

Mirosław Darecki  
Instytut Oceanologii  
Polskiej Akademii Nauk  
w Sopocie

**Autoreferat w języku polskim i angielskim**

Załącznik 2 do wniosku  
o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego

Opracowanie teoretycznych i praktycznych podstaw optycznej,  
satelitarnej teledetekcji Morza Bałtyckiego i ich weryfikacja

Sopot, 2014

Załącznik 2  
do wniosku o  
przeprowadzenie  
postępowania  
habilitacyjnego  
z dnia 1 września 2014

**Autoreferat w języku polskim:**

**1. Imię i Nazwisko:**

Mirosław Darecki

**2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/ artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej:**

Magister Fizyki Doświadczalnej, ze specjalnością Spektroskopia Atomowa na Uniwersytecie Gdańskim w roku 1988.

Dyplom ukończenia studiów podyplomowych na Uniwersytecie Warszawskim w dziedzinie Fotografii i Informatyki Obrazowej w 1989 roku.

Doktor Nauk o Ziemi w zakresie Oceanologii, przyznany w roku 1999 przez Radę Naukową Instytutu Oceanologii PAN w Sopocie, tytuł rozprawy: Analiza wpływu składników wód Bałtyku na spektralne charakterystyki oddolnego pola światła.

**3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/ artystycznych:**

listopad 1988 - do chwili obecnej - Instytut Oceanologii Polskiej Akademii Nauk w Sopocie (asystent, starszy asystent, adiunkt, asystent)

-od 2007 kierownik Pracowni Teledetekcji Morza, Zakładu Fizyki Morza

-od 2014 kierownik Zakładu Fizyki Morza w IOPAN

marzec 1998 - kwiecień 2000 - Southampton Institute, Southampton, UK (Research Fellow)

marzec 1998 - marzec 2000 - School of Ocean and Earth Science, University of Southampton, Southampton, UK (Visiting Fellow)

styczeń 2002 - lipiec 2002, Scripps Institution of Oceanography, University of California at San Diego, USA

styczeń 2005 –czerwiec 2006, Scripps Institution of Oceanography, University of California at San Diego, USA

**4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki:**

a) tytuł osiągnięcia naukowego/artystycznego,

**Opracowanie teoretycznych i praktycznych podstaw optycznej, satelitarnej teledetekcji Morza Bałtyckiego i ich weryfikacja**

b) (autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa),

- A1. **Darecki M.**, Weeks A., Sagan S., Kowalczyk P., Kaczmarek S., 2003, *Optical characteristics of two contrasting Case 2 waters and their influence on remote sensing algorithms*. Continental Shelf Research, 23, 3-4, 237-250. (IF: **2.161**, **punktacja MNiSZW: 30, praca była cytowana 51 razy**)
- A2. **Darecki M.**, Kaczmarek S., Olszewski J., 2005, *SeaWiFS chlorophyll algorithms for the Southern Baltic*. International Journal of Remote Sensing, Vol.26, No.2, 247-260. (IF: **1.445**, **punktacja MNiSZW: 30, praca była cytowana 25 razy**)
- A3. Kowalczyk P., Olszewski J., **Darecki M.**, Kaczmarek S., 2005, *Empirical relationships between coloured dissolved organic matter (CDOM) absorption and apparent optical properties in Baltic Sea waters*. International Journal of Remote Sensing, Vol.26, No.2, 345-370. (IF: **1.445**, **punktacja MNiSZW: 30, praca była cytowana 32 razy**)
- A4. **Darecki M.**, Stramski D., 2004. *An evaluation of MODIS and SeaWiFS bio-optical algorithms in the Baltic Sea*, Remote Sensing of Environment. Vol 89/3, 326-350. (IF: **4.574**, **punktacja MNiSZW: 50, praca była cytowana 184 razy**)
- A5. Woźniak B., Krężel A., **Darecki M.**, Woźniak S.B., Majchrowski R., Ostrowska M., Kozłowski Ł., Ficek D., Olszewski J., Dera J., 2008. *Algorithms for the remote sensing of the Baltic ecosystem (DESAMBEM). Part 1: Mathematical apparatus*. Oceanologia 2008, no 50(4), 451-508, (IF: **1.122**, **punktacja MNiSZW: 20, praca była cytowana 12 razy**)
- A6. **Darecki M.**, Ficek D., Krężel A., Ostrowska M., Majchrowski R., Woźniak S.B., Bradtke K., Dera J., Woźniak B., 2008. *Algorithms for the remote sensing of the Baltic ecosystem (DESAMBEM). Part 2: Empirical validation*. Oceanologia 2008, no 50(4), 509-538, (IF: **1.122**, **punktacja MNiSZW: 20, praca była cytowana 11 razy**)

*Sumaryczny Impact Factor wymienionych powyżej publikacji wynosi 11.869\**

*\* na podstawie dostępnych IF za okresy 5 latnie obejmujące rok wydania publikacji*

*Sumaryczna liczba punktów MNiSZW (wg listy z 2013 r.) wymienionych publikacji wynosi - 180*

c) omówienie celu naukowego/artystycznego ww. pracy/prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

Śledzenie i diagnozowanie coraz wyraźniejszych zmian zachodzących w otaczającym nas środowisku, w tym silnie wpływających na wiele aspektów życia - od gospodarki po rekreację - ekosystemach morskich, jest naszym żywotnym interesem i obowiązkiem. W ostatnich latach jednym z podstawowych narzędzi do obserwacji i diagnozy stanu obszarów morskich stała się teledetekcja satelitarna w widzialnym zakresie widma elektromagnetycznego, wykorzystująca związki pomiędzy fizycznymi i chemicznymi właściwościami składników wody a ich rejestrowanymi zdalnie charakterystykami optycznymi.

Związki pomiędzy składem, stężeniem a nawet stanem fizjologicznym różnych substancji zawieszonych i rozpuszczonych w toni wodnej i ich właściwościami optycznymi są stosunkowo dobrze zbadane i opisane dla oceanicznych wód tzw. pierwszego rodzaju (ang. Case 1 waters). W przypadku mórz zamkniętych i strefy przybrzeżnej, czyli tzw. wód

drugiego rodzaju do których należy Bałtyk, jest to ciągle obszar niedostatecznie rozpoznany, co nie pozwala na pełne wykorzystanie możliwości analiz jakie dają nam skanery satelitarne. Mając na uwadze znaczenie i potrzebę rzetelnego określania stanu środowiska morskiego i śledzenia jego zmian, głównym celem moich wieloletnich badań i analiz było **opracowanie, teoretycznych i praktycznych podstaw badania i monitorowania ekosystemów Bałtyku i innych podobnych akwenów, za pomocą teledetekcji satelitarnej w widzialnym zakresie widma elektromagnetycznego z możliwie wysoką dokładnością**. Wymagało to realizacji, m.in. szeregu cząstkowych celów badawczych, z których najistotniejsze to:

- I- Rozpoznanie, zbadanie i opisanie specyficznych cech Morza Bałtyckiego i innych tego typu akwenów, wpływających na warunki teledetekcji satelitarnej w widzialnym obszarze widma elektromagnetycznego oraz krytyczna analiza stosowanych w teledetekcji uniwersalnych algorytmów pozwalających na wyznaczenie różnych charakterystyk środowiska morskiego.
- II- Zaplanowanie i przeprowadzenie badań eksperymentalnych oraz zebranie zbioru danych empirycznych umożliwiających określenie związków pomiędzy zasobami chlorofilu, rozpuszczonej materii organicznej i innych parametrów biooptycznych a spektralnymi charakterystykami radiacji oddolnej wychodzącej z toni wodnej.
- III- Dokonanie analiz statystycznych danych empirycznych, ustalenie matematycznych opisów związków pomiędzy zasobami chlorofilu, rozpuszczonej materii organicznej i innymi parametrami biooptycznymi a spektralnymi charakterystykami radiacji oddolnej wychodzącej z toni wodnej oraz opracowanie na tej podstawie algorytmów uwzględniających specyfikę badanych akwenów Bałtyku i umożliwiających zdalne wyznaczanie parametrów opisujących stan jego ekosystemów.
- IV- Wykazanie przydatności opracowanych algorytmów do kompleksowej analizy stanu ekosystemu Bałtyku metodami satelitarnymi.

Realizacja powyższych celów została udokumentowana w zbiorze sześciu publikacji składających się na moją rozprawę habilitacyjną pod tytułem **Opracowanie teoretycznych i praktycznych podstaw optycznej, satelitarnej teledetekcji Morza Bałtyckiego i ich weryfikacja**.

Zainicjowane przeze mnie badania miały w wielu wymiarach aspekty pionierskie. Do czasu ich podjęcia w żadnym polskim ośrodku nie przetwarzano na szeroką skalę informacji satelitarnej pozyskanej ze specjalistycznych radiometrów dedykowanych obserwacjom morza w zakresie widzialnym. W tamtym czasie, przetwarzanie i analizy danych satelitarnych odnoszących się do Bałtyku nie były też wykonywane na taką skalę w żadnym innym ośrodku na świecie.

Osiągnięcie założonego celu wiązało się z jednej strony z opracowaniem metod przetwarzania i interpretacji danych satelitarnych, dostosowanych do specyfiki wód Bałtyku, a z drugiej ze znacznym wysiłkiem związanym z zaprojektowaniem, pozyskaniem i przygotowaniem odpowiedniej bazy technicznej spełniającej wysokie wymagania związane z transferem, gromadzeniem i analizą ogromnej ilości danych i spełnieniem procedur zapewniających wysoką jakość i powtarzalność pomiarów. Pozyskanie z centrów odbioru, magazynowanie i przetwarzanie danych przestrzennych o wyjątkowo dużej objętości wymagało zapewnienia specjalnie dostosowanych serwerów i szybkich łączy internetowych oraz odpowiednio skonfigurowanych dużych zasobów pamięci masowej do przechowywania źródłowych i później także przetworzonych informacji satelitarnych. Dodatkowo, utworzona baza techniczna musiała być wsparta przez, uwzględniające specyficzne warunki teledetekcji

satelitarnej w środowisku morskim, specjalistyczne oprogramowanie do masowego przetwarzania danych satelitarnych w widzialnym zakresie widma elektromagnetycznego.

W celu zapewnienia rzetelnych i miarodajnych wyników, niezmiernie ważnym było także zaplanowanie i przeprowadzenie badań "podsatelitarnych". Wyniki tych pomiarów niezbędne były zarówno do opracowania odpowiednich modeli i algorytmów wiążących strumień oddolny radiacji z wybranymi składnikami wody morskiej, jak i do kalibracji i walidacji danych satelitarnych. Wymagało to między innymi przygotowania zestawu specjalistycznych, charakteryzujących się odpowiednią czułością i zakresami spektralnymi, radiometrów morskich wykorzystywanych do pomiarów optycznych *in situ* w wodzie. Na początkowym etapie badań, z powodu braku innych możliwości, opracowano koncepcję, a następnie wykonano we własnym zakresie nowatorski, siedmiokanałowy radiometr morski, przeznaczony do pomiarów radiacji oddolnej w zakresie do 400nm do 750nm zarówno nad powierzchnią wody jak i tuż pod jej powierzchnią. Skonstruowany miernik, oprócz czułości dostosowanej do relatywnie mętnych wód Bałtyku, charakteryzował się też wysoką szybkością pomiarów.

