

dr Dorota Pryputniewicz

Biuro Hydrograficzne Marynarki Wojennej

mgr Bożena Wojtasiewicz

Ośrodek Zabezpieczenia Hydrometeorologicznego Centrum Operacji Morskich

POMIARY PRZEZROCZYSTOŚCI WODY I WIDZIALNOŚCI PODWODNEJ WYKONYWANE PRZEZ SIŁY MW

1. WPROWADZENIE

Rozpoznanie fizycznych właściwości środowiska morskiego jest niezwykle istotne w działaniach prowadzonych na morzach i oceanach. Do najczęściej uwzględnianych parametrów należą temperatura, ciśnienie, przewodnictwo, zasolenie, gęstość i prędkość dźwięku oraz parametry opisujące procesy dynamiczne: wahania poziomu morza, falowanie oraz prądy morskie (prędkość i kierunek). Zabezpieczenie cywilnych i wojskowych prac podwodnych wymaga również rozpoznania właściwości optycznych środowiska. Prowadzone przez nurków oraz pojazdy typu ROV (*remotely operated vehicle*) działania, takie jak: prace eksploatacyjne, operacje wiertnicze, stawianie konstrukcji podwodnych, inspekcja istniejących konstrukcji, podwodne akcje ratownicze, badanie i wydobywanie zatopionych obiektów cywilnych i wojskowych powinny być poprzedzone analizą właściwości optycznych środowiska w obszarze zainteresowania.

2. PODSTAWOWE PARAMETRY OPTYCZNE

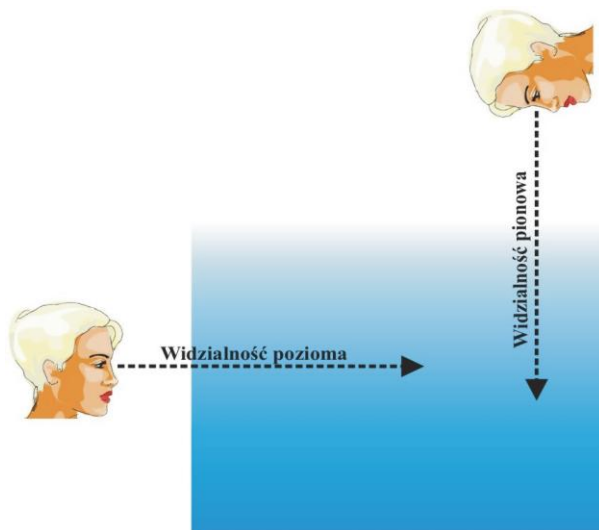
Przezroczystość wody to popularne określenie jednej z podstawowych optycznych cech wody morskiej. Stosuje się je zarówno w odniesieniu do wyniku pomiaru „przezroczystości pozornej”, głębokości na jakiej zanika z zasięgu widzenia krążek Secchiego (z_{SD}) jak i poprzez określenie osłabiania jakiego ulega wiązka promieniowania na drodze jednego metra (z zastosowaniem mierników elektronicznych). Oba parametry wiążą się ściśle z całkowitym współczynnikiem osłabiania światła $c(\lambda)$ będącym jedną z najważniejszych wielkości opisujących właściwości optyczne morza (Krężel, 1993). W znaczeniu fizycznym przezroczystość wody morskiej to wartość transmitancji wiązki światła na drodze $r = 1$ m (Dera 2003), przy czym transmitancja (T_r) zdefiniowana jest jako stosunek radiacji wiązki światła wchodzącej do warstwy wody (L_0) do wartości radiacji po przebyciu przez to światło drogi r w wodzie (L_r) (równanie 1).

$$T_r = \frac{L_r}{L_0} = e^{-c \cdot r} \quad (1)$$

Pomiary przezroczystości wody morskiej wykonywane są miernikami przezroczystości (ang. *transmissometer*; przezroczomierz [3]), które pozwalają na wyznaczenie wartości współczynnika osłabiania światła na podstawie zmierzonej transmitancji.

