

OCENA MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA TELEDETEKCYJNYCH METOD POMIARU EUTROFIZACJI ŚRÓDLĄDOWYCH ZBIORNIKÓW WODNYCH

Łukasz Pierzchała¹

¹ Główny Instytut Górnictwa, Zakład Ochrony Wód, Plac Gwarków 1, 40-166 Katowice

e-mail: lpierzchala@gig.eu

STRESZCZENIE

Rozwój satelitarnych technologii obserwacji powierzchni ziemi stwarza możliwości wdrożenia nowoczesnych narzędzi monitoringu jakości wód powierzchniowych. W niniejszym artykule zaprezentowano wyniki badań, których celem było opracowanie zautomatyzowanej metody pomiaru eutrofizacji wód śródlądowych. Przeanalizowano zalety i ograniczenia przedmiotowej technologii oraz oceniono potencjalne możliwości jej wykorzystania. Podstawowym wskaźnikiem stanu troficznego wód powierzchniowych jest koncentracja chlorofilu-a w wodzie. W ramach przeprowadzonych badań uzyskano silny związek pomiędzy wartościami koncentracji chlorofilu-a określonych na podstawie standardowych metod pomiarowych, a wartościami tego parametru obliczonymi na podstawie satelitarnych danych spektralnych. Przedstawiono także funkcjonalności opracowanego oprogramowania pozwalającego na automatyczny pomiar eutrofizacji wód śródlądowych za pomocą teledetekcji. Pomimo szeregu ograniczeń technologii, wykazano wysoki potencjał aplikacyjny przedmiotowego rozwiązania.

Słowa kluczowe: eutrofizacja, chlorofil a, teledetekcja, monitoring jakości wód

ASSESSMENT OF THE POSSIBILITY OF USING REMOTE SENSING METHODS FOR MEASURING EUTROPHICATION OF INLAND WATER RESERVOIRS

ABSTRACT

The development of satellite technologies for observing the earth's surface creates the possibility of implementing modern tools for surface waters quality monitoring. This article presents the results of the research aimed at developing an automated method for assessment of the eutrophication of inland waters. The advantages and limitations of the technology were analyzed and the potential possibilities of its application were described. The basic indicator of the trophic state of surface waters is the concentration of chlorophyll-a in the water. As result of the research, a strong relationship was obtained between the chlorophyll-a concentration values determined on the basis of standard measurement methods, and the chlorophyll-a values calculated on the basis of satellite spectral data. The functionalities of the developed software for automated measuring eutrophication of inland water using remote sensing were also presented. Despite a number of limitations of the technology, high application potential of the solution has been demonstrated.

Keywords: eutrophication, chlorophyll-a, remote sensing, water quality monitoring

WSTĘP

Eutrofizacja jest jednym z największych zagrożeń dla jakości wód śródlądowych (Siuda et al. 2020). Pod pojęciem eutrofizacji rozumie się wzbogacanie wody biogenami, w szczególności związkami azotu lub fosforu, powodującymi przyspieszony wzrost glonów oraz wyższych

form życia roślinnego, w wyniku którego następują niepożądane zakłócenia biologicznych stosunków w środowisku wodnym oraz pogorszenie walorów użytkowych tych wód. Koncentracja chlorofilu-a (chl-a) jest jednym z kluczowych parametrów wskazującym na poziom troficzny wód. Chl-a określa biomasę fitoplanktonu, którego wysoka koncentracja świadczy o zaburzeniu

stanu równowagi w ekosystemie wodnym, będące efektem procesu nadmiernego z bogacenia wód w związki biogenne (Harding and Perry 1997). Wody powierzchniowe charakteryzujące się wysoką biomasą glonów skutkują niskim potencjałem gospodarczym, rekreacyjnym oraz obniżoną bioróżnorodnością.