Podobnie jak w przypadku przetwarzania danych satelitarnych, także w przypadku pomiarów radiometrycznych *in situ* należało wziąć pod uwagę specyficzne właściwości wód Bałtyku, co wiązało się z opracowaniem odpowiedniej techniki pomiarowej. Technika ta musiała uwzględniać między innymi zwiększone w relatywnie mętnych wodach Bałtyku efekty samozacieniania radiometrów rejestrujących radiację oddolną, a jednocześnie być zgodna z ustalonymi wysokimi standardami i procedurami przyjętymi dla pozyskiwania danych wykorzystywanych w teledetekcji satelitarnej morza. Tylko ta zgodność mogła zapewnić uznanie, przez międzynarodową społeczność naukową, wyników analiz przeprowadzonych na podstawie tych danych.

Kompleksowy charakter przeprowadzanych badań i analiz, złożoność zjawisk związanych z teledetekcją środowiska morskiego i konieczność pozyskiwania niezwykle obszernego materiału badawczego wymagały udziału w prezentowanych pracach szeregu specjalistów z różnych dziedzin, posiadających szczególne umiejętności i zaplecze laboratoryjne. Z tego powodu wszystkie prezentowane prace są współautorskie, ale z moim dominującym lub głównym udziałem.

Poniżej przedstawiono w zarysie najważniejsze elementy osiągnięcia naukowego zawarte w treści publikacji składających się na moją rozprawę habilitacyjną.

Należy tu zwrócić uwagę, że drugi i trzeci artykuł prezentowanego cyklu, stanowią prace A2 i A3, które ze względu na bardzo duże opóźnienie wydawnicze spowodowane edycją numeru specjalnego pisma *International Journal of Remote Sensing* ukazały się dopiero w roku 2005. Prace te powstały w roku 2003, czyli wcześniej niż praca A4 opublikowana w roku 2004, i dlatego prezentowane są w kolejności odpowiadającej chronologii prowadzonych przeze mnie badań.

W pierwszej pracy prezentowanego cyklu (*Optical characteristics of two contrasting Case 2 waters and their influence on remote sensing algorithms*), stanowiącej udokumentowanie realizacji pierwszego a także częściowo drugiego celu cząstkowego (I i II), przedstawione zostały analizy potwierdzające tezę, że, inaczej niż w przypadku wód pierwszego rodzaju, akweny powszechnie klasyfikowane jako wody drugiego rodzaju, mogą cechować się bardzo różnymi charakterystykami biooptycznymi. Ze względu na to, że charakterystyki te istotnie wpływają na warunki teledetekcji satelitarnej stosowanie jednego typu algorytmów satelitarnych do zdalnego monitorowania i obserwacji stanu ekosystemu w przypadku tych akwenów prowadzi do znacznie większych błędów niż w przypadku wspomnianych akwenów rodzaju pierwszego.

W pracy przeanalizowano istotne z punktu widzenia teledetekcji właściwości optyczne wybranych dwóch ekosystemów morskich zaliczanych do wód rodzaju drugiego (Bałtyku Południowego i Oceanu Atlantyckiego u zachodnich wybrzeży Irlandii). Analizie poddano zarówno rzeczywiste właściwości optyczne takie jak widma współczynników absorpcji całkowitej zawiesiny, pigmentów fitoplanktonu, detrytu i rozpuszczonych substancji organicznych jak i pozorne właściwości optyczne wody morskiej takie jak spektralne rozkłady współczynników dyfuzyjnego osłabiania oświetlenia odgórnego czy reflektancji bezkontaktowej. Wszystkie te parametry określano w zakresie spektralnym od 400nm do 750nm (widma ciągłe rzeczywistych właściwości optycznych wody morskiej i pomiary w 10 kanałach spektralnych, w zakresie od 412nm do 710nm w przypadku pozornych właściwości optycznych wody morskiej).

Przeprowadzone badania wykazały między innymi, że właściwości optyczne wód Bałtyku Południowego determinowane są przez absorpcję tzw. chromoforowych rozpuszczonych związków organicznych, CDOM (z ang. Coloured Dissolved Organic Matter) w znacznie większym stopniu niż w wodach Szelfu Irlandzkiego. W rezultacie takiego zróżnicowania, oparta na algorytmach satelitarnych, wykorzystujących radiację oddolną w zakresie widzialnym widma elektromagnetycznego teledetekcja satelitarna w tych akwenach wymaga opracowania osobnych algorytmów dedykowanych dla każdego z nich. Stosowanie - tak jak w przypadku wód pierwszego rodzaju - jednego globalnego algorytmu, powoduje duże błędy wyznaczanych parametrów i uniemożliwia wykorzystanie w pełni potencjału i możliwości jakie daje nam teledetekcja satelitarna. W pracy zaproponowano także różne postaci algorytmów na przykładzie algorytmu wyznaczającego zdalnie stężenie chlorofilu *a*, parametru powszechnie określającego ilość fitoplanktonu w wodzie morskiej. Zwrócono też uwagę na konieczność wykorzystywania w algorytmach zróżnicowanych przedziałów spektralnych, dostosowanych do specyfiki badanych akwenów. W przypadku zaproponowanych, przykładowych zestawach kanałów spektralnych, wykorzystanych w algorytmach, w zależności od wykorzystanego zestawu kanałów, stwierdzono sezonową zależność współczynników liczbowych w proponowanych algorytmach lub jej brak. We wnioskach pracy zaproponowane zostały kanały spektralne których wykorzystanie w poszczególnych akwenach, może zapewnić poprawę dokładności algorytmów wyznaczających zdalnie stężenie chlorofilu *a* w przypowierzchniowej warstwie wody i to niezależnie do sezonu troficznego danego akwenu.

Prezentowana praca spotkała się z dużym zainteresowaniem. W roku 2004 była jedną z najczęściej pobieranych *on-line* prac wydawnictwa Elsevier. Rozpropagowany w pracy termin "contrasting Case 2 waters" stał się powszechnie używanym zwrotem w dyskusjach o zróżnicowaniu algorytmów satelitarnych w wodach drugiego rodzaju. Wiele późniejszych opracowań literatury światowej bezpośrednio odwoływało się do wyników tej pracy, a ona sama była powszechnie cytowana (od dnia publikacji cytowana ponad pięćdziesiąt razy).

W drugiej pracy (*SeaWiFS chlorophyll algorithms for the Southern Baltic*), przedstawiającej badania związane z realizacją II i III celu cząstkowego, przeprowadzono krytyczną analizę i ocenę dokładności zależności wiążących strumienie radiacji oddolnej w wybranych, dostosowanych do spektralnych charakterystyk skanera satelitarnego SeaWiFS, kanałach spektralnych z przypowierzchniowym stężeniem chlorofilu *a*. Analizy te przeprowadzono na podstawie obszernego materiału eksperymentalnego zebranego na obszarze Bałtyku Południowego w latach 1993-2001, składającego się głównie z wieloletnich i wielosezonowych serii synchronicznych pomiarów reflektancji bezkontaktowej i stężenia chlorofilu *a* w przypowierzchniowej warstwie wody.

Warto tu zwrócić uwagę, że wspomniany Skaner SeaWiFS był praktycznie pierwszym instrumentem satelitarnym pracującym w zakresie widzialnym widma elektromagnetycznego,

który dostarczał odpowiedniej jakości dane związane z biooptycznymi parametrami mórz i oceanów (jego poprzednik - skaner CZCS, z powodu swojej niestabilności nie zapewnił długiego cyklu danych o wymaganej jakości (Evans i Gordon, 1994)). Długi i względnie stabilny okres jego działania zapewnił pierwszy, wieloletni zbiór danych na podstawie których określono zmiany ilości fitoplanktonu morskiego w skali całego globu, co było jednym z istotniejszych elementów śledzenia zmian klimatycznych zarówno w skali globalnej jak i lokalnej. Prawie wszystkie kolejne dane z misji satelitarnych typu "ocean color", oprócz dostarczania danych w swoim natywnym zakresie spektralnym, dostarczają też dane dostosowywane dodatkowo do charakterystyk skanera SeaWiFS, co zapewnia, istotną w obserwacjach długookresowych zmian środowiska morskiego, ciągłość pozyskiwanych informacji.

W omawianej w pracy stwierdzono duże rozbieżności pomiędzy wartościami stężenia chlorofilu *a* zmierzonymi *in situ* w wodach Bałtyku Południowego i określonymi zdalnie za pomocą wszystkich powszechnie używanych algorytmów dla skanera SeaWiFS. Najistotniejszym powodem tak dużych rozbieżności jest wspomniana wcześniej (patrz praca A1) specyficzna biooptyczna kompozycja wód Bałtyku, określona w pierwszej kolejności przez dużą zawartość w wodzie mieszaniny oddziaływujących ze światłem rozpuszczonych związków organicznych CDOM. Związki te absorbują światło w niebieskim obszarze widma i skutecznie "maskują" wpływ absorpcji chlorofilu *a* na poziom radiacji oddolnej w kanałach spektralnych wykorzystywanych w typowych algorytmach satelitarnych.

Wobec powyższego opracowano lokalne wersje tych algorytmów, które w istotny sposób zmniejszają błędy estymacji poprzez uwzględnienie efektu zwiększonej absorpcji światła przez CDOM lub poprzez wykorzystanie obszarów widma, w których ta absorpcja jest już relatywnie mała lub wręcz zaniedbywalna. Wykazano też, że w celu dalszego zwiększenia dokładności wyznaczania stężenia chlorofilu *a* metodami zdalnymi na obszarze Bałtyku Południowego należy w algorytmach wykorzystywać inne kanały spektralne, niż te stosowane obecnie w większości skanerów satelitarnych. Wykorzystanie w teledetekcji morza, pomijanego zwykle w konstrukcji skanerów, obszaru spektralnego 560nm do 600nm, (np. kanału 590 nm, w którym radiacja oddolna jest relatywnie najmniej kształtowana przez absorpcję składników wody morskiej w Bałtyku, w tym przez absorpcję CDOM) i umieszczenie w nim kanału referencyjnego, radykalnie wpływa na dokładność określania istotnych parametrów biooptycznych, np. stężenia chlorofilu *a*. W podsumowaniu pracy postulowano wyposażenie kolejnych detektorów, przeznaczonych do badań morza właśnie w taki zestaw kanałów spektralnych.

W kolejnym artykule (*Empirical relationships between coloured dissolved organic matter (CDOM), absorption and apparent optical properties in Baltic Sea waters*) który dokumentuje realizację II i III celu cząstkowego, przedstawione zostały algorytmy dedykowane kolejnym parametrom określającym stan środowiska, w tym przede wszystkim współczynnikowi absorpcji CDOM.

Ilość CDOM w wodzie morskiej jest, jak już wspomniano, jednym z czynników odróżniających wody Bałtyku od wielu innych analogicznych akwenów i już z tego powodu jego zdalne określanie jest zagadnieniem istotnym. Jednak zainteresowanie zdalnym określaniem CDOM w przypowierzchniowej warstwie wody bardzo wzrosło w ostatnim okresie także z wielu innych powodów, wśród których można m.in. wymienić znaczący wpływ na teledetekcję chlorofilu *a* i procesy wymiany gazów (głównie CO, CO<sub>2</sub> i COS) na granicy powietrze-woda, oraz możliwości stosowania CDOM jako wyznacznika wnoszenia materii organicznej rzekami do morza i parametru określającego cykl węgla w wodach przybrzeżnych. Nie bez znaczenia jest też fakt, że CDOM jest istotnym absorbentem promieniowania ultrafioletowego w wodzie morskiej.

Ekspotencjalny charakter spektralnej zależności absorpcji CDOM, pozwala na szacowanie jej wartości w całym zakresie spektralnym na podstawie absorpcji wyznaczonej dla jednej długości fali. Najczęściej jako taką absorpcję "referencyjną" stosuje się jej wartość dla długości fali 400nm i taki też parametr był dyskutowany w pracy.

