

Kamila Rudź

Akademia Morska w Gdyni

SKUTKI ZRZUTU OLEJOWEGO W POLU ŚWIATŁA W MORZU

Wody zrzutowe pochodzące z siłowni okrętowych zawierają substancje olejowe, które dostają się do środowiska morskiego w postaci rozpuszczonej oraz zdyspergowanej, w następstwie czego zmieniają warunki transferu energii promienistej w toni morskiej. W artykule przedstawiono jakościową i ilościową analizę porównawczą tzw. pozornych właściwości optycznych czystej i zanieczyszczonej wody morskiej na przykładzie refleksyjności oświetlenia, dla modelu akwenu bałtyckiego i akwenu oceanicznego. Kątowe rozkłady radiacji nadwodnej dla wybranych modeli środowiska morskiego otrzymano metodą komputerowej symulacji losów wielkiej liczby fotonów (ang. photon trace simulation). Przeprowadzono symulacje dla dwóch rodzajów substancji ropopochodnych o skrajnie różnych właściwościach optycznych, dla długości fal z zakresu światła widzialnego, dla różnych wysokości słońca. Wyniki przedstawiono w postaci zależności widmowych i kątowych refleksyjności oświetlenia obliczonej poprzez definicyjne całkowanie rozkładów oddolnej radiacji.

WPROWADZENIE

Zanieczyszczenie wód morskich substancjami obcymi jest realnym problemem współczesnej ekologii oraz przemysłu okrętowego i rafineryjnego. Praca siłowni okrętowych wiąże się z ryzykiem zanieczyszczenia wody morskiej substancjami ropopochodnymi w postaci filmu olejowego na powierzchni morza lub emulsji (zawiesiny niewielkich kropli oleju w wodzie). Poprawa jakości monitorowania zawartości oleju w wodzie zrzutowej zmniejszy ryzyko poważnych zanieczyszczeń i inwazyjność przemysłu okrętowego wobec środowiska morskiego. Wody zrzutowe pochodzące z siłowni okrętowych zawierają pewne stężenia substancji olejowych, które mogą być wykrywane metodami optycznymi, ponieważ ich obecność znacząco zmienia właściwości optyczne wody morskiej [2, 5]. W niniejszym artykule zaprezentowano wyniki komputerowej symulacji rozkładu radiacji światła wychodzącego z toni wodnej dla wybranych modeli środowiska morskiego i dwóch substancji ropopochodnych o skrajnie różnych właściwościach optycznych.

1. RADIACJA I REFLEKTANCJA WÓD POWIERZCHNIOWYCH

Parametry optyczne wody morskiej dzieli się na rzeczywiste (tzw. IOPs – *Inherent Optical Properties*) i pozorne (tzw. AOPs – *Apparent Optical Properties*) [1]. Parametry rzeczywiste nie zależą od warunków obserwacji; zalicza się do nich m.in. współczynniki absorpcji, rozpraszania i całkowity współczynnik osłabiania promieniowania. Natomiast parametry pozorne to wielkości fizyczne zależne od parametrów rzeczywistych i od warunków obserwacji (szybkość i kierunek wiatru, rozkład nachyleń skłónów fal, przejrzystość atmosfery, stopień zachmurzenia, kąt ustawienia miernika itp.), są to m.in.: radiacja, oświetlenie (wektorowe i skalarne), refleksja radiacji, refleksja oświetlenia.

Refleksja w oceanologii jest rozumiana jako całkowity współczynnik odbicia strumienia światła od powierzchni morza, czyli stosunek strumienia światła odbitego do strumienia światła padającego. Strumień światła wychodzący z morza formuje się w następstwie aktów absorpcji i rozpraszania na składnikach toni morskiej, będzie się więc zmieniał wraz ze zmianami składu wody [7].

