PRODUKTY i METODY „WaterPUCK"

Model ekosystemu Morza Bałtyckiego 3D CEMBS z modułem upwellingu

Opis działania modelu ekosystemu 3D CEMBS z modułem upwellingu w trybie operacyjnym

Celem tego produktu wykonywanego przez zespół modelarzy IOPAN w projekcie WaterPUCK było i) przygotowanie działającego modelu ekohydrodynamicznego Morza Bałtyckiego dla potrzeb projektu, tzn. połączenia jego z modelem ekosystemu Zatoki Puckiej 3D EcoPuckBay na granicy woda-woda oraz ii) opracowanie i przyłączenie modułu upwellingu do 3D CEMBS modelu. Model 3D CEMBS ma za zadanie określając:

1. czas i miejsce wystąpienia zakwitów glonów;
2. stężenia substancji biogenicznych;
3. stężenie rozpuszczonego tlenu
4. temperaturę i zasolenie wód Bałtyku, z uwzględnieniem strefy przybrzeżnej, gdzie upwellingi mogą lokalnie szybko zmienić te parametry;
5. prądy i wychylenie swobodnej powierzchni morza;
6. pokrywę lodową, jej miąższość i przemieszczanie się w rejonie strefy przybrzeżnej Bałtyku;
7. występowanie upwellingu w strefie przybrzeżnej Bałtyku.

Rozwijany w ramach projektu WaterPUCK model numeryczny ekosystemu Morza Bałtyckiego 3D CEMBS, z nową wizualizacją, pozwala na śledzenie w czasie i przestrzeni badanych zjawisk, jak również prognozowanie opisywanych zagrożeń.

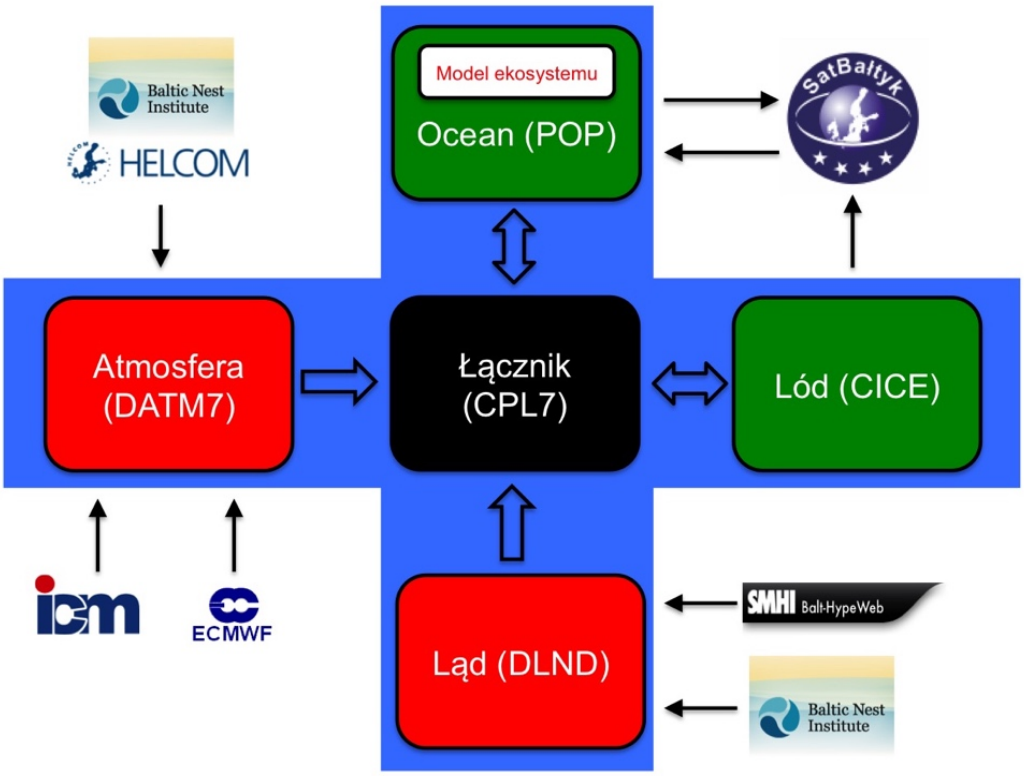
Jako zewnętrzne siły wymuszające zostały wykorzystane dane dostarczane przez meteorologiczny model, wykorzystywany do określania w czasie rzeczywistym prognozy pogody dla naszego kraju i Bałtyku (UW – ICM). W odróżnieniu od metod tradycyjnych, model numeryczny pozwala na, ciągłe w czasie i w przestrzeni, kontrolowanie głównych charakterystyk ekosystemu. Takie podejście pozwala również, na uzyskanie szczegółowego ilościowego opisu zmienności fizycznych, dynamicznych i biologicznych parametrów środowiska morskiego. Elementy te są niezbędne w nowoczesnym prognozowaniu ekologicznym środowiska Bałtyku.

Opis modelu 3D CEMBS

Opracowany model ekosystemu Morza Bałtyckiego 3D CEMBS z modułem upwellingu jest odpowiednim narzędziem do kontrolowania stanu i bioproduktywności morskiego ekosystemu i prognozowania fizycznych i ekologicznych zmian w badanym akwenie.

Model 3D CEMBS (3D Coupled Ecosystem Model of Baltic Sea) składa się z czterech oddzielnych elementów z dodatkowym łącznikiem (CPL7), który kontroluje czas, siły wymuszające, domeny, siatki oraz wymianę informacji między modelami (Rysunek 1).

Centralna część modelu bazuje na MCT (The Model Coupling Toolkit) – który jest w pełni równoległym narzędziem udostępniającym szereg usług, takich jak rejestr poszczególnych komponentów modelu, deskryptory rozkładu domeny na procesory, komunikację, redystrybucję danych oraz inne bardzo pomocne narzędzia. Model jest skonfigurowany dla rozdzielczości poziomej 2km (1/12°). Batymetria modelu jest reprezentowana przez 21 poziomów, gdzie grubości pierwszych czterech warstw powierzchniowych wynoszą odpowiednio 5 metrów. Topografia dna jest oparta na modelu globalnym ETOPO2___(http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html, National Geophysical Data Center). Dane batymetryczne zostały interpolowane na siatkę modelu za pomocą metody Kriginga.



Rysunek 1. Schemat blokowy modelu 3D CEMBS.

W trybie aktywnym pracuje model oceanu (POP, wersja 2.1) z modułem hydrodynamicznym i modułem biologicznym i model lodu (CICE, wersja 4.0), które wymuszane są przez model danych atmosferycznych (datm7). Głównym zadaniem modelu atmosfery datm7 jest interpolacja danych atmosferycznych na domenę modelu. Siły zewnętrzne to średnie dzienne z okresu czterdziestu lat, pochodzące z re-analizy ECMWF (ERA-40). Obecnie w stanie operacyjnym wykorzystywane są 48-godzinne prognozy atmosferyczne dostarczane przez model UM Interdyscyplinarnego Centrum Modelowania Uniwersytetu Warszawskiego. Dodatkowo, poprzez model lądu dlnd wprowadzane są do modelu klimatyczne dopływy rzeczne. Dane objętościowe pochodzą

z modelu Balt-HYPE SMHI. Obecnie w modelu wykorzystywanych jest 71 największych rzek zlewni Bałtyku.
Zlewiska większości wstawionych rzek leżą na terytorium Szwecji (34 rzeki) oraz Finlandii (25 rzek). Model 3D CEMBS posiada moduł ekosystemu, który zlokalizowany jest wewnątrz modelu oceanu i pracuje jedynie gdy POP jest uruchomiony w trybie aktywnym.

Użyta metoda dla modelu 3D CEMBS

Część oceaniczna to regionalna adaptacja modelu POP (*Parallel Ocean Program*) rozwiniętego w Los Alamos National Laboratory (LANL), (Smith i Gent, 2004). POP jest trójwymiarowym modelem hydrodynamicznym, wywodzącym się z modelu oceanu stworzonego pod koniec lat sześćdziesiątych przez Kirk Bryan (1969) i Michael Cox z NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory w Princeton. Model był później modyfikowany i przystosowany do wektorowych procesorów przez Semtnera (1974). Cała klasa modeli z których wywodzi się POP to typ Brayan-Cox-Semtner (B-C-S). Modele tego typu były i dalej są modyfikowane i udoskonalane.