Ze względu na fakt, że w niebieskim zakresie widma, radiacja oddolna jest potencjalnie najsilniej determinowana przez wielkość absorpcji CDOM, kanały 412nm i 443nm są najczęściej wykorzystywane w algorytmach satelitarnych wyznaczających ten parametr środowiska morskiego. Na podstawie analizy widma absorpcji CDOM, oraz poziomów rzeczywistych refleksyjności w wodach bałtyckich, stwierdzono bezużyteczność wykorzystywania tych kanałów spektralnych do określania metodami teledetekcyjnymi absorpcji organicznych substancji rozpuszczonych w tym akwenie. W pracy wykazano, że alternatywą dającą w wypadku Bałtyku lepsze wyniki, jest wykorzystanie kanału 490nm, w którym radiacja oddolna jest również w znaczącym stopniu kształtowana przez absorpcję CDOM, a uwarunkowania środowiskowe i stosowane schematy korekcji atmosferycznej, pozwalają na bardziej efektywne wykorzystywanie tego kanału spektralnego do operacyjnej teledetekcji satelitarnej Bałtyku.

Kolejna publikacja (*An evaluation of MODIS and SeaWiFS bio-optical algorithms in the Baltic Sea*), stanowiąca udokumentowanie realizacji III celu cząstkowego, powstała częściowo na zamówienie NASA (grant walidacyjny D. Stramskiego z Scripps Institute of Oceanography, University of California). NASA w latach 1999 i 2002 umieściła na orbicie satelity Terra i Aqua ze skanerami MODIS, które miały w założeniu zastąpić i w kolejnych latach zapewnić kontynuację strumienia danych dostarczanych przez skaner SeaWiFS na satelicie OrbitView-2. Nowe skanery MODIS charakteryzowały się ulepszonymi parametrami i powszechnie było oczekiwane, że wraz z nimi, dzięki dostępności wieloletnich serii jednorodnych danych o stałej jakości, rozpocznie się nowa era "ocean color remote sensing".

Zanim jednak dane skanerów MODIS mogły być powszechnie wykorzystywane należało zweryfikować proponowane przez NASA algorytmy wyznaczania biooptycznych parametrów wody morskiej. Taka weryfikacja, a w dalszej kolejności analiza rezultatów, istotnie przyczynia się do rozszerzenia wiedzy o optycznych właściwościach wód Bałtyku i lepszego zrozumienia ich specyfiki.

W pracy wykorzystana została baza danych biooptycznych zebranych w wodach Bałtyku Południowego z okresu prawie 10 lat. Materiał ten charakteryzował się odpowiednim zróżnicowaniem przestrzennym (od mętnych wód zatokowych po względnie czyste wody otwartego Bałtyku) i sezonowym (pomiaru wykonywane niemalże we wszystkich miesiącach w roku) co pozwala założyć, że określa on wybrany akwen w stopniu wystarczającym i uwzględnia cały zakres zmienności mierzonych parametrów biofizycznych.

Dane te posłużyły do weryfikacji standardowych algorytmów umożliwiających zdalne wyznaczanie podstawowych parametrów biooptycznych wód Bałtyku. We wcześniejszych opisanych powyżej pracach, wykazano lokalny charakter algorytmów satelitarnych w wodach drugiego rodzaju, stąd też wynikało ograniczenie omawianej pracy do tego akwenu. Ocenie poddane zostały powszechnie stosowane w "globalnym" przetwarzaniu danych, algorytmy opracowane na dla skanera MODIS (m.in. CZCS\_pigm, Chlor\_MODIS, chlor\_a\_2, chlor\_a\_3) a także nowy algorytm dla skanera SeaWiFS (OC4v4). Weryfikacji poddano nie tylko algorytmy przeznaczone do zdalnego wyznaczania stężenia chlorofilu *a* lub stężenia chlorofilu *a* z feofitynami, ale także algorytmy do zdalnego określania współczynnika absorpcji CDOM dla 400nm,  $a_{CDOM}(400nm)$ , czy współczynnika dyfuzyjnego osłabiania oświetlenia odgórnego dla 490nm,  $K_d(490nm)$ , przy czym oba ostatnie algorytmy dostosowane były do parametrów skanera MODIS.



W celu pełnej identyfikacji problemów związanych z teledetekcją w wodach Bałtyku, ocenie poddano wartości parametrów bioptycznych wyznaczonych na podstawie reflektancji zmierzonej *in situ*, z pomiarami *in situ* tych parametrów, jak i też reflektancji wyliczonej na podstawie danych satelitarnych. To ostatnie pozwoliło na walidację już "końcowego" produktu satelitarnego na podstawie danych *in situ*. Takie oddzielnie badanie tych dwóch produktów, pozwoliło na separację błędów z różnych źródeł a także lepsze zrozumienie zjawisk biofizycznych determinujących obserwowane rozbieżności. Na ewentualne błędy wartości parametrów wyliczonych metodami teledetekcji satelitarnej wpływają bowiem nie tylko nieodpowiednie algorytmy, czyli niewłaściwe dla danego akwenu powiązanie radiacji oddolnej z wybranymi parametrami bioptycznymi, ale także błędy wynikające z korekcji atmosferycznej, oraz ze zróżnicowania przestrzennego i czasowego wyznaczanych w danym akwenu parametrów.

Przeprowadzone analizy wykazały, że średnie statystyczne błędy wyznaczania wartości stężenia chlorofilu *a* na podstawie standardowych formuł opracowanych dla tych skanerów mieszczą się w zakresie od ponad 300 do kilku tysięcy procent. Ograniczenie materiału eksperymentalnego do przypadków, dla których błędy statystyczne są mniejsze od 1000% (możliwa jest eliminacja takich ekstremalnych wartości w czasie przetwarzania), spowodowało zmniejszenie błędów do wartości od 155% do 225% w zależności od typu algorytmu. Są to jednak wciąż wartości zbyt wysokie, żeby czynić te formuły w pełni użytecznymi do badania środowiska morskiego.

Znacznie mniejsze błędy w estymacji stwierdzono w przypadku algorytmu umożliwiającego zdalne wyznaczanie wartości współczynnika osłabiania światła  $K_d(490\text{nm})$ . Statystyczny błąd wynosił tu ok 20%. Niski błąd w przypadku tego parametru nie jest zaskoczeniem, gdyż z racji swojej natury współczynnik  $K_d(490\text{nm})$  kształtowany jest przez wszystkie optycznie znaczące składniki wody morskiej w analogiczny sposób jak to ma miejsce w przypadku reflektancji.

W pracy, po dyskusji przyczyn tak dużych wielkości błędów estymacji, zaproponowano nowe, dostosowane do specyficznych warunków wód Bałtyku Południowego wersje odpowiednich algorytmów. Te regionalne algorytmy, obok niskiego błędu systematycznego charakteryzują się także mniejszym błędem statystycznym (w zależności od algorytmu, od 114% do 130%). Zaproponowano też nową parametryzację dla algorytmów typu "semi-analytical", które mogą być traktowane jako uproszczone modele bioptyczne środowiska morskiego.

W omawianej pracy przeprowadzono również weryfikację efektywności standardowych procedur korekcji atmosferycznej, poprzez bezpośrednie porównanie zmierzonej *in situ* radiacji wychodzącej z toni wodnej z odpowiadającą jej radiacją wyznaczoną za pomocą radiometru satelitarnego. Korekcja atmosferyczna w przypadku teledetekcji satelitarnej nad takim akwenami jak Bałtyk ma krytyczne znaczenie dla jakości przeprowadzanych badań. Identyfikacja przyczyn jej wadliwego działania i w konsekwencji jej odpowiednia modyfikacja, może istotnie przyczynić się do zwiększenia dokładności i efektywności teledetekcji satelitarnej w tych obszarach. Analiza dużych, zwłaszcza w niebieskim obszarze widma, rozbieżności pomiędzy radiacją oddolną zmierzoną *in situ* i określoną z poziomu satelity, oraz analiza wyznaczonych w procesie korekcji atmosferycznej parametrów atmosfery, takich jak grubość optyczna czy typ aerozolu, wykazały, że w procesie korekcji atmosferycznej oprócz zmiany klasycznego założenia o zerowej radiacji oddolnej w czerwonym obszarze spektralnym, należy również zrewidować wykorzystywane modele aerozoli atmosfery nadmorskiej.

Praca ta stała się docenionym i popularnym w literaturze naukowej, przykładem kompleksowej analizy problemu teledetekcji satelitarnej dla wybranego lokalnego akwenu

i jest do tej pory powszechnie cytowana (od dnia publikacji cytowana była już ponad 180 razy).

Przedstawione wyżej badania i analizy pozwoliły na zrealizowanie kolejnych celów (III i IV) mojej pracy badawczej. Zostało to udokumentowane w omówionych w tym punkcie łącznie, dwóch artykułach prezentowanego cyklu (*Algorithm for the remote sensing of the Baltic ecosystem (DESAMBEM). Part 1: Mathematical apparatus i Algorithms for the remote sensing of the Baltic ecosystem (DESAMBEM). Part 2: Empirical validation*). Przedstawiają one wyniki moich prac a także prac szerokiego grona naukowców z trzech jednostek naukowych współpracujących w ramach projektu badawczego DESAMBEM<sup>1</sup>). Współpraca ta zaowocowała opracowaniem szeregu szczegółowych modeli matematycznych i zależności statystycznych opisujących transport promieniowania słonecznego w systemie atmosfera-morze, absorpcję tego promieniowania w toni wodnej i jego wykorzystanie na różne procesy, w tym szczególnie na fotosyntezę w komórkach fitoplanktonu. Modele te złożyły się na kompleksowy algorytm DESAMBEM, który pozwala określać szereg właściwości abiotycznych środowiska oraz stan i funkcjonowanie ekosystemu Bałtyku na podstawie dostępnych danych satelitarnych. Wśród wyznaczanych, z pomocą tego algorytmu, parametrów można wymienić m.in.: temperaturę powierzchniową morza, prądy powierzchniowe i prądy wznoszące - *upwelling*'i, zasięg wód rzecznych, przezroczystość wód, oświetlenie użyteczne dla fotosyntezy PAR (z ang. Photosynthetic Available Radiation), stężenia chlorofilu i innych pigmentów w wodzie, wydajność fotosyntezy i produkcję pierwotną materii organicznej. Charakterystyki te wyznaczane są za pomocą algorytmów opracowanych między innymi na podstawie zależności będących przedmiotem przeprowadzonych przeze mnie szczegółowych analiz przedstawionych w pracach A1 – A4.

Złożony algorytm DESAMBEM rozszerza zakres teledetekcji satelitarnej Bałtyku o szereg dotychczas nie wyznaczanych rutynowo parametrów, które niosą informacje o wielu fizycznych, chemicznych i biologicznych właściwościach wód morskich oraz o procesach w nich zachodzących. Takie kompleksowe podejście do monitoringu środowiska, przy wykorzystaniu teledetekcji z wielu urządzeń pracujących w różnych zakresach spektralnych widma promieniowania elektromagnetycznego, nie tylko rozszerza zakres określanych zdalnie parametrów ale też, w wielu przypadkach, pozwala na ich wyznaczanie ze zwiększoną dokładnością. Niebagatelną rolę w tym zwiększeniu ilości i dokładności wyznaczanych parametrów, jak wykazano w omawianych powyżej pracach A1 i A2, odgrywa możliwość doboru odpowiednich kanałów spektralnych, co zaprezentowane zostało w przypadku proponowanych w pracy algorytmów na stężenie chlorofilu *a*.