Stosunek oświetlenia oddolnego E_{\uparrow} (pochodzącego od fotonów wychodzących z toni morskiej) do oświetlenia odgórnego E_{\downarrow} zwany jest **reflektancją oświetlenia** R_E (ang. *irradiance reflectance*):

$$R_E = \frac{E_{\uparrow}}{E_{\downarrow}}. \quad (1)$$

Oświetlenie to moc strumienia świetlnego dP emitowanego przez jednostkę powierzchni dS :

$$E = \frac{dP}{dS}. \quad (2)$$

Tak zdefiniowane oświetlenie, odniesione do elementarnego kąta bryłowego $d\Omega$, nazywamy radiacją $L(\theta, \varphi)$ (ang. *radiance*).

$$L = \frac{dE}{d\Omega \cos \theta}. \quad (3)$$

Wyrażona w ten sposób radiacja odnosi się do pełnego widma promieniowania lub do określonego jego pasma i jest funkcją kąta zenitalnego θ i kąta azymutalnego φ . Zatem elementarne oświetlenie emitowane przez jednostkę powierzchni prostopadłej do kierunku emitowanego światła wyniesie:

$$dE = L(\theta, \varphi) d\Omega. \quad (4)$$

Całkowanie po pełnej sferze pozwala otrzymać tzw. całkowite oświetlenie skalarne E_s :

$$E_s = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} L(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi, \quad (5)$$

a także oświetlenie wektorowe:

$$E_{\downarrow} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} L(\theta, \phi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi. \quad (6)$$

Ponadto rozróżnia się oświetlenie wektorowe oddolne E_{\uparrow} (ang. *upwelling irradiance*) od odgórnego E_{\downarrow} (ang. *downwelling irradiance*):

$$E_{\uparrow} = \int_0^{2\pi} \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} L(\theta, \phi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi, \quad (7)$$

$$E_{\downarrow} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} L(\theta, \phi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi. \quad (8)$$

Przedstawione w niniejszym artykule wartości refleksyjności oświetlenia zostały obliczone z rozkładów radiacji nadwodnej $L(\theta, \phi)$ uzyskanych drogą komputerowej symulacji losów wielkiej liczby fotonów przemieszczających się w wirtualnej toni wodnej.

