

Operacyjny model hydrodynamiczny Zatoki Gdańskiej

Marek Kowalewski

Uniwersytet Gdański, Instytut Oceanografii
Al. Marszałka Piłsudskiego 46, 81-378 Gdynia
e-mail: ocemk@univ.gda.pl

Abstrakt

Uruchomiony w ostatnim czasie trójwymiarowy model hydrodynamiczny Zatoki Gdańskiej umożliwił przygotowywanie codziennych 48-godzinnych prognoz temperatury i zasolenia wody, pól przepływów oraz wychylenia powierzchni swobodnej. Model obejmuje swym zasięgiem cały Bałtyk wraz z Cieśninami Duńskimi. Obliczenia wykonywane są z wykorzystaniem numerycznej prognozy pogody ICM (Interdyscyplinarne Centrum Modelowania Matematycznego i Komputerowego Uniwersytetu Warszawskiego). Porównanie wyników symulacji modelowych z pomiarami wykazało ich generalną zgodność, wystarczającą do wielu praktycznych zastosowań. Przeprowadzone analizy wskazują, że głównym źródłem błędów jest niedoskonałość warunków brzegowych, tzn. błędy prognoz meteorologicznych, uproszczenia warunków na otwartej granicy modelu i nieuwzględnienie rzeczywistych dopływów rzecznych. Wyeliminowanie tych mankamentów wpłynęłoby na zwiększenie wiarygodności wyników modelu. Dalszą poprawę dokładności prognoz można osiągnąć poprzez modyfikację modelu, która pozwoli na asymilację aktualnych danych: poziomów morza, temperatury i zasolenia wody mierzonych na stacjach brzegowych oraz bojach pomiarowych, a także termicznych zdjęć satelitarnych.

Wprowadzenie

W ostatnich latach obserwuje się duże zainteresowanie matematycznymi metodami modelowania procesów hydrodynamicznych w morzu. W rejonie Zatoki Gdańskiej to szczególnie zainteresowanie było głównie związane z problemem rozprzestrzeniania się substancji pochodzenia lądowego (Jędrasik i Kowalewski, 1993; Van der Vat i in., 1994; Ołdakowski i in., 1994; Robakiewicz i Karelse, 1994). W Instytucie Oceanografii Uniwersytetu Gdańskiego prowadzone są, od kilku lat, badania zmierzające do opracowania i uruchomienia operacyjnych modeli opisujących hydrodynamiczne oraz biogeochemiczne procesy zachodzące w Morzu Bałtyckim, a w szczególności w Zatoce Gdańskiej. W latach 1995—1997 został opracowany trójwymiarowy model hydrodynamiczny (Kowalewski, 1997). Model został wykorzystany jako baza do budowy modelu ekologicznego Zatoki Gdańskiej (Jędrasik, 1997), a także do badań zjawiska upwellingu w Morzu Bałtyckim (Kowalewski, 1998).

W 1998 roku model hydrodynamiczny został przystosowany do korzystania z cyfrowej 48-godzinnej prognozy meteorologicznej ICM (Interdyscyplinarne Centrum Modelowania Matematycznego Uniwersytetu Warszawskiego) pochodzącej z mezoskalowego modelu pogody - UMPL. Umożliwiło to uruchomienie, w czerwcu 1999, próbnej wersji operacyjnej modelu pozwalającej na codzienne obliczanie 48-godzinnych prognoz hydrodynamicznych. Aktualne wyniki modelu, w formie map temperatury wody, prądów oraz wychyleń powierzchni morza w Zatoce Gdańskiej oraz dla południowej części Bałtyku, prezentowane

są na stronie internetowej (<http://tajfun.ocean.univ.gda.pl/>). Potencjalnymi odbiorcami operacyjnych prognoz morskich mogą być:

- służby powołane do ratowania życia na morzu oraz zwalczania rozlewów olejowych,
- służby i instytucje związane z ochroną środowiska,
- porty, firmy połowowe i transportowe,
- instytuty naukowe zajmujące się badaniami środowiska morskiego,
- firmy eksploatujące surowce z dna morskiego,
- prasa i telewizja (prognoza temperatury wody itp.),
- plażowicze i amatorzy sportów wodnych (np. żeglarze).

Charakterystyka modelu

Teoretyczne i numeryczne rozwiązanie oparto na modelu Blumberga i Mellora (1987) POM (Princeton Ocean Model) wprowadzając do niego pewne modyfikacje konieczne do zastosowania go na Morzu Bałtyckim (Kowalewski, 1997). Ponieważ wymiana wód pomiędzy Zatoką Gdańską i Bałtykiem jest stosunkowo duża, niemożliwe jest modelowanie dynamiki jej wód bez uwzględnienia całego Bałtyku. Z tego względu model objął cały obszar Morza Bałtyckiego, a pomiędzy Kattegatem i Skagerrakiem usytuowano otwartą granicę, przez którą następuje wymiana wód z Morzem Północnym. Zastosowano radiacyjny warunek brzegowy dla uśrednionych w pionie przepływów, przy założeniu stałego poziomu morza w Skagerraku. W sytuacji, gdy chwilowa wartość wychylenia powierzchni swobodnej jest większa od przyjętej stałej wartości następuje odpływ wód z Bałtyku, proporcjonalny do różnicy tych wartości. W przypadku przeciwnym, tzn. gdy poziom morza w Kattegacie jest niższy – napływ wód ze Skagerraku.

