

# Bałtyk z satelity



## JERZY DERA

Instytut Oceanologii  
Polska Akademia Nauk, Sopot  
dera@iopan.gda.pl

Prof. Jerzy Dera jest członkiem rzeczywistym PAN, współtwórcą i wieloletnim pracownikiem IO PAN, wykłada fizykę morza na Uniwersytecie Gdańskim, autor prac i książek z fizyki morza.



## BOGDAN WOŹNIAK

Instytut Oceanologii  
Polska Akademia Nauk, Sopot  
wozniak@iopan.gda.pl

Prof. Bogdan Woźniak jest fizykiem, kieruje Zakładem Fizyki Morza IO PAN wykłada w Akademii Pomorskiej w Słupsku, inicjator i lider satelitarnych badań morza w Polsce, kierownik Projektu SatBałtyk.

### **Rutynowe monitorowanie wód oceanów jest kosztowne i niedoskonałe. Badacze pokładają nadzieję w nowej metodzie – teledetekcji satelitarnej**

Oceany i morza podtrzymują trwanie wielorakich procesów przyrodniczych, niezbędnych do życia człowieka na naszym globie. Proces fotosyntezy w oceanach i morzach w ogromnym stopniu determinuje zawartość tlenu i dwutlenku węgla w atmosferze. Dzięki temu oceany kształtują klimat Ziemi i stabilizują efekt cieplarniany. Olbrzymi wpływ na klimat Ziemi ma także przenoszenie przez wody oceanów gigantycznych ilości ciepła i nawilżanie atmosfery. Zależnie od stanu wód danego rejonu morza oczyszczają lub zanieczyszczają atmosferę, dostarczają zdrowej lub niezdrowej żywności, dostarczają lub nie dostarczają użytecznych surowców, zapewniają bezpieczną żeglugę lub jej nie zapewniają, zachęcają rzesze turystów do korzystania z nadmorskiej rekreacji i wypoczynku i umożliwiają im to albo zniechęcają do tej rekreacji i zagrażają ludzkiemu zdrowiu.

W skali wszechoceanu uwarunkowania te wynikają głównie z geograficznego zróżnicowania dopływu energii słonecznej, oddziaływania oceanu z atmosferą i globalnych cyrkulacji

ciepłych i zimnych mas wody. Jednak i w tej wielkiej skali oddziaływanie naszej cywilizacji na środowisko, w tym zanieczyszczanie atmosfery i rzek, modyfikują w sposób niekorzystny te naturalne uwarunkowania życia człowieka i przyczyniają się do zmian globalnych, które powinniśmy monitorować i przewidywać, aby ludzkość mogła przetrwać. Dlatego zespoły ekspertów organizacji międzynarodowych, takich jak Organizacja Narodów Zjednoczonych, Międzyrządowa Komisja Oceanograficzna UNESCO czy Międzynarodowa Rada Eksploracji Morza, wzywają do ciągłego monitorowania środowiska morskiego i poprzez różne programy i konwencje międzynarodowe np. konwencję helsińską) zobowiązują do tego kraje nadmorskie.

Morze Bałtyckie jako morze półzamknięte i otoczone ze wszystkich stron krajami licznie zamieszkanymi, z dopływem wielu rzek i ścieków, rozbudowanymi portami i wielorakim przemysłem narażone jest na wyjątkowo silny wpływ antropogenicznych czynników – odpadów i nawozów z pól i łąk, szkodliwych ścieków przemysłowych, ropy, siarki, spalin i wielu in. Polska jest przy tym największym dostawcą azotu i fosforu do Bałtyku, spływającego z wodami Wisły i Odry. Kontrola skutków tych licznych zanieczyszczeń i niepożądanego nadmiernej eutrofizacji Bałtyku jest konieczna, zarówno po to, aby skuteczniej im zapobiegać, jak i po to, by racjonalnie planować i optymalnie wykorzystywać przestrzeń i zasoby morza.