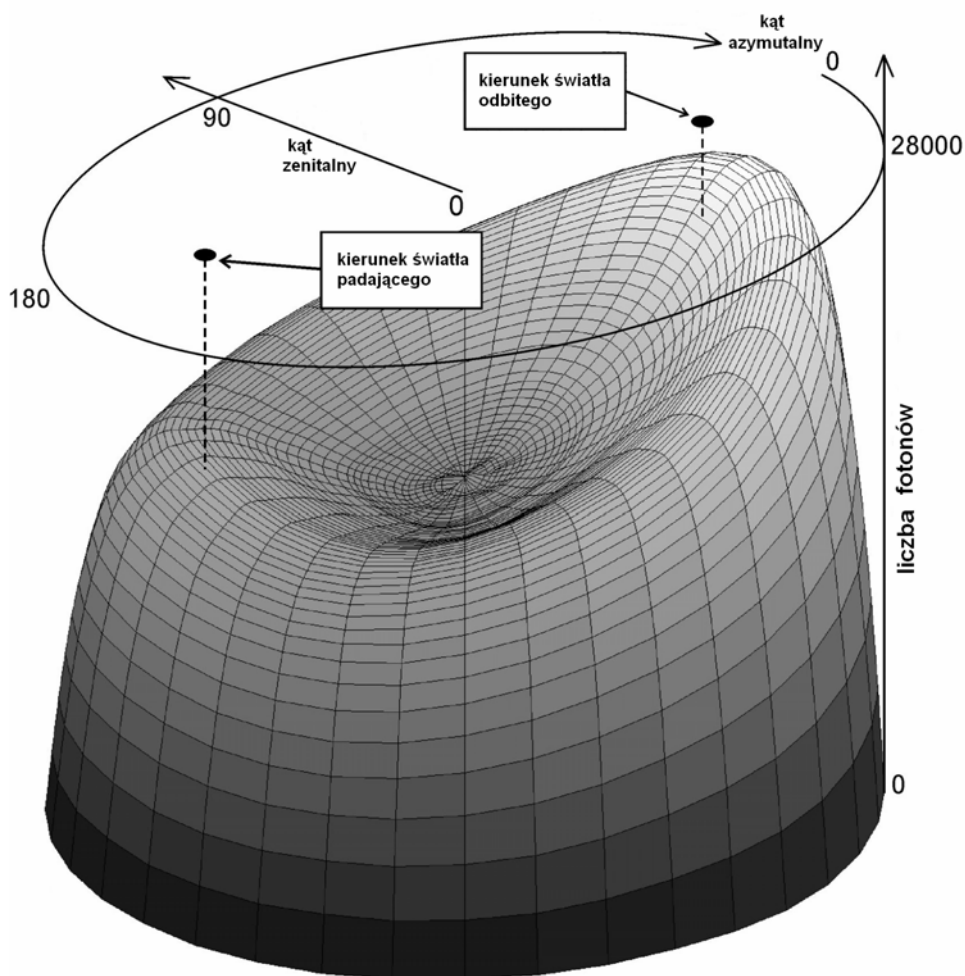
2. METODA

System komputerowych symulacji losów wielkiej liczby fotonów jest oparty na kodzie Monte Carlo i służy do wyznaczania kątowych rozkładów radiacji strumienia światła wychodzącego z morza dla zadanego modelu środowiska morskiego i oświetlenia odgórnego [4].

Model środowiska morskiego tworzony jest na podstawie następujących informacji:

- charakterystyka optyczna powierzchni morza (formuły Fresnela),
- charakterystyka optyczna dna morskiego,
- stan morza (rozkład nachyleń skłónów fal),
- pozycja kątowna detektora fotonów.

Program komputerowy zlicza fotony opuszczające powierzchnię morza w określony kąt bryłowy $\Delta\Omega$. W tym celu górna półsfera została podzielona na 1836 sektorów kąta bryłowego (rys. 1).



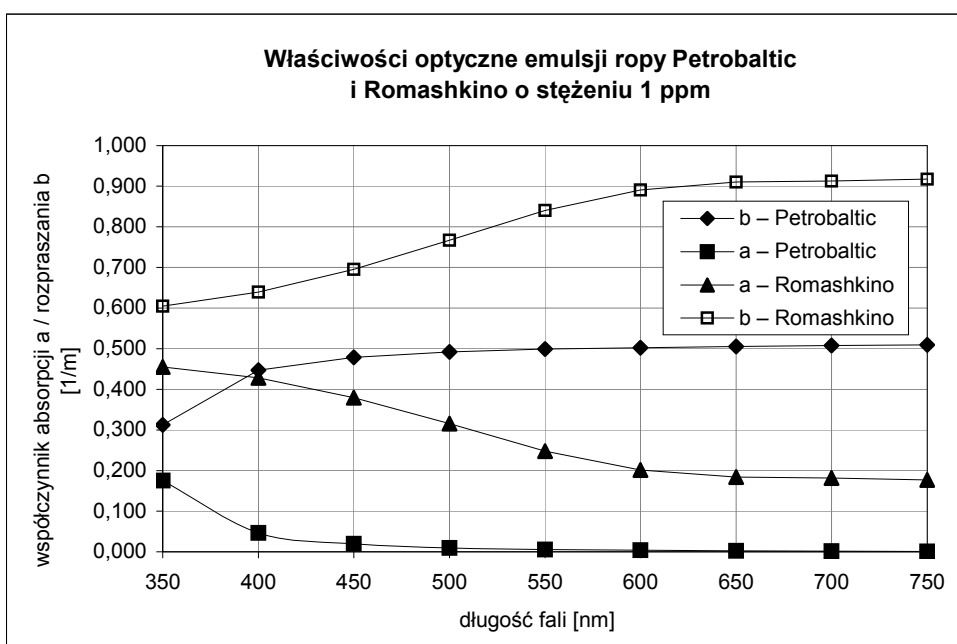
Rys. 1. Typowy rozkład kątowny liczby fotonów wychodzących z morza (proporcjonalnej do oddolnej radiacji $L(\theta, \varphi)$) otrzymany metodą komputerowej symulacji losów wielkiej liczby fotonów dla modelu akwenu bałtyckiego

Oświetlenie odgórne jest zadane poprzez konkretną liczbę wirtualnych fotonów (zwykle 2 mld) padających na powierzchnię morza pod zdefiniowanym kątem θ_{inc} . Natomiast oświetlenie wektorowe oddolne obliczane jest jako suma fotonów E_{\uparrow} wychodzących z morza we wszystkie sektory kątów bryłowych:

$$E_{\uparrow} = \sum_{i,j} L(\theta_i, \phi_j) \cos \theta_i \Delta\Omega . \quad (9)$$

3. DANE WEJŚCIOWE

Wybrano dwa typy substancji olejowych o różnych właściwościach optycznych: względnie przezroczystą ropę *Petrobaltic* wydobywaną w Polskiej Strefie Ekonomicznej w rejonie Bałtyku Południowego oraz nieprzezroczystą ropę *Romashkino* pochodzącą z Tatarstanu. Zależności spektralne współczynników absorpcji $a(\lambda)$ i rozpraszania $b(\lambda)$ emulsji wodnych tych substancji przedstawiono na rysunku 2. Uzyskano je z obliczeń na podstawie teorii rozpraszania Lorenza-Mie [7].