Widzialność to największa odległość, przy której obiekt może być bez trudu obserwowany. Ze względu na kierunek prowadzonych obserwacji wyróżnić można widzialność „pionową” i „poziomą” (rys. 1). W przypadku widzialności pionowej określa się jak daleko/głęboko widoczny jest obiekt obserwowany od góry lub od dołu. Za widzialność poziomą uznaje się odległość na jakiej można identyfikować obiekty patrząc na wprost przed siebie. Wyniki obserwacji prowadzonych w różnych kierunkach (od góry, od dołu lub na wprost) mogą się między sobą znacząco różnić.

Z pojęciem widzialności bezpośrednio związana jest wielkość zwana kontrastem. Spadek kontrastu poniżej wartości progowej powoduje, iż obiekt przestaje być widoczny. Obserwowany w wodzie przedmiot jest widoczny, gdy światło odbite od niego i docierające do obserwatora jest różne od światła dochodzącego do obserwatora od tła, na którym znajduje się ten obiekt. Różnica radiacji tych dwóch światła nazywana jest kontrastem obrazu. Kontrast w ośrodku wodnym zależy od współczynnika osłabiania światła $c(\lambda)$ oraz dyfuzyjnego współczynnika osłabiania światła odgórnego K_d (Duntley 1962, 1963). Osłabianie promieniowania świetlnego przez wodę morską oraz zamazywanie kontrastów na skutek obecności światła rozproszonego wpływa na jakość obrazów oraz zasięg widzenia obiektów w wodzie.

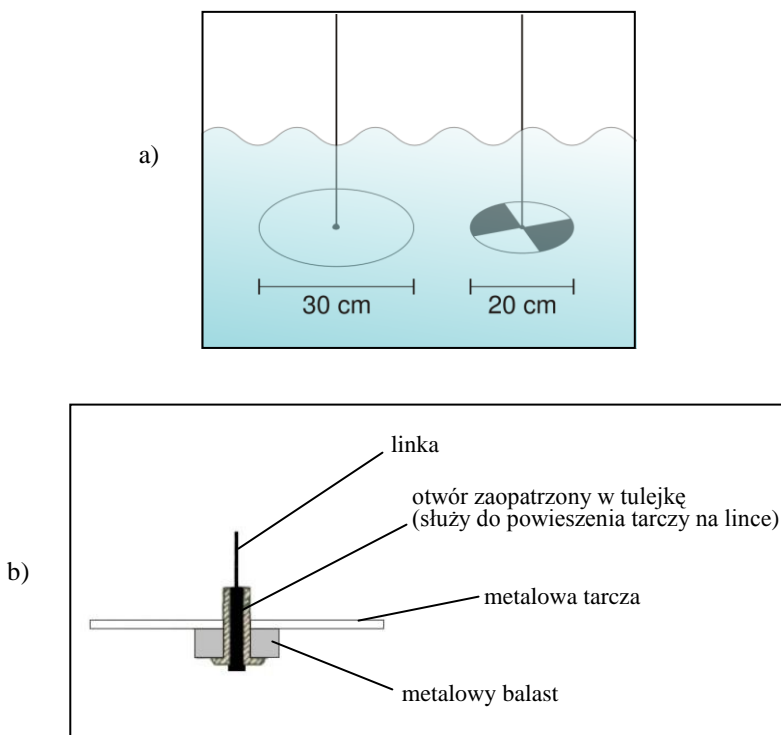


Rys. 1. Widzialność podwodna w kontekście kierunku obserwacji

Właściwości optyczne wody morskiej uzależnione są od koncentracji i jakości rozpuszczonej w niej materii organicznej, organicznych i nieorganicznych zawiesin oraz obecności pęcherzyków gazowych. W morzach i oceanach optycznie istotne składniki wody morskiej występują w stężeniach bardzo zróżnicowanych przestrzennie i czasowo. Jest to wynikiem wielu zjawisk, takich jak dopływ silnie zanieczyszczonych wód rzecznych i ścieków z lądu, unoszenie rumowiska z brzegów i dna morskiego w czasie sztormów, produkcja pierwotna oraz wypadanie aerozoli z atmosfery. Wraz ze wzrostem zawartości tych składników zmniejsza się zasięg widzialności podwodnej.