Modele wywodzące się z rodziny typu B-C-S są najczęściej używanym narzędziem do modelowania oceanu. Obecnie modele typu B-C-S są stosowane w wielu ośrodkach naukowych na całym świecie. Są to zarówno modele regionalne np. dla Morza Bałtyckiego (Meier, 2005; Lehmann i in., 2004; Lass i Mohrholz, 2003; Rudolph i Lehmann, 2006), Północnego Atlantyku (Brachet i Le Traon, 2004), Arktyki (Maslowski i in., 2004) jak i globalne (Maltrud i McClean, 2005; Lee i Coward, 2003), badające procesy w wodach przybrzeżnych (Lass, 2001) i na otwartym oceanie, w krótkich okresach czasowych i w skalach klimatycznych (Nadiga i in., 2006; Bryan i in., 2006). W 2001 roku POP został zaadoptowany w USA do modelu CCSM (*Community Climate System Model*) jako składnik oceaniczny.

Podstawowe równania modułu hydrodynamicznego

Podstawą modułu hydrodynamicznego modelu 3D CEMBS jest model POP są to trójwymiarowe równania ruchu z założeniem hydrostatyki i Boussinesq'a. Opis znajduje się w artykule Dzierzbickiej-Głowackiej i inni (Dzierzbicka-Głowacka i inni 2013a).

Podstawowe równanie modułu lodu

Model lodu to regionalna adaptacja modelu CICE (*Community Ice CodE*). Zastosowana została najnowsza wersja tego modelu (CICE 3.14), która jest efektem pracy naukowców z Los Alamos National Laboratory (Lipscomb i Hunkle), Naval Postgraduate School (Wieslaw Maslowski, Jaromir Jakacki), National Centre for Atmospheric Research i Uniwersity of Washington nad wydajnym kodem modelu lodu , który może być zintegrowany zarówno z morzem, lądem, oceanem jak i atmosferą. CICE jest kompatybilny z POP, jako elementem oceanicznym.

CICE składa się z kilku współpracujących elementów: termodynamiczny model, model dynamiki lodu liczący prędkość paku lodowego, model transportu. Najnowsza wersja CICE 3.14 zawiera ulepszone algorytmy dla narastania i zanikania lodu oparte na pracach Bitz i Lipscomb (1999). Aby jak najdokładniej odwzorować rozkład grubości pokrywy lodowej i nieliniowe profile temperatury i zasolenia model lodu morskiego może posiadać pięć poziomów lodu z czterema warstwami przypadającymi na jedną kategorię. W każdej kategorii jest warstwa śnieżna. Zastosowano elastyczną-lepkościowo-plastyczną (EVP, *elastic-visco-plastic*) reologię (Hunke i Dukowicz, 1997). Aby poprawić wydajność CICE wykonano *remapping* transportu lodu (Lipscomb i Hunke, 2004) i grubości lodu (Lipscomb, 2001) oraz zachowania się pokrywy lodowej. Badania z użyciem nowego CICE dla Morzu Beringa i dla całego Oceanu Arktycznego pokazały zasadnicze ulepszenie odwzorowania lodu morskiego.

Włączenie modelu CICE do regionalnego modelu POP, zrealizowane zostało przez zespół IOPAN. Opis znajduje się w artykułach Jakackiego i inni. (Jakacki i inni 2018) i Janeckiego i inni. (Janecki i inni 2018).

Podstawowe równania modułu biogeochemicznego

Moduł biologiczny modelu 3D CEMBS jest zbiorem równań mających postać równania turbulentnej dyfuzji z członem adwekcyjnym.

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + u_i \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(K_i \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} \right) + F_\Phi$$

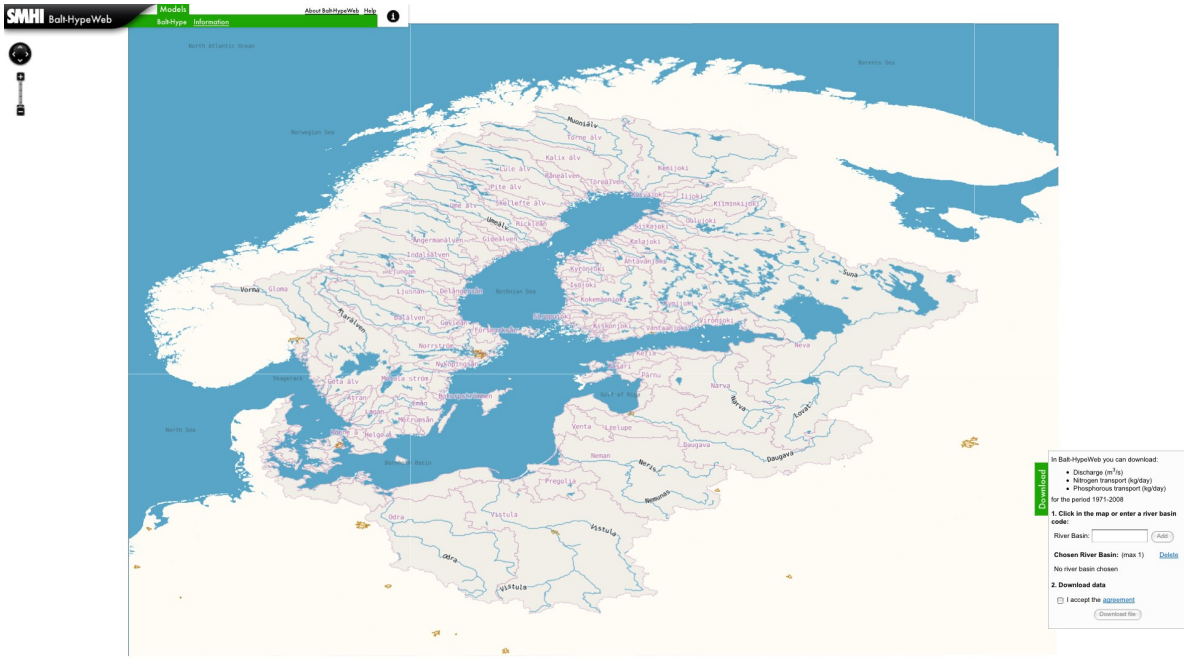
gdzie: Φ - zmienne biogeochemiczne modelu, u_i – składowe prędkości, K_i – współczynniki turbulentnej dyfuzji, F_Φ – funkcje źródła i strat dla badanych zmiennych.

Model składa się z powiązanych ze sobą jedenastu cząstkowych równań różniczkowych drugiego rzędu, dla stężenia chlorofilu-a, biomasy fitoplanktonu (dla trzech zmiennych jako Chl*a*), biomasy zooplanktonu, stężenia substancji biogennych (fosforanów, azotanów i amoniaku), koncentracji tlenu, złoża detrytusu pelagicznego oraz bentosowego (dla dwóch zmiennych – fosforanów i azotanów). Funkcje źródła i strat będą określone na podstawie znajomości procesów biologicznych i chemicznych, zachodzących w środowisku morskim i ich wzajemnych powiązań. Opis modelu znajduje się w artykule Dzierzbicka-Głowacka i inni (2013b).

