

**mgr Kamila Haule**

*“Modelling the influence of dispersed oil droplets on the upwelling light flux in seawater in application to satellite remote sensing”*

*(“Modelowanie wpływu zdyspergowanych substancji ropopochodnych na oddolny strumień światła wychodzący z wody morskiej w aspekcie badań satelitarnych”)*

Zanieczyszczenia ropopochodne dostają się do wody morskiej zarówno w wyniku procesów naturalnych jak i, w znacznie większej ilości, w wyniku działalności człowieka. W szczególności do ich obecności w środowisku morskim przyczynia się codzienna aktywność żeglugowo-transportowa, działalność rafinerii, przemysłowo-rolnicze wpływy rzeczne, przypadkowe rozlewy olejowe i celowe zrzuty oleju. Ewolucja zdyspergowanego oleju w czasie i jego wpływ na optyczne właściwości wody morskiej są do tej pory słabo poznane, a teledetekcja zdalna zdyspergowanych substancji ropopochodnych nie jest jeszcze szeroko praktykowana.

Głównym zadaniem niniejszej rozprawy jest poszerzenie wiedzy na temat wpływu obecności rozproszonych kropeł substancji ropopochodnych na optyczne właściwości wody morskiej oraz zbadanie możliwości zdalnego wykrywania obecności zanieczyszczeń olejowych w formie zdyspergowanej. W pracy doktorskiej zostały zrealizowane trzy główne cele stanowiące jednocześnie kolejne kroki w budowie modelu wody morskiej zanieczyszczonej zdyspergowanymi substancjami ropopochodnymi:

**I. Zgromadzenie bazy rzeczywistych właściwości optycznych zdyspergowanych substancji ropopochodnych.** Baza zawiera wartości współczynnika absorpcji i rozpraszania w zakresie widma widzialnego oraz zależną od długości fali światła objętościową funkcję rozpraszania. Żaden z tych parametrów nie może być zmierzony bezpośrednio dla cząstek rozproszonych w medium, dlatego zostały one obliczone przy użyciu modelu opartego na równaniach teorii Lorenza-Mie. Do przeprowadzenia takiego modelowania zostały zmierzone bądź zaadoptowane z literatury naukowej wartości złożonego współczynnika refrakcji światła w zakresie światła widzialnego, tj. jego część rzeczywista, będąca funkcją współczynnika absorpcji światła przez olej oraz jego część urojona, będąca funkcją współczynnika rozpraszania światła przez olej, a także rozkłady rozmiarów kropeł oleju rozproszonych w wodzie morskiej. Utworzono wygodną w użyciu empiryczno-analityczną metodę generacji logarytmiczno-normalnych rozkładów rozmiarów parametryzowanych tylko za pomocą średnicy najbardziej prawdopodobnego rozmiaru kropli. W rozprawie wykazano, że właściwości optyczne rozproszonych kropeł oleju zależą w większej mierze od ich rozkładu rozmiarów niż od rodzaju oleju.

**II. Włączenie kropeł oleju do modelu transferu energii promienistej w wodzie morskiej opartego na kodzie Monte Carlo.** Cel ten został zrealizowany przez rozbudowanie istniejącego modelu o możliwość wirtualnego zanieczyszczenia środowiska morskiego rozproszonymi kroplami oleju o zadanym stężeniu i głębokości penetracji w toni morskiej. W modelu ton morska została uwarstwiona z możliwością ustawiania ilości i głębokości warstw na podstawie profili głębokościowych współczynników absorpcji i rozpraszania światła. Każda warstwa może być niezależnie wirtualnie zanieczyszczona kroplami oleju o określonym typie, stężeniu i rozkładzie rozmiarów. Pomiary referencyjne do tego modelu zostały przeprowadzone na pokładzie jednostki badawczej *s/y Oceania*. Dokładność modelu została ustalona poprzez porównanie reflektancji zdalnej zmierzonej *in situ* z wynikami modelowania dla naturalnej wody morskiej. Zastosowanie spektralnie zależnej funkcji

fazowej dla naturalnej wody morskiej pozwoliło uzyskać <5% odchylenia między mierzonymi i modelowymi wartościami  $R_{rs}$  w zakresie całego widma światła widzialnego.