W celu zmniejszenia ilości obliczeń zastosowano lokalne zagęszczenie siatki obliczeniowej. Model obejmuje dwa obszary o różnych krokach przestrzennych: Bałtyk, z krokiem ok. 5 mil morskich oraz Zatokę Gdańską z krokiem ok. 1 mili morskiej (rys. 1.). Obliczenia w obu obszarach odbywają się równolegle, a wymiana informacji na wspólnej granicy odbywa się na każdym kroku czasowym. Wszystkie zmienne modelu wyliczone na granicy jednego obszaru służą jako warunek brzegowy dla drugiego obszaru. Algorytm realizujący połączenie zapewnia zachowanie masy i energii.

Zastosowanie sigma-transformacji powoduje, iż w każdym punkcie morza, profil pionowy niezależnie od jego głębokości, można podzielić na jednakową liczbę warstw (rys. 2.). Pozwala to na lepsze odwzorowanie przydennej warstwy przyściennej, a także upraszcza numeryczny schemat obliczeniowy. Z drugiej jednak strony poszczególne warstwy nie są położone dokładnie poziomo, co powoduje niedokładności przy obliczaniu poziomych gradientów ciśnienia (Haney, 1991) i dyfuzji poziomej, co w konsekwencji prowadzi do błędów w obliczonych przepływach. W celu zminimalizowania tego typu błędów zastosowano technikę polegającą na odejmowaniu uśrednionej obszarowo gęstości przed obliczeniem gradientu gęstości (Gary, 1973; Mellor i inni, 1994). W operacyjnej wersji modelu zastosowano podział na 18 warstw o nieregularnej grubości. W celu lepszego odwzorowania powierzchniowej i przydennej warstwy przyściennej zastosowano tam warstwy o mniejszej grubości niż pozostałe.

Uwzględniono dopływy z 49 rzek, w tym 10 wpływających do Zatoki Gdańskiej. Wartości przepływu oraz temperatury na każdy dzień w roku są wyliczane z szeregów trygonometrycznych opisujących sezonową zmienność odpływów rzecznych, a ustalonych na podstawie wieloletnich danych (Cyberski, 1997). Model uwzględnia także dopływ energii słonecznej (Krężel, 1997) i wymianę ciepła przez powierzchnię morza (Jędrasik, 1997). Dane meteorologiczne: pole wiatru, temperatury powietrza, ciśnienie atmosferyczne i prężność pary wodnej, pochodziły z mezoskalowego operacyjnego modelu pogody UMPL. Warunki

początkowe dla pól hydrologicznych przyjęto na podstawie klimatycznych rozkładów temperatury i zasolenia wód Morza Bałtyckiego dla lutego. Po uruchomieniu modelu zmiany temperatur i zasolenia kształtowały się wyłącznie w wyniku oddziaływania zmiennych w czasie warunków meteorologicznych oraz dopływów rzecznych, tzn. nie dokonywano asymilacji danych hydrologicznych.

Dążenia do uruchomienia dla Zatoki Gdańskiej operacyjnego modelu hydrodynamicznego, spowodowały zorganizowanie w 1996 roku, z inicjatywy Instytutu Morskiego, eksperymentu badawczego POLRODEX '96 (Gajewski J. i Gajewski L., 1997), którego głównym celem było zebranie danych potrzebnych do kalibracji i weryfikacji modeli. Duże zainteresowanie tym przedsięwzięciem spowodowało, iż eksperyment ten został powtórzony w latach następnych (1997, 1998 i w 1999 roku), a udział w nim brało wiele instytutów naukowych. Uzyskane dane posłużyły do weryfikacji modelu w odniesieniu do temperatury wody, wahań poziomu morza oraz rozprzestrzeniania się substancji bierniej (rodaminy).

Weryfikacja operacyjnych prognoz modelu

Porównanie temperatur wód powierzchniowych zmierzonych na stacjach brzegowych z wynikami modelu hydrodynamicznego (rys. 3) wykazało ich generalną zgodność w przebiegu czasowym (współczynniki korelacji wahały się od 0.65 do 0.86). Pomiary w Sopocie wykonywane były co godzinę dla całego okresu letniego. Dla stacji Hel i Gdańsk-Port Północny obserwacje wykonywane były raz na dobę, a dane te pochodzą z Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej Oddział Morski. Obserwowane temperatury wody w okresie lipca i pierwszej połowy sierpnia były bardzo wysokie (20-24°C), co związane było z występowaniem bardzo wysokich temperatur powietrza w tym okresie. Temperatury wody obliczone za pomocą modelu były w tym okresie systematycznie zaniżone. Spowodowane to było zaniżaniem temperatury powietrza nad morzem w prognozach meteorologicznych pochodzących z modelu pogody UMPL, który uwzględniał klimatyczne temperatury wody w Bałtyku. W drugiej połowie sierpnia i we wrześniu różnice pomiędzy obserwacjami i wynikami modelu były stosunkowo niewielkie.