Warto podkreślić, że diagnoza funkcjonowania ekosystemu Bałtyku za pomocą algorytmu DESAMBEM nie ogranicza się do powierzchniowej warstwy morza jak to ma zazwyczaj miejsce w zdalnych obserwacjach morza. Opracowane wcześniej pół-empiryczne modele uzyskane na podstawie analizy danych z wieloletnich serii pomiarowych w Bałtyku umożliwiają również wyznaczanie wielu charakterystyk w całej strefie eufotycznej lub na wybranych głębokościach. Taki, szeroki zakres informacji, pozwala na wiarygodne diagnozowanie stanów i prognozowanie zmienności środowiska Bałtyku.

Ze względu na omawiane powyżej istotne różnice optycznych właściwości wód różnych akwenów rodzaju drugiego (patrz prace A1, A4), opracowane i przedstawione w pracy modele i algorytmy składające się na kompleksowy algorytm DESAMBEM,

---

<sup>1</sup> DESAMBEM, projekt badawczy zamawiany przez KBN, nr PBZ-KBN 056/P04/2001, "Badanie i opracowanie systemu satelitarnej kontroli ekosystemu Bałtyku". Projekt realizowany przez Instytut Oceanologii Polskiej Akademii Nauk (koordynator), Instytut Oceanografii UG, Instytut Fizyki Pomorskiej Akademii Pedagogicznej w Słupsku, przy współpracy z Morskim Instytutem Rybackim w Gdyni

dostosowane są do specyficznych charakterystyk fizycznych, chemicznych i biologicznych wód Bałtyku. Tym niemniej, ich ogólny charakter pozwala na dostosowanie ich, poprzez nową parametryzację i odpowiednie modyfikacje modeli, także do innych akwenów.

Opracowanie takiego złożonego algorytmu DESAMBEM stanowiącego nową jakość w teledetekcji wód rodzaju drugiego możliwe było dzięki wiedzy i doświadczeniu skupionych wokół realizacji projektu zespołów naukowych w tym, w dużym stopniu dzięki wynikom analiz przedstawionych w pierwszych czterech pracach prezentowanego cyklu, które dokumentowały realizację celów I-III. Te wcześniejsze wyniki badań przyczyniły się znacząco do rozwinięcia metod teledetekcji satelitarnej Bałtyku i otworzyły drogę do podjęcia próby zastosowania ich do kompleksowej diagnozy tego ekosystemu.

Możliwości praktycznego wykorzystania algorytmu DESAMBEM w monitoringu morza z poziomu satelity opisano w pracy A5. Przedstawia ona opracowane na podstawie tego algorytmu mapy przestrzennych rozkładów wybranych parametrów środowiska Bałtyku, w niektórych przypadkach po raz pierwszy określone na podstawie danych uzyskanych metodami satelitarnymi. Jak już wcześniej wspomniano, skonstruowanie takich map możliwe było między innymi dzięki opracowaniu z moim wiodącym udziałem metod i procedur integrujących dane z różnych satelitów i modeli oraz algorytmów wykorzystujących odpowiednio dobrane kanały spektralne w widzialnym zakresie widma elektromagnetycznego.

Analiza błędów estymowanych satelitarne wartości parametrów przedstawionych na mapach, wykonana na podstawie gromadzonego przez wiele lat, również z moim udziałem, zbioru danych empirycznych, wykazała, że osiągnięta dzięki algorytmowi DESAMBEM jakość produktów satelitarnych dla Bałtyku, pozwala na zdalne określanie wielu parametrów biooptycznych morza z zadawalającą dokładnością.

Warto tu podkreślić, że zarówno opracowanie modeli i zależności składowych algorytmu DESAMBEM, jak i późniejsza weryfikacja wyników jego stosowania wymagały obszernego zbioru danych pozyskiwanych z zachowaniem procedur zapewniających powtarzalność pomiarów również w przypadku stosowania różnych instrumentów i technik pomiarowych, co często ma miejsce w przypadku wieloletnich serii czasowych. Niebagatelne znaczenie ma także synchronizacja informacji pozyskiwanych z satelity z pomiarami wykonywanymi bezpośrednio w morzu. Planowanie i nadzór nad pracami eksperymentalnymi w efekcie których pozyskiwany jest materiał empiryczny do dalszych analiz laboratoryjnych i równoległe przeprowadzane bezpośrednio pomiary *in situ* wymagało dużego zaangażowania, doświadczenia i przygotowania merytorycznego. Tego typu kompleksowe badania, spełniające najwyższe światowe standardy nie były dotychczas powszechnie wykonywane w analizowanym akwenu morskim, szczególnie w przypadku spektralnych pomiarów reflektancji. Co więcej, przy przeprowadzaniu prac eksperymentalnych, specyfika właściwości optycznych wód Bałtyku wymagała nie tylko wykorzystania zaawansowanej aparatury badawczej o najwyższych standardach i maksymalnej czułości ze względu na relatywnie mętne wody w tym akwenu, ale także odpowiednio dostosowanej i przy tym zgodniej z obowiązującymi procedurami metodyki pomiarowej, która została przeze mnie opracowana na potrzeby przeprowadzanych eksperymentów.

W opisanych badaniach podjęto też próbę rozwiązania problemu wypełniania na mapach miejsc, dla których niemożliwe jest wyznaczenie danego parametru za pomocą obserwacji satelitarnych, na przykład z powodu zachmurzenia. Warto pamiętać, że satelitarna teledetekcja w widzialnym zakresie widma możliwa jest jedynie gdy obserwowany rejon nie jest zakryty przez chmury. Zagadnienie to jest niezwykle istotne dla zapewnienia operacyjności metod teledetekcyjnych. Zaproponowane metody takiego uzupełniania wartości określanych parametrów w takich obszarach, oparte były na statystycznych

interpolacjach wykorzystujących informacje zawarte w danych satelitarnych dla danego akwenu uzyskanych w innych przedziałach czasowych. Analiza błędów szacowania wielkości chlorofilu *a* wyznaczanych za pomocą takich interpolacji również została przedstawiona w pracy. Metoda ta jednak nie jest w stanie zapewnić operacyjności systemu i bieżącej diagnozy stanu ekosystemu badanego akwenu. Natomiast sam algorytm DESAMBEM, już w tej chwili, w warunkach bezchmurnych może być z powodzeniem stosowany w systemach analizujących funkcjonowanie Morza Bałtyckiego w sposób operacyjny.

Zaprezentowany powyżej cykl artykułów jest, w mojej ocenie, opisem naturalnej drogi badawczej rozpoczętej postawieniem "diagnozy", rozpoznaniem problemu oraz środowiska w jakim on występuje, i wreszcie przeprowadzeniem badań, które zaowocowały zaproponowanymi rozwiązaniami. I tak, w kolejnych krokach, opracowane zostały algorytmy pozwalające za pomocą metod satelitarnych określić podstawowe parametry opisujące stan środowiska morskiego np. stężenie chlorofilu *a*, a następnie CDOM, parametru wyróżniającego pod względem optycznym środowisko Bałtyku od pozostałych analogicznych akwenów, co pozwoliło także na lepszą interpretację estymowanych satelitarnie pozostałych parametrów środowiskowych. W konsekwencji, po przetestowaniu i sprawdzeniu "prostych" rozwiązań, przedstawiono oparte na wielu sensorach satelitarnych i wspomagane modelami i odpowiednimi algorytmami obejmującymi niemalże cały zakres biooptyki morza rozwiązanie diagnozujące kompleksowo ekosystem morski.

Omówione powyżej osiągnięcie badawcze ma też aspekt praktyczny, gdyż zaprezentowany w dwóch ostatnich publikacjach algorytm DESAMBEM stanął u podstaw opracowywanego obecnie systemu operacyjnego SatBałtyk<sup>2</sup>, który będzie udostępniał systematycznie codzienne mapy ponad kilkudziesięciu charakterystyk Morza Bałtyckiego, użyteczne nie tylko dla szerokiego grona naukowców zajmujących się Morzem Bałtyckim ale też dla administracji lokalnej czy regionalnej odpowiedzialnej za administrowanie i ochronę środowiska morskiego. Także szerokie grono obywateli znajdzie w budowanym serwisie użyteczne, dla siebie, związane z wypoczynkiem nad morzem czy też pracą, informacje.

Reasumując, zaprezentowane tu, opracowane przeze mnie dzieło habilitacyjne ma oryginalny i pionierski charakter. Jest to pierwsze, opublikowane w literaturze tak kompleksowe ujęcie zagadnień związanych teledetekcją satelitarną środowiska Morza Bałtyckiego. Jednak uzyskane rezultaty w postaci szeregu zaprezentowanych algorytmów mają charakter bardziej uniwersalny, stanowiąc jedną z pierwszych na świecie prób zastosowania teledetekcji satelitarnej do kompleksowych badań – w stopniu dotychczas nie spotykanym – stanów i funkcjonowania ekosystemów mórz zaliczanych do akwenów optycznego rodzaju drugiego (Case 2 waters). W moim odczuciu stanowi znaczący wkład w rozwój współczesnej wiedzy oceanologicznej.

---

<sup>2</sup> SATBAŁTYK POIG, nr POIG.01.01.02-22-011/09, "Satelitarna kontrola środowiska Morza Bałtyckiego (SatBałtyk)". Projekt realizowany przez Konsorcjum Naukowe SATBAŁTYK w skład którego wchodzi: Instytut Oceanologii Polskiej Akademii Nauk (koordynator), Instytut Oceanografii Uniwersytetu Gdańskiego, Instytut Fizyki Akademii Pomorskiej w Słupsku oraz Instytut Nauk o Morzu Uniwersytetu Szczecińskiego

## 5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych (artystycznych)

Jestem absolwentem Wydziału Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Gdańskiego, który ukończyłem w 1988 roku. Już w czasie studiów interesowałem się zagadnieniami teledetekcji. Swoją wiedzę w tym zakresie poszerzałem w czasie studiów podyplomowych na kierunku Fotografii i Informatyki Obrazowej na Uniwersytecie Warszawskim (1988-1989), gdzie zagadnienia teledetekcji satelitarnej były jednymi z istotniejszych elementów programu kształcenia.

Bezpośrednio po studiach, w 1988 roku podjąłem pracę w Instytucie Oceanologii PAN w Sopocie, w Pracowni Teledetekcji Morza, Zakładu Fizyki Morza, kierowanej w tamtym okresie przez prof. dr hab. Jerzego Olszewskiego (wówczas doktora), w której to Pracowni pracuję do dnia dzisiejszego, przejmując funkcję jej kierownika w 2006 roku, którą pełnię do chwili obecnej, a od roku 2014 równocześnie z funkcją kierownika Zakładu Fizyki Morza.

### *Badanie charakterystyk spektralnych strumieni radiacji oddolnej i odgórnej w środowisku morskim*

Już w pierwszym okresie pracy, zatrudniony jako pracownik naukowo-techniczny, rozpocząłem działania zmierzające w kierunku organizacji bazy technicznej niezbędnej do rozpoczęcia prac związanych z teledetekcją morza i zagadnieniami pokrewnymi. Z powodu braku odpowiedniego zaplecza technicznego oraz ograniczonych środków finansowych, pierwsze prace w tym kierunku skierowałem w stronę najpierw opracowania koncepcji, a później budowy spektrofotometru morskiego, który mógłby być wykorzystywany w pomiarach radiacji oddolnej.

W pracach tych, zarówno koncepcyjnych jak i wykonawczych, należało uwzględnić specyficzne uwarunkowania dotyczące pomiarów radiacji oddolnej w morzach śródlądowych, do których zaliczany jest Bałtyk oraz w wodach przybrzeżnych. Wspomniane uwarunkowania to stosunkowo wysoka absorpcja optycznie znaczących składników wody morskiej, co powoduje zwiększony efekt samozacieniania przez radiometr o skończonej średnicy umieszczony w toni wodnej i mierzący radiację oddolną.