Rys. 2. Zależności spektralne współczynników absorpcji a i rozpraszania b dla emulsji wodnych sporządzonych z ropy *Petrobaltic* i *Romashkino* w stężeniu 1 ppm

Ropa *Petrobaltic* tworzy emulsję o znacznie niższych wartościach a i b w zakresie światła widzialnego niż ropa *Romashkino*. System symulacji konwertuje zadane rzeczywiste właściwości optyczne środowiska wodnego do wartości prawdopodobieństwa absorpcji i rozproszenia na jednym metrze wędrówki fotonu. Prawdopodobieństwa te wyrażone są formułami:

$$p_a = 1 - e^{-a}, \quad (10)$$

$$p_b = 1 - e^{-b}. \quad (11)$$

Właściwości optyczne emulsji olejowo-wodnej zmieniają się w miarę upływu czasu, jako skutek zmian rozkładu rozmiarów kropelek oleju zawieszonych w wo-

dzie, stanowiących sferyczne centra rozpraszania i absorpcji światła. Rozkłady rozmiarów kropli olejowych wyznaczono laboratoryjnie i opisano w publikacji [2]. Wartości współczynników absorpcji i rozpraszania niezanieczyszczonej wody bałtyckiej i oceanicznej zaczerpnięto z literatury [1, 6]. Prawdopodobieństwo rozpraszania fotonu w określonym kierunku wyznacza objętościowa funkcja rozpraszania $\beta(\theta)$, związana ze współczynnikiem rozpraszania b zgodnie z formułą:

$$b = \int_{4\pi} \beta(\theta) d\Omega. \quad (12)$$

Funkcje fazowe $p(\theta)$ dla substancji olejowych wyznaczono doświadczalnie [2, 3] zgodnie z zależnością:

$$p(\theta) = \frac{\beta(\theta)}{b}. \quad (13)$$

Dla niezanieczyszczonej wody morskiej wybrano i interpolowano funkcje najczęściej stosowane w optyce morza, czyli tzw. funkcje fazowe Petzolda. W modelu akwenu przyjęto płaską powierzchnię morza. Wpływ dna morskiego wyeliminowano, umieszczając dno na bardzo dużej głębokości (1000 m), do której fotony docierają w niemierzalnej ilości.