W oparciu o pomiary przeprowadzone w ramach eksperymentu POLRODEX'99 w okresie 16 – 25 sierpnia 1999 roku, porównano zamiany temperatury wody w profilu pionowym (rys. 4) z wynikami modelu hydrodynamicznego. Obserwacje pionowych rozkładów temperatury wody wykonywane były co godzinę z pokładu statku ORP *Kopernik* zakotwiczonego w rejonie ujścia Wisły (54° 26.2'N, 19° 0.9'E). W okresie pomiarowym można było zaobserwować dwie sytuacje wyraźnego podniesienia się termokliny, 16-17 i 20-21 sierpnia, związane ze zjawiskiem upwellingu przybrzeżnego. Widoczne to jest także w obliczonych za pomocą modelu rozkładach temperatury, z tym, że zmiany temperatury w pionie były znacznie łagodniejsze niż obserwowane. Rozmywanie pionowych gradientów temperatury w warstwie termokliny było prawdopodobnie wynikiem zastosowania niewystarczającej liczby warstw numerycznej siatki obliczeniowej. W warstwie powierzchniowej modelowane temperatury były niższe o około 1–2°C niż obserwowane, co można wiązać z zaniżeniem temperatury powietrza, w tym samym zakresie, przez model pogody UMPL (rys. 4a).

Modelowane i obserwowane w sierpniu 1999 roku na stacjach IMGW (Władysławowo, Hel i Gdańsk-Port Północny) wahania poziomu morza (rys. 5) wykazywały dużą zgodność osiągając współczynniki korelacji około 0.9. Wychylenia powierzchni morza obliczone przez model mają jednak charakter względny, tzn. trudno powiązać je ze średnim poziomem wody w Bałtyku. Przyczyna tkwi w niedoskonałości warunków brzegowych zadanych na otwartej

granicy Bałtyku tzn. pomiędzy Sakagerrakiem i Kattegatem. Zastąpienie stałego poziomu morza przez zmienne wartości poziomów wody obserwowane na stacjach brzegowych położonych w pobliżu otwartej granicy poprawiłoby niewątpliwie dokładność prognozowanych wychyleń powierzchni morza i pozwalałoby na obliczenia bezwzględnych poziomów morza, np. w układzie odniesienia: "NN Amsterdam 1955".

Wykonane w ramach eksperymentu POLRODEX'99, przez Instytut Morski w Gdańsku, obserwacje rozprzestrzeniania się plamy rodaminy w wodach Zatoki Gdańskiej umożliwiły zweryfikowanie modelu pod kątem jego przydatności do prognozowania rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń i innych substancji. Alkoholowy roztwór rodaminy został wylany w rejonie ujścia Wisły (rys. 6.) w dniu 17 sierpnia 1999 roku, a następnie zmiany położenia plamy rodaminy obserwowane było poprzez pomiary jej stężenia wykonywane za pomocą fluorymetru w trakcie ruchu statku. Przemieszczanie się plamy śledzono przez okres około doby, a położenia środka plamy (rozumianego jako punkt o najwyższym zmierzonym stężeniu rodaminy) w poszczególnych momentach czasu zaznaczono na rysunku. Analogicznie przedstawiono wyniki symulacji rozprzestrzeniania się substancji bierniej wykonanej za pomocą modelu hydrodynamicznego w oparciu o 48-godzinną prognozę meteorologiczną obliczoną za pomocą modelu UMPL na podstawie danych z 17.sierpnia godz. 00, a więc zanim jeszcze eksperyment został rozpoczęty. Porównanie obserwowanej i prognozowanej trasy przemieszczenia się plamy wykazało, że kierunek prognozowanego transportu rodaminy zgadzał się generalnie z obserwowanym, jednak prędkość przesuwania się plamy obliczona za pomocą modelu była znacznie mniejsza niż w rzeczywistości. Jedną z przyczyn zaniżenia prędkości przepływów w symulacji modelowej mogło być nieuwzględnienie rzeczywistych przepływów Wisły, które mogą mieć istotny wpływ na dynamikę wód w tym rejonie. Statystyczny opis dopływów rzecznych zastosowany w obecnej wersji modelu umożliwia jedynie uwzględnienie ich sezonowych zmian, jednak krótkookresowe zmiany wywołane na przykład opadami atmosferycznymi nie są uwzględniane i mogą prowadzić do znacznych błędów. Inną przyczyną mogło być zaniżenie prędkości wiatru w prognozie meteorologicznej (rys. 7.) pochodzącej z modelu UMPL. Obserwowane z pokładu statku prędkości wiatru w rejonie eksperymentu były większe niż prognozowane.