Ocena koncentracji biomasy fitoplanktonu metodami tradycyjnymi dostarcza precyzyjnych informacji o stanie troficznym wód, wymaga jednak bezpośredniego poboru prób w terenie oraz przeprowadzenia kosztownych i czasochłonnych metod analitycznych. Tego typu metody pomiaru stosowane są w ramach państwowego monitoringu środowiska. Ze względu na wysokie koszty monitoring stanu wód ma ograniczony zasięg. W Polsce jest ok. 7000 jezior o powierzchni powyżej 1 ha przy czym monitoring jakości wody prowadzony jest na 1044 jeziorach o powierzchni ponad 50 ha. Programem monitoringu objęte są także sztuczne i silnie zmienione jednolite części wód powierzchniowych, o powierzchni przekraczającej 50 ha, a także zbiorniki zaporowe wyznaczone jako silnie zmienione jednolite części wód powierzchniowych, których objętość przekracza 10 mln m³ (PPMŚ, 2015). Pozostałe śródlądowe zbiorniki wodne nie są aktualnie objęte programem monitoringu jakości wód.

Ograniczona ilość danych w zakresie trofii wód utrudnia identyfikację kluczowych źródeł presji na ekosystemy wodne oraz ogranicza możliwości oceny podjętych działań, których celem jest poprawa stanu ekologicznego wód powierzchniowych. W szczególności dotyczy to zbiorników nie objętych programem państwowego monitoringu środowiska.

Rozwój technologii satelitarnych stwarza coraz większe możliwości zdalnej oceny jakości wód powierzchniowych. Technologia teledetekcji jest z powodzeniem wykorzystywana do monitoringu wód morskich i oceanicznych. W przypadku wód śródlądowych większą złożoność biologiczną i optyczną, w znacznym stopniu utrudnia aplikację metod teledetekcyjnych (Osińska-Skotak, 2010). W ramach niniejszej pracy na podstawie rezultatów projektu pn: „Zautomatyzowana metoda pomiaru eutrofizacji wód śródlądowych za pomocą teledetekcji” (Automated Method for Measuring Eutrophication of Inland Water Using Remote Sensing – AMMER) przeanalizowano możliwości zastosowania satelitarnych zdjęć spektralnych do oceny jakości wód śródlądowych.

MATERIAŁY I METODY

Projekt AMMER finansowany przez Europejską Agencję Kosmiczną (European Space Agency - ESA) był realizowany od stycznia 2018 roku do marca 2019 roku przez konsorcjum: firma Future Processing Sp. z o.o., Główny Instytut Górnictwa w Katowicach oraz Stowarzyszenie Naukowe im. Stanisława Staszica, zrzeszające pracowników Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie.

W pierwszym etapie projektu pozyskano dane w zakresie parametrów fizykochemicznych zbiorników zaporowych z województwa śląskiego i małopolskiego. Następnie oceniono punkty monitoringowe w obrębie tych zbiorników pod kątem przydatności do prowadzenia pomiarów spektralnych. Do badań wytypowano punkty monitoringowe, gdzie nie zidentyfikowano występowania roślinności naczyniowej. W celu ograniczenia wpływu dna na właściwości spektralne powierzchni wody przyjęto, że głębokość w punkcie monitoringowym musi wynosić co najmniej 3 m. Na podstawie tych kryteriów wytypowano 10 punktów monitoringowych. Klasyfikacje stanu troficznego na podstawie koncentracji chl-a wytypowanych zbiorników przeprowadzono za Dojlido, 1995. W grupie zbiorników znalazły się zarówno ekosystemy wodne o stosunkowo niskim (zbiornik Czchów, Dobczyce), przeciętnym (Rożnów, Dzierżno Małe), jak i bardzo wysokim poziomie trofii (Dzierżno Duże, Goczałkowice, Kozłowa Góra, Łąka) W ramach tego etapu prac zidentyfikowano także substancje, których podwyższona koncentracja w zbiorniku może zakłócać spektralny pomiar chlorofilu a (Tabela 1) (Gitelson et al. 1993).

W kolejnym etapie prac przeprowadzono porównanie źródeł danych satelitarnych pod kątem ich przydatności do monitoringu śródlądowych wód powierzchniowych. W rezultacie tych prac wytypowano Sentinelę 2 jako docelowe źródło danych teledetekcyjnych. Zdjęcia spektralne tego satelity charakteryzują się wystarczającą rozdzielczością przestrzenną i czasową, a zakresy kanałów spektralnych umożliwiają identyfikację właściwości chlorofilu a, w zakresie pochłaniania i odbicia promieniowania słonecznego (Brezonik et al. 2015).