Przy wsparciu zespołu Pracowni Teledetekcji Morza IO PAN, zbudowano siedmio-kanalowy, morski spektrofotometr, składający się z dwóch mierników: radiacji oddolnej i oświetlenia odgórnego, który był wykorzystywany jako miernik referencyjny. Przyrząd ten dostosowany był zarówno do pomiarów optycznych tuż pod powierzchnią wody jak, i pomiarów nad jej powierzchnią. W skonstruowanym radiometrze udało się osiągnąć wysoką częstotliwość pomiarów radiacji, co pozwoliło na zastosowanie nowej, dostosowanej specjalnie dla takiego akwenu, metodyki pomiarowej. (patrz załącznik 3, rozdz. I-B, pozycja A40).

Po opracowaniu i przetestowaniu metodyki przeprowadzania pomiarów i interpretacji danych uzyskanych za pomocą zbudowanego radiometru przystąpiłem do intensywnego pozyskiwania danych, głównie w czasie rejsów badawczych r/v Oceania na Bałtyku. W skład zbieranych danych wchodziły zarówno pomiary radiometryczne w toni wodnej, jak i pomiary ilościowe wybranych komponentów wody morskiej takich jak stężenie chlorofilu *a*, stężenie zawiesiny oraz zawartości CDOM określane umownie przez jej współczynnik absorpcji dla długości fali 400 nm.

Równoległe, dzięki pozyskanym środkom finansowym zakupiłem renomowany spektrofotometr morski MER-2040 (Biospherical Instruments), który w pierwszej kolejności posłużył do zweryfikowania danych pozyskanych siedmio-kanalowym spektrofotometrem, a następnie w latach 1996-2008 stał się podstawowym instrumentem pozyskiwania danych radiometrycznych w IO PAN, nie tylko na potrzeby badań związanych z teledetekcją, ale również do badania pionowych rozkładów światła w toni wodnej.

Zebrany materiał został wykorzystany do opracowania odpowiednich modeli i algorytmów wiążących stężenie wybranych komponentów wody morskiej z rozpraszaniem i absorpcją a także z reflektancją. Opracowane zagadnienia przyczyniły się do rozszerzenia naszej wiedzy i lepszego zrozumienia biooptycznych właściwości Morza Bałtyckiego i innych analogicznych akwenów. Efektem tych działań oprócz kilku publikacji i wystąpień konferencyjnych (patrz załącznik 3, rozdz. I-B, pozycje A7, A9, A10, A13, A37, A39) było opracowanie mojej rozprawy doktorskiej i jej obrona w 1999 roku.

Poza systematycznym gromadzeniem materiału eksperymentalnego i pracami teoretycznymi związanymi z jego analizą, w swoich badaniach z tamtego okresu, kontynuowałem badania nad metodyką pomiarów radiometrycznych, co między innymi doprowadziło do budowy kolejnego radiometru. Był to dwunasto-kanałowy radiometr, dedykowany tylko do pomiarów znad powierzchni, przeprowadzanych m.in. podczas ruchu statku. Efektem naukowym tych badań było kilka prac na temat metodyki pomiarów (patrz załącznik 3, rozdz. I-B, pozycje A15, A20, A40), w których proponowane są nowe instrumenty i metody do pomiarów parametrów radiacyjnych niezbędnych do wyliczania reflektancji lub analizowane są cechy spektrofotometrów morskich wpływające w sposób istotny na dokładność pomiarów (patrz załącznik 3, rozdz. I-B, pozycja A20).

Zebrana i ciągle rozszerzana baza danych empirycznych zawierająca zarówno pomiary radiacyjne jak i parametry określające ilości naturalnych składników wody morskiej, posłużyła do opracowania nie tylko szeregu algorytmów pozwalających na zdalne określanie ilości wybranych komponentów wody morskiej (patrz załącznik 3, rozdz. I-B, pozycje A10, A11, A13, A39), ale też modeli opisujących związki pomiędzy charakterystykami światła i wybranymi składnikami wody morskiej (patrz załącznik 3, rozdz. I-B, pozycje A12, A37). Znacząco przyczyniło się to do rozszerzenia naszej wiedzy o środowisku morskim Bałtyku i zachodzących w nim procesach związanych ze światłem i jego rozkładami w toni wodnej.

Z biegiem lat, głównie dzięki wielu projektom badawczym którymi kierowałem lub w których uczestniczyłem (patrz załącznik 3, rozdz. I-I, pozycja P1-P22) oraz dzięki szerokiej współpracy międzynarodowej, udało mi się znacznie rozszerzyć posiadaną aparaturę badawczą o prawie wszystkie typy i rodzaje, komercyjnych i nie tylko, spektrofotometrów przeznaczonych do badań morskich.

Ważnym krokiem w mojej działalności naukowej było rozpoczęcie badań spektralnych charakterystyk radiacji oddolnej i oświetlenia odgórnego z wysoką rozdzielczością spektralną. Badanie strumienia oddolnego z wysoką rozdzielczością spektralną, pozwalającą na pomiary subtelniejszych charakterystyk widma radiacji, zaowocowało rozpoczęciem badań w dwóch kierunkach naukowych. Pierwszym była identyfikacja kultur fitoplanktonu w toni wodnej na podstawie subtelnych charakterystyk widma radiacji oddolnej. Zadaniem tego pionierskiego kierunku badawczego jest przygotowanie podstaw teoretycznych i metodyki dla przyszłych skanerów satelitarnych, z których część z pewnością będzie pracowała z wysoką rozdzielczością spektralną. Zagadnienia te realizowane są m.in. w ramach rozprawy doktorskiej pisanej pod moją opieką (jako promotora pomocniczego) na Uniwersytecie Gdańskim przez Panią mgr Monikę Woźniak. Wspólne badania prowadzone są od 2010 roku. Osiągnięte już przez nas rezultaty, pokazujące potencjalne możliwości detekcji wybranych kultur fitoplanktonu w Morzu Bałtyckim, prezentowano na kilku konferencjach i opublikowano w materiałach konferencyjnych (patrz załącznik 3, rozdz. I-B, pozycje A56, A60 i rozdz. III.B p.64, 68).

Drugim kierunkiem badawczym jaki zapoczątkowany został w tym okresie, są prowadzone przeze mnie, we współpracy z Akademią Morską w Gdyni, badania wpływu emulsji substancji ropopochodnych w przypowierzchniowej warstwie wody na strumienie radiacji oddolnej i reflektancję. Tematykę tę realizuję wspólnie z doktorantką z Akademii Morskiej w Gdyni, która pod moją opieką naukową przygotowuje się do otwarcia przewodu

doktorskiego. Dotychczasowe wyniki zostały przedstawione w kilku publikacjach i zaprezentowane na kilku konferencjach międzynarodowych. Wykazano w nich istotne zmiany w widmie reflektancji wywołane określonymi stężeniami wybranych substancji ropopochodnych, co w przyszłości może pozwolić na ich teledetekcję nawet przy ich mniejszych stężeniach (patrz załącznik 3, rozdz. I-B, pozycje A35 A44,A63 i rozdz. III-B p.72, 78).

W chwili obecnej IOPAN, w dużej mierze dzięki mojej aktywności na polu radiometrii morskiej, jest jedną z najlepiej wyposażonych w najnowocześniejszą aparaturę do badań pozornych właściwości toni wodnej placówek w Europie a także plasuje się pod tym względem w czołówce światowej. Pozyskana dzięki tym pomiarom wiedza o pozornych właściwościach optycznych wód Bałtyku, która przyczyniła się do lepszego zrozumienia jego środowiska, stawia nas w czołówce instytucji europejskich zajmujących się optyką morza a nawet wśród "zauważalnych" instytucji w skali światowej.

#### *Badania optycznych uwarunkowań fotosyntezy w środowisku morskim*

Równoległe z badaniami charakterystyk spektralnych strumieni radiacji oddolnej i odgórnej w środowisku morskim, swoje zainteresowania naukowe skoncentrowałem także na badaniu optycznych uwarunkowań fotosyntezy w morzu. Zainteresowanie to zainicjowane zostało w wyniku współpracy z grupą profesora Bogdana Wozniaka z IO PAN, w ramach której, aktywnie uczestniczyłem w badaniach zagadnień związanych z modelowaniem dopływu światła słonecznego do akwenów morskich i jego wykorzystaniem na energetyczne zasilanie ekosystemów poprzez proces fotosyntezy.

W pracach tych przydatne okazało się moje doświadczenie w przeprowadzaniu i analizie pomiarów radiometrycznych w środowisku morskim. Na potrzeby tych badań opracowałem metodykę i kod numeryczny do wyliczania naturalnych pól oświetleń PAR (z ang. Photosynthetically Active Radiation) na podstawie pomiarów radiometrami wielokanałowymi i piranometrami.

W wyniku tej współpracy, kontynuowanej i zacieśnianej do dnia dzisiejszego, powstało wiele nowych pomysłów i rozwiązań w zakresie badanego przedmiotu które zostały przedstawione w wielu oryginalnych publikacjach i wystąpieniach konferencyjnych z czego ponad 7 z moim współautorstwem (m.in. patrz załącznik 3, rozdz. I-B, pozycje A10, A11, A12 i rozdz. III-B p.28,29,40,41). Wśród całego szeregu poruszanych zagadnień warte odnotowania jest m.in. opisanie wpływu naturalnych pól oświetleń PAR w toni wodnej na charakterystyki barwników fitoplanktonu w Morzu Bałtyckim (patrz załącznik 3, rozdz. I-B, pozycja A29). W nurcie tej działalności powstały także prace, które wykorzystują wiedzę z zakresu fotosyntezy w środowisku morskim i "zbliżają" się do mojego głównego nurtu naukowego, jakim jest teledetekcja, np. analiza możliwości wykorzystania naturalnej fluorescencji chlorofilu *a* do jego teledetekcji (patrz załącznik 3, rozdz. I-B, pozycja A11).

Szereg powstałych w wyniku tej współpracy publikacji poświęconych zostało produkcji pierwotnej, ze szczególnym uwzględnieniem zrozumienia i opisanie procesów związanych z wyjątkowymi warunkami biooptycznymi panującymi w Morzu Bałtyckim. Praktycznym zastosowaniem części rezultatów uzyskanych w tym zakresie badań, w połączeniu z tematyką przedstawioną w moim głównym osiągnięciu naukowym, była realizacja dwóch znaczących projektów badawczych: *DESAMEBM* i *SatBałtyk*, wyszczególnionych już w części 4c niniejszego autoreferatu. Pierwszy z nich przygotował teoretyczne podstawy do opracowania szeregu modeli i algorytmów, pozwalających na wyliczenie na podstawie informacji mierzonej zdalnie, całego szeregu istotnych parametrów środowiska morskiego. Celem drugiego projektu, realizowanego obecnie, który niejako jest kontynuacją i rozszerzeniem *DESAMBEM* jest udoskonalenie tych modeli, ich weryfikacja i wprowadzenie do powszechnego użycia, poprzez budowę operacyjnego systemu, który regularnie będzie

dostarczał informacji dotyczących kilkudziesięciu parametrów niezbędnych do pełnej oceny kondycji i zmian środowiska morskiego Bałtyku.

### Badania fluktuacji oświetlenia pod sfalowaną powierzchnią morza

Kolejnym zagadnieniem realizowanym w ramach mojej aktywności naukowej, w którym mogę zaprezentować istotne osiągnięcia naukowe, są badania krótkookresowych fluktuacji naturalnego oświetlenia słonecznego pod sfalowaną powierzchnią morza, określanych często jako błyski podwodne. Zjawisko błysków, powstałych w wyniku ogniskowania promieniowania słonecznego przez fale morskie, jest szczególnie intensywne na niewielkich głębokościach pod powierzchnią morza.