4. WYNIKI

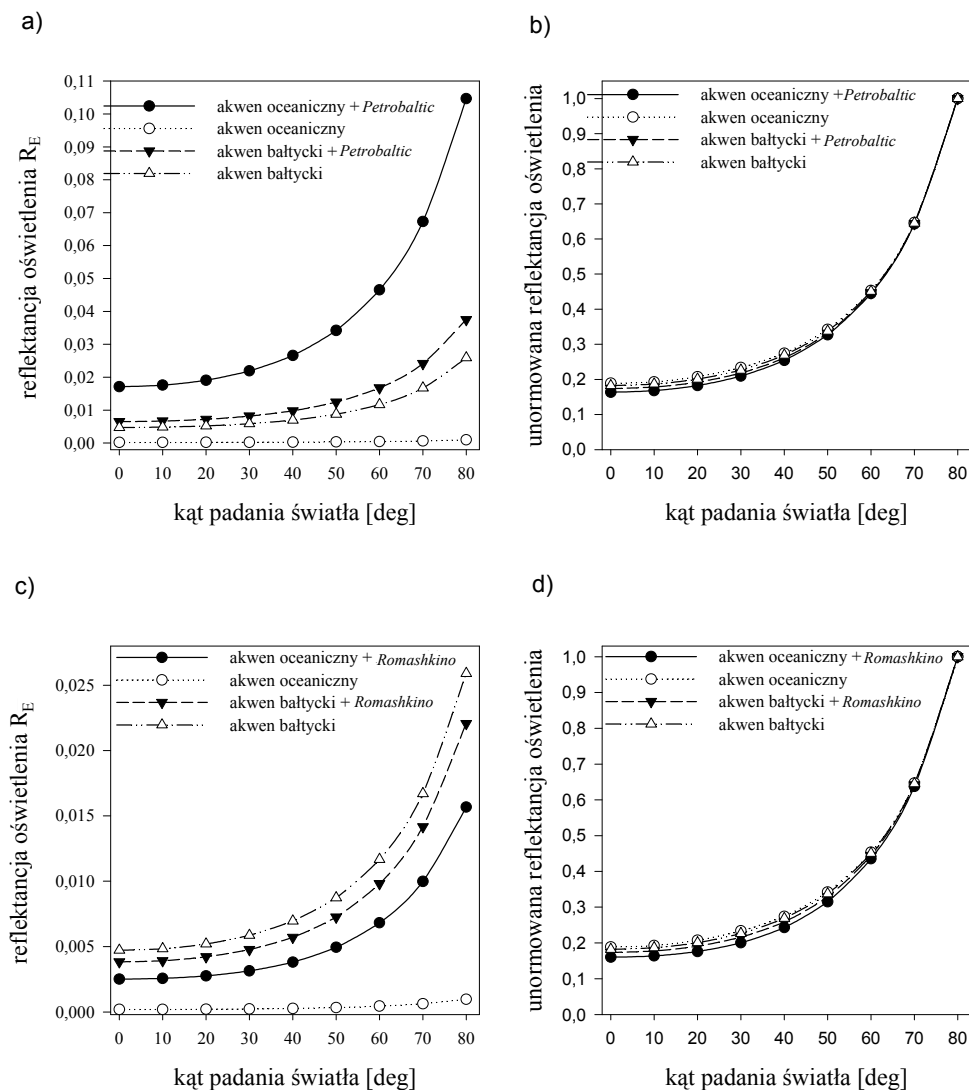
Zależność reflektancji oświetlenia od kąta padania promieni słonecznych

Na rysunku 3 przedstawiono zależności reflektancji oświetlenia R_E od zadanego kąta padania fotonów mierzonego od nadiru dla długości fali 550 nm.

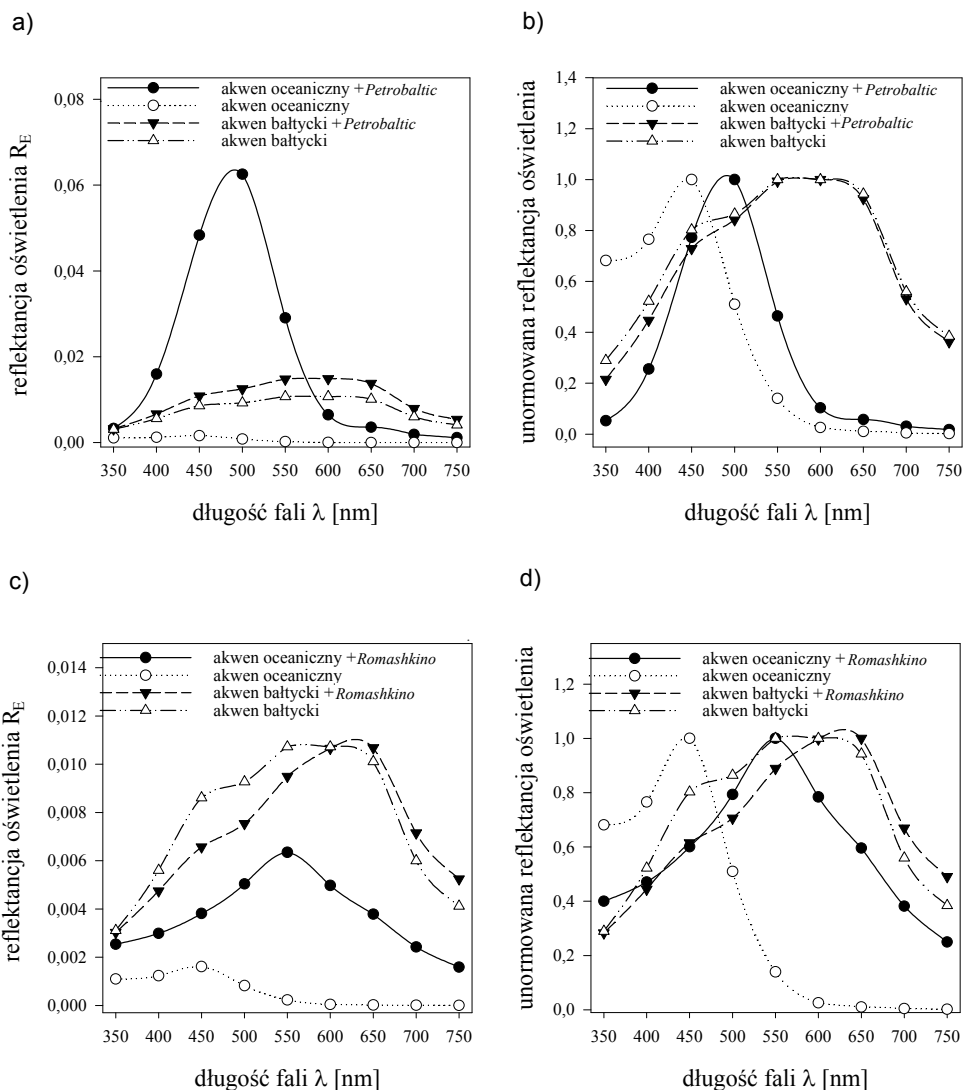
Zależność reflektancji od długości fali światła