Następnym etapem prac było dopasowanie czasowe danych z państwowego monitoringu środowiskowego z archiwalnymi zdjęciami spektralnymi Sentinelę 2. Ze względu na stosunkowo szybkie zmiany koncentracji chl-a w wodach

Tabela 1. Charakterystyka wytypowanych punktów monitoringowych

Nazwa punktu monitoringowego	Czchów – powyżej zapory			Rożnów – powyżej zapory			Zbiornik Dobczyce – w pobliżu ujęcia		
	Śr.	Min.	Max.	Śr.	Min.	Max.	Śr.	Min.	Max.
Czasowy zasięg danych	–	2004.01.12	2009.10.22	–	1999.04.06	2012.09.26	–	2004.01.12	2009.10.22
Chlorofil a (µg/l)	3,58	0,80	15,00	10,32	0,90	31,00	4,35	0,00	17,90
Temperatura (ToC)	14,53	7,80	22,50	16,65	7,50	25,80	13,66	0,00	26,00
Przejrzystość SD (m)	2,13	1,00	3,00	2,38	1,50	4,00	–	0,00	0,00
Zawiesina (mg/l)	9,64	2,50	30,00	8,07	2,50	37,00	6,51	1,00	44,00
Tlen rozpuszczony (mg O ₂ /l)	9,47	6,60	12,40	11,07	5,10	15,80	10,58	7,00	13,80
Węgiel organiczny (mg C/l)	2,43	1,30	3,90	2,81	1,20	5,00	2,74	-1,00	4,53
Azot ogólny (mg N/l)	1,60	1,06	2,35	1,47	0,81	2,50	2,01	1,20	3,47
Fosfor ogólny (mg P/l)	0,04	0,02	0,31	0,04	0,01	0,11	0,02	0,01	0,07
Krzemionka (mg SiO ₂ /l)	–	–	–	3,34	1,21	4,94	0,00	0,00	0,00
Stan troficzny	Mezotrofia			Eutrofia			Mezotrofia		
Obecność substancji których obecność może zakłócać teledetekcyjny pomiar chlorofilu a									
Substancje nieorganiczne	+			+			+		
Substancje organiczne	–			–			–		
Nazwa punktu monitoringowego	Dzierżno Duże – środek zbiornika			Dzierżno Małe – powyżej zapory			Goczałkowice – powyżej zapory		
	Śr.	Min.	Max.	Śr.	Min.	Max.	Śr.	Min.	Max.
Czasowy zasięg danych	–	2000.07.05	2017.07.04	–	1999.06.22	2017.07.04	–	1999.10.14	2017.07.27
Chlorofil a (µg/l)	26,85	1,20	77,00	19,11	2,20	37,00	30,85	2,50	97,00
Temperatura (ToC)	18,78	14,40	22,10	15,20	6,10	22,60	16,14	0,90	24,80
Przejrzystość SD (m)	–	–	–	1,80	1,80	1,80	1,21	0,60	2,60
Zawiesina (mg/l)	–	–	–	–	–	–	11,31	4,00	22,00
Tlen rozpuszczony (mg O ₂ /l)	9,33	9,00	10,00	11,87	9,70	12,60	9,91	7,40	13,40
Węgiel organiczny (mg C/l)	6,60	6,20	6,80	5,67	4,80	6,50	5,12	3,20	8,40
Azot ogólny (mg N/l)	5,27	4,60	5,60	6,01	3,70	7,50	1,40	0,81	2,50
Fosfor ogólny (mg P/l)	0,24	0,20	0,31	0,05	0,03	0,07	0,06	0,03	0,15
Krzemionka (mg SiO ₂ /l)	5,59	1,70	8,50	122,56	7,10	315,00	–	–	–
Stan troficzny	Hipertrofia			Eutrofia			Hipertrofia		
Obecność substancji których obecność może zakłócać teledetekcyjny pomiar chlorofilu a									
Substancje nieorganiczne	+			+			–		
Substancje organiczne	+			–			+		
Nazwa punktu monitoringowego	Kozłowa Góra – powyżej zapory			Łąka – powyżej zapory					
	Śr.	Min.	Max.	Śr.	Min.	Max.			
Czasowy zasięg danych	–	2000.05.18	2017.10.17	–	2000.10.09	2012.09.26			
Chlorofil a (µg/l)	55,56	3,10	140,30	70,08	29,00	105,00			
Temperatura (ToC)	16,17	2,20	22,70	12,33	5,40	20,40			
Przejrzystość SD (m)	0,66	0,20	1,60	0,70	0,60	0,80			
Zawiesina (mg/l)	24,45	6,00	48,00	–	–	–			
Tlen rozpuszczony (mg O ₂ /l)	10,20	6,50	15,10	10,97	9,00	13,00			
Węgiel organiczny (mg C/l)	16,20	9,30	27,00	10,88	8,30	12,00			
Azot ogólny (mg N/l)	2,23	0,50	5,18	4,50	1,32	7,70			
Fosfor ogólny (mg P/l)	0,12	0,03	0,36	0,12	0,09	0,18			
Krzemionka (mg SiO ₂ /l)	–	–	–	4,16	3,00	5,40			
Stan troficzny	Hipertrofia			Hipertrofia					
Obecność substancji których obecność może zakłócać teledetekcyjny pomiar chlorofilu a									
Substancje nieorganiczne	–			+					
Substancje organiczne	+			–					