Wyniki weryfikacji przeprowadzone dla próbnej wersji modelu działającej w trybie operacyjnym wykazały nieco gorszą zgodność z pomiarami, niż dla obliczeń przeprowadzonych w oparciu o dane archiwalne (Kowalewski, 1997). Wynika to z ograniczonego dostępu do hydrologicznych i meteorologicznych danych operacyjnych takich jak: przepływy rzek, temperatura powietrza, itp. W efekcie błędy obliczonej operacyjnie temperatury wody sięgały nawet 6°C (rys. 3 a), podczas gdy, przy uwzględnieniu rzeczywistych temperatur powietrza, nie przekraczały 2°C (Kowalewski, 1997). Świadczy to o możliwości znacznego zmniejszenia błędów, poprzez uwzględnienie aktualnych danych obserwacyjnych. Systematyczne zaniżanie wartości temperatury wody w okresie letnim spowodowane było zaniżaniem temperatury powietrza nad morzem w prognozach meteorologicznych pochodzących z modelu pogody UMPL. Błędy te mogą zostać wyeliminowane poprzez udoskonalenie modelu pogody lub przez uwzględnienie w modelu hydrodynamicznym obserwowanych na stacjach IMGW temperatur powietrza, a także poprzez asymilację danych o bieżącej temperaturze wody pochodzących z termicznych zdjęć satelitarnych, ze stacji brzegowych i automatycznych stacji pomiarowych zainstalowanych na bojach. Dalszą poprawę dokładności prognoz hydrodynamicznych, szczególnie w rejonach ujściowych, można osiągnąć poprzez wprowadzenie do modelu aktualnych, operacyjnych danych o przepływach i temperaturach wód dopływających rzekami. W przypadku Zatoki

Gdańskiej, w pierwszej kolejności należałoby uwzględnić dane dotyczące Wisły ze względu na jej duży wpływ na dynamikę tego akwenu.

Wnioski

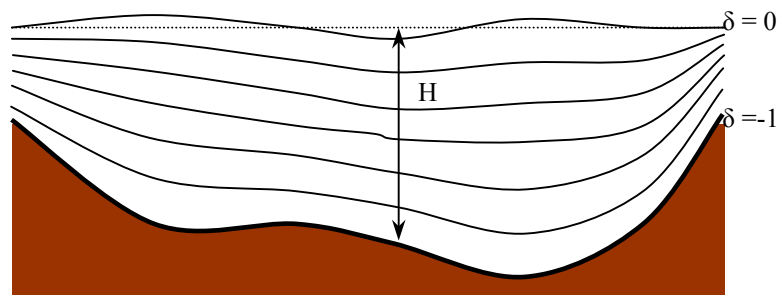
1. Wyniki weryfikacji modelu wskazują na jego przydatność do prognozowania: przepływów, temperatury wody oraz zmian poziomu morza. Dobra zgodność pomiędzy pomiarami i symulacjami zachęca do wykorzystania modelu w działalności praktycznej zarówno w strefie brzegowej, jak i w akwenach otwartych.
2. W celu zwiększenia dokładności prognoz konieczne jest uwzględnienie aktualnych pozyskiwanych operacyjnie warunków brzegowych (danych meteorologicznych, poziomów wody na granicy otwartej, przepływów i temperatur wód rzecznych).
3. Dalszą poprawę wiarygodności prognoz można osiągnąć poprzez wprowadzenie procedur asymilacji danych, a w szczególności: termicznych zdjęć satelitarnych i danych z automatycznych stacji pomiarowych.

Literatura

- Blumberg A.F., Mellor G.L., 1987, *A description of the three-dimensional coastal ocean circulation model*, [w] *Three-Dimensional Coastal Ocean Models*, N. Heaps, American Geophysical Union, 1-16
- Cyberski J., 1997, *Riverine water outflow into the Gulf of Gdańsk*, *Oceanol. Stud.*, 26 (4), 65-75
- Gary J.M., 1973, *Estimate of truncation errors in transformed coordinate, primitive equation atmospheric models*, *J. Atmos. Sci.*, 30, 223-233
- Gajewski J., Gajewski L., 1997, *Planned and realised POLRODEX '96 activities*, *Bulletin of the Maritime Institute*, 24 (1), 7-12
- Haney R.L., 1991, *On the pressure gradient force over steep topography in sigma coordinate ocean models*, *J. Phys. Oceanogr.*, 21, 610-619
- Jędrasik J., 1997, *A model of matter exchange and flow of energy in the Gulf of Gdańsk ecosystem - overview*, *Oceanol. Stud.*, 26 (4), 3-20
- Jędrasik J., Kowalewski M., 1993, *Transport model of pollutants in Gdansk Bay*, *Stud. i Mater. Oceanol.*, 64 (3), 61-75
- Kowalewski M., 1997, *A three-dimensional, hydrodynamic model of the Gulf of Gdańsk*, *Oceanol. Stud.*, 26 (4), 77-98
- Kowalewski M., 1998, *Upwellings przybrzeżne w płytkim morzu stratyfikowanym na przykładzie Bałtyku*, rozprawa doktorska, maszynopis, Gdynia, Biblioteka Wydziału BGiO Uniwersytetu Gdańskiego, 85
- Krężel A., 1997, *A model of solar energy input to the sea surface*, *Oceanol. Stud.*, 26 (4), 21-34
- Mellor, G. L., Ezer T., Oey L.Y., 1994, *The pressure gradient conundrum of sigma coordinate ocean models*, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 11 (4), Part 2, 1126-1134
- Ołdakowski B., Kowalewski M., Jędrasik J., 1994, *Nutrient dynamics model for the Gulf of Gdansk*, *Proc. of the 19th Conference of the Baltic oceanographers*, Sopot - Poland, 29.08 - 1.09. 1994