Badania nad błyskami podwodnym rozpoczęte zostały m.in. w IO PAN, przez profesora Jerzego Derę, który na przełomie lat sześćdziesiątych i siedemdziesiątych opublikował pierwsze wyniki badań na ten temat (Dera i Gordon, 1968, Snyder i Dera, 1970). Prace te kontynuowane były następnie przez profesora Dariusza Stramskiego (w owym czasie magistranta, a później doktoranta profesora Dery), w ramach jego prac magisterskiej i doktorskiej (Stramski i Dera, 1988). W tamtym okresie były to prace pionierskie na skalę światową, wykonywane specjalnymi instrumentami pomiarowymi, których wyniki jeszcze przez wiele lat pozostały jedynymi i ciągle aktualnymi w tej dziedzinie. Ograniczone w tamtym czasie możliwości techniczne w zakresie detekcji krótkookresowych fluktuacji światła, prawdopodobnie zatrzymały dalszy rozwój tych badań.

Idea powrotu do badań nad błyskami podwodnymi powstała podczas mojego pobytu u prof. Stramskiego w Scripps Institution of Oceanography UCSD w roku 2005. Dzięki jego rekomendacji, otrzymałem wraz z nim zaproszenie do udziału w projekcie RaDyO, fundowanym przez Biuro Badań Marynarki Wojennej USA (Office of Naval Research, ONR). Projekt RaDyO grupował badaczy z przodujących ośrodków zajmujących się pomiarami i modelowaniem zjawisk związanych ze sfalowaną powierzchnią morza oraz pomiarami optycznymi pod jego powierzchnią. Zaproszenie mnie do udziału w pracach tego zespołu, poczytuję sobie jako duże wyróżnienie i uznanie mojego dorobku w dziedzinie radiometrii morskiej.

Podstawowym moim zadaniem w projekcie RaDyO było skonstruowanie nowatorskiego urządzenia badawczego oraz wykonanie za jego pomocą pomiarów fluktuacji oświetlenia i radiacji słonecznej pod sfalowaną powierzchnią morza.

Środki pozyskane z ONR pozwoliły na rozpoczęcie budowy tego unikalnego na skalę światową instrumentu badawczego w IO PAN (patrz załącznik 3, rozdz. I-B, pozycja A25). Równocześnie aplikowałem i otrzymałem też grant badawczy z Ministerstwa Nauki na wsparcie budowy tego instrumentu i późniejszych badań wykonywanych za jego pomocą.

Skonstruowany radiometr morski, nazwany roboczo "Jeżem" (w angielskiej wersji "Porcupine") składał się z 26 detektorów światła, które można było dowolnie orientować w przestrzeni a także rekonfigurować do pomiarów oświetlenia lub radiacji. Dzięki zastosowaniu nowatorskich wzmacniaczy logarytmicznych i specjalnie na potrzeby tego urządzenia opracowanych i wykonanych fotoogniw krzemowych detektory "Jeża" pozwalały na bardzo szybki pomiar fluktuacji pola światła z częstotliwością nawet ponad 1 kHz i z dynamiką pozwalającą rejestrować sygnał w zakresie ponad sześciu rzędów wielkości. Każdy detektor wyposażono w filtr interferencyjny, co pozwoliło na wykonywanie pomiarów w różnych zakresach spektralnych światła. Całość uzupełniono o szybki miernik ciśnienia i kompas elektroniczny wraz ze wskaźnikami odchylenia od pionu, a także układ mechaniczny orientujący miernik w toni wodnej i pozwalający na utrzymanieżądanego azymutu. Żaden inny z obecnie dostępnych instrumentów do pomiarów światła w morzu nie ma takich możliwości.



Pierwsze eksperymenty pomiarowe z wykorzystaniem nowego urządzenia, których głównym celem była charakterystyka czasowo-częstotliwościowa fluktuacji światła w danym punkcie przestrzeni w toni wodnej, były prowadzone zarówno na otwartym oceanie, w latach 2008 -2009 z platformy badawczej FLIP jak i w strefie przybrzeżnej, w roku 2009 z platformy Aqua Alta Oceanographic Tower na Morzu Adriatyckim.

Opis zjawisk i efektów odkrytych dzięki eksperymentom w ramach projektu RaDyO opublikowałem w pracy A25 (patrz załącznik 3, rozdz. I-B), gdzie zaprezentowany został także zbudowany przez nas instrument. Dzięki zastosowaniu nowocześniejszych układów detekcji, w czasie przeprowadzanych eksperymentów zaobserwowano skupienia energii słonecznej pod sfalowaną powierzchnią morza o znacznie większych intensywnościach, niż te znane wcześniej i opisane dotychczas w literaturze przedmiotu. Zmierzone w czasie pierwszych eksperymentów fluktuacje oświetlenia przewyższały ponad dwudziestokrotnie średni poziom oświetlenia na danej głębokości. Można spodziewać się, że w bardziej sprzyjających warunkach takie skupienia energii mogą być jeszcze większe, niż te które napotkaliśmy w czasie naszych dotychczasowych eksperymentów. Zdobyte własne doświadczenie poparte publikacjami naukowym z dziedziny, pokazuje, że najsilniejsze efekty ogniskowania światła mają miejsce przy lekko sfalowanej powierzchni morza, przy słabych wiatrach (od 2 do 5m/s), niskim stopniu dyfuzyjności oświetlenia powierzchni morza (poniżej 30-40%) i przy czystej bezchmurnej atmosferze i stosunkowo wysokim położeniu słońca nad horyzontem (kąąt zenitalny mniejszy niż 30-40 °) oraz oczywiście przy małym zmętnieniu wody morskiej.

Zgromadzony w czasie przeprowadzonych eksperymentów materiał badawczy wykorzystany został także w wielu publikacjach i wystąpieniach konferencyjnych. Prezentowane tam rezultaty znacząco rozszerzyły naszą wiedzę o charakterystykach światła pod sfalowaną powierzchnią morza (patrz załącznik 3, rozdz. I-B, pozycje A23, A25, A26, A31).

Pozyskane za pomocą "Jeża" dane, przyczyniły się też znacząco do rozwijania modelowania numerycznego sfalowanej powierzchni morza, stanowiąc unikalne dane pomiarowe do weryfikacji tych modeli. Wyniki analizy statystycznej materiału badawczego uzyskanego w czasie eksperymentów RaDyO zostały porównane z wynikami analizy statystycznej danych modelowych, wygenerowanych przez grupę profesora Kattawara z Texas University pracującą nad modelem sfalowanej powierzchni morza. Obie statystyki okazały się bardzo zbliżone do siebie, co było potwierdzeniem poprawności zastosowanego w modelu przybliżenia złożonej struktury sfalowanej powierzchni morza (patrz załącznik 3, rozdz. I-B, pozycja A23). Wydaje się też, że zgodność tych dwóch statystyk potwierdza jednocześnie jakość dostarczanych przez zbudowany radiometr danych.

Budowa tego oryginalnego urządzenia, które wniosło tak istotny wkład w rozwój badań w tej dziedzinie, spotkało się z dużym zainteresowaniem mediów. Instrument prezentowany był w wielu materiałach filmowych i prasowych, w tym na antenie telewizji ogólnopolskiej w serwisach emitowanych w czasie największej oglądalności. Zbudowany morski spektrofotometr "Jeż" wytypowany został także do prezentacji w publikacji *Selected Research Findings from the Institutes of the Polish Academy of Sciences* wydanej przez Polską Akademię Nauk w 2008 roku.

Doświadczenia zdobyte przy budowie i wykorzystaniu podwodnego "Jeża", stanowiły podstawę konstrukcji kolejnego takiego instrumentu w ramach następnego projektu, tym razem finansowanego przez Amerykańską Agencję Nauki (NSF). Instrument ten, noszący roboczą nazwę "SQUID", przeznaczony był do obserwacji przestrzennych charakterystyk fluktuacji oświetlenia pod sfalowaną powierzchnią morza. Pierwszy eksperyment z jego użyciem przeprowadzony został na Catalina Island (wschodni Pacyfik ) i potwierdził, spełnienie wszystkich wymogów jakie postawiono przed "SQUID"em. Niestety w chwili

obecnej z powodu ograniczeń budżetowych w USA, kolejne eksperymenty z jego użyciem zostały przesunięte w czasie na kolejne lata. Jednakże same analizy danych pomiarowych z obu przyrządów są nadal prowadzone zarówno przeze mnie w kraju jak też przez moich partnerów w USA.

### Metody optyczne w badaniach biologicznych i ekologicznych

Podstawowe zagadnienia i problemy optyki morza, w tym badania zmienności przestrzennej i czasowej parametrów optycznych w różnych kontekstach, a w szczególności wykorzystane potencjału optyki morza w innych dziedzinach oceanografii jest kolejnym obszarem badawczym, w którym mogę zaprezentować swoje osiągnięcia naukowe.

Warunki optyczne panujące w toni wodnej determinują funkcjonowanie wielu organizmów morskich, dla których jednym z ważniejszych aspektów funkcjonowania jest przezroczystość wody i wynikające z niej warunki postrzegania lub bycia postrzeganym. Między innymi, byt wielu drapieżników, zależy bezpośrednio od tego czy będą w stanie dostrzec potencjalną ofiarę. W wielu przypadkach postępujące zmiany klimatyczne czy eutrofizacja danego zbiornika morskiego istotnie wpływają na zmianę tych warunków oddziałując na wiele organizmów żyjących czy też żywiących się w tym środowisku.

Przykładem takiego systemu jest ekosystem arktyczny. Przedmiotem badań jednego z projektów w jakim uczestniczyłem (Alkekonge) był wpływ zmian parametrów środowiskowych w wyniku intensywnego topnienia lodowców, na warunki życia alczyka, małego ptaka który jest jednym z istotniejszych elementów ekosystemu wysp Svalbard w Arktyce europejskiej.

Pomiary terenowe przeprowadzane w ramach tego projektu, oprócz typowych badań hydrograficznych i pobieranych prób zooplanktonu stanowiącego pokarm alczyków, obejmowały również wszechstronne pomiary optyczne zarówno pozornych jak i rzeczywistych właściwości optycznych toni wodnej. Analiza zebranych danych miała pokazać jak zmieniają się istotne dla alczyka parametry ekosystemu i czy w związku z postępującymi zmianami klimatycznymi, istnieje potencjalne zagrożenia dla jego przetrwania. W celu oceny tych czynników, zaproponowałem parametr łączący zasięg widzialności z ilością zooplanktonu. Parametr ten, hipotetycznie związany z ilością zooplanktonu widzianego przez alczyka i równocześnie silnie determinowany przez właściwości optyczne wody morskiej, w połączeniu z innymi "typowymi" parametrami jak np. temperatura czy zasolenie wody, pozwolił na pełniejsze wytłumaczenie przestrzennego rozmieszczenia obszarów żerowania alczyków (patrz załącznik 3, rozdz. I-B pozycja A32).

W kolejnej pracy poświęconej analizie środowiska Svalbardu (artykuł p.t. *Fine scale zooplankton vertical distribution in relation to hydrographic and optical characteristics of the surface Arctic waters*- obecnie w druku), dzięki zaproponowaniu właściwych parametrów optycznych, które mogą bezpośrednio określać istotne warunki środowiskowe dla zooplanktonu lub być powiązane z takim warunkami, udało się znacznie pełniej opisać i zrozumieć zmienność przestrzennego rozmieszczenia zooplanktonu w badanym akwenie. Odpowiednio dobrane przeze mnie parametry optyczne wykorzystane zostały również w innej pracy poświęconej analizie i zrozumieniu tego środowiska (patrz załącznik 3, rozdz. I-B pozycja A36).