śródlądowych przyjęto, że koincydencja czasowa pomiędzy poborem wód a terminem wykonania zdjęcia spektralnego nie może przekroczyć 2 dni. Dla otrzymania ilości danych niezbędnych do wyliczenia zależności statystycznych pomiędzy wynikami algorytmów opartych o wartości wybranych kanałów spektralnych, a oznaczonymi wartościami chlorofilu a w wodzie analizowanych zbiorników wykonano serie własnych badań terenowych i oznaczeń laboratoryjnych (Tabela 2). Pobór wód był prowadzony zgodnie z normą PN-ISO 10260, a oznaczenia koncentracji chl-a zgodnie z normą ISO 5667-4.

Na podstawie zebranych danych opracowano algorytmy oparte o wartości poszczególnych kanałów spektralnych, które w największym stopniu korelują z oznaczonymi wartościami chl-a w poszczególnych punktach monitoringowych. Dla oceny siły związku pomiędzy tymi wartościami wykorzystano modele regresji nieliniowej. Analizy zostały wykonane w programie Statistica 13. Ostatnim elementem projektu było opracowanie narzędzia informatycznego pozwalającego na automatyczną ocenę stopnia eutrofizacji wybranych zbiorników wodnych.

WYNIKI

Wartości algorytmów wykorzystanych do pomiaru wartości chl-a na podstawie zdjęć spektralnych Sentinel 2, które zostały opracowane w ramach projektu AMMER objęte są ochroną własności intelektualnych i nie mogą zostać przedstawione w niniejszym artykule. W poniższej tabeli zaprezentowano wartości współczynników determinacji dla modeli regresji opisujących związek pomiędzy wartościami chl-a w wodzie określonych na podstawie oznaczeń laboratoryjnych a wartościami chl-a obliczonymi na podstawie wartości kanałów spektralnych zdjęć satelitarnych powierzchni wody. Uzyskane wyniki wykazały silne i istotne zależności z pomiarami jakości wód prowadzonymi zgodnie z standardowymi metodami pomiarowymi. Brak istotności modelu otrzymano jedynie dla Zbiornika Poraj (Tabela 3). Wynika to prawdopodobnie z zbyt małej liczby pomiarów wykorzystanych do wyliczenia modelu regresji (Tabela 2).