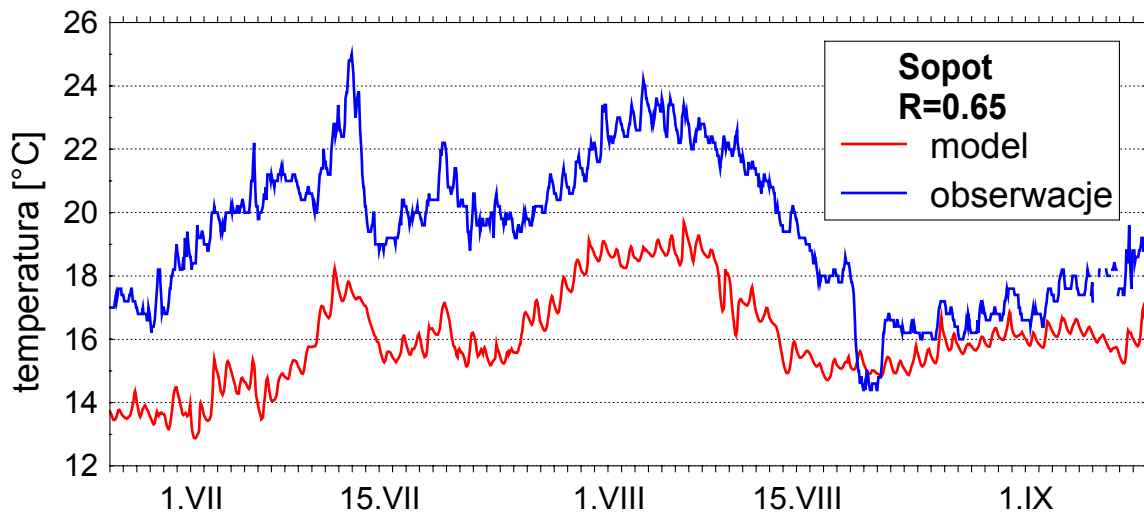


Rys. 1. Obszary objęte modelowaniem – Bałtyk i Zatoka Gdańska

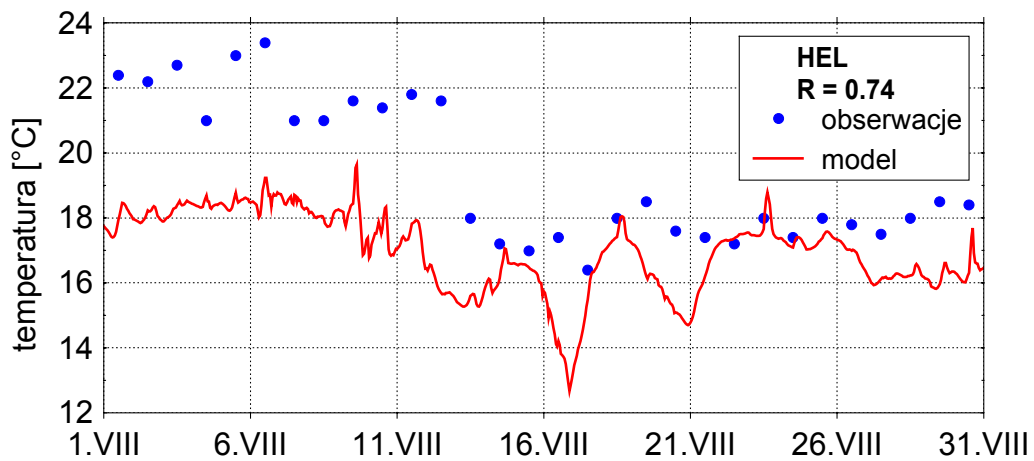


Rys. 2. Schemat przedstawiający sposób podziału akwenu na warstwy we współrzędnych sigma

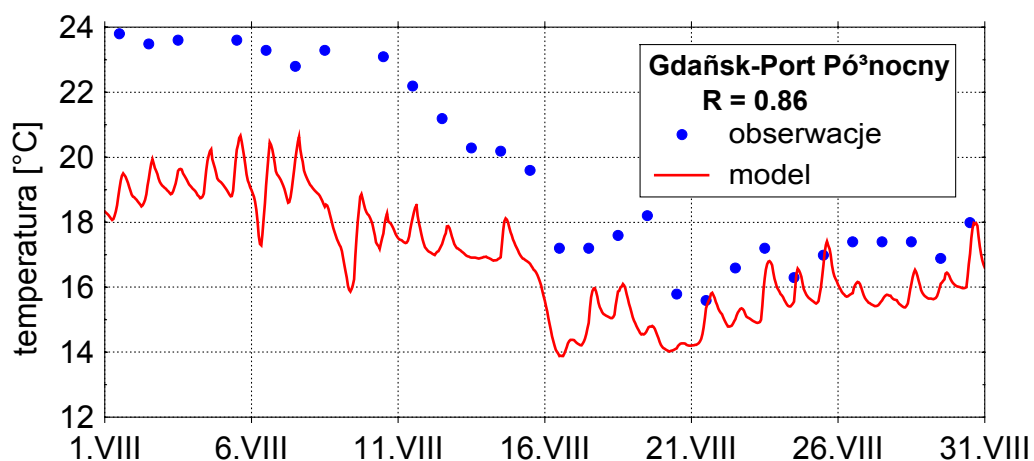
a)



b)