Moduł danych z rzek

Dane objętościowe dopływów rzecznych pochodzą z modelu Balt-HYPE SMHI (Swedish Meteorological and Hydrological Institute). Balt-HYPE jest modelem

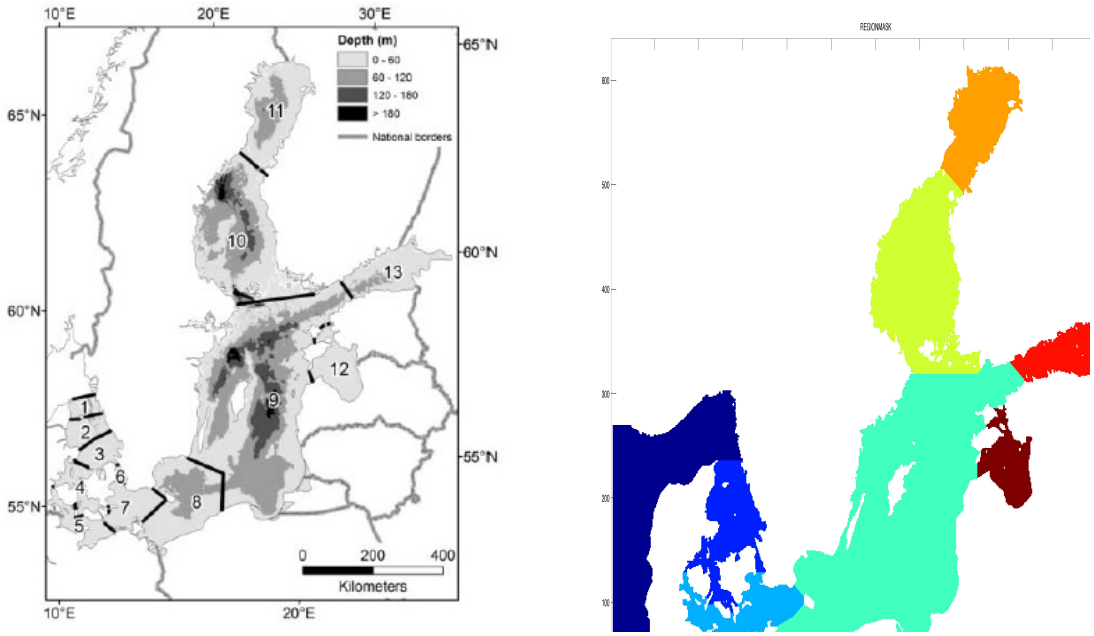
hydrologicznym do symulacji przepływów wody i substancji z opadów atmosferycznych, przez ziemię, do potoków i jezior aż po ujścia rzek. Zlewnie rzek są podzielone na podobszary, a każdy podobszar na klasy w zależności od pokrycia lądu, typu gleby i wysokości n.p.m. Wartości przepływów dla lat 1971-2008 są dostępne do pobrania na stronie http://balt-hypeweb.smhi.se/ (Rysunek 2)



Rysunek 2. Strona http://balt-hypeweb.smhi.se.

Wybrano 71 rzek zlewni Bałtyku. Zlewiska większości wstawionych rzek leżą na terytorium Szwecji (34 rzeki) oraz Finlandii (25 rzek). Ponadto wstawiono rzeki leżące na terytorium Estonii (4), Łotwy (3), Polski (2), Litwy (1), Rosji (1) oraz Norwegii (1).

Baza danych Baltic Nest Institute ze związkami biogenicznymi dostającymi się do Morza Bałtyckiego z rzek i atmosfery obejmuje okres 1850-2006 i została podzielona na 13 regionów (Rysunek. 3). Podobny podział wykonano w modelu 3D-CEMBS, wyselekcjonowano rzeki uchodzące do Morza Bałtyckiego w granicach poszczególnych regionów i ustalono procentowy udział każdej rzeki w danym regionie. W sumie w modelu uwzględnionych jest 71 rzek.



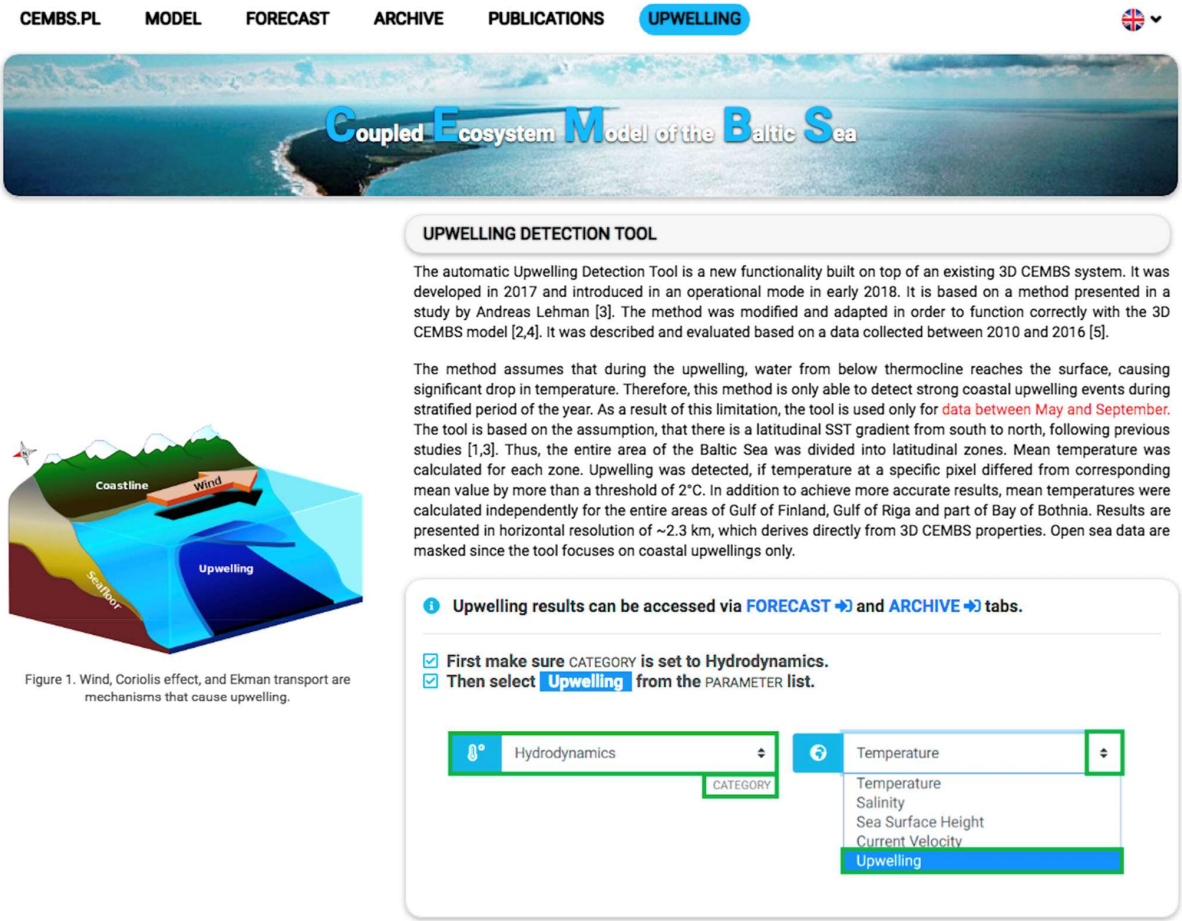
Rysunek 3: Podział Morza Bałtyckiego na regiony dla depozycji substancji biogenicznych wg Baltic Nest Institute (lewa) i w modelu 3D-CEMBS (prawa).