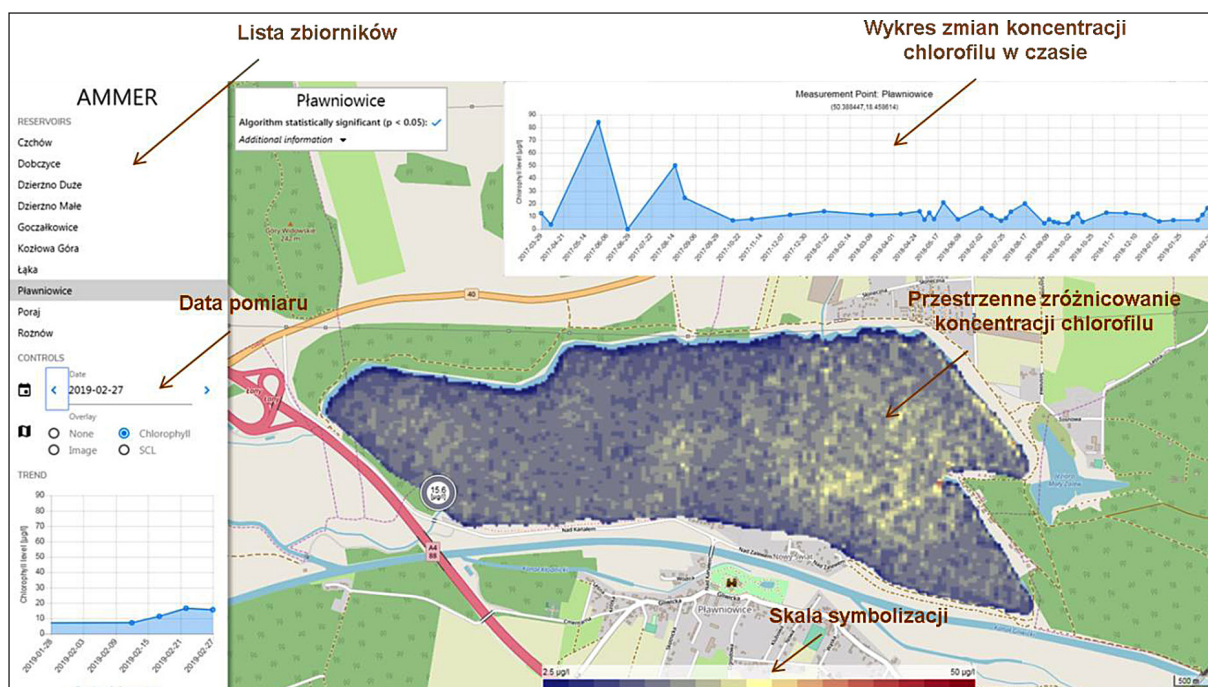
Opracowane rozwiązanie informatyczne pozwala na automatyczne pobieranie, analizę, prezentację i archiwizowanie danych w zakresie kon-

Tabela 2. Zakres danych wejściowych

Liczba dopasowań zdjęć satelitarnych do pomiarów chlorofilu a w punkcie monitoringowym (koincydencja >2 dni)	Nazwa punktu monitoringowego										Łącznie
	Rożnów – powyżej zapory	Czchów – powyżej zapory	Zbiornik Dobczyce – w rejonie ujęcia	Dzierżno Duże – środek zbiornika	Dzierżno Małe – powyżej zapory	Pławniowice – powyżej zapory	Goczałkowice – powyżej zapory	Łąka – powyżej zapory	Kozłowa Góra – powyżej zapory	Poraj – powyżej zapory	
Na podstawie dostępnych danych monitoringowych	0	0	0	4	3	3	2	2	2	1	17
W ramach badań własnych	7	5	7	4	5	5	5	4	5	5	52
Łącznie	7	5	7	8	8	8	7	6	7	6	70

Tabela 3. Wartości współczynnika determinacji oraz istotność statystyczna algorytmów pozwalających na zdalny pomiar chlorofilu a w zbiornikach wód powierzchniowych

Nazwa Zbiornika	Istotność statystyczna modelu ($p < 0.05$)	Współczynnik determinacji modelu (R^2)
Dzierżno Małe	Tak	0,81
Dzierżno Duże	Tak	0,94
Goczałkowice	Tak	0,95
Pławniowice	Tak	0,99
Rożnów	Tak	0,75
Czchów	Tak	0,96
Dobczyce	Tak	0,90
Kozłowa Góra	Tak	0,81
Poraj	Nie	0,76
Łąka	Tak	0,94



Rys. 1. Funkcjonalności oprogramowania do zdalnego pomiaru koncentracji chlorofilu-a

centracji chl-a. Narzędzie jest dedykowane dla zbiorników o powierzchni powyżej 0,5 ha. Portal prezentujący wyniki analiz dostosowano do komfortowego przeglądania na urządzeniach mobilnych, takich jak smartfon i tablet. Ekran aplikacji pozwalającej na prezentację rezultatów pomiaru koncentracji chlorofilu w zbiornikach wód powierzchniowych przedstawiono na rysunku 1.

