rozkłady przestrzenne uzyskane przy zastosowaniu tej zależności przedstawia rysunek 6.



Rys. 2. Zależność przezroczystości wody, mierzonej za pomocą krążka Secchiego [m] oraz pola powierzchni pod krzywą spektralną w zakresie fal o długości $679 \div 755$ nm obliczonego na podstawie danych CHRIS/ PROBA zarejestrowanych dla obszaru badawczego „Zalew Wiślany”

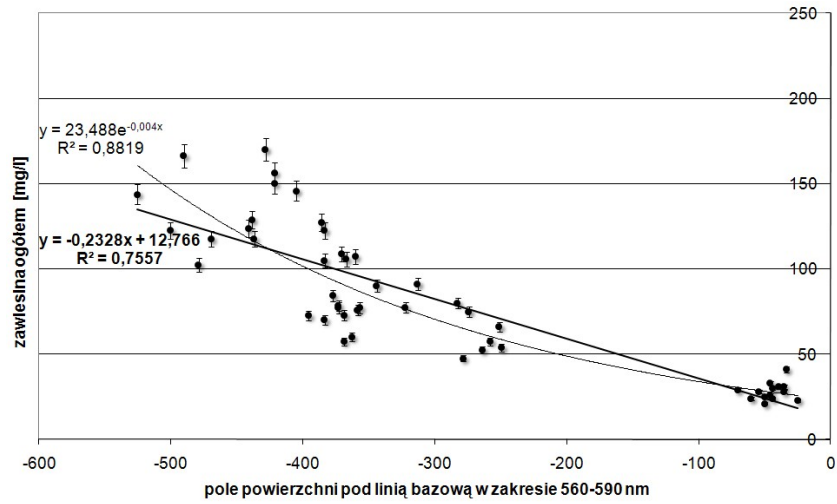
Formułę tę wykorzystano do obliczenia rozkładu przestrzennego przezroczystości wód (widzialności krążka Secchiego) w Zalewie Wiślanym w dniach 8 i 9 czerwca 2007 r. (Rys. 3). Obraz przedstawiający zachodnią część Zalewu Wiślanego został pozyskany 9 czerwca 2007 r. Widać wyraźnie różnice na styku obu obrazów, co wynika głównie ze zmiany warunków pogodowych. W dniu 9 czerwca na obszarze Zalewu Wiślanego zaobserwowano silny wiatr, co spowodowało sfalowanie powierzchni wody. Przezroczystość wód mierzona krążkiem Secchiego wynosiła od 0.45 do 1.10 m. Różnice pomiędzy obliczonymi wartościami przezroczystości wody a wartościami pomierzonymi w terenie wynoszą od -0.2 do +0.2 m.



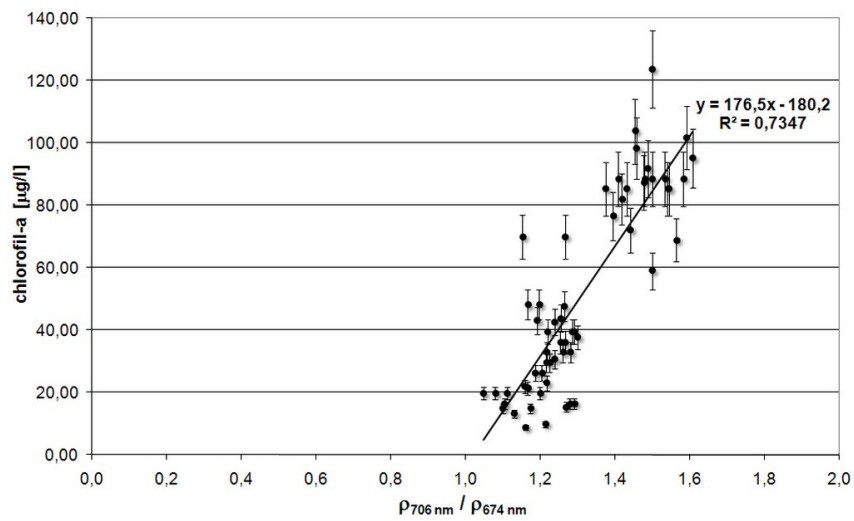
Rys. 3. Widzialność krążka Secchiego [m] obliczona na podstawie obrazów satelitarnych CHRIS/PROBA zarejestrowanych 8 oraz 9 czerwca 2007 r. przy wykorzystaniu formuły uzyskanej na podstawie danych z 8 czerwca 2007 r.