Moduł upwellingu

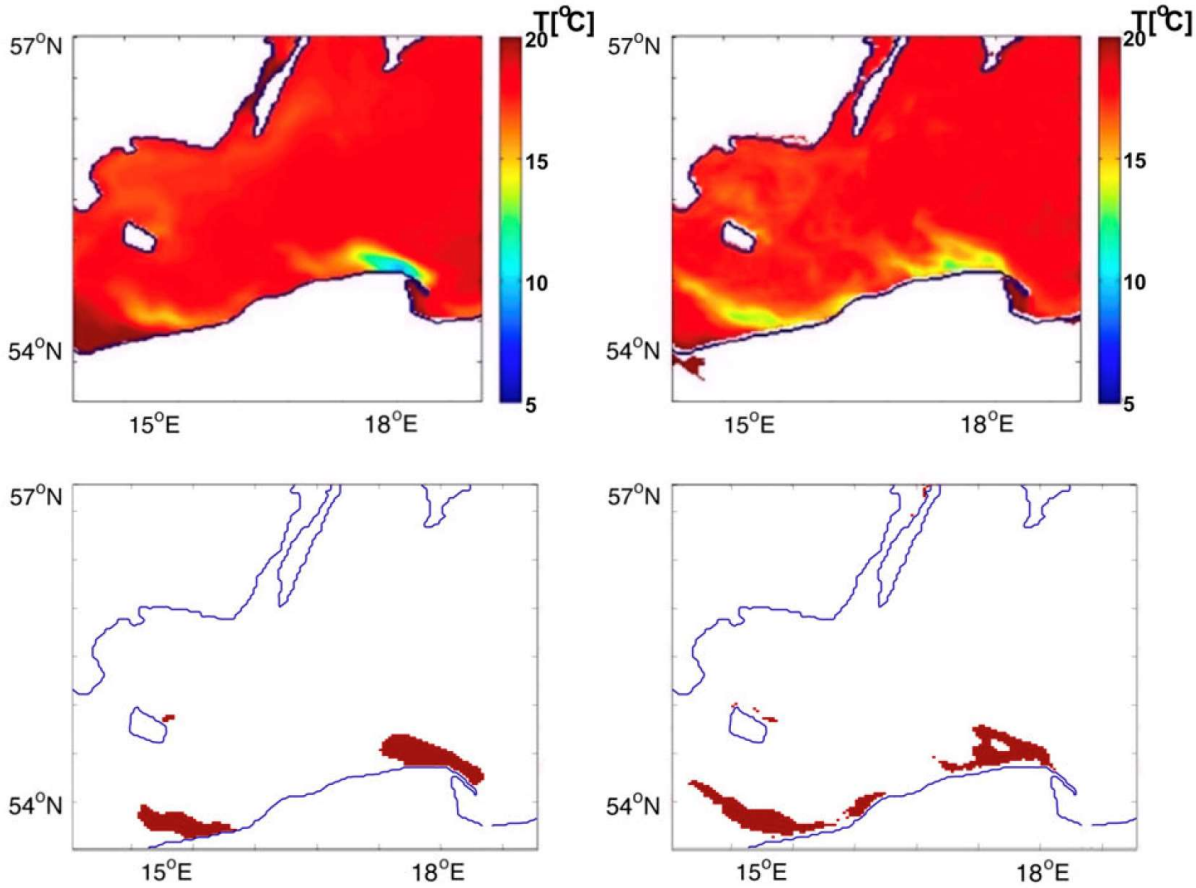
Metoda automatycznej detekcji upwellingu zastosowana w tym module, opracowanym w ramach projektu WaterPUCK, wykorzystuje właściwości tego zjawiska oraz specyficzną charakterystykę Bałtyku. Morze Bałtyckie rozciąga się na szerokościach geograficznych od około 54^oS do 66^oN. Dzięki takiemu usytuowaniu, można zaobserwować wyraźny gradient SST w kierunku z północy na południe. Ponadto, dzięki dużej stratyfikacji termicznej upwelling zazwyczaj prowadzi do znacznego spadku temperatury na powierzchni poprzez wynoszenie zimnych mas wodnych z głębszych warstw, co może doprowadzić do zaistnienia znacznych gradientów na powierzchni sięgających $5^oC/km$ (Krężel et al. 2005). Wykorzystując pierwszą obserwację, można podzielić cały Bałtyk na strefy wzdłuż kolejnych długości geograficznych. Dla każdej z tych stref wylicza się następnie średnią temperaturę powierzchniową. Korzystając z drugiej właściwości można przyjąć, że jeśli różnica temperatury między punktem a temperaturą średnią dla danej warstwy jest wyższa od założonej wartości progowej oznacza to iż mamy do czynienia z upwellingiem (Lehmann et al. 2012). Po kilku próbach, wartość progowa temperatury została ustalona na 2^oC. Zaobserwowano również, że dla pewnych regionów Bałtyku, a konkretnie dla Zatoki Fińskiej, Ryskiej oraz części Zatoki Botnickiej, uzyskuje się lepsze rezultaty jeśli zamiast dzielić te regiony na strefy, wylicza się dla każdego z nich jedną wartość średnią temperatury. Jak już wcześniej wspomniano, do wykrycia upwellingu konieczny jest duży spadek temperatury, który wynika z wyniesienia zimnych mas wodnych z warstw poniżej termokliny. W związku z tym, metoda ta jest skuteczna tylko w okresie silnej stratyfikacji termicznej Bałtyku, czyli od Maja do Września. Sprawdzenia jakości omówionej

wyżej metody jak również analizę wyników i opis międzyletnich zmian upwellingu przeprowadzono z wykorzystaniem danych satelitarnych AVHRR oraz wyników symulacji modelu 3D CEMBS (Nowicki et al. 2019). Dane satelitarne wykorzystane w tym celu były uprzednio przetworzone poprzez algorytm DESAMBEM (Woźniak et al. 2008).

Moduł automatycznej detekcji upwelligów przybrzeżnych został napisany w programie MATLAB® oraz został włączony do systemu operacyjnego. Wyniki modułu są dostępne na stronie modelu 3D CEMBS. Rysunek 4 przedstawia opis modułu na stronie natomiast rysunek 5 a, b oraz c przedstawia przykładowe wyniki. W górnej części każdej z map widoczne są dane temperatury powierzchniowej natomiast w dolnej, oznaczone na jej podstawie obszary występowania upwellingu.



Rysunek 4. Strona opisująca system detekcji upwellingów.

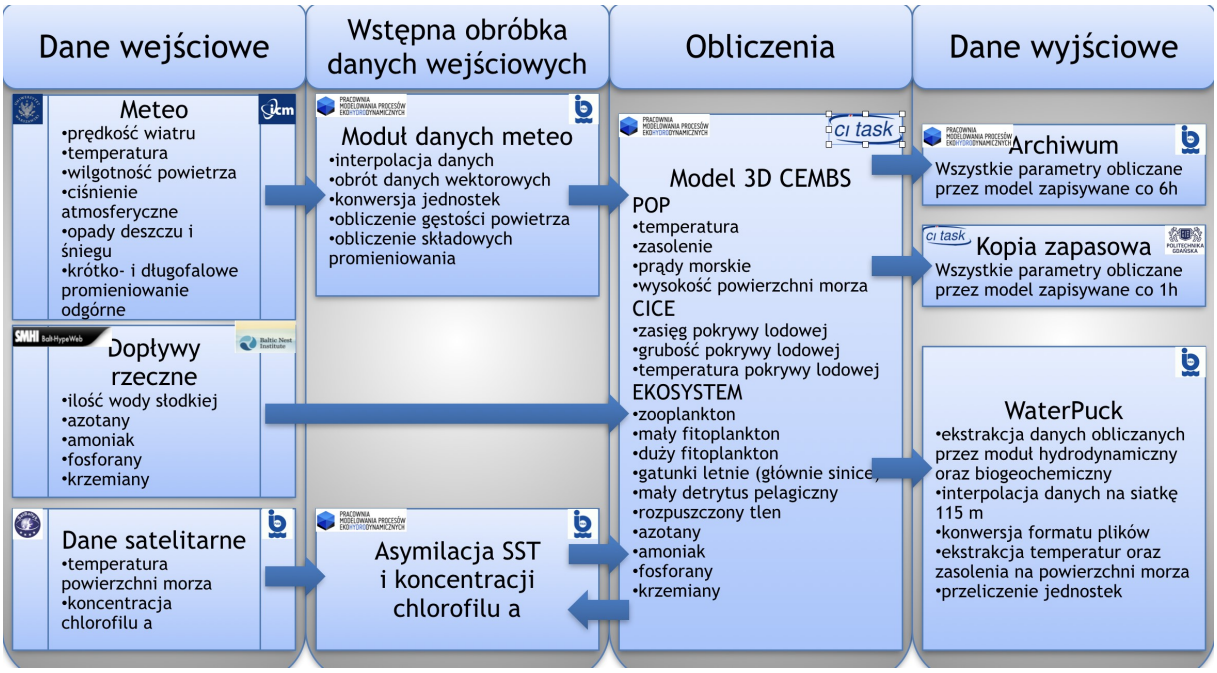


Rysunek 5. Przykładowe wyniki detekcji upwellingów z dnia 18.08.2015.