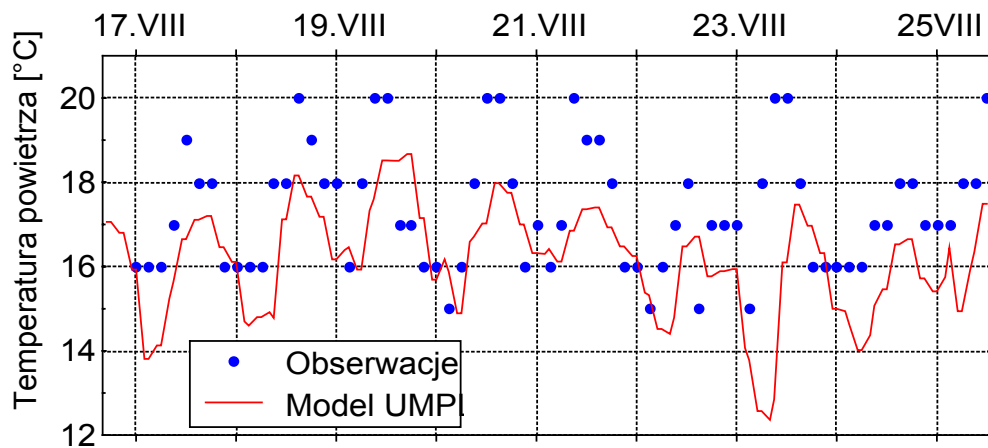


c)