W przypadku zawartości zawiesin ogółem najwyższy współczynnik determinacji (0.76 dla zależności liniowej i 0.88 dla zależności wykładniczej) uzyskano przy wykorzystaniu pola powierzchni obliczonego nad krzywą spektralną w zakresie promieniowania zielonego o długości fal 560 i 590 nm (Rys. 4). Podobnie jak w przypadku przezroczystości wód, analiza wykonana dla pojedynczych terminów wykazała słabe zależności ($R^2=0.05\div 0.47$). Zmienność zawiesiny ogółem w wodach Zalewu Wiślanego jest bardzo duża, od 20 mg/l na początku czerwca do 125 mg/l w lipcu i sierpniu.

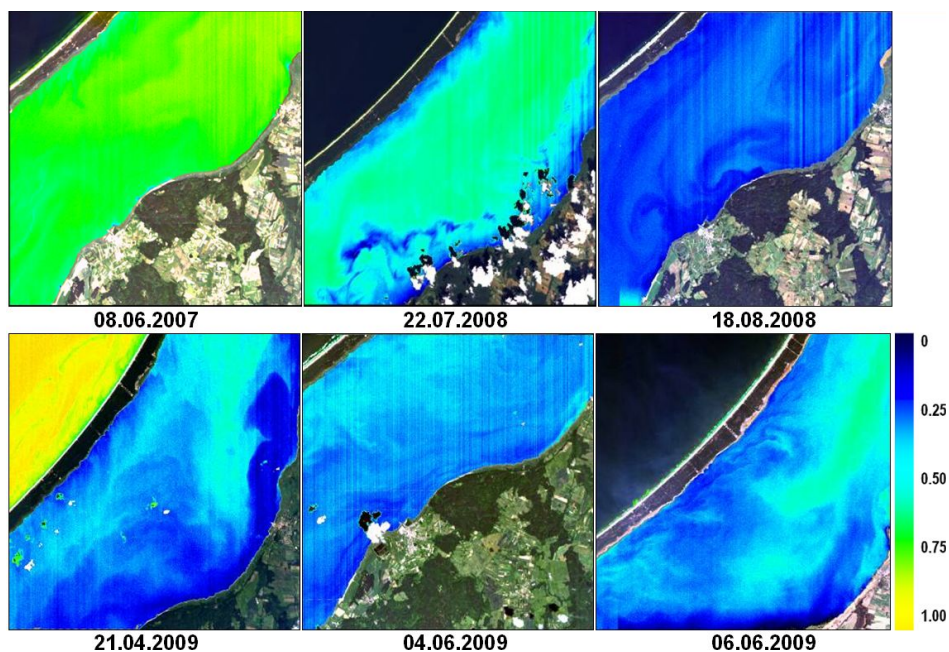
Analizy przeprowadzone dla zawartości chlorofilu-a wskazały zakres fal o długości 680÷755 nm jako najlepszy do obliczenia jego rozkładu przestrzennego z wykorzystaniem danych CHRIS/PROBA. Wskaźnik w postaci $\rho_{706\text{ nm}} / \rho_{674\text{ nm}}$ jest silnie ($r = 0.89$) skorelowany z wartościami zawartości chlorofilu-a oznaczonej metodami analitycznymi. Współczynnik determinacji dla zależności liniowej wykorzystującej wskaźnik $\rho_{706\text{ nm}} / \rho_{674\text{ nm}}$ wyniósł 0.73 (Rys. 5), zaś dla zależności wykładniczej 0.65. Rozkłady przestrzenne chlorofilu-a obliczone przy zastosowaniu zależności liniowej przedstawiono na rysunku 7. Wykorzystanie tego wskaźnika do obliczenia chlorofilu-a na podstawie danych CHRIS/PROBA dla każdego terminu indywidualnie niestety dało w większości przypadków zależności empiryczne o niskich wartościach współczynnika determinacji. Jedynie w odniesieniu do danych zarejestrowanych 8 czerwca 2007 r. uzyskana formuła obliczeniowa charakteryzowała się współczynnikiem R^2 wynoszącym 0.63.