### **Monitorowanie oceanu**

Monitorowanie stanu wód Bałtyku tradycyjnymi metodami z pokładów statków prowadzone jest od wielu lat – w Polsce głównie przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej. Te tradycyjne metody polegają głównie na poborze prób wody z morza i ich laboratoryjnych analizach fizycznych, chemicznych, biologicznych i innych. Część z nich zawsze będzie potrzebna. Jednak rutynowe monitorowanie w ten sposób stanu środowiska i zmian jego funkcjonowania jest niedoskonałe i kosztowne. Angażuje statki badawcze z załogami i ekipa-



www.huc.edu.pl

**Monitorowanie stanu wód Bałtyku tradycyjnymi metodami z pokładów statków prowadzone jest od wielu lat – w Polsce głównie przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej**

mi naukowymi a dostarcza tylko wyniki testów z ograniczonej liczby punktów przestrzeni tego bardzo zmiennego środowiska wodnego w ograniczonym czasie. Można natomiast przewidzieć, że widoczna z daleka (z satelity) odpowiednia zmiana koloru danego rejonu morza w dziennym świetle prezentuje określone zmiany w środowisku. Np. dana zmiana koloru świadczy o przyroście masy glonów, a ten z kolei jest wynikiem (i wskaźnikiem) zwiększonego dopływu substancji biogenicznych (związków fosforu, azotu i in.) prowadzących do eutrofizacji akwenu. Takie i inne związki pomiędzy widmem światła dziennego wychodzącego z morza na skutek rozpraszania i odbicia w toni wodnej (tj. kolorem morza) a koncentracją różnych grup substancji zawartych w wodzie morskiej, ustala się na podstawie wielu badań empirycznych i coraz powszechniej wykorzystuje do zdalnego monitorowania zawartości tych substancji w morzu. Radiometry na satelitach rejestrują natężenie i widma światła wychodzącego z morza i z pomocą ww. modelowych formuł matematycznych umożliwiają wyznaczanie koncentracji tych substancji w przypowierzchniowej warstwie morza (np. chlorofilu *a*). Formuły modelowe wiążą te koncentracje z oświetleniem (czyli dopływem energii), temperaturą powierzchni morza (które także rejestrują satelity), głębokością w morzu i in. W sumie dane satelitarne pozwalają wyznaczać różne charakterystyki środowiska wodnego (w tym wydajność kwantową fotosyntezy, szybkość produkcji materii organicznej w danym rejonie morza, a nawet obecność ryb). Odpowiednio zestawiony zbiór wielu formuł tworzy algorytm do obliczenia badanych charakterystyk środowiska morskiego na podstawie danych rejestrowanych przez satelity, tj. danych natężeń fal elektromagnetycznych różnych długości (światlnych i innych) wychodzących z morza oraz temperatury powierzchni morza na podstawie jej promieniowa-

nia podczerwonego. Aktualnie wiele satelitów rejestruje te wielkości systematycznie, m.in. z rejonu Bałtyku. Różne satelity rejestrują różne pasma fal i z różną rozdzielczością przestrzenną (tzw. piksele skanowania obejmują np. 1 km<sup>2</sup>, 4 km<sup>2</sup> i więcej). Dane satelitarne i odpowiednie algorytmy obliczeniowe pozwalają sprawnie wyznaczać różne ważne charakterystyki środowiska morskiego i tworzyć mapy rozkładów jego charakterystyk. Kolory na tych mapach wyrażają wartości charakterystyk w poszczególnych rejonach morza, odpowiednio do zamieszczonej obok skali wartości oznaczonych umownie tymi kolorami. Są to prezentacje poglądowe, natomiast szczegółowe informacje o tych charakterystykach przechowuje się w elektronicznej wersji cyfrowej. Poglądowe prezentacje graficzne tych map są również dostępne w wersji elektronicznej, która pozwala je z łatwością powiększać i dokładniej porównywać kolory w dowolnych miejscach mapy z kolorami skali wartości danej charakterystyki.

Zespoły naukowe w Sopocie, Gdyni, Słupsku i Szczecinie pracują od lat nad wykorzystaniem optycznych metod teledetekcji satelitarnej do badań i monitorowania środowiska Morza Bałtyckiego. Polska zajmuje w tej specjalności naukowej wysoką pozycję i tworzy system satelitarnej kontroli środowiska Bałtyku w ramach dużego projektu SatBałtyk, którego inicjatorem i koordynatorem jest Instytut Oceanologii PAN.

### Możliwości i ograniczenia

Łatwiej monitoruje się otwarte wody oceanu. Zastosowanie tych samych metod do monitorowania środowiska Bałtyku jest o wiele trudniejsze ze względu na dużą złożoność i zmienność tych wód pod wpływem czynników antropogenicznych.