System operacyjny modelu 3D CEMBS

Model 3D CEMBS jest obecnie częścią systemu, działającego w trybie operacyjnym, w czasie rzeczywistym (Rysunek 6). Jego zadaniem jest udostępnianie wartości parametrów hydrodynamicznych, biogeochemicznych, lodu oraz upwellingu w formie danych archiwalnych oraz ich prognoz. W trybie operacyjnym model produkuje wyniki w rozdzielczości poziomej 1/48^0 (~2km). W pionie jest podzielony na 21 warstw. Pierwsze cztery warstwy mają grubość 5 metrów każda. Grubość każdej kolejnej warstwy stopniowo się zwiększa. System w oparciu o wyniki poprzednich prognoz, dane meteorologiczne, satelitarne oraz dane z dopływów rzecznych tworzy 48-godzinne prognozy stanu wszystkich parametrów. Prognozy są uaktualniane 4 razy dziennie. Dane wyjściowe przechowywane są w archiwach CI TASK oraz IO PAN. Dostęp do wyników aktualnych oraz archiwalnych jest możliwy poprzez stronę www (http://cembs.pl). Schemat na rysunku 8 przedstawia główne moduły składające się na

system oraz opisuje w skrócie ich funkcje przedstawione szerzej w kolejnych podrozdziałach tego rozdziału. Zawiera on również listy danych wejściowych oraz wyjściowych przechowywanych w bazie danych systemu



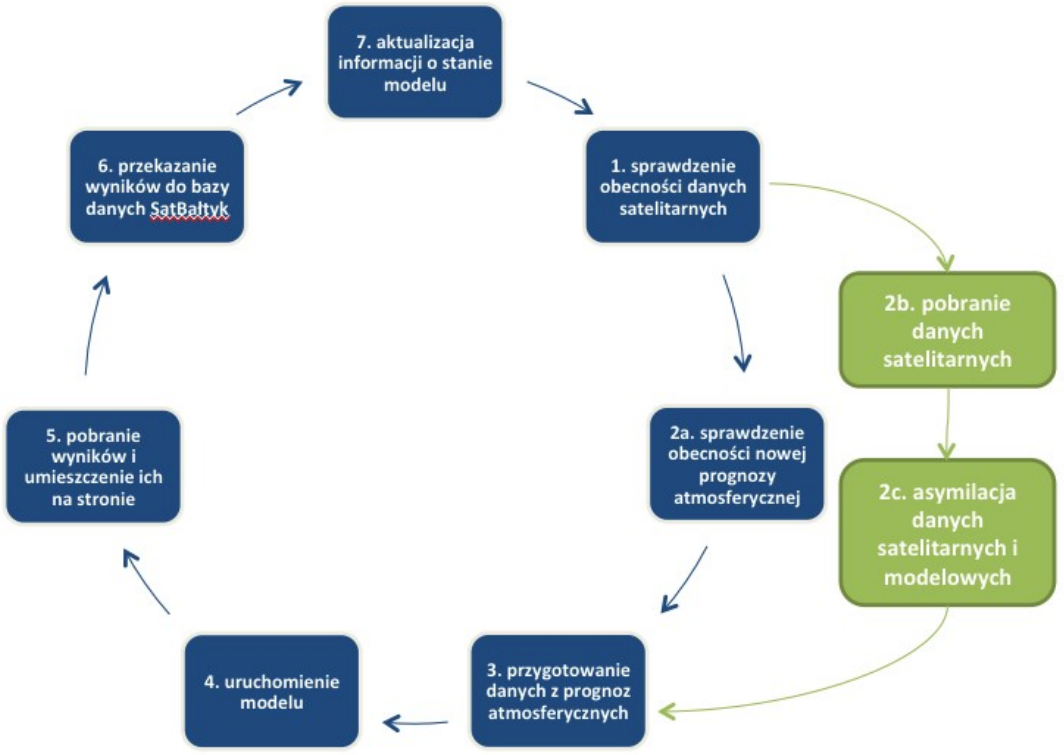
Rysunek 6. Schemat systemu operacyjnego modelu 3D CEMBS

Schemat na rysunku 7 przedstawia kolejne etapy działania całego systemu zarządzającego pracą modelu 3D CEMBS w trybie operacyjnym. Punkty w niebieskich ramkach przedstawiają pracę systemu w trybie podstawowym, bez asymilacji danych satelitarnych. Punkty w zielonych ramkach przedstawiają część systemu odpowiedzialną za asymilację.

Moduł asymilacja danych satelitarnych

Dane satelitarne wykorzystywane w modelu 3D CEMBS to SST oraz stężenie powierzchniowe chlorofilu *a*. Dane te pochodzą z czujnika MODIS umieszczonego na satelicie AQUA. Zazwyczaj pojawiają się one dwa razy dziennie w kilkunastominutowych odstępach i obejmują obszar całego Bałtyku. Dane te są dostępne w bazie danych projektu SatBałtyk. Ich rozdzielczość pozioma to 1 km. Są one pobierane na lokalny komputer a następnie interpolowane przy pomocy opisanej wcześniej metody distance-weighted average remapping na siatkę modelową. Jeśli danego dnia występuje więcej niż jedna scena satelitarna system przed

dalszą pracą połączy wszystkie dostępne sceny w jedną mapę. Następnie dane satelitarne zostaną wykorzystane do asymilacji z obliczeniami modelowymi.



Rysunek 7. Schemat działania modelu 3D CEMBSA w trybie operacyjnym

Moduł obsługi wyników

Moduł wyników jest odpowiedzialny za wszystkie procesy związane z przesyłaniem danych między serwerami oraz ich konwersją. Ponieważ model zapisuje do plików wynikowych znacznie więcej parametrów niż są wykorzystywane w systemie, po poprawnym zakończeniu obliczeń z plików tych, w celu zaoszczędzenia miejsca na dyskach, wybierane są tylko najistotniejsze parametry prognozy opisane w części „Opis modelu 3D CEMBS" tego dokumentu. Następnie wybrane dane są importowane z powrotem na lokalny komputer. Stąd wyniki najnowszych prognoz kopiowane są do odpowiednich folderów roboczych umożliwiających dostęp do nich z poziomu strony www modelu. Co szósta godzina prognoz jest też przenoszona do bazy archiwalnej.

Wartości temperatury i zasolenia, poziom morza, prędkości i kierunki prądów, grubość i zasięg pokrywy lodowej, koncentracja chlorofilu *a* i fitoplanktonu, stężenie azotanów, amoniaku, fosforanów i krzemianów oraz rozpuszczonego tlenu są

interpolowane na tą siatkę, a następnie konwertowane do plików binarnych oraz eksportowane do bazy danych tego projektu. Do interpolacji wykorzystano tą samą metodę co w przypadku interpolacji danych meteorologicznych na siatkę modelową. Kopie zapasowe wszystkich wyników są przechowywane na serwerach CI TASK. Jak wcześniej wspomniano, poza podstawowymi produktami wymienionymi wcześniej, model wylicza dziesiątki innych produktów pośrednich. Wszystkie te wyniki przechowywane są w archiwach CI TASK w postaci oryginalnych plików NetCDF wyprodukowanych przez model.