PODSUMOWANIE

Rozwój technologii satelitarnych stwarza możliwości budowy nowoczesnych narzędzi monitoringu jakości wód powierzchniowych. Wyniki projektu AMMER wskazują, że zastosowanie teledetekcyjnych metod pozwala na ocenę stanu troficznego zbiorników śródlądowych w oparciu o pomiar chlorofilu-a, ponieważ zmiany tego parametru oddziałują na właściwości spektralnych powierzchni wody. Pomimo obecności w wodach śródlądowych innych substancji mogących powodować pochłanianie lub odbicie promieniowania słonecznego w pasmach charakterystycznych dla chlorofilu-a możliwe jest opracowanie algorytmów pozwalających na pomiar chlorofilu-a w oparciu o satelitarne zdjęcia spektralne powierzchni wody.

Rozdzielczość przestrzenna aktualnie dostępnych satelitarnych danych spektralnych daje możliwość monitorowania zbiorników o niewielkiej powierzchni (powyżej 0,5 ha). Zaletą przedmioto-

wej metody jest identyfikacja przestrzennego zróżnicowania jakości wody w zbiorniku. W przypadku zbiornika o powierzchni 1ha otrzymanie podobnego rezultatu standardowymi metodami pomiarowymi wymagałoby pobrania i laboratoryjnego oznaczenia chlorofilu w co najmniej 40 próbkach wody. Analiza przestrzennego zróżnicowania jakości wody daje możliwość określenia przyczyn pogorszenia się jakości wód w obrębie zbiornika np. poprzez wskazanie możliwych kierunków dopływu zanieczyszczeń do zbiornika. W przypadku zbiorników o funkcji rekreacyjnej pozwala to na efektywne zarządzanie ryzykiem związanym z pogorszeniem się jakości wody w obrębie kąpielisk. Dane w zakresie przestrzennego zróżnicowania biomasy fitoplanktonu są także bardzo istotną informacją w przypadku zbiorników stanowiącym rezerwuuar wody pitnej. W okresach zakwitów fitoplanktonowego niezbędna jest modyfikacja procesu uzdatniania wody. Nieodpowiednie prowadzenie procesu uzdatniania wody objętej procesem eutrofizacji może doprowadzić do przekroczenia wartości granicznych wskaźników dla wody pitnej. Może to skutkować ograniczeniem, a nawet zatrzymaniem możliwości produkcyjnych stacji uzdatniania.

Ograniczeniem dla przedmiotowej metody pomiaru jest konieczność opracowywania algorytmów dedykowanych dla danego zbiornika. Wynika to ze znacznej zmienności właściwości fizykochemicznej śródlądowych wód powierzchniowych, a w szczególności zróżnicowanej obec-

ności substancji o właściwościach spektralnych zbliżonych do chl-a (np. barwne związki organiczne) (Kneubühler 2007, Song et al. 2010, Kutser et al. 2012, Tebbs et al. 2013). Przedmiotowa technologia ma także ograniczone możliwości zastosowania na zbiornikach, w których występuje roślinność wodna. Chlorofil zawarty w roślinach naczyniowych w znaczący sposób zakłóca lub uniemożliwia pomiar chlorofilu w biomasie fitoplanktonu w wodzie. Błędy pomiarowe mogą być obserwowane także w płytkich zbiornikach o wysokiej przejrzystości wody. W takich sytuacjach właściwości substratu dennego mają znaczący wpływ na właściwości spektralne powierzchni wody i mogą powodować pochłanianie lub odbicie promieniowania w zakresach, które są wykorzystywane do identyfikacji chl-a w wodzie.

Pomiar z wykorzystaniem satelitarnych danych spektralnych jest bezpośrednio zależny od warunków atmosferycznych. Brak jest możliwości wykonania pomiaru jeżeli w chwili przelotu satelity nad zbiornikiem utrzymuje się zwarta pokrywa chmur. Rozdzielczość czasowa wytypowanego źródła danych wynosi 5 dni, a dla pasów granicznych strefy obrazowania satelity nawet 2-3 dni. Pozwala to na zebranie w ciągu roku wystarczającej ilości danych pomiarów by określić stan troficzny zbiornika.