Zależności widmowe reflektancji oświetlenia R_E przedstawiono na rysunku 4. Symulacje przeprowadzono dla fotonów padających na powierzchnię morza pod kątem zenitalnym 60° .

Otrzymane wyniki potwierdzają wpływ kąta padania fotonów na wartość reflektancji oświetlenia. Maksymalna wartość reflektancji występuje przy kącie 80° i nie ulega przesunięciu w wyniku zmian rzeczywistych właściwości optycznych. Wartości reflektancji dla zanieczyszczonej wody oceanicznej są natomiast znacząco wyższe niż dla wody czystej. Obecność emulsji *Petrobaltic* w wodzie oceanicznej w stężeniu 1 ppm powoduje średnio 100-krotny wzrost wartości reflektancji, natomiast to samo stężenie emulsji *Romashkino* powoduje wzrost 15-krotny. Dla modelu akwenu bałtyckiego zaobserwowano zwiększoną o 40% reflektancję oświetlenia po dodaniu emulsji *Petrobaltic*, natomiast po dodaniu emulsji *Romashkino* spadek o 20%. Dla porównania, średni stosunek reflektancji oświetlenia otrzymanej dla modelu niezanieczyszczonego akwenu bałtyckiego względem oceanicznego wynosi 26.



Rys. 3. Zależność refleksyjności oświetlenia R_E od wysokości słońca. Wykresy a) i c) przedstawiają wartości R_E obliczone dla modelu akwenu bałtyckiego i modelu akwenu oceanicznego bez zanieczyszczeń olejowych oraz odpowiednio z dodatkiem ropy *Petrobaltic* i *Romashkino* (w formie emulsji) w stężeniu 1 ppm. Wykresy b) i d) przedstawiają unormowane wartości refleksyjności przedstawionych na wykresach a) i c)



Rys. 4. Zależności widmowe refleksyjności oświetlenia R_E otrzymane dla modelu akwenu bałtyckiego i akwenu modelu oceanicznego bez zanieczyszczenia oraz z dodatkiem emulsji o stężeniu 1 ppm ropy *Petrobaltic* (wykres a) i *Romashkino* (wykres c). Wykresy b) i d) przedstawiają unormowane wartości refleksyjności przedstawionych na wykresach a) i c)

Na rysunku 2 widoczne są znaczące przesunięcia maksimum refleksyjności modelu zanieczyszczonego oceanu w stosunku do modelu czystego oceanu. Wynoszą one odpowiednio 50 nm w przypadku dodania emulsji *Petrobaltic* i 100 nm w przypadku dodania emulsji *Romashkino*. W modelu akwenu bałtyckiego zaobserwowano przesunięcie maksimum o 60 nm jedynie po dodaniu emulsji *Romashkino*.