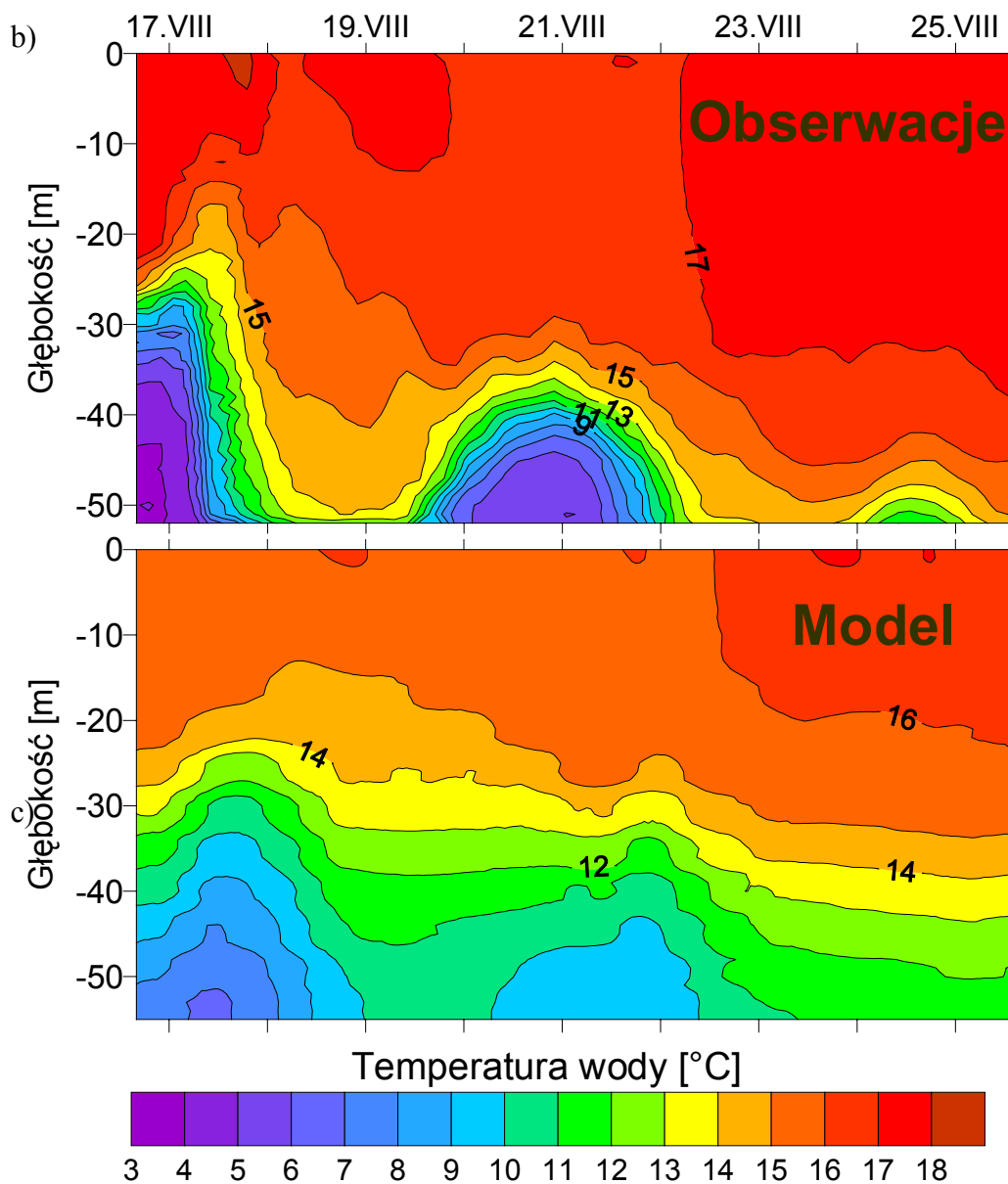


Rys. 3. Porównanie obserwowanych i obliczonych, za pomocą modelu hydrodynamicznego, temperatur wód powierzchniowych w Zatoce Gdańskiej, w lecie 1999 roku (R-współczynnik korelacji liniowej)

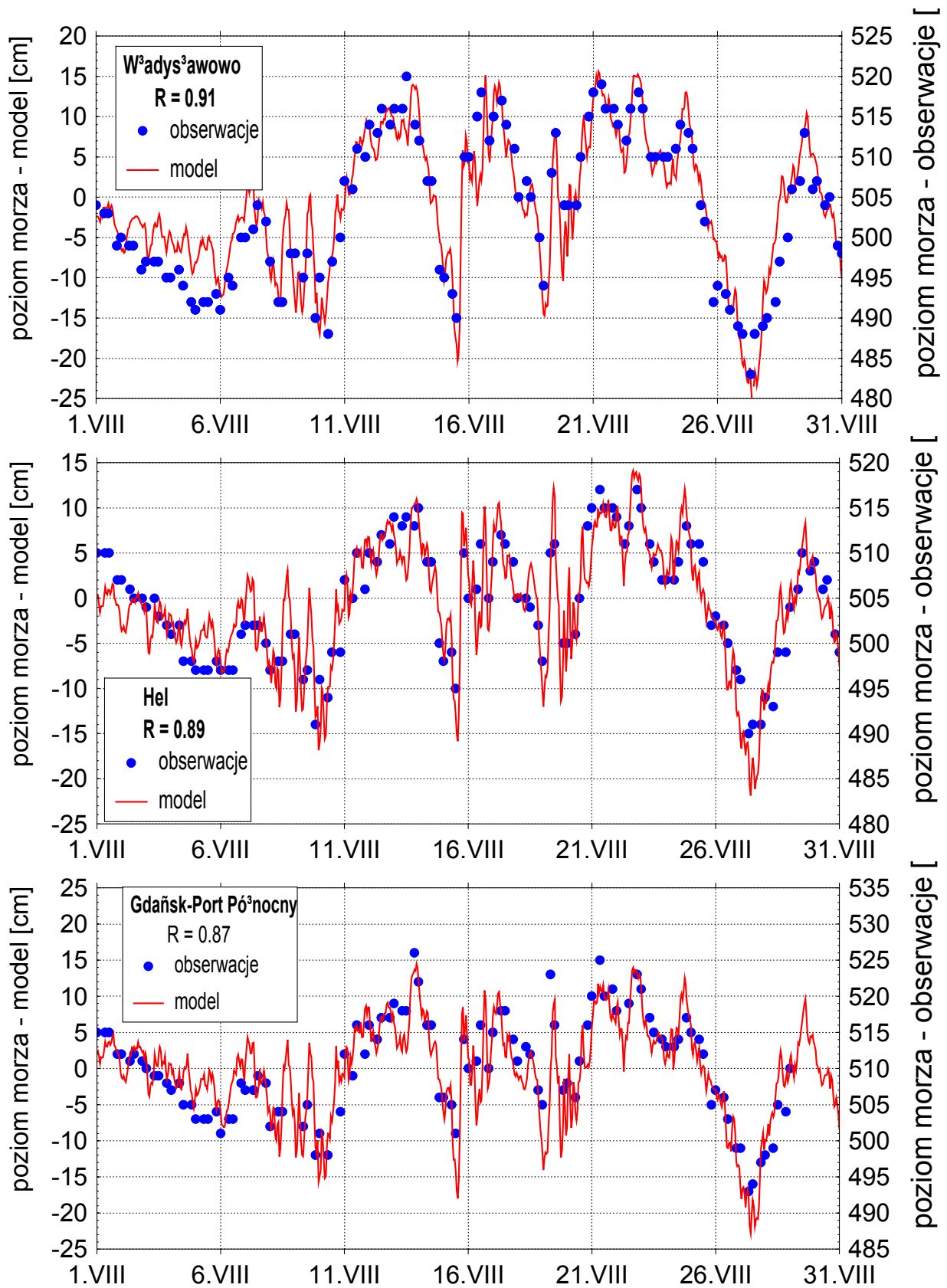
a)