**III. Charakterystyka zmian oddolnego strumienia światła w wodzie morskiej zawierającej rozproszone krople substancji ropopochodnych różnych typów, w różnych stężeniach i o różnej strukturze rozmiarów.** W efekcie realizacji tego celu zostały przeprowadzone modelowe obliczenia powszechnie mierzonych w oceanografii wielkości optycznych, takich jak reflektancja, reflektancja zdalna, profile głębokościowe oświetlenia odgórnego w toni morskiej. Rozpatrzono także możliwy wpływ obecności zdyspergowanych substancji ropopochodnych w środowisku morskim na dostępność światła w morzu, w tym na głębokość strefy eufotycznej oraz charakterystyki spektralne reflektancji i reflektancji zdalnej. Oszacowano też dokładność algorytmów biooptycznych, wykorzystujących obie reflektancje. Uzyskane dane zostały przeanalizowane i skomentowane w odniesieniu do istniejących metod i modeli opartych na pomiarach satelitarnych oraz opublikowane w wiodących czasopismach naukowych.

**Wyniki modelowania.** Wyniki modelowania transferu energii promienistej w wodzie morskiej z zawartością rozproszonych kroplel ropy *Petrobaltic* pokazały, że typowo rozważane niewielkie ich stężenie 1 ppm może lokalnie wpłynąć na reflektancję zdalną zwiększając ją nawet 6-krotnie bądź powodując jej dwukrotny spadek, zależnie od rozkładu rozmiarów kroplel ropy. Wykazano również, że obecność zdyspergowanej ropy znacząco zmniejsza odgórny strumień światła w wodzie morskiej poczynając od głębokości większych niż 2 m. Efekt ograniczania  $E_d$  jest większy w paśmie niebieskim i nieco mniejszy w paśmie czerwonym, a maksimum osiąga dla rozkładu rozmiarów o średnicy piku 0.3  $\mu\text{m}$ . Krople submikronowe powodowały wzrost oświetlenia odgórnego tuż pod powierzchnią wody zwykle do głębokości 0.5 m.

W celu pokazania możliwości zdalnej detekcji zdyspergowanych olejów, obliczono powszechnie używane charakterystyki spektralne reflektancji zdalnych. Zademonstrowano przykładowo, że obecność kroplel submikronowych w typowo rozważanym stężeniu 1 ppm może zwiększać stosunek  $R_{rs}$  w pasmach niebieskim i zielonym o 32% podczas gdy większe mikrometrowe kroplel powodują jego spadek nawet o 18%. Stosunek  $R_{rs}$  w pasmach niebieskim i czerwonym najwyraźniej uwidoczniał wpływ obecności kroplel ropy *Petrobaltic* obniżając go o 9-54% w przypadku rozkładów rozmiarów o średnicy piku do 100  $\mu\text{m}$ , co wskazuje na jego potencjalną użyteczność w budowaniu algorytmów do zdalnego rejestrowania rozproszonych form olejów w środowisku morskim.

Konsekwencją obecności submikronowych kroplel oleju w wodzie morskiej może być także redukcja głębokości strefy eufotycznej nawet o 77% w centralnej części widma światła widzialnego przy stężeniu 1 ppm. Zauważono także, że kroplel ropy o średnicach poniżej 100  $\mu\text{m}$ , o ile ich stężenie nie przekracza 5 ppm, należą do tzw. *rozmiarów optycznie znaczących* zdefiniowanych jako takie, które dają istotny wkład do całkowitego współczynnika rozpraszania wody morskiej.

**Pomiary w środowisku morskim.** W celu dodatkowej weryfikacji wyników modelowania, podjęto też pierwsze próby wykonania pomiarów w unikalnym, samodzielnie zaprojektowanym pływającym stanowisku pomiarowym (przeźroczysty tank). Pomiary optyczne obejmowały spektralny współczynnik absorpcji i osłabiania światła, reflektancję zdalną i rozkład rozmiarów kroplel oleju. W kolejnych sekwencjach do tanku wypełnionego naturalną wodą morską i umieszczonego w naturalnym środowisku morskim, wlewano odpowiednio przygotowane porcje zdyspergowanych olejów zwiększając w ten sposób ich stężenie, a po każdym wlewie wykonywano serię pomiarów. Wstępna analiza danych pomiarowych potwierdziła wzrost reflektancji zdalnej spowodowany obecnością kroplel ropy *Petrobaltic* zauważalny już przy stężeniu 1 ppm i powiększający się wraz ze wzrostem stężenia.

Wyniki modelowania zaprezentowane w niniejszej dysertacji odnoszą się do pomiarów wykonanych w wodach przybrzeżnych Bałtyku Południowego, aczkolwiek wypracowane metody i sformułowane wnioski mają charakter uniwersalny i mogą zostać zastosowane również do innych akwenów morskich. W rozprawie wykazano i opisano możliwy istotny wpływ obecności zdyspergowanych substancji ropopochodnych na oddolny strumień światła wychodzący z wody morskiej oraz na pole światła w głębi toni morskiej a także przedyskutowano jak wpływ zdyspergowanych substancji ropopochodnych na optyczne właściwości wody może być wykorzystany w teledetekcji zdalnej.