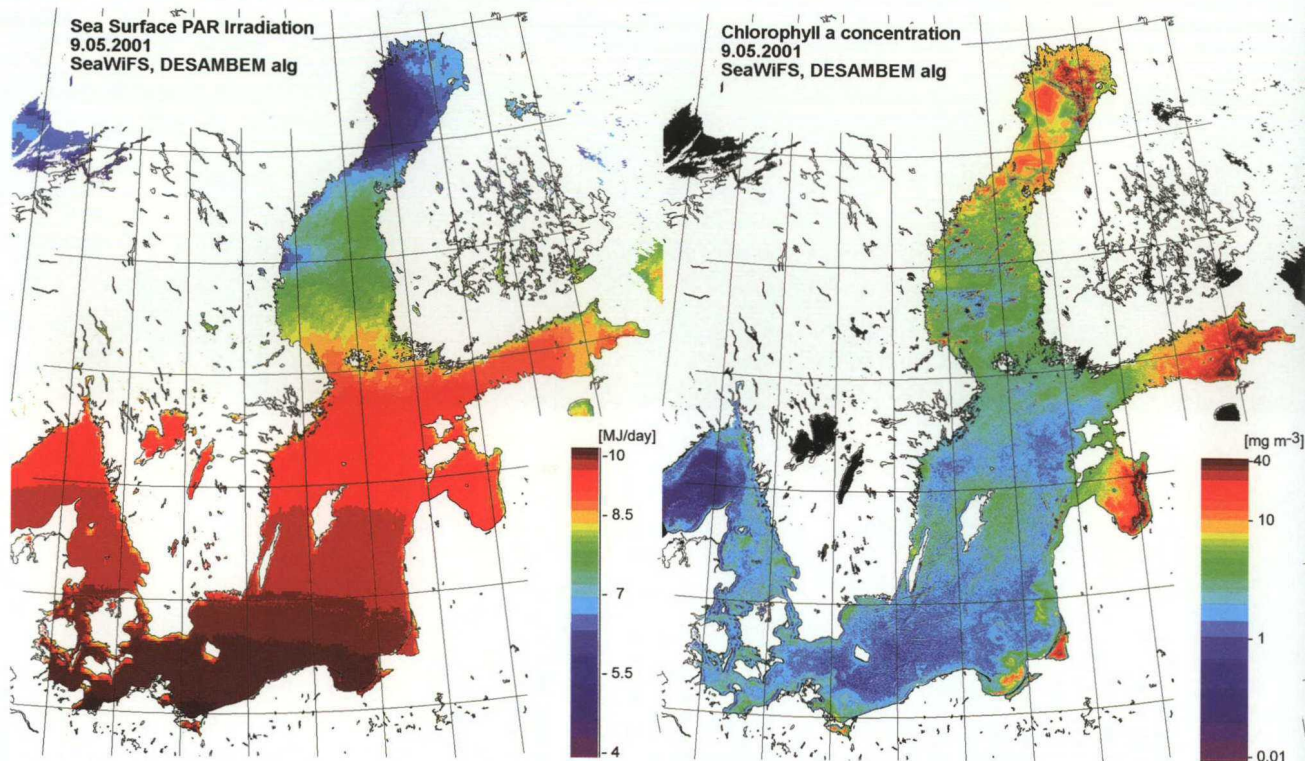
Pierwsze ograniczenie zastosowań techniki satelitarnej do monitorowania środowiska

## Teledetekcja satelitarna Morza Bałtyckiego

Rozkłady dwóch wybranych charakterystyk ekosystemu Bałtyku, zarejestrowane zdalnie techniką satelitarną (9 maja 2001, Darecki i in. 2008):