Pomimo wskazanych ograniczeń zautomatyzowane technologie teledetekcyjne mają znaczący potencjał aplikacyjny w monitoring stanu ekologicznego zbiorników śródlądowych. Dane o stanie troficznym zbiorników wód powierzchniowych pozyskane tą metodą mogą służyć m.in. do:

- planowania i weryfikacji skuteczności działań mających na celu poprawę jakości wody w zbiorniku,
- oceny ryzyka związanego z zakwitem sinicowym w obrębie kąpielisk (zagrożenie zdrowotne dla osób mających bezpośredni kontakt z wodą),
- wsparcia w zakresie planowania i prowadzenie procesu uzdatnienia wód powierzchniowych do potrzeb komunalnych.

Potencjalnymi odbiorcami przedmiotowej technologii są właściciele zbiorników o funkcji rekreacyjnej, nadzorca kąpielisk i stacji uzdatniania wód powierzchniowych do celów komunalnych.

Podziękowania

Artykuł powstał dzięki realizacji projektu pn. „Zautomatyzowana metoda pomiaru eutrofizacji wód śródlądowych za pomocą teledetekcji”

(AMMER) wykonywanego na podstawie kontraktu ESA Contract No. 4000121810/17/I-EF.

LITERATURA

1. Dojlido J.R. 1995. Chemia wód powierzchniowych. Wydawnictwo Ekonomia i Środowisko, Białystok, 342.
2. Osińska-Skotak K. 2010. Metodyka wykorzystania super-i hiperspektralnych danych satelitarnych w analizie jakości wód śródlądowych. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Geodezja, (47), 3-153.
3. Brezonik P.L., Olmanson L.G., Finlay J.C., Bauer M.E. 2015. Factors affecting the measurement of CDOM by remote sensing of optically complex inland waters. *Remote Sensing of Environment*, 157, 199-215.
4. Gitelson A., Garbuzov G., Szilagyi F., Mittenzwey K.H., Karnieli A., Kaiser A. 1993. Quantitative remote sensing methods for real-time monitoring of inland waters quality. *International Journal of Remote Sensing*, 14(7), 1269-1295.
5. ISO 5667-4. 2016. Jakość wody – Pobieranie próbek – Część 4: Wytyczne dotyczące pobierania próbek z jezior naturalnych i sztucznych zbiorników zaporowych.
6. Harding Jr. L.W., Perry, E.S. 1997. Long-term increase of phytoplankton biomass in Chesapeake Bay, 1950-1994. *Marine Ecology Progress Series*, 157, 39-52.
7. Kneubühler M. et al. 2007. Mapping chlorophyll-a in Lake Kivu with remote sensing methods. In: *Proceedings of Envisat Symposium*.
8. Kutser T. et al. 2012. Remote sensing of water quality in optically complex lakes. In: *Proc. of the XXII Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, Melbourne, Australia.
9. Siuda W., Grabowska K., Kaliński T., Kiersztyn B., Chróst R.J. 2020. Trophic state, eutrophication, and the threats for water quality of the great Mazurian Lake System. In: *Polish River Basins and Lakes, Part I*, pp. 231-260.
10. Song, Y., Song, X.D., Jiang, H., Guo, Z.B., Guo, Q.H. 2010. Quantitative remote sensing retrieval for algae in inland waters. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 30(4), 1075-1079.
11. PN-ISO 10260, 2002. Jakość wody – Pomiar parametrów biochemicznych – Spektrometryczne oznaczanie stężenia chlorofilu a.
12. Tebbs E.J.; Remedios J.J.; Harper D.M. 2013. Remote sensing of chlorophyll-a as a measure of cyanobacterial biomass in Lake Bogoria, a hypertrophic, saline-alkaline, flamingo lake, using Landsat ETM+. *Remote Sensing of Environment*, 135, 92-106.
13. PPMŚ 2015. Program Państwowego Monitoringu Środowiska na lata 2016–2020. Główny Inspektor Ochrony Środowiska Warszawa.