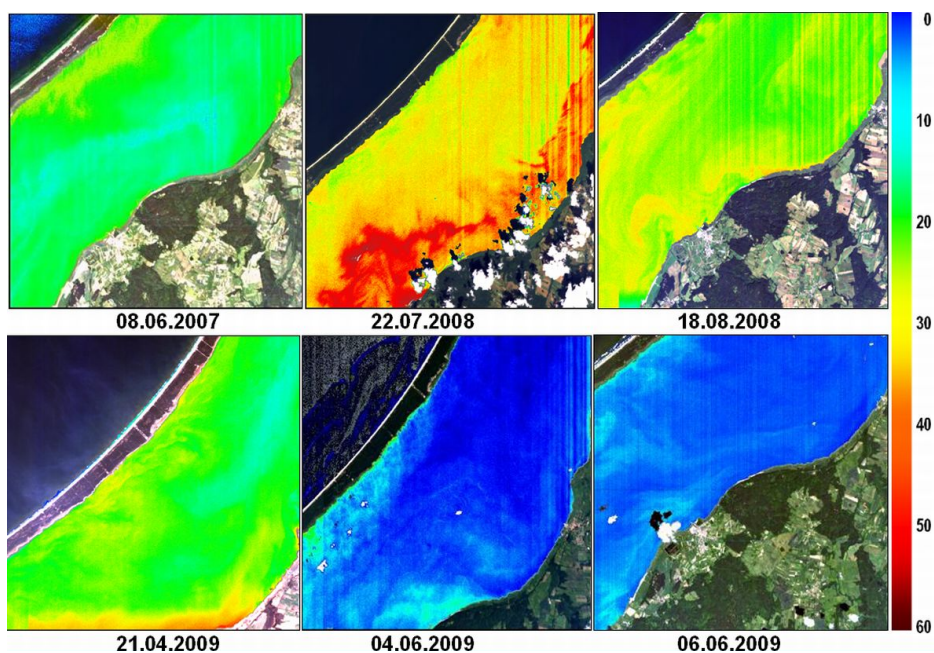
Rys. 4. Zależność zawartości zawiesin ogółem [mg/l] oraz pola powierzchni nad krzywą spektralną w zakresie fal o długości 560÷590 nm obliczonego na podstawie danych CHRIS/ PROBA zarejestrowanych dla obszaru badawczego „Zalew Wiślany”



Rys. 5. Zależność zawartości chlorofilu-a [µg/l] oraz wskaźnika $\rho_{706 \text{ nm}} / \rho_{674 \text{ nm}}$ obliczonego na podstawie danych CHRIS/ PROBA zarejestrowanych dla obszaru badawczego „Zalew Wiślany”



Rys. 6. Rozkład przestrzenny przezroczystości wód [m] obliczony na podstawie danych satelitarnych CHRIS/PROBA dla obszaru badawczego „Zalew Wiślany”



Rys. 7. Rozkład przestrzenny zawartości chlorofilu-a [$\mu\text{g/l}$] obliczony na podstawie danych satelitarnych CHRIS/PROBA dla obszaru badawczego „Zalew Wiślany”

5. PODSUMOWANIE

Uzyskane wyniki wskazują na możliwość zastosowania danych superspektralnych CHRIS do operacyjnego monitorowania stanu jakości wód. W przypadku wszystkich rozważanych parametrów jakości wody analiza regresji wielorakiej przeprowadzona łącznie dla wszystkich terminów dała wysokie współczynniki determinacji. Współczynnik determinacji dla formuły obliczeniowej uzyskanej w przypadku oszacowania przezroczystości wód wyniósł 0.75, dla zawartości zawiesin ogółem 0.88, a dla zawartości chlorofilu-a 0.73. Największym problemem podczas przetwarzania superspektralnych danych satelitarnych CHRIS/PROBA jest korekcja szumów instrumentalnych. Starzenie się detektorów powoduje, iż zmianie ulega charakter szumu i wypracowane dotąd algorytmy nie zawsze dają dobre efekty. O wadze tego problemu mogą chociażby świadczyć liczne wystąpienia na konferencjach poświęconych satelicie PROBA (2nd CHRIS/PROBA Workshop, 28-30 April 2004; 3th CHRIS/PROBA Workshop, 21-23 March 2005, 4th CHRIS/PROBA Workshop, 19-21 September 2006). Mimo to próba operacyjnego zastosowania wypracowanych formuł obliczeniowych w odniesieniu do danych zarejestrowanych w roku 2009 dla obszaru Zalewu Wiślanego dała wysoką zgodność w porównaniu z wynikami naziemnej kampanii pomiarowej. Operacyjne wykorzystanie danych satelitarnych powinno dać możliwość szybkiego uzyskania rozkładów przestrzennych wybranych wskaźników jakości wód, należy więc dążyć do zautomatyzowania procesu przetwarzania danych satelitarnych, tak jak to ma miejsce w przypadku monitorowania wód morskich i oceanicznych.