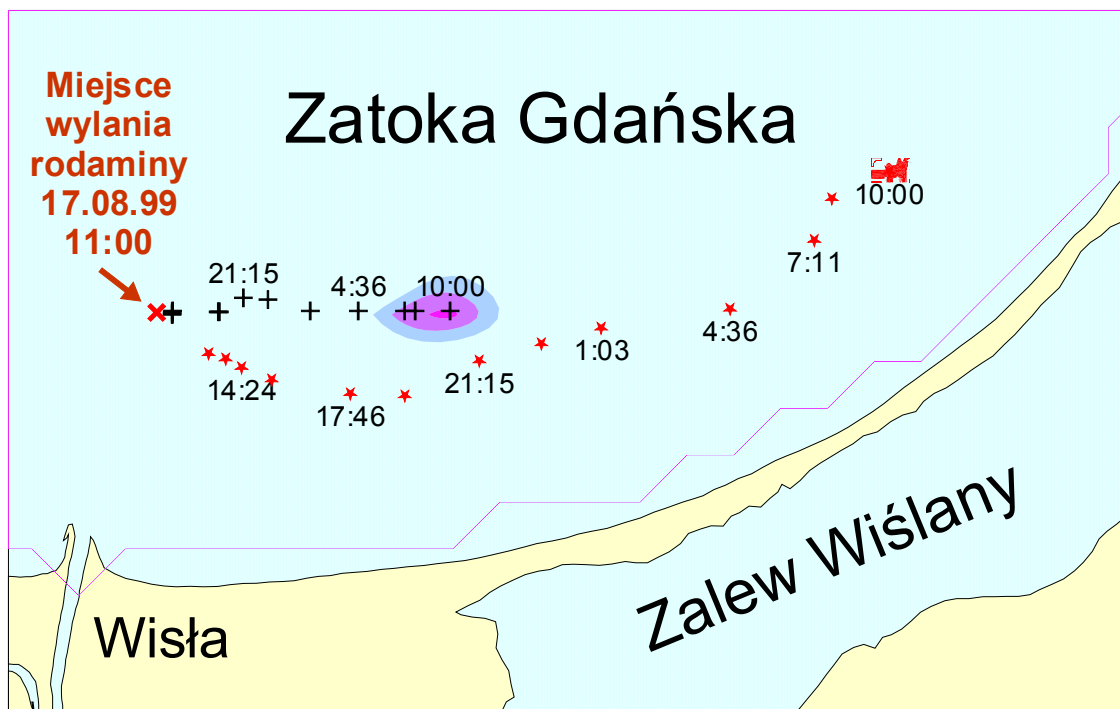
b)



Rys. 4. Porównanie temperatury powietrza (a) obserwowanej i pochodzącej z modelu UMPL oraz temperatury wody obserwowanej (b) i obliczonej za pomocą modelu hydrodynamicznego (c) w rejonie ujścia Wisły (54° 26.2'N, 19° 00.9'E) w sierpniu 1999 r.



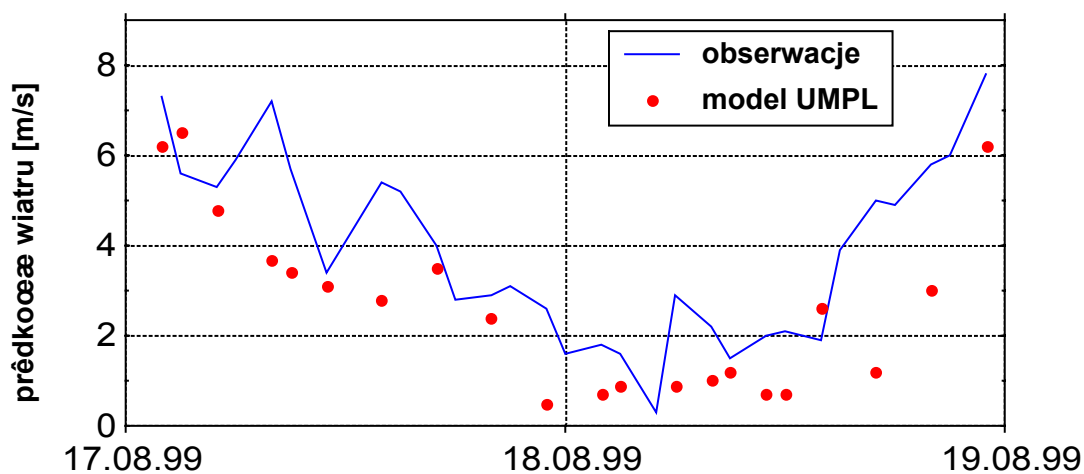
Rys. 5. Porównanie modelowanych i obserwowanych poziomów morza na stacjach: Władysławowo, Hel i Gdańsk – Port Północny w sierpniu 1999 roku (R - współczynnik korelacji liniowej)



+ model

★ obserwacje

Rys. 6. Obserwowana i prognozowana przy pomocy modelu hydrodynamicznego trasa rozprzestrzeniania się plamy rodaminy wylanej w ramach eksperymentu POLRODEX'99



Rys. 7. Porównanie prędkości wiatru: obserwowanej i obliczonej za pomocą modelu UMPL, w rejonie ujścia Wisły (54° 26.2'N, 19° 00.9'E), w trakcie eksperymentu POLRODEX'99