Moduł połączenia modeli 3D CEMBS z 3D EcoPuckBay

Moduł ten jest odpowiedzialny za przetwarzanie danych z modelu 3D CEMBS tak, aby można je było wykorzystać jako pola wymuszające na granicy woda-woda w modelu EcoPuckBay. Moduł ten składa się z szeregu programów napisanych w Fortranie oraz w BASHu. W pierwszej kolejności moduł pobiera dane będące wynikami obliczeń modelu 3D CEMBS i na podstawie zadanej listy zmiennych wybiera te zmienne, które są potrzebne na granicę. Minimalna lista zmiennych potrzebnych do działania modelu to temperatura, zasolenie oraz wysokość powierzchni morza natomiast dodatkowe parametry obejmują szereg zmiennych hydrodynamicznych oraz biochemicznych. Po wybraniu odpowiednich zmiennych model poddaje je obróbce. W pierwszej kolejności zmienne wektorowe obracane są pomiędzy siatkami. Następnie dane są dzielone na obszar otwartego morza oraz zatoki wzdłuż Półwyspu Helskiego. Jest to konieczne ze względu na mniej dokładne odwzorowanie półwyspu na siatce modelu 3D CEMBS niż na siatce modelu EcoPuckBay. Tak podzielone dane z zatoki oraz z morza są niezależnie ekstrapolowane przy pomocy solvera Poisson'a tak, aby zapewnić ich obecność w każdym punkcie po interpolacji na dokładniejszą siatkę. Ekstrapolowane dane są następnie interpolowane na siatkę modelu EcoPuckBay. Ostatnim krokiem przetwarzania danych jest ponowne połączenie ich wzdłuż półwyspu według nowego, dokładniejszego jego odwzorowania na siatce o większej rozdzielczości. Tak przygotowane dane są następnie wykorzystywane do zasilenia modułu granicy woda-woda co pozwala na zachowanie lepszego odwzorowania wyników modelu.

Strona Website 3DCEMBS

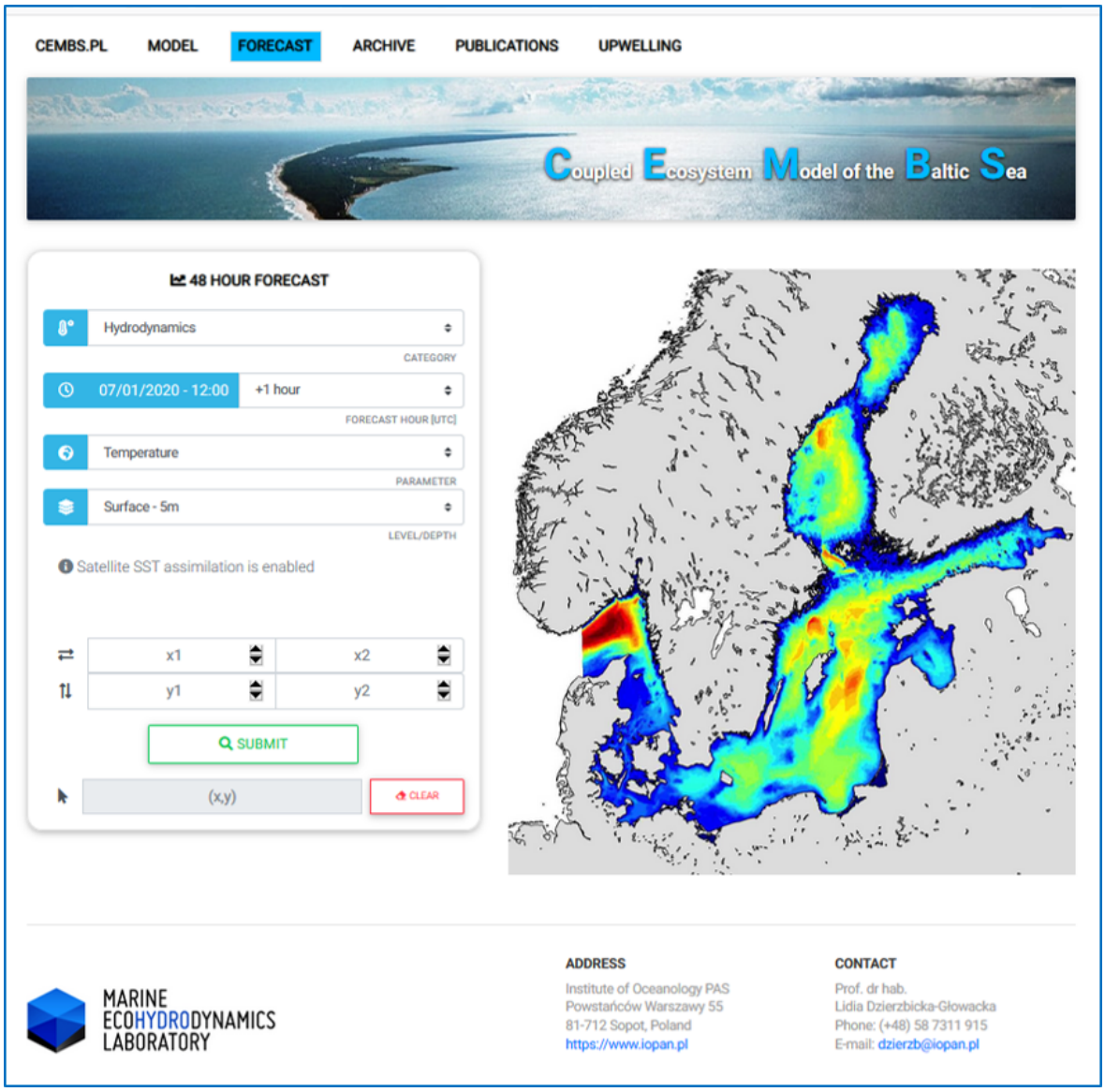
Wyniki działania modelu są automatycznie umieszczane na stronie internetowej po każdej aktualizacji prognozy (www.cembs.pl). Strona składa się z kilku powiązanych zakładek (Rysunek 8). Strona główna i model zawierają opis modelu, jego poszczególnych składników i informacje o konfiguracji. Zakładka o nazwie prognoza 2 km zawiera aktualne oszacowanie wybranych parametrów modelu dla obszaru z 48-godzinną prognozę. Również dane archiwalne są dostępne na stronie. Przedostatnia

zakładka to wykaz publikacji dotyczących samego modelu 3D CEMBS i jego działania. Natomiast ostatnia zakładka zawiera opis modułu upwellingu.

Obecnie dostępne są następujące parametry poprzez zakładkę:

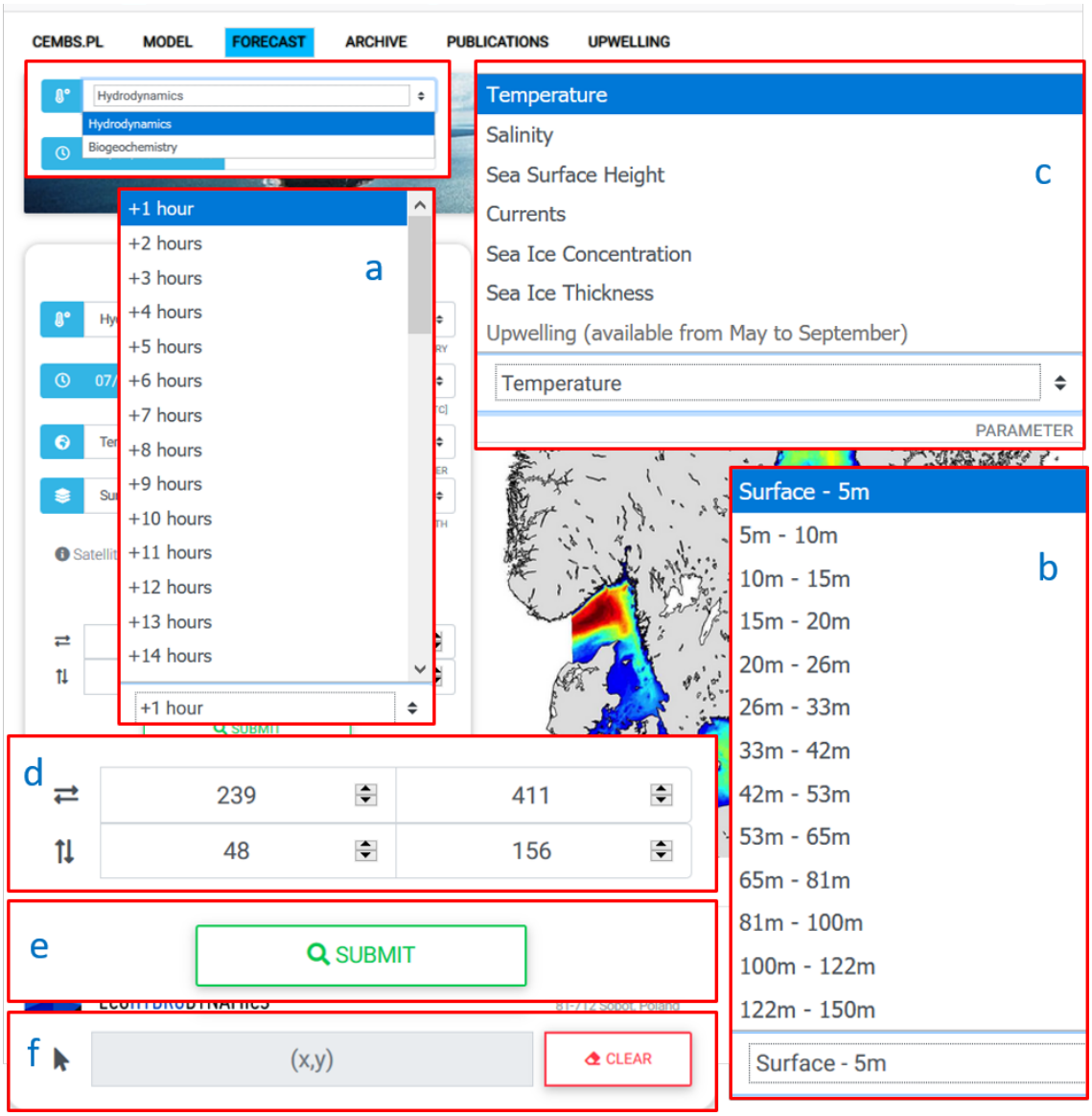
• Hydrodynamics: temperatura, zasolenie, prądy i poziom morza oraz pokrywa i grubość pokrywy lodowej a także występowania upwellingu;