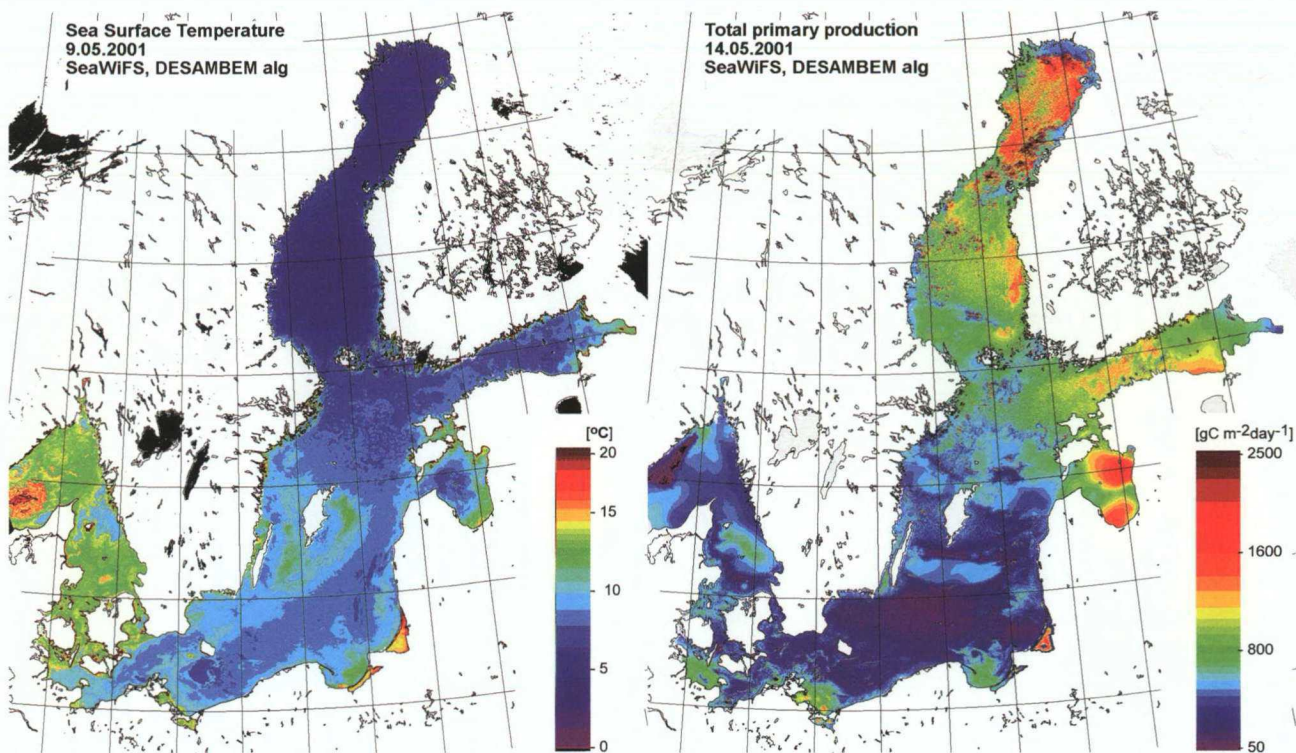
a) Doza dzienna energii oświetlenia powierzchni Bałtyku promieniowaniem użytecznym dla fotosyntezy (Photosynthetically Available Radiation - PAR), tj. w przedziale długości fal 400-700 nm, wyrażona w megadžulach na dobę [MJ/day].

b) Koncentracja chlorofilu a w powierzchniowej warstwie morza Ca, wyrażona w miligramach na metr sześcienny wody [mg/m<sup>3</sup>]



Bałtyku wynika z losowo zmiennego pochłaniania i rozpraszania światła w atmosferze nadbałtyckiej. Widma światła niosącego informacje przez atmosferę do satelity są tutaj szczególnie mocno zniekształcane oraz osłabiane przez aerozole i mgły, a często praktycznie w ogóle nieprzepuszczone przez chmury. Wprowadzanie tzw. poprawki atmosferycznej tych widm jest problemem nierozwiązanym do końca i powodem dużych błędów wyznaczania charakterystyk morza. Drugim ograniczeniem jest nakładanie się pasm absorpcji światła przez różne składniki mieszaniny substancji zawartych w wodzie bałtyckiej, w tym licznych barwnych substancji organicznych i różnego rodzaju cząstek zawiesiny wpływających z wodami rzek do Bałtyku. Utrudniają one identyfikację zawartości substancji badanych na podstawie ich pasm absorpcji, a ściślej na podstawie reflektancji, czyli tej reszty niepochłoniętego światła, która wychodzi z powrotem z morza i rejestrowana jest przez satelitę. Problemy te rozwiązują w pewnym stopniu modele statystyczne oparte na wynikach tysięcy wcześniejszych, kompleksowych pomiarów przeprowadzonych *in situ*. Dla przedziałów czasu i przestrzeni, kiedy brakuje danych satelitarnych z powodu zachmurzenia nieba, stosuje się interpolację punktów wyznaczonej charakterystyki z wykorzystaniem danych ob-