6. LITERATURA

- Flink P., Lindell T., Ostlund C., 2001. Statistical analysis of hyperspectral data from two Swedish lakes. *The Science of the Total Environment*, vol. 268, 155–169.
- Frauendorf J., 2002. Entwicklung und Anwendung von Fernerkundungsmethoden zur Ableitung von Wasserqualitätsparametern verschiedener Restseen des Braunkohlentagebaus in Mitteldeutschland, rozprawa doktorska. Mathematisch-Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 261 stron.
- Garcia J.C., Moreno J., 2004. Removal of noises in CHRIS/PROBA images: application to the SPARC Campaign data. Proc. of the 2nd CHRIS/PROBA Workshop, 28-30 April 2004, ESA/ESRIN, Frascati, Italy, ESA SP-578, July 2004.
- Giardino C., Pepe M., Brivio P.A., Ghezzi P., Zilioli E., 2001. Detecting chlorophyll, Secchi disk depth and surface temperature in a sub-alpine lake using Landsat imagery. *The Science of the Total Environment*, vol. 268, 19–29.
- Harma P., Vepsalainen J., Hannonen T., Pyhalahti 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*, vol. 268, 107–121.
- Kallio K., Kutser T., Hannonen T., Koponen S., Pulliainen J., Vepsalainen J., Pyhalahti T., 2001. Retrieval of water quality from airborne imaging spectrometry of various lake types in different seasons. *The Science of the Total Environment*, vol. 268, 59–77.
- Kloiber S.M., Brezonik P.L., Olmanson L.G., Bauer M.E., 2002. A procedure for regional lake water clarity assessment using Landsat multispectral data. *Remote Sensing of Environment*, vol. 82, 38–47.
- Mannheim S., Segl K., Heim B., Kaufmann H., 2004. Monitoring of lake water quality using hyperspectral CHRIS-PROBA data. Proc. of the 2nd CHRIS/PROBA Workshop, 28-30 April 2004, ESA/ESRIN, Frascati, Italy (ESA SP-578, July 2004).

Osińska-Skotak K., Kruk M., Mróz M., Ciołkowska M., 2005. CHRIS/PROBA superspectral data for inland water quality studies. W: *Imaging spectroscopy – new quality in environmental studies*, Warsaw, 357–366.

Osińska-Skotak K., 2009. Możliwości teledetekcyjnego monitorowania zawartości chlorofilu-a w wodach śródlądowych”, *Teledetekcja Środowiska*, nr 42, 59–68.

Osińska-Skotak K., 2010. Metodyka wykorzystania super- i hiperspektralnych danych satelitarnych w analizie jakości wód śródlądowych. Rozprawa habilitacyjna. *Zeszyty Naukowe Politechniki Warszawskiej*, seria Geodezja i Kartografia, z. 47.

Soszka H., 2002. Ocena i klasyfikacja wód powierzchniowych – ewolucja podejścia do zagadnienia. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych*, nr 23/24.

Thiemann S., Kaufmann H., 2002. Lake water quality monitoring using hyperspectral airborne data – a semiempirical multisensor and multitemporal approach for the Mecklenburg Lake District, Germany. *Remote Sensing of Environment*, vol. 81, s. 228– 237.

Vos R.J., Hakvoort J.H.M., Jordans R.W.J., Ibelings B.W., 2003. Multiplatform optical monitoring of eutrophication in temporally and spatially variable lakes. *The Science of the Total Environment*, vol. 312, 221–243.

WATER QUALITY MONITORING OF VISTULA LAGOON USING REMOTE SENSING

KEY WORDS: superspectral images, CHRIS/PROBA, water quality, Vistula Lagoon

SUMMARY: The investigation possibilities of usage remote sensing techniques for water quality monitoring of Vistula Lagoon have been made since 2006. All research studies, presented in the article, have been done under three international projects: SWANLAKE (ESA Project Category-1 LBR), MONTRANSAT (INTERREG project co-financed from European Regional Development Fund within the framework Neighbourhood Programme Lithuania, Poland and Kaliningrad Region of Russian Federation) and VISLA (project co-financed within the frame Norway Grants). All presented in article analysis based on the six cloudless superspectral satellite images of CHRIS/PROBA (in “Water” mode, 18 spectral bands) acquired in 2007–2009. CHRIS/ PROBA images were processed according to successive steps: radiometric correction, atmospheric correction, geometric registration, water quality parameters extraction. CHRIS/PROBA satellite data was made using ATCOR 2/3 model – version 6.4.2. Water quality parameters were extracted using empirical and statistical relationships between CHRIS measured spectral reflectance and in situ measurements (regression based): Secchi disc depth ($R^2=0.75$), suspended solids ($R^2=0.88$), chlorophyll-a ($R^2=0.73$). Results presented in article for Vistula Lagoon test site, shows the real possibilities of CHRIS satellite data usage for near real time determination of various water quality parameters like water transparency, total suspended solids, chlorophyll-a concentration.

dr inż. Katarzyna Osińska-Skotak
e-mail: kos@gik.pw.edu.pl
telefon: 22 234 73 58
fax: 22 234 53 89