

PRODUKTY i METODY „WaterPUCK”

3D EcoPuckBay –

Model hydrodynamiczny Zatoki Puckiej

Opis działania modułu hydrodynamicznego modelu ekosystemu 3D EcoPuckBay w trybie operacyjnym

Celem opracowanego trójwymiarowego modelu ekosystemu Zatoki Puckiej/wewnętrznej Zatoki Gdańskiej 3D EcoPuckBay przez zespół modelarzy IOPAN jako nowoczesnego narzędzia jest śledzenie i prognozowanie zachodzących w środowisku zmian dla zwiększenia zasobów danych i zrozumienia wobec potrzeb zrównoważonego rozwoju i przeciwdziałania zagrożeniom poprzez przedstawienie dziennych i sezonowych zmian zachodzących w środowisku Zatoki Puckiej, w aspekcie presji antropogenicznych związanych z wprowadzaniem zanieczyszczeń z wód powierzchniowych i gruntowych gminy Puck.

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 biochemicznych parametrów środowiska morskiego. Elementy te są niezbędne w nowoczesnym prognozowaniu ekologicznym środowiska morskiego.

Model EcoPuckBay został opracowany w ramach projektu WaterPUCK. Celem projektu było stworzenie zintegrowanej usługi informacyjno-prognostycznej dla Urzędu Gminy Puckiego poprzez opracowanie systemu komputerowego zapewniającego usługę WaterPUCK, który w jasny i praktyczny sposób oceni wpływ gospodarstw i struktur użytkowania gruntów na wody powierzchniowe i podziemne w Gminie Puck, a co za tym idzie - jakość wód Zatoki Puckiej (Dzierzbicka-Głowacka i inni., 2018, 2019a). Budowa usługi oparta jest na badaniach in situ, danych środowiskowych (chemicznych, fizykochemicznych i hydrologicznych) i modelowaniu numerycznym. Usługa WaterPUCK to zintegrowany system składający się z połączonych ze sobą modeli komputerów, działający w sposób ciągły, dostarczając mu dane meteorologiczne, i składa się z dwóch kalkulatorów i 6 modeli numerycznych:

- k1. kalkulator gospodarstw rolnych w Gminie Puck CalcGosPuck jako interaktywna aplikacja;

- k2. kalkulator wymywania azotu z pól CalcNPuck jako interaktywna aplikacja.
- 1. kompleksowy model spływu wód powierzchniowych oparty na kodzie SWAT;
- 2. numeryczny model przepływu wód podziemnych w oparciu o kod Modflow;
- **trójwymiarowy model numeryczny ekosystemu Zatoki Puckiej 3D EcoPuckBay**, w skład którego wchodzi: 3. **model hydrodynamiczny**, 4. model biochemiczny z modułem pestycydów i 5. model rozptyłu biogenów;
- 6. trójwymiarowy model numeryczny ekosystemu Morza Bałtyckiego 3D CEMBS z modułem upwellingu (www.cembs.pl) jako dynamiczny moduł wyznaczający warunki brzegowe na granicy woda-woda;

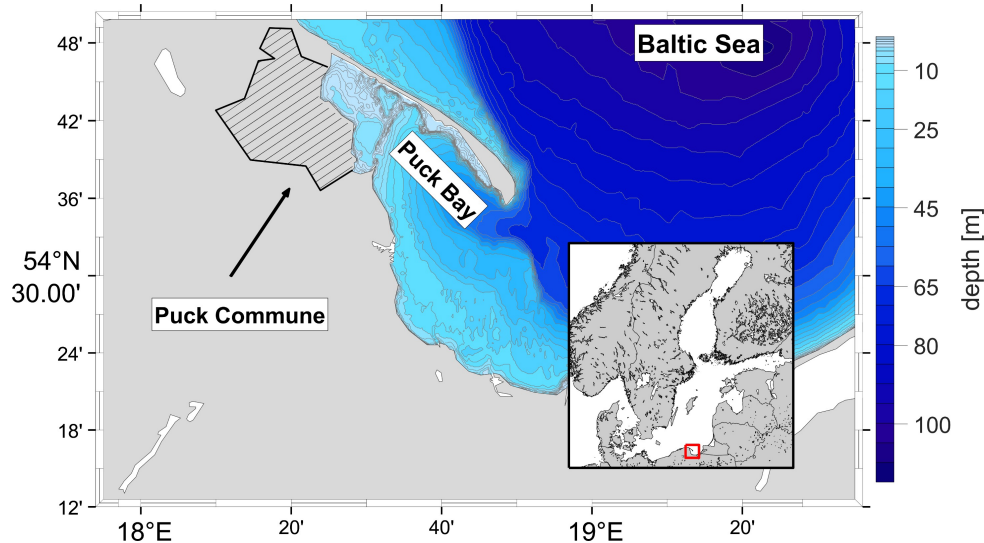
Metoda

Opracowanie modeli numerycznych o wysokiej rozdzielczości, które są w stanie symulować zarówno procesy fizyczne, jak i biochemiczne określające stan środowiska morskiego, jest czasochłonne i wymaga szerokiej wiedzy na temat wielu zdarzeń występujących w modelowanym ekosystemie. Wymaga to dostępu do informacji o bezpośrednich i pośrednich czynnikach wymuszających, które wpływają na dynamikę zmian w domenie modelu. Aby dopasować się do złożoności tego zadania przeprojektowano istniejący najnowszy Community Earth System Model, dostosowując go do obszaru badań, co pozwala nam dostarczać doskonałe narzędzie do reanalizy lub prognozowania parametrów środowiska.