3. POMIAR „GŁĘBOKOŚCI SECCHIEGO”

Badania przezroczystości wód z zastosowaniem białej tarczy zapoczątkował włoski astrofizyk Pietro Angelo Secchi, który wykonywał pomiary na Morzu Śródziemnym już w 1865 roku. Współcześnie stosuje się zazwyczaj dwa typy krążka Secchiego: całkowicie biały o średnicy 30 cm, lub tarczę o średnicy 20 cm podzieloną na pola białe i czarne (rys. 2a).



Rys. 2. Krążek Secchiego a) z tarczą białą i podzielony na pola białe i czarne b) przekrój poprzeczny

Źródło: http://pl.wikipedia.org/wiki/Kr%C4%85%C5%BCek_Secchiego;

Biały krążek stosuje się najczęściej w wodach morskich, a czarno-biały do badania przezroczystości wód jeziornych. Krążek opuszczany jest w kolumnie wody na wyskalowanej linie. U jego podstawy umieszczony jest balast umożliwiający pionowe opuszczanie, ułożonego w pozycji poziomej, krążka Secchiego (rys. 2b) (Zagrodzki, 1956). Pomiar z zastosowaniem krążka Secchiego są metodą prostą, tanią i bardzo często wykorzystywaną w badaniach monitoringowych środowiska wodnego. Umożliwiają porównanie przezroczystości wód powierzchniowych w różnych okresach i punktach pomiarowych. Odczyty głębokości Secchiego są również wykorzystywane jako odniesienie do pomiarów teledetekcyjnych obiektów wodnych.

Przy pomiarze „przezroczystości pozornej” krążkiem Secchiego trzeba przestrzegać następujących zasad:

- krążek należy opuszczać do wody powoli, gdy zniknie on z oczu obserwatora należy odczytać z wyskalowanej linki głębokość;
- następnie, ostrożnie wyciągać krążek z wody, aż pojawi się w polu widzenia, wówczas należy ponownie odczytać głębokość;
- uśrednienie obu wartości stanowi ostateczny wynik „głębokości Secchiego” (przezroczystości pozornej).

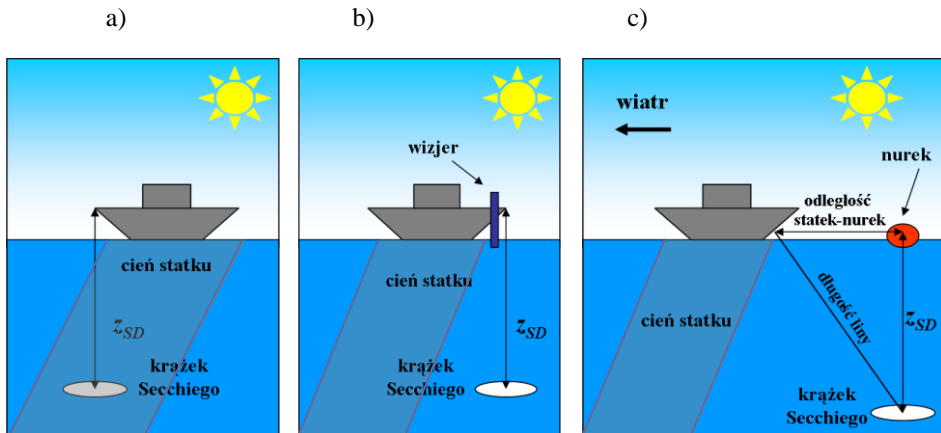
Uzyskany wynik jest wypadkową następujących czynników: przezroczystości wody, odbicia światła od powierzchni wody, cech wody związanych ze współczynnikiem pochłaniania światła, barwy wody i koncentracji zawiesin.

Dodatkowe zalecenia do pomiaru głębokości Secchiego

Pomimo tego, iż pomiar głębokości Secchiego jest jednym z najpopularniejszych i najczęściej wykonywanych pomiarów oceanograficznych, nie istnieje jedna powszechnie przyjęta metoda tego pomiaru. Opisana powyżej procedura pomiaru poszerzana jest o dodatkowe zalecenia, które czasami są ze sobą sprzeczne.