WNIOSKI

W artykule wykazano, że nawet niewielkie stężenia emulsji olejowej mogą zostać wykryte metodami optycznymi, ponieważ pozorne wielkości optyczne (takie jak radiacja i reflektancja) są wrażliwe na niewielkie zmiany rzeczywistych parametrów optycznych wody morskiej. Zastosowana metoda komputerowej symulacji losów wielkiej liczby fotonów pozwala na stosunkowo szybkie uzyskiwanie kątowych rozkładów radiacji oddolnej przy zadanych rzeczywistych właściwościach optycznych środowiska morskiego.

Zmiany wartości reflektancji oświetlenia występujące w następstwie zanieczyszczenia akwenu morskiego emulsją olejową są bardzo silne w przypadku wody oceanicznej (która zawiera niewielkie stężenia cząstek organicznych). W wodzie bałtyckiej (z dużą ilością zawiesiny) zmiany te są słabsze i zależne od okresowych zmian fauny i flory morskiej, chociaż są wykrywalne i identyfikowalne już przy stężeniu emulsji 1 ppm.

Rzeczywiste oświetlenie odgórne toni morskiej zależne jest od wysokości Słońca nad horyzontem, zachmurzenia oraz przejrzystości atmosfery, co stanowi poważne utrudnienie w analizie pomiarów radiacji dokonywanych *in situ*. Zastosowanie symulacji komputerowej procesów optycznych zachodzących w toni morskiej przy zadanym oświetleniu odgórnym znacznie upraszcza interpretację wyników oraz poprzez możliwość wprowadzania niezależnych zmian dowolnych parametrów „wejściowych” przyczynia się do poznania wpływu każdego z nich na „sygnał wyjściowy” (rozkład radiacji).

Możliwe jest rozszerzenie zakresu przeprowadzanych symulacji o nowe modele akwenów morskich, czystych i zanieczyszczonych różnymi substancjami ropopochodnymi. Analiza dużej bazy kątowych rozkładów radiacji daje podstawy do budowy mierników zdolnych do wykrywania obecności i rodzaju zanieczyszczeń olejowych bezpośrednio w wodach zrzutowych pochodzących z siłowni okrętowych.

LITERATURA

1. Dera J., *Marine Physics*, PWN, Warszawa 1992.
2. Otremba Z., *Oil droplets as light absorbents in seawater*, Opt. Express, 2007, 15(14), s. 8592–8597.
3. Otremba Z., Piskozub J., *Phase functions of oil-in-water emulsions*, Optica Appl., 2004, XXXIV (1), s. 93–99.
4. Otremba Z., Rudź K., *Photon trace simulation in seawaters polluted by oil-in-water emulsion*, materiały konferencyjne, Current Problems on Optics of Natural Waters (ONW), St. Petersburg 2009.
5. Otremba Z., Rudź K., *Zjawisko rozpraszania światła w detekcji zanieczyszczeń olejowych emitowanych w siłowni okrętowej*, Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej nr 178A, Gdynia 2009, s. 223–228.

6. Sagan S., *Rzeczywiste właściwości optyczne wód Bałtyku*, Rozprawy i Monografie, 2008, 21, Polska Akademia Nauk.
7. Woźniak B., Dera J., *Light Absorption in Sea Water*, Springer, 2007.

UPWELLING LIGHT FIELD CHANGES AS THE EFFECT OF OIL DISCHARGE IN SEAWATER

Summary

Discharge waters coming from ship plants contain small amount of oil substances which enter the marine environment in the form of dispersed droplets (emulsion). It has been proven that small concentrations of oil-in-water emulsion cause significant changes of seawater optical properties. This paper presents a comparative analysis of apparent optical properties for unpolluted and polluted seawater. Irradiance reflectance was calculated for both models of marine basins: the Baltic and oceanic one. Angular distribution of upwelling radiance was received from a computed photon trace simulation (based on the Monte Carlo code) for selected models of the marine environment. Simulations were performed with two types of petroleum substances, each with extremely different optical properties, for nine wavelengths selected from the visible light spectrum and for various sun height above the horizon. Inherent optical properties of seawater and oils, as well as angular scattering functions and oil droplets' size distributions, have been obtained mainly in the laboratory and partly adopted from specialist literature. Results are presented in the form of sun-height and spectral dependences of irradiance reflectance. The values of irradiance reflectance have been calculated by the integration of simulated upwelling radiance distributions.