W wymienionych powyżej pracach wykazano, że pełna analiza środowiska morskiego czy wybranych jego elementów, nawet takich które w łańcuchu troficznym są oddalone od fotosyntezy, powinna uwzględniać też jego charakterystyki optyczne, i to nie tylko te pozorne, jak ilość światła, która ma bezpośrednie przełożenie na proces fotosyntezy i produkcję materii organicznej stanowiącej pokarmu dla wielu organizmów będących wyżej w łańcuchu troficznym, ale również te rzeczywiste, związane np. z przezroczystością toni

wodnej. Jest to o tyle istotne, że dotychczas, tak kompleksowe postrzeganie analiz środowiska morskiego przez niektórych badaczy nie było powszechne.

### Metody satelitarne w badaniach biologicznych i ekologicznych

Wiedzę i doświadczenie zdobyte podczas analiz i interpretacji danych z radiometrów satelitarnych pracujących w zakresie optycznym widma elektromagnetycznego, z czasem rozszerzyłem na pozyskiwanie danych z radiometrów termalnych, pozwalających na odtworzenie przestrzennego zróżnicowania temperatury powierzchni mórz i oceanów.

Interpretacja i analiza przestrzennego zróżnicowania rozkładów temperatury powierzchniowej, równoległe z analizą danych z zakresu widzialnego, okazała się niezmiernie istotna przy badaniach i interpretacji wielu zjawisk epizodycznych, jak np. zakwity fitoplanktonu (patrz załącznik 3, rozdz. I-B, pozycja A30) czy rozptyw wód powodziowych do Zatoki Gdańskiej (patrz załącznik 3, rozdz. I-B, pozycja A22).

Opracowane przeze mnie na podstawie danych satelitarnych, przestrzenne rozkłady temperatury powierzchniowej z rejonu Spitsbergenu i ich interpretacja, okazały się istotnym elementem na drodze do zrozumienia zachowania alcyków, związanego ze zdobywaniem pokarmu zarówno w okresie lęgowym jak i poza nim (patrz załącznik 3, rozdz. I-B, pozycja A36). Wykorzystanie tych danych okazało się kluczowe dla zrozumienia procesów jakim podlegają wybrane elementy ekosystemu. Bez tej wiedzy byłoby to znacznie utrudnione lub wręcz niemożliwe.

### Współpraca zagraniczna

Wybrana przeze mnie tematyka badawcza, związana w pierwszym okresie z radiometrią morską wykorzystywaną do badań tworzących podstawy teledetekcji morza nie była do czasu rozpoczęcia moich badań rozwijana w intensywny sposób w żadnym innym krajowym ośrodku badawczym. Stąd jedyną możliwością wymiany doświadczeń i współpracy z innym naukowcami w tej dziedzinie, była współpraca z zagranicznymi ośrodkami badawczymi.

Pierwsze zawodowe kontakty zagraniczne nawiązałem w czasie letniej szkoły EAISO Intensive Course on Processes in the Euphotic Zone (Universitat des Illes Balears) w Hiszpanii w 1992. W czasie kursu poznałem czołowych przedstawicieli optyki i biofizyki morza, co w istotny sposób wpłynęło na ukierunkowanie moich przyszłych zainteresowań naukowych. W późniejszym okresie, z racji bogatej tradycji współpracy IO PAN z Rosyjską Akademią Nauk, brałem udział w kilku ekspedycjach na statkach rosyjskich (między innymi ponad 3 miesięczna Atlantycka ekspedycja naukowa na statku Vitiaz w 1992r. czy międzynarodowy rejs badawczy na statku Akwanaf w 1997 r.). W czasie tych rejsów wykonywałem przede wszystkim pomiary radiometryczne, ale też byłem zaangażowany w wiele innych badań, co w znaczący sposób wpłynęło na poszerzenie moich horyzontów badawczych.

Kolejnym krokiem w kierunku poszerzania mojej współpracy z ośrodkami zagranicznymi, było zatrudnienie w okresie od 1998 do 2000 w Southampton Institute (SI) i Southampton Oceanographic Centre (SOC, obecnie National Oceanographic Centre). Obie placówki są uznawane za wiodące w dziedzinie badań związanych z morzem nie tylko w Wielkiej Brytanii ale też na świecie. Mój pobyt w Southampton miał częściowo charakter stażu doktorskiego. Pracowałem głównie nad tematami badawczymi związanymi z projektem Biocolor, zbliżonymi w tematyce do zakresu moich badań w kraju. Głównie były to zagadnienia związane ze zrozumieniem i interpretacją związków pomiędzy składnikami wody morskiej, a spektralnymi charakterystykami radiacji wychodzącej z toni wodnej w warunkach naturalnych. Pracowałem też przy konstrukcji i później interpretacji danych

z wieloczułnikowej sondy optycznej, mierzącej parametry z wyższą rozdzielczością spektralną - SUMOSS (patrz załącznik 3, rozdz. III-B p.33). Zdobyte tam doświadczenia w pracy z morskimi miernikami rejestrującymi w pełnej rozdzielczości spektralnej okazały się bardzo przydatne w przyszłości, kiedy w IO PAN zaczęliśmy również wykorzystywać spektrofotometri morskie pracujące z taką rozdzielczością spektralną.

Efektami mojej działalności w Wielkiej Brytanii była między innymi publikacja na temat 'contrasting Case 2 waters', przedstawiona w niniejszym wniosku jako jeden z elementów głównego dorobku oraz inne publikacje i wystąpienia konferencyjne, w większości poświęcone modelom biooptycznym środowiska morskiego i analizie danych dostarczanych przez spektrofotometri pracujące z wyższą rozdzielczością spektralną (patrz załącznik 3, rozdz. I-B, pozycja A50,A51 i rozdz. III-B p.33, 38).

Nawiązane tam kontakty zaowocowały współpracą w ramach kolejnych projektów badawczych (patrz załącznik 3, rozdz. I-I, pozycja P2,) i wspólnych eksperymentach czy pobytach naukowych w państwach zagranicznych. Kolejną okazją do zacieśnienia współpracy naukowej z instytucjami z Wielkiej Brytanii, było dwukrotnie przyznane mi stypendium naukowego z Royal Society w latach 2000 i 2003. W czasie pierwszego stypendium przebywałem w Plymouth Marine Laboratory gdzie rozszerzyłem swoje umiejętności i zdobyłem nowe doświadczenia w zakresie przetwarzania i interpretacji danych satelitarnych. W czasie drugiego stypendium z Royal Society powróciłem do Southampton, gdzie kontynuowałem pracę na specyfiką algorytmów satelitarnych w różnych wodach drugiego rodzaju.

W roku 2002 rozpocząłem trwającą do dnia dzisiejszego, współpracę ze Scripps Institution of Oceanography University of California San Diego, USA, z grupą profesora Stramskiego. W czasie mojego pierwszego pobytu w Scripps pracowałem nad walidacją algorytmów lokalnych wykonywaną w ramach grantu prof. Stramskiego, finansowanego przez NASA. Kolejne pobyty w Scripps były związane z badaniami nad zdalnym określaniem cząsteczkowej materii organicznej w morzach i oceanach (patrz załącznik 3, rozdz. III.B p. 44), a następnie w ramach projektu RaDyO, nad badaniami i opisem fluktuacji oświetlenia pod sfalowaną powierzchnią morza.

Projekt RaDyO był również okazją do nawiązania współpracy z wieloma innym instytucjami z USA, wśród których wartą wymienienia w tym miejscu jest współpraca z grupą prof. Kattawara z Texas University, która zajmowała się modelowaniem sfalowanej powierzchni morza. Efektem tej bardzo kształcącej i owocnej współpracy są wspólne publikacje (patrz załącznik 3, rozdz. I-B, pozycje A23,A31). W tym okresie nawiązałem też bliższe kontakty naukowe z prof. Zhong-Ping Lee z Naval Research Laboratory, Stennis Space Center, Mississippi, USA, w ramach której wymienialiśmy się doświadczeniami i wiedzą na temat metod teledetekcji morza i opracowywania algorytmów. W wyniku tej współpracy, wspólnie z kilkoma naukowcami z innych amerykańskich ośrodków, opublikowaliśmy prace na temat różnych metod teledetekcji współczynników dyfuzyjnego osłabiania oświetlenia w morzach i oceanach (patrz załącznik 3, rozdz. I-B, pozycja A19). Współczynnik ten jest jednym z podstawowych parametrów określających warunki świetlne w naturalnych akwenach. Praca ta do dzisiejszego dnia jest często cytowana i doceniana przez środowisko naukowe zajmujące się tą dziedziną.

Szerokie kontakty międzynarodowe jakie zdobyłem w czasie spotkań i eksperymentów projektu RaDyO przełożyły się na moje zaangażowanie w kolejny amerykański projekt, tym razem finansowany przez National Science Fundation . Dynamic Camouflage in Benthic and Pelagic Cephalopods dotyczył zjawisk kamuflażu organizmów morskich, a w szczególności imitowania na swojej skórze naturalnych fluktuacji oświetlenia zewnętrznego, dzięki czemu organizmy te stają się niewidoczne dla potencjalnych drapieżników. W ramach tego projektu

brałem udział w kilku ekspedycjach badawczych w Zatoce Kalifornijskiej i na Pacyfiku. Bogaty materiał pomiarowy uzyskany w czasie tych eksperymentów jest ciągle analizowany, a uzyskane wyniki zostaną wkrótce zaprezentowane w literaturze naukowej.

Moja aktywność w projekcie *Dynamic Camouflage in Benthic and Pelagic Cephalopods* zaowocowała również nawiązaniem współpracy naukowej z prof. Williamem F. Gilly ze Stanford University, USA. W wyniku tej współpracy uczestniczę obecnie w przygotowywaniu wniosku o finansowanie kolejnego projektu, poświęconego kontynuacji badań nad kamuflażem organizmów morskich. Moją rolą w projekcie będzie zbadanie i opisanie charakterystyk fluktuacji oświetlenia na różnych głębokościach i w różnych środowiskach morskich.

Równoległe z moją współpracą z ośrodkami naukowymi z USA, inicjowałem też współpracę z wieloma instytucjami naukowymi w Europie. W pierwszej kolejności przebiegała ona w obrębie państw bałtyckich, początkowo z Deutsches Institut für Luft- und Raumfahrt, Berlin, Germany. Jej tematem były wspólne badania nad algorytmami satelitarnymi dla Bałtyku. Została ona sformalizowana poprzez podpisanie umowy pomiędzy naszymi instytucjami, która była w kolejnych latach przedłużana. W ramach tej współpracy przygotowano m.in. projekt typu CAT-1 do Europejskiej Agencji Kosmicznej, dzięki któremu uzyskaliśmy dostęp do danych skanera MERIS, które w tamtym czasie były limitowane dla większości instytucji.

Analogiczną formą współpracy, też sformalizowanej podpisaniem stosownej umowy między instytucyjami, była współpraca z Tiitem Kutserem z Marine Institute, University of Tartu, Tallinn, Estonia. W ramach współpracy organizowane były wspólne rejsy badawcze i przygotowywane wspólne aplikacje do projektów europejskich.