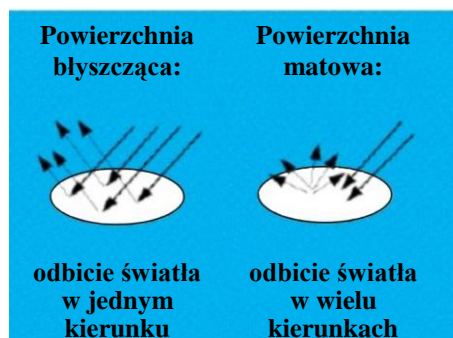
1) Pomiary powinny być prowadzone po zaciętej stronie statku ze względu na wpływ promieniowania odbitego od powierzchni wody („odbłasku Słońca”) na zdolność obserwacji krążka Secchiego (Zagrodzki, 1965; Jassby i in., 1999) (rys. 3a).

2) Pomiary powinny być prowadzone po słonecznej stronie statku w celu zwiększenia kontrastu i zasięgu widzenia krążka Secchiego (rys. 3b) (Tyler 1968; Holmes, 1970; Davies-Colley, 1993). Dodatkowo, aby uniknąć odbicia światła zaleca się stosowanie do opuszczania krążka wyskalowanej, czarnej liny. Wpływ promieniowania odbitego od powierzchni morza na wynik pomiaru należy ograniczyć stosując do obserwacji tzw. wizjer (ang. *viewer box*), chociaż Holmes (1970) wykazał, iż nie istnieją statystycznie istotne różnice pomiędzy głębokością Secchiego wyznaczoną z wykorzystaniem wizjera i bez niego.



Rys. 3. Pomiar głębokości Secchego z zacienionej strony burty statku a), ze strony nasłonecznionej b) i przez nurka c)

3) Powierzchnia dysku powinna być pomalowana matową farbą, co sprawia iż zwiększa się zasięg widzenia krążka Secchiego w wodzie morskiej. W przypadku błyszczącej powierzchni światło odbijane jest w jednym kierunku i istnieje duża zależność pomiędzy kierunkiem odbicia a kątem padania światła (wysokość Słońca w zależności od pory dnia) (rys. 4). Najlepiej aby dysk odbijał światło w różnych kierunkach niezależnie od usytuowania Słońca. Matowa powierzchnia sprawia, że światło odbijane jest w różnych kierunkach w związku z tym więcej światła odbitego dociera do obserwatora, kontrast pomiędzy dyskiem a otoczeniem jest bardziej intensywny, a przez to zwiększa się głębokość na której może być widoczny krążek Secchiego.



Rys. 4. Wpływ rodzaju powierzchni krążka Secchiego na odbicie światła.

Źródło: <http://dipin.kent.edu/Disk%20Design.htm>

4) Niektórzy badacze (np. Keeler i in. 2004) proponują także, aby osoba wykonująca pomiar każdorazowo obserwowała krążek tuż spod powierzchni wody. Proponowana jest metoda, która umożliwia również wyeliminowanie wpływu dryfu statku na wyniki pomiarów. W metodzie tej konieczne jest prowadzenie pomiaru przez nurka, który znajduje się dokładnie nad krążkiem

i obserwuje jego zanikanie. Znając odległość nurka od statku oraz głębokość Secchiego zmierzoną przez obserwatora na statku, możliwe jest, korzystając z twierdzenia Pitagorasa, obliczenie rzeczywistej głębokości Secchiego (rys. 3c). Metoda ta nie została powszechnie przyjęta ze względu na to, iż jest skomplikowana, silnie uzależniona od panujących warunków (kwestia bezpieczeństwa nurka), a różnice pomiędzy tak wyznaczaną głębokością Secchiego, a wyznaczaną w sposób klasyczny są niewielkie.

5) Ponadto, zalecane jest, aby pomiary wykonywane były zawsze w południe lub w godzinach bliskich południa, gdy promieniowanie słoneczne przenika najgłębiej.

6) Głębokość akwenu na którym prowadzone są obserwacje powinna być co najmniej dwukrotnie większa od głębokości Secchiego, aby uniknąć wpływu światła odbitego od dna na wynik pomiaru.