Model ekohydrodynamiczny Zatoki Puckiej został nazwany 3D EcoPuckBay. Model 3D EcoPuckBay składa się z modelu hydrodynamicznego i biochemicznego z modułem pestycydów, i modułem rozptyłu biogenów oraz z modułu asymilacji danych satelitarnych i środowiskowych.

Zakres badań

Południowa część Morza Bałtyckiego obejmująca Zatokę Pucką to popularny region turystyczny, na który duży wpływ ma także aktywność antropogeniczna mieszkańców i rolnictwa. Czyni to Zatokę Pucką naturalnym zbiornikiem do składowania odpadów nawozów i innych środków dostarczanych przez glebę, wody gruntowe, rzekę lub bezpośrednio składowanie. W celu oceny możliwości i skali eutrofizacji i zanieczyszczenia wody obszar domeny modelu EcoPuckBay obejmuje zachodnią część Zatoki Gdańskiej (ryc. 1). Można go podzielić dalej na płytką część znaną jako Zatoka Pucka i częściowo zamknięty Zalew Pucki na zachodzie.



Rysunek 1. Obszar badań

Konfiguracja modelu 3D EcoPuckBay

Model 3D EcoPuckBay podobnie jak model 3D CEMBS (www.cembs.pl) wywodzi się z modelu globalnego klimatu opracowanego przez Community Earth System Model (CESM) (<http://www.cesm.ucar.edu/models/ccsm4.0>) przez NCAR. Na potrzeby projektu CESM został dostosowany do regionu Zatoki Puckiej i rozwijany w Instytucie Oceanologii Polskiej Akademii Nauk. Rozdzielczość pozioma EcoPuckBay wynosi $1/960^\circ$ co odpowiada nominalnej rozdzielczości 115 m. Rozdzielczość pionowa wynosi 0,4–0,6 m w górnych warstwach do 3 m, a następnie stopniowo wzrasta do 5 m na głębokości, łącznie 24 warstwami (Tabela 1). Pionowa dyskretyzacja wykorzystuje formułę z, a dolna topografia oparta jest na Baltic Sea Bathymetric Database (BSBD) z Baltic Sea Hydrographic Commission [5]. Dane batymetryczne interpolowano do siatki modelu za pomocą metody Kriginga. Krok czasowy modelu oceanu wynosi 12 s.

Wymuszania atmosfery

Model EcoPuckBay jest wymuszany przez 48-godzinne prognozy meteorologiczne z modelu UM dostarczonego przez Interdyscyplinarne Centrum Modelowania Matematycznego i Obliczeniowego Uniwersytetu Warszawskiego (ICM UW). Używane są następujące pola zewnętrzne:

- temperatura powietrza i wilgotność właściwa na poziomie 2 m,
- ciśnienie na poziomie morza,
- opad atmosferyczny,
- promieniowanie krótkofalowe i długofalowe,
- prędkość wiatru na poziomie 10m,
- gęstość powietrza na poziomie 2m.

Table 1. EcoPuckBay's vertical resolution.

Model Level	Thickness (m)	Lower Depth (m)	Mid-Depth (m)
1	0.60	0.60	0.30
2	0.40	1.00	0.80
3	0.40	1.40	1.20
4	0.40	1.80	1.60
5	0.40	2.20	2.00
6	0.50	2.70	2.45
7	0.60	3.30	3.00
8	0.80	4.10	3.70
9	1.00	5.10	4.60
10	1.40	6.50	5.80
11	1.80	8.30	7.40
12	2.50	10.80	9.55
13	4.00	14.80	12.80
14	5.00	19.80	17.30
15	5.00	24.80	22.30
16	5.00	29.80	27.30
17	5.00	34.80	32.30
18	5.00	39.80	37.30
19	5.00	44.80	42.30
20	5.00	49.80	47.30
21	5.00	54.80	52.30
22	5.00	59.80	57.30
23	5.00	64.80	62.30
24	5.00	69.80	67.30

Aby użyć danych z UM dostępne na innej siatce numerycznej niż siatka modelu EcoPuckBay konieczne jest przeprowadzanie interpolacji danych za każdym razem przy ich wczytywaniu.

Warunki na granicy ląd-woda

Informacje o objętości wody odprowadzanej przez rzeki w ujściach w rejonie Pucka (Rys. 1, liczby od 8 do 13) pochodzą z modelu hydrologicznego SWAT, który został wdrożony jako jeden z etapów projektu WaterPUCK. Prace przy modelu SWAT obejmowały przygotowanie złożonego modelu hydrologicznego wykorzystującego dostępne dane meteorologiczne (opady, wiatr, temperatura, ciśnienie atmosferyczne). Jego mechanizm działania oparty jest na wykorzystaniu obserwacji w czasie rzeczywistym (lokalna stacja pogodowa) i krótkoterminowych prognoz pogody (strona internetowa ICM UW). Oprogramowanie SWAT pozwala na prowadzenie obliczeń

hydrologicznych poprzez przekształcenie