W 2003 roku zostałem zaproszony do udziału w projekcie *Validation of algorithms for chlorophyll retrieval from satellite data for the Baltic Sea area*, zamówionym i finansowanym przez HELCOM, a koordynowanym przez Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, Ispra, Italy. Od tego czasu datuje się też moja współpraca z grupą dr Giuseppe Zibordiego z Joint Research Centre w Isprze. Kolejnym etapem tej współpracy było podpisanie umowy na zorganizowanie wspólnych kampanii pomiarowych na Bałtyku, w czasie których oprócz pozyskiwania danych mogliśmy wymieniać doświadczenia w zakresie metodyki pomiarów podsatelitarnych. W 2005 roku odbyłem krótki staż w Joint Research Centre w Isprze (Włochy) w czasie którego badałem parametry kalibracyjne radiometrów morskich ("immersion factors") wykorzystywanych w ostatnim okresie coraz powszechniej w morskich badaniach hyperspektralnych. Dzięki stałym i dobrym kontaktom z dr Zibordim, jeden z eksperymentów w ramach projektu RADyO mogłem przeprowadzić na Aqua Alta Oceanographic Tower na Adriatyku. W 2014 roku zostałem zaproszony do koordynowanego przez JRC eksperymentu porównującego metodyki i rezultaty z pomiarów podsatelitarnych wykonywanych aparaturą różnego typu. Do eksperymentu AAOT 2014 zaproszeni zostali przedstawiciele czterech instytucji europejskich i dwóch amerykańskich, wyróżniających się doświadczeniem i osiągnięciami w zakresie metodyki pomiarów radiometrycznych wykorzystywanych do szeroko pojmowanych badań "podsatelitarnych". Uwzględnienie mnie w gronie tych osób poczytuję sobie jako nobilitację i docenienie mojego dorobku.

Istotnym aspektem mojej współpracy międzynarodowej jest uczestnictwo w projektach badawczych integrujących naukowców i ośrodki badawcze z wielu krajów. Oprócz wspomnianych powyżej projektów, finansowanych przez agencje amerykańskie, uczestniczyłem aktywnie w ponad dwudziestu międzynarodowych projektach badawczych, finansowanych z różnych programów Unii Europejskiej, funduszy polsko –norweskich lub

innych funduszy europejskich. Wykaz tych projektów zawarty jest w załączniku nr 3 do niniejszego wniosku.

Wspomniane powyżej instytucje nie zamykają pełnej listy zagranicznych ośrodków badawczych i instytucji naukowych z którymi współpracowałem, i z którymi w większości ciągle utrzymuję stałe kontakty polegające na przeprowadzaniu wspólnych badań, aplikowaniu o granty naukowe czy organizowaniu spotkań i konferencji. Wśród tych wielu pozostałych instytucji należałoby wymienić m.in.: Department of Systems Ecology, Stockholm University, Sweden; Alfred-Wegener-Institute for Polar and Marine Research, Germany; Helmholtz-Zentrum Geesthacht Centre for Materials and Coastal Research, Germany; Institute for Chemistry and Biology of the Marine Environment, ICBM, Oldenburg, Germany; NERC Dundee Satellite Receiving Station, Wielka Brytania; P.P.Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, St.Petersburg, Rosja; Marine Hydrophysical Institute, Sevastopol, Ukraina; Norwegian Polar Institute, Fram Centre, Tromsø, Norway i inne.

Podjęmowane przeze mnie działania na polu badawczym, w tym dążenie do osiągnięcia w badaniach najwyższych standardów światowych wielokrotnie spotkały się z uznaniem ze strony międzynarodowej społeczności naukowej.

Przykładem takiego wyróżnienia, było zaproszenie mnie jako jedyne go przedstawiciela z dawnych państw Europy Środkowej do prac komitetu powołanego przez Marine Board i Europejską Fundację Nauki do opracowania raportu na temat stanu obecnego i perspektyw teledetekcji obszarów mórz szelfowych i zamkniętych. Prace zespołu przebiegały w latach 2006-2007, a ich efektem jest m.in. monografia p.t.: *Remote Sensing of Shelf Sea Ecosystems - State of the Art and Perspectives*, opublikowana w 2008 roku (patrz załącznik 3, rozdz. I-B, pozycja A43).

W 2007 roku zostałem też osobiście zaproszony do prac grupy roboczej GEO Inland and Nearshore Coastal Water Quality Remote Sensing Workshop, pod auspicjami Intergovernmental Group on Earth Observations w Genewie. Grupa ta, skupiająca aktywnych w dziedzinie teledetekcji satelitarnej naukowców z całego świata, została powołana do wypracowania stanowiska i zaleceń dotyczących rozwoju systemów obserwacji satelitarnej morskich obszarów przybrzeżnych i wód śródlądowych. Grupa ta działa do dnia dzisiejszego, obecnie w sposób mniej formalny, propagując idee związane z teledetekcją morza i lobbując w kierunku rozwoju systemów obserwacji satelitarnej.

Za istotny wyraz uznania przez międzynarodową społeczność naukową mojej działalności w dziedzinie radiometrii morskiej uważam wielokrotne zaproszenia do międzynarodowych specjalistycznych grup roboczych czy eksperymentów badawczych, dotyczących metodyki pomiarów radiometrycznych na morzu, takich jak m.in.: NASA Validation Workshop, organizowanym przez Ocean Biology and Biogeochemistry Calibration and Validation Office at GSFC, NASA, w dniach 7-12 grudnia 2010, w San Diego USA czy eksperyment Assessment of in situ Radiometric Capabilities for Coastal Water Remote Sensing Applications (ARC-2014).

Kolejnym wyrazem uznania mojego dorobku i pozycji w uprawianych dziedzinach nauki były liczne zaproszenia do prac komitetów naukowych wielu międzynarodowych konferencji (szczegóły w załączniku 3). Wielokrotnie też byłem proszony o wygłoszenie zamawianych referatów plenarnych na międzynarodowych konferencjach (patrz załącznik 3, rozdz. III C, p.1-10).

W ciągu ostatnich 10 lat byłem recenzentem wielu artykułów w następujących czasopiśmie naukowych: *Remote Sensing of Environment*, *Environmental Engineering and Management Journal*, *Oceanologia*, *International Journal of Remote Sensing*, *Journal of Applied Remote Sensing* oraz *Journal of Marine Systems*.

Wielokrotnie zwracano się do mnie z prośbą o ewaluację projektów badawczych zgłaszanych do różnych programów Unii Europejskiej (patrz załącznik 3, rozdz. III-O, p.1-4), co również poczytuję sobie jako wyraz uznania mojej pozycji naukowej na arenie międzynarodowej.

### Działalność dydaktyczna

W miarę swoich możliwości starałem się również znajdować czas na prowadzenie działalności dydaktycznej. Okazjonalnie, zajęcia poświęcone optyce morza dla studentów prowadziłem już podczas mojego pobytu w Southampton.

Pierwsze regularne zajęcia stanowił cykl wykładów z Optyki Morza dla studentów studium doktoranckiego IOPAN w 2007 roku.

Od roku 2012 do chwili obecnej, prowadzę już systematycznie wykłady z Podstaw Oceanografii Fizycznej dla studentów pierwszego roku studium doktoranckiego w IO PAN.

W latach 2012/2013, 2013/2014 prowadziłem wykłady i ćwiczenia z Teledetekcji środowiska morskiego dla studentów czwartego roku studiów I stopnia na kierunku Ochrona Środowiska na Wydziale Ekologii i Ochrony Środowiska w Wyższej Szkole Zarządzania w Gdańsku.

W latach 2010 i 2014 prowadziłem też zajęcia *Optical measurements in the sea water* w ramach międzynarodowych kursów w Asko Laboratory (Szwecja) organizowanych przez Stockholm University, Department of Systems Ecology, których uczestnikami byli studenci z krajów europejskich, a zajęcia praktyczne odbywały się głównie na statku r/v Oceania.

W ciągu mojej pracy w IOPAN, wielokrotnie pełniłem również funkcję opiekuna grupy studentów podczas praktyk studenckich oraz praktyk studenckich na statku badawczym.

Od października 2013 pełnię funkcję promotora pomocniczego w przewodzie doktorskim mgr Moniki Woźniak, doktorantki z Uniwersytetu Gdańskiego której wstępny tytuł rozprawy doktorskiej brzmi: *Identyfikacja grup organizmów dominujących w zakwitach fitoplanktonu w wodach Morza Bałtyckiego metodami nie kontaktowymi*.

W latach 2010-2012 byłem opiekunem naukowym słuchacza studium doktoranckiego IO PAN, Marcina Bukowskiego (który jednak był zmuszony przerwać studia z powodów rodzinnych).

Od 2013 roku pełnię rolę nieformalnego opiekuna naukowego doktorantki z Akademii Morskiej w Gdyni, która przygotowuje się do otwarcia przewodu doktorskiego na temat zdalnej detekcji substancji ropopochodnych w morzu.

### Popularyzacja badań

W swojej pracy naukowej doceniałem też potrzebę i wagę popularyzacji zarówno wyników prowadzonych badań jak i uprawianej dziedziny naukowej. Jestem autorem rozdziałów tematycznych w trzech książkach popularnonaukowych (patrz załącznik 3, rozdz. III-D, p.1-3), a rezultaty moich badań były wielokrotnie prezentowane w lokalnych i ogólnopolskich mediach, czego wybrane przykłady prezentuję poniżej.

- Udział w ogólnopolskim programie telewizyjnym LABORATORIUM pod redakcją Wiktora Nidzickiego w 2005 roku.

- Publikacja w miesięczniku Nasze Morze Nr 12(36) grudzień 2008, pod tytułem *Podwodny Jeż z Sopotu*, na podstawie wywiadu udzielonego przeze mnie, związanego z pracami w IOPAN.
- Przygotowanie informacji o morskim spektrofotometrze "Jeż", który został wytypowany do prezentacji w publikacji Selected Research Findings from the Institutes of the Polish Academy of Sciences wydanej przez Polską Akademię Nauk w 2008 roku.
- Materiał informacyjny opublikowany w Onet.pl, Wiadomości, Nauka (9 Październik 2008, Internet) pod tytułem: "Polski wynalazek w światowym projekcie".
- Audycja radiowa dla programu pierwszego polskiego radia (9 Październik 2008) na temat zbudowanego w IOPAN przy współpracy ze Scripps Institution of Oceanography spektrofotometru morskiego "Jeż".
- Informacja w serwisie TVP Gdańsk Panorama (15 Październik 2008): Komunikaty o nowatorskim urządzeniu Podwodnym Jeż i o prowadzonych badaniach nad podwodnymi błyskami światła.
- Wywiad i nagranie audycji radiowej dla Radia Gdańsk (30 stycznia 2009).
- Wielokrotnie nagrywane materiały filmowe dla Telewizji Polskiej czy innych ogólnopolskich stacji telewizyjnych poświęcone projektowi SatBałtyk.

Podsumowanie bibliometryczne osiągnięć naukowych.

- Efektem mojej działalności naukowej jest **64** publikacji w tym **29** oryginalnych artykułów publikowanych w czasopismach znajdujących się w obecnym wydaniu bazy Journal Citation Reports (JRC).
- Liczba cytowań moich prac naukowych wynosi **442 i 400** (bez autocytowań), wg bazy Web of Science i **476** wg Bazy Scopus.
- Indeks Hirsha według bazy Web of Science wynosi **10**, a według Bazy Scopus **11**.

Literatura:

- Dera, J., and H. R. Gordon (1968), Light field fluctuations in the photic zone, *Limnol. Oceanogr.*, 13, 697-699.
- Dera, J., and D. Stramski (1986), Maximum effects of sunlight focusing under a wind-disturbed sea surface, *Oceanologia*, 23, 15-42.
- Evans, R. H., & Gordon, H. R. (1994). CZCS system calibration: A retrospective examination, *Journal of Geophysical Research*, 99, 7293-7307.
- Snyder, R. L., and J. Dera (1970), Wave-induced light-field fluctuations in the sea, *J. Opt. Soc. Am.*, 60, 1072-1079.
- Stramski, D., and J. Dera (1988), On the mechanism for producing flashing light under a wind-disturbed water surface, *Oceanologia*, 25, 5-21.