7) Należy zwrócić uwagę aby osoby wykonujące pomiar miały zblizoną zdolność widzenia.

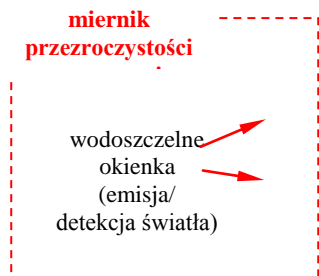
Jak dotychczas nie ustalono jednoznacznie jaka metoda jest najlepsza, aczkolwiek podkreśla się, że bardzo ważnym elementem jest stosowanie zawsze tej samej techniki w czasie serii pomiarowej. Zwykle uwzględnia się również cel wykonywania pomiaru. Jeśli dane wartości głębokości Secchiego mają być porównywane z innymi właściwościami wody morskiej (np. współczynnikiem osłabiania światła) bądź wykorzystane w algorytmach służących do określania przezroczystości wody z poziomu satelitarnego, zazwyczaj pomiar wykonywany jest po stronie słonecznej (Smith i Hoover, 1999).

4. POMIAR WIDZIALNOŚCI POZIOMEJ

Jak już wspomniano do wyznaczenia widzialności poziomej stosowane są specjalne urządzenia elektroniczne nazywane miernikami przezroczystości (przezroczomierzami [3]), które mierzą współczynnik osłabiania światła w wodzie. Istnieją różne typy tych mierników Pierwsze urządzenia tego typu pojawiły się na przełomie lat 30-tych i 40-tych (Jerlov, 1965). Ze względu na zasadę pomiaru można je podzielić na dwie klasy: przyrządy oparte na pomiarze naturalnego pola światła w morzu oraz przyrządy wykorzystujące sztuczne źródła światła (Dera, 1971; Sagan, 1991).

Na wyposażeniu okrętów hydrograficznych dywizjonu Zabezpieczenia Hydrograficznego MW znajdują się mierniki przezroczystości C-Star (firmy WET Labs) wykorzystujące sztuczne źródło światła (fot. 1). Przyrządy te są zintegrowane z sondą CTD (Valeport MIDAS).

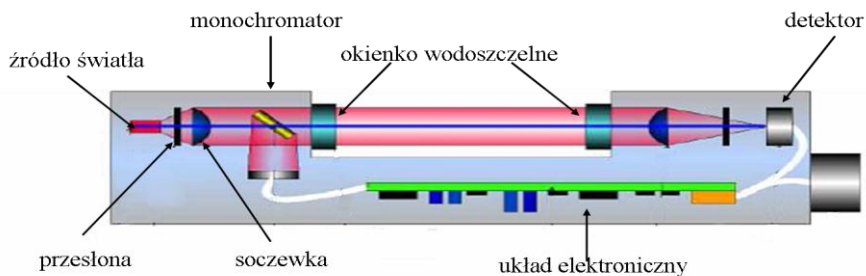




Fot. 1. Miernik przezroczystości C-star (WetLabs) zintegrowany z sondą CTD (Valeport) – zestawy na wyposażeniu okrętów hydrograficzny DZH (ORP Arctowski i ORP Heweliusz)

Mierniki tego typu składają się z następujących elementów: sztucznego źródła radiacji (lampka punktowa lub laser) i miernika radiacji umieszczonych w osi optycznej na sztywnej konstrukcji oraz elektronicznego układu zasilania i rejestracji (rys. 5). Mierniki przezroczystości C-star będące na wyposażeniu okrętów hydrograficznych posiadają sztuczne źródło radiacji (diode o maksimum radiacji $\lambda = 530 \text{ nm}$) emitujące skolimowaną wiązkę światła. Miernik radiacji w tych urządzeniach umieszczony jest w osi optycznej w odległości

$x = 10 \text{ cm}$. Przy pomocy miernika możliwe jest wykonanie pomiaru profilu pionowego współczynnika osłabiania $c(530, z)$ optycznie aktywnych składników wody morskiej. Ze względu na to, iż kalibracja urządzenia przeprowadzana jest dla czystej wody, wartość uzyskanego współczynnika osłabiania nie zawiera w sobie informacji o osłabianiu światła przez cząsteczki wody.