• Biogeochemistry: chlorophyll-a, fitoplankton, zooplankton, azotan, amoniak, fosforan, krzemian, rozpuszczony tlen, detrytus.



Rysunek 8 . Strona internetowa modelu 3D CEMBS (www.cembs.pl)

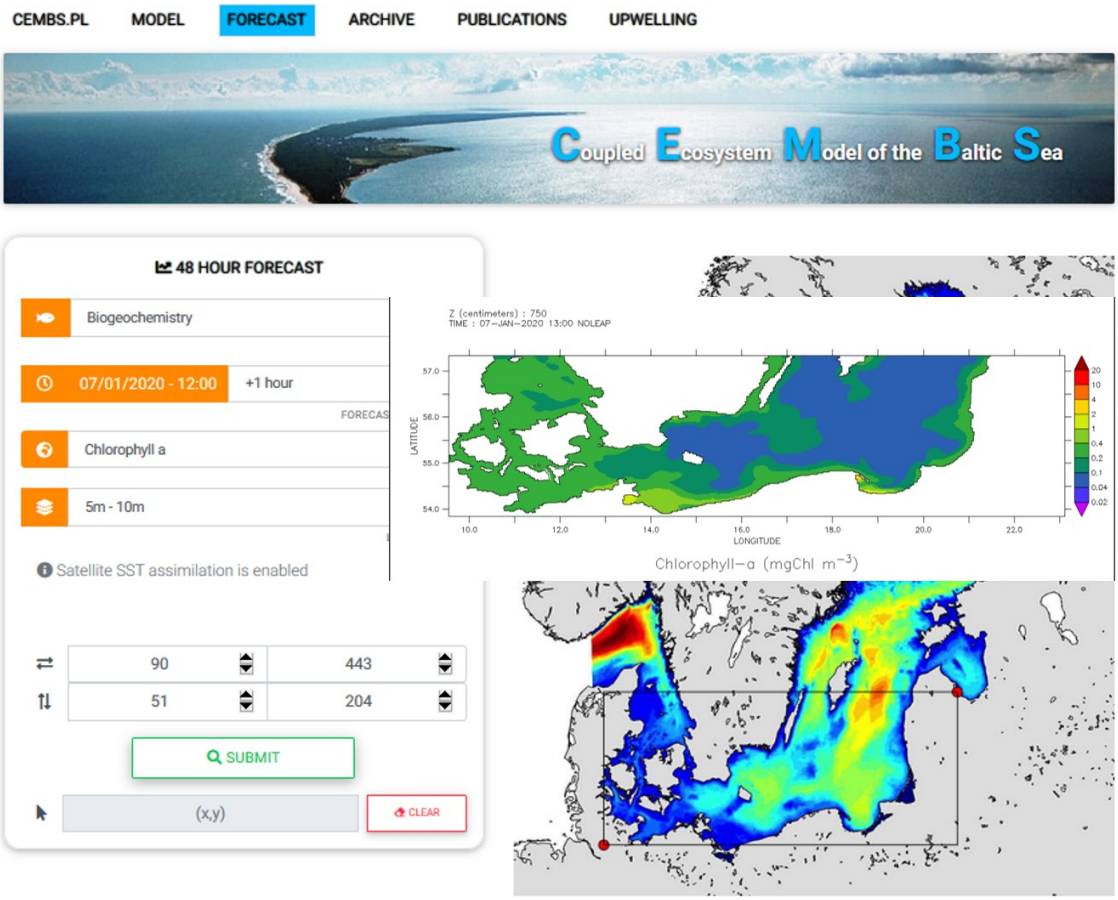
Aby wyświetlić prognozę dla wybranej zmiennej i danego obszaru Bałtyku, należy:
- wybierz czas prognozy (prognoza 48 h) (Rysunek 9a),
- wybierz głębokość, jedną z dziesięciu warstw, dla których chcesz zobaczyć wyniki modelu (rysunek 9b),
- wybierz zmienną z panelu Hydrodynamics lub Biogeochemistry (rysunek 9c),
- opcjonalnie możesz ustawić granice, aby zawęzić obszar zainteresowania o wybranie dwóch losowych punktów (narożników prostokąta) na mapie (rysunek9),
- aby zmienić współrzędne „X" i „Y" wybranych punktów, naciśnij: „Clear" (rysunek 9e),
- po wybraniu wszystkich parametrów naciśnij: „Submit" (rysunek 9f).



Rysunek 9. Panel wyboru użytkownika dla ilustracji wyników modelu 3D CEMBS

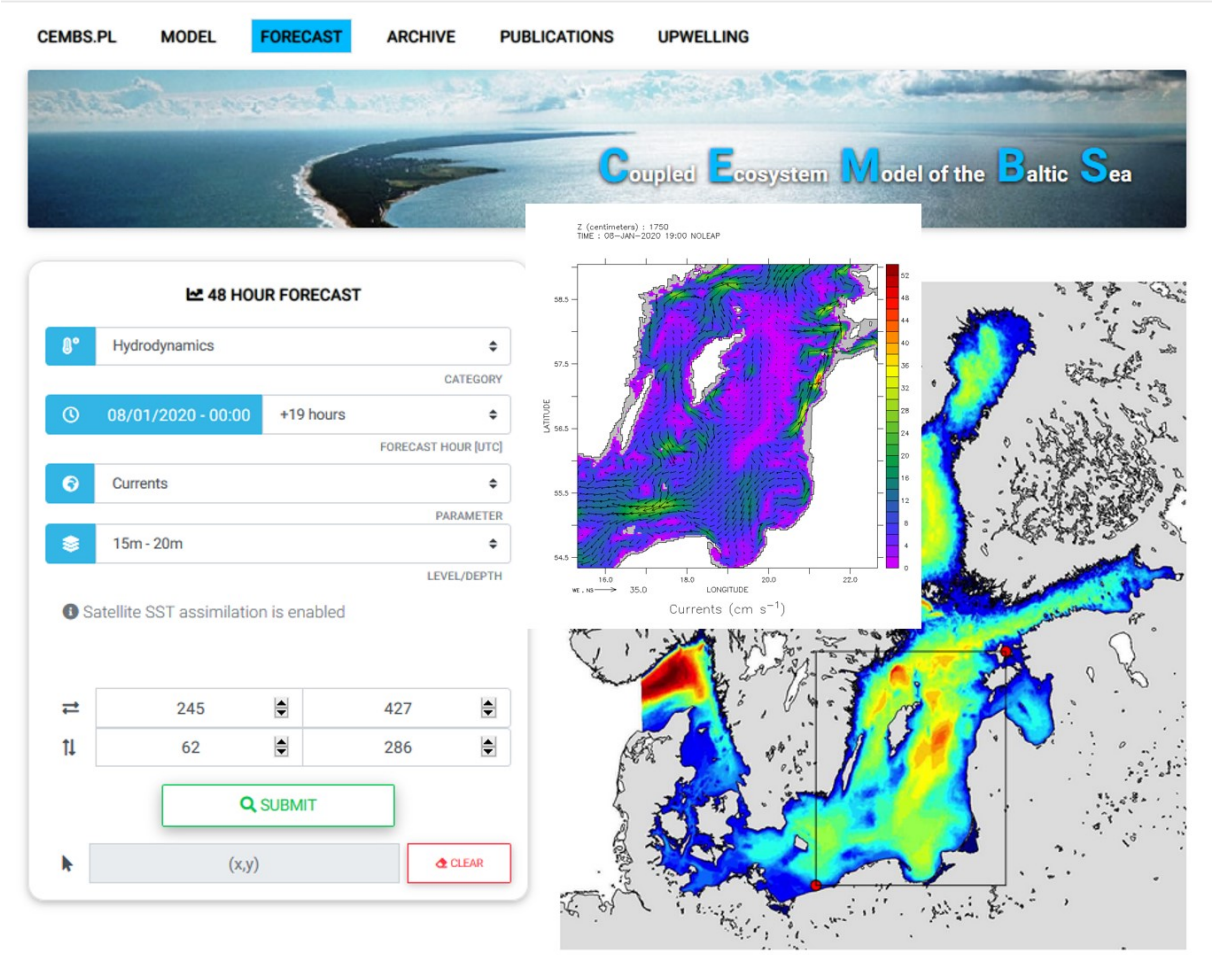
Panel wyboru użytkownika i przykładowa mapa z prognozą dla stężenia chlorofilu-a (przypadek 1) i prądów (przypadek 2) zilustrowano odpowiednio na rysunkach 10 i 11.