liczonych z modeli prognostycznych. Mimo to błędy tych pomiarów nie są małe. Na przykład standardowe odchylenie wartości uśrednionej na obszarze „piksela” satelitarnego skanowania (1 km<sup>2</sup> i więcej) od wartości punktowych zmierzonych *in situ* wynosi: dla dziennej dozy dopływającej do morza energii promieniowania w przedziale długości fal fotosyntetycznie aktywnej radiacji (PAR, 400-700 nm) ok. 23% a dla koncentracji chlorofilu a przekracza nawet 50%. Podobne błędy wprowadza jednak także metoda wyznaczania przestrzennych rozkładów tych i innych wielkości na podstawie wyników dokładnych analiz punktowych, ale zebranych najczęściej tylko w nielicznych punktach badanej przestrzeni morskiej, i to nie jednocześnie, tylko kolejno w czasie dni lub tygodni trwania rejsu badawczego. W odniesieniu do chlorofilu a można natomiast przyjąć, że nawet 50-procentowe różnice pomiędzy wartościami punktowymi jego koncentracji i wartościami uśrednionymi wyznaczonymi techniką satelitarną są małe wobec naturalnych zmian koncentracji chlorofilu w Bałtyku o mniej więcej 3 rzędy wielkości. Z tych względów celowe jest wykorzystywanie techniki satelitarnej, ale jednocześnie też doskonalenie jej algorytmów i ich weryfikacja na podstawie wyników dokładnych punktowych pomiarów *in situ* z pomocą boi pomiarowych i statków badawczych.



Darecki i in., 2008

Rozkład temperatury powierzchniowej wyrażonej w [°C] (a) i całkowitej dziennej produkcji materii organicznej Ptot w toni wodnej Bałtyku, wyrażonej w gramach węgla asymilowanego w czasie 1 doby w słupie wody pod 1 metrem kwadratowym powierzchni morza [g C / m<sup>2</sup> day<sup>-1</sup>] (b), zarejestrowane zdalnie techniką satelitarną (9 maja 2001; Darecki i in. 2008)

### Program SatBałtyk

Historia polskich optycznych badań morza ma już 50 lat. W latach 2001-2005 Instytut Oceanologii PAN wspólnie z Instytutem Oceanografii Uniwersytetu Gdańskiego i Instytutem Fizyki Akademii Pomorskiej w Słupsku stworzyły oryginalny, wysoce złożony algorytm do wyznaczania wielu charakterystyk środowiska Bałtyku z wykorzystaniem optycznych danych z satelitów. Nazwano go DESAMBEM od pierwszych liter angielskiej nazwy projektu (Development of Satellite Method for Baltic Ekosystem Monitoring). Na podstawie tego algorytmu budowany jest system satelitarnej kontroli środowiska Bałtyku. Instytut Oceanologii PAN koordynuje projekt SatBałtyk, który realizują zespoły naukowe konsorcjum, w skład którego wchodzi oprócz IO PAN: Instytut Oceanografii Uniwersytetu Gdańskiego, Instytut Fizyki Akademii Pomorskiej i Instytut Nauk o Morzu Uniwersytetu Szczecińskiego. Kierownikiem tego projektu jest prof. dr hab. Bogdan Woźniak. Głównym celem projektu jest przygotowanie i uruchomienie bazy technicznej oraz procedur operacyjnych umożliwiających sprawne, rutynowe określanie stanów środowiska Bałtyku, tworzenie map jego charakterystyk strukturalnych i funkcjonalnych, w tym dopływu i charakterystyk energii (PAR, UV), rozkładów temperatury, stanu dynamicznego powierzchni

morza, stężenia chlorofilu i innych pigmentów fitoplanktonu, zakwitów trujących alg, występowania prądów wynoszących wody z głębi ku powierzchni morza („upwellingów”), pojawiają się plamy zanieczyszczeń, w tym rozlewów ropy oraz charakterystyk produkcji pierwotnej materii organicznej.

Baza będzie zbierała informacje z satelitów meteorologicznych, środowiskowych i innych przeznaczonych do celów specjalnych, m.in. TRIOS N/NOAA, MSG Meteosat 9, EOS/AQUA, DMS, ENVISAT. Wykorzystywane będą również informacje z modeli matematycznych morza i atmosfery. ■

#### Chcesz wiedzieć więcej?

Woźniak B., Bradtke K., Darecki M., Dera J., Dzierzbicka L., Ficek D., Furmańczyk K., Kowalewski M., Krężel A., Majchrowski R., Ostrowska M., Paszkuta M., Stoń-Egiert J., Stramska M., Zapadka T., 2011, SatBaltic - A Baltic environmental satellite remote sensing system - an ongoing Project in Poland. Part 1: Assumptions, scope and operating range, *Oceanologia*, 53(4), 897-924.

Woźniak B., Bradtke K., Darecki M., Dera J., Dudzińska-Nowak J., Dzierzbicka L., Ficek D., Furmańczyk K., Kowalewski M., Krężel A., Majchrowski R., Ostrowska M., Paszkuta M., Stoń-Egiert J., Stramska M., Zapadka T., 2011, SatBaltic - A Baltic environmental satellite remote sensing system - an ongoing Project in Poland. Part 2: Practical applicability and preliminary results, *Oceanologia*, 53(4), 925-958.