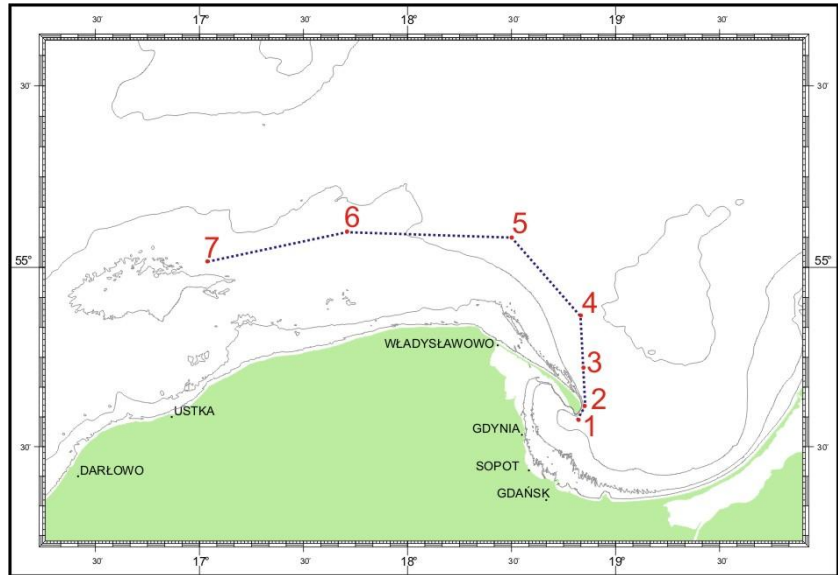
Rys. 5. Schemat budowy miernika przezroczystości C-Star (WetLabs)

W oparciu o pomiar wykonany tym urządzeniem podwodna widzialność pozioma określana jest na podstawie formuły (2) opracowanej przez Zaneveld i Pegau (2003).

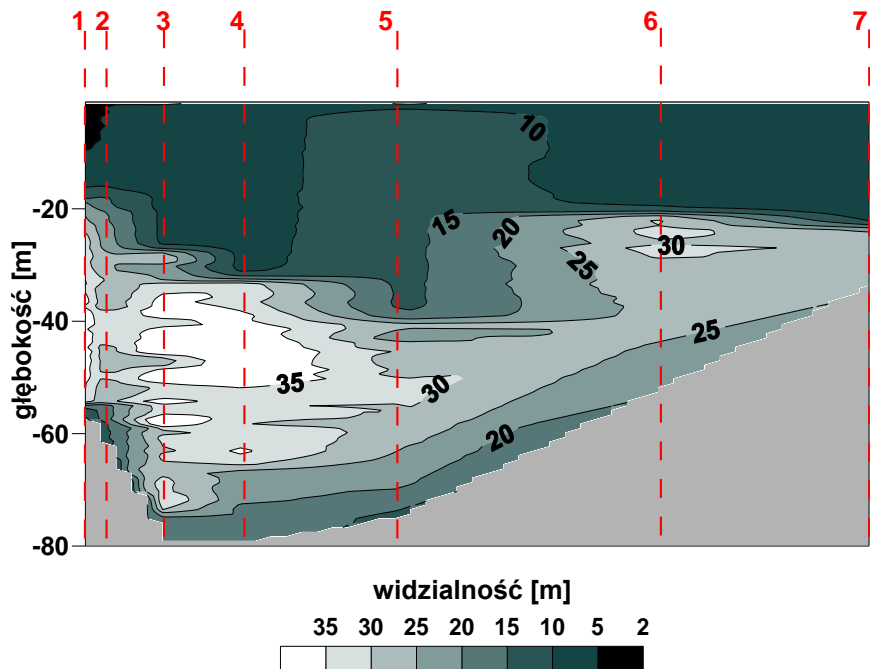
$$V_h = \frac{4,8}{0,9 \cdot c \cdot 30 + 0,081} \quad (2)$$