Poniżej przedstawiono dwa przykłady dla następujących sytuacji:
1. Rozpoczęcie prognozy: 07.01.2020, 12:00 UTC (rys. 10); Wybierz parametry prognozy - godzina: +1 (prognoza dotyczy 07.01.2013, 13:00 UTC), zmienna: chlorofil–a [mgChl m-3]; głębokość: 5-10 (2 warstwa), współrzędna „X": 90 do 443, współrzędna „Y": 51 do 204. Po zakończeniu wybierz parametry, naciśnij: „Submit", a ekran zilustruje wyniki modelu.



Rysunek 10. Panel wyboru użytkownika i przykładowa mapa z prognozą dla stężenia chlorofilu-a (przypadek 1)

2. Rozpoczęcie prognozy: 08.01.2020, 00:00 UTC (rys. 11); Wybierz parametry prognozy - godzina: +19 (prognoza na 09.01.2020, 07:00 UTC), zmienna: prądy [cm s-1]; głębokość: 15–20 m (4 warstwa), współrzędna „X": 245 do 427, współrzędna „Y": 62 do 286. Po wybierz parametry, naciśnij: „Submit", a ekran zilustruje wyniki modelu.



Rysunek 11. Panel wyboru użytkownika i przykładowa mapa z prognozą dla prądów (przypadek 2)

Podsumowanie.

Prace wykonane w ramach realizacji projektu polegały na implementacji danych modelu 3D CEMBS do integracji z modelem 3D EcoPuckBay na granicy woda-woda dla prawidłowej wymiany informacji między nimi oraz przygotowanie tego narzędzia do

pracy w trybie operacyjnym. Jako, że modelowanie numeryczne (szczególnie zmiennych biologicznych) w Morzu Bałtyckim jest trudnym zagadnieniem nie tylko ze względu na specyfikę samego akwenu, ale również na dużą zmienność czasową modelowanych parametrów, należało uwzględnić wiele czynników wymuszających oraz zapewnić zarówno ich wysoką jakość jak i częstotliwość. W tym celu w modelu 3D CEMBS uwzględnione zostały dopływy wody słodkiej wraz z depozycją substancji biogenicznych pochodzące z 71 największych rzek zlewiska Morza Bałtyckiego. Ponadto wykorzystane zostały bardzo dokładne atmosferyczne siły wymuszające z modelu prognozy pogody UM (ICM, Uniwersytet Warszawski) . Prace nad modelem 3D CEMBS obejmowały również zmianę parametryzacji mieszania pionowego z pierwotnej Richardsona na obecną KPP. Poza poprawą w odwzorowaniu pionowej struktury Morza Bałtyckiego pozwoliło to na obserwowanie w modelu takich zjawisk jak np. upwelling, czyli przemieszczania się wody podpowierzchniowej na powierzchnię, będące efektem wiatrowego odsuwania od brzegu wód powierzchniowych. Wynoszona wówczas z głębszych warstw zimna woda bogata jest w substancje biogeniczne, które stymulują eutrofizację, a w efekcie zakwit fitoplanktonu. Prace te spowodowały opracowanie w ramach projektu WaterPUCK narzędzia działającego w trybie operacyjnym dla wykrywania upwellingu.

W ramach prac w projekcie WaterPUCK i dzięki dostępowi do danych satelitarnych z systemu SatBałtyk dla temperatury powierzchni morza w modelu 3D CEMBS zaimplementowano moduł upwellingu. Pozwoliło to na znaczne zwiększenie poprawności parametrów uzyskiwanych w modelu i uwzględnianiu gwałtownych zmian stanu wód Morza Bałtyckiego, które bez asymilacji nie zostałyby odwzorowane w związku z rozdzielczością modelu.

Uruchomienie modelu 3D CEMBS z modułem upwellingu w trybie operacyjnym pozwala na tworzenie 48-godzinnych prognoz badanych zmiennych ekosystemu. Struktura modułowa systemu operacyjnego zwiększa jego efektywność i pozwala na lepszą wymianę informacji między modelem, skryptami zarządzającymi i generującymi dane wymuszające oraz systemem WaterPUCK.

Dzięki wykonanym pracom model 3D CEMBS z modułem upwellingu stał się doskonałym narzędziem pozwalającym na kontrolę stanu środowiska Morza Bałtyckiego ze szczególnym uwzględnieniem strefy przybrzeżnej i głębokowodnej na podstawie badań numerycznych jak i w sposób pośredni badań środowiskowych poprzez asymilację danych. Umożliwia śledzenie zachodzących w Bałtyku zmian dla poprawy stanu i ochrony ekosystemu, a także przewidywania jego reakcji na zagrożenia wynikające z przyczyn naturalnych, niezależnych od człowieka, oraz zagrożenia powodowane działalnością ludzką, nieobojętne dla ekologicznych uwarunkowań życia w morzu.

Literatura

Dzierzbicka-Głowacka L., Jakacki J. , Janecki M., Nowicki A, 2013. Activation of the operational ecohydrodynamic model (3D CEMBS) - the hydrodynamic part, *Oceanologia*, 55(3), 519-541.

Dzierzbicka-Głowacka L., Janecki M., Nowicki A., Jakacki J., Activation of the operational ecohydrodynamic model (3D CEMBS) – the ecosystem module, *Oceanologia*, 2013, 55(3), 543-572.

Janecki M., Nowicki A., Kańska A., Golenko M., Dzierzbicka-Głowacka L. 2018. Numerical simulations of the sea ice conditions in the Baltic Sea for the winters 2010-2016. Polish Maritime Research, 3(99), vol.25, 35-43, https://doi.org/10.2478/pomr-2018-0094 .

Jakacki J., Meler S., 2018. An evaluation and implementation of the regional coupled ice-ocean model of the Baltic Sea. Ocean Dynamics. https://doi.org/10.1007/s10236-018-1219-8

Nowicki A., Janecki M., Dzierzbicka-Głowacka L., 2019. Operational System for Automatic Coastal Upwelling Detection in the Baltic Sea based on the 3D CEMBS Model. Journal of Operational Oceanography 12 (2), 104-115. https://doi.org/10.1080/1755876X.2019.1569748