Na rysunku 6 zaprezentowano przykładowy profil widzialności podwodnej wykonany na podstawie pomiarów wykonanych miernikiem przezroczystości C-Star z pokładu ORP „Arctowski”. Pomiarzy prowadzono jesienią (23.09-3.10.2008) na profilu pomiarowym (1-7) od okolic Helu do Ławicy Słupskiej (rys. 6a). Uzyskane wyniki charakteryzują się typowymi zmianami właściwości optycznych wód z wyraźnym spadkiem widzialności w wodach powierzchniowych, zwłaszcza w pobliżu strefy brzegowej (stacje 1 i 2 widzialność poniżej 5 m), zwiększeniem widzialności w warstwie wód przejściowych (nawet powyżej 35 m) i ponownym spadkiem w warstwie naddennej (około 20 m). Podobny przebieg zmian widzialności podwodnej w profilu pionowym opisał Olszewski (1973) na podstawie badań wód Zatoki Gdańskiej. Zaobserwował on dodatkowo dużą zmienność zasięgu widzenia w zależności od kierunku i siły wiatru w obszarze objętym bezpośrednim wpływem Wisły. Zmienność ta nasilała się wiosną, przy dużym spływie wód. W rejonie ujścia Wisły charakterystyczny był ostry i duży skok przezroczystości wody na granicy nurtu mętnych wód wiślanych i znacznie czystszej wody morskiej. Powodowało to wyraźny wzrost zasięgu widzenia na większych głębokościach, przy czym blisko dna zasięg ten nieco spada na skutek obecności w tej warstwie rumowiska wnoszonego przez Wisłę. Inaczej prezentowała się sytuacja w rejonach Zatoki oddalonych od ujścia Wisły. Zasięg widzenia w tych rejonach także wzrastał wraz z głębokością, lecz wzrost ten był znacznie mniejszy i łagodniejszy niż przy ujściu. Zaobserwowano też niejednokrotnie, w spokojnych warunkach hydrodynamicznych, wyraźny wzrost zasięgu widzenia w pobliżu dna, co mogło być spowodowane występowaniem chłodnych prądów niosących czystą wodę z otwartego morza. Spadek widzialności odnotowany w warstwie naddennej jesienią 2008 r. był najprawdopodobniej spowodowany podnoszeniem (resuspensją) osadów.

a)



b)



Rys. 6. Rozmieszczenie stacji na profilu pomiarowym 1-7 podczas rejsu na ORP „Arctowski” (23.09-3.10.2008) a), zmiany widzialności [m] w toni wodnej wzdłuż profilu pomiarowego 1-7 b)

PODSUMOWANIE

W związku z dużą użytecznością dla działań podwodnych konieczne jest prowadzenie pomiarów umożliwiających stworzenie charakterystyki optycznych właściwości środowiska morskiego. Obecnie trwają prace nad poszerzeniem Oceanograficznej Bazy Danych BHMW (dotychczas zawierającej informacje o temperaturze, przewodnictwie, zasoleniu, gęstości wody i prędkości dźwięku w wodzie morskiej) o dodatkowe parametry, między innymi o „głębokość Secchiego” oraz widzialność poziomą.

Od 2008 roku na okrętach hydrograficznych ORP „Arctowski” i ORP „Heweliusz”, istnieje możliwość prowadzenia pomiarów miernikami przezroczystości bardzo dobrej klasy (C-star firmy WetLabs); jednocześnie, od kilku lat prowadzone są na tych jednostkach pomiary przezroczystości pozornej. W tym czasie zgromadzono znaczną ilość wyników, która daje podstawy do tworzenia jakościowo istotnych opracowań. Należy jednak stale dążyć do poprawienia systematyczności pomiarów w czasie i przestrzeni, szczególnie w odniesieniu do dużej dynamiki zmian parametrów optycznych w Bałtyku.

Istotnym elementem w opracowywaniu danych przezroczystości pozornej jest technika pomiarowa i rodzaj używanego krążka Secchiego. Zastosowanie różnych metod pomiarowych powoduje duże rozbieżności w wynikach, które są trudne do zweryfikowania.

Przed wprowadzeniem do bazy danych z innych źródeł (instytucji) prowadzących pomiary „przezroczystości pozornej”, wskazane jest szczegółowe rozpoznanie metody jaką były one prowadzone. Przy rozważaniach nad ulepszeniem techniki pomiarowej lub zmianą rodzaju krążka Secchiego, należy wziąć pod uwagę, iż odejście od dotychczasowych procedur pomiarowych może wprowadzić rozbieżności w wynikach przy identycznej sytuacji w środowisku. Jest to problematyczne zwłaszcza gdy dla obszaru objętego badaniami istnieje już pokaźna baza danych. Przejście na „nową technikę” pomiarową uniemożliwi wówczas porównanie wyników z wielolecia.

Jeżeli konieczne jest wprowadzenie nowego sposobu prowadzenia pomiarów warto rozważyć wprowadzenie okresu przejściowego, gdy pomiary prowadzone będą tak jak dotychczas i „nową techniką”, co umożliwi porównanie wyników oraz stworzenie formuł lub modeli za pomocą których można będzie przetransformować zgromadzone dotychczas dane. W związku z tym, iż pomiar głębokości „Secchiego” nie jest kłopotliwy można również rozważyć prowadzenie pomiarów równoległych (np. ze słonecznej i zacienionej strony statku lub ze słonecznej strony statku z wykorzystaniem wizjera i bez wizjera).

Zasięg widzialności podwodnej w poziomie, pomierzony za pomocą miernika przezroczystości, w przeciwieństwie do głębokości Secchiego, jest uzależniony jedynie od rzeczywistych właściwości optycznych wody morskiej (współczynnik osłabiania radiacji), jest zatem bardziej obiektywnym miernikiem przezroczystości wód.

BIBLIOGRAFIA

1. Davies-Colley, R.J, W.N. Vant, D.G. Smith, 1993, Colour and Clarity of Natural Waters, Ellis Horwood.
2. Dera J., 1971, Charakterystyka oświetlenia strefy eufotycznej w morzu, Oceanologia (1), 9-98.
3. Dera J., 2003, Fizyka morza, PWN, Warszawa, 144-237.
4. Duntley, S. Q., 1962, Underwater visibility [w:] The sea, t.1. Physical oceanography, M. N. Hill (red.), Wiley, New York, 452-455.
5. Duntley, S. Q., 1963, Light in the sea, J. Opt. Soc. Am., 32, 61-70.
6. Holmes, R. W., 1970, The Secchi disc in turbid coastal waters, Limnol. Oceanogr., 15, 688-694.
7. Jassby, A. D., C. R. Goldman, J. E. Reuter, R. C. Richards, 1999, Origins and scale dependence of temporal variability in the transparency of Lake Tahoe, California-Nevada, Limnol. Oceanogr. 44(2), 282 – 294.
8. Jerlov N.G., 1965, The evolution of the instrument technique in underwater optics [w:] M.Sears (red.), Progress in oceanography, Pergamon Press, New York.
9. Jones A., Duck R., Reed R., Weyers J., 2002, Nauki o środowisku. Ćwiczenia praktyczne, PWN, Warszawa, 217-218.
10. Keeler, R. N., E. P. Zege, R. C. Kuhn, J. A. Prentice, 2004, Secchi Disc Measurements Made Under Difficult Conditions.
11. Krężel A., 1993, Właściwości optyczne wód [w:] Zatoka Pucka, K Korzeniewski (red), IO UG, 206-221.
12. Olszewski J., 1973, Analiza warunków widzialności podwodnej w morzu na przykładzie Zatoki Gdańskiej, Oceanologia, 153-225.
13. Sagan S., 1991, Transmisja światła w wodach południowego Bałtyku, Rozprawy i monografie IO PAN, Sopot, -149
14. Smith, D. G., C. M. Hoover, 1999, Use of a viewer box in Secchi disk measurements.
15. Tyler, J. E., 1968, The Secchi disc, Limnol. Oceanogr., 13, 1-6.
16. Zagrodzki K, 1956, Oceanografia dla marynarzy, Wydawnictwa Komunikacyjne, Warszawa, 180-193.
17. Zaneveld, J. R. V., W. S. Pegau, 2003, Robust underwater visibility parameter, Optics Express, Vol. 11

Recenzował dr inż. Michał Holec, profesor Akademii Morskiej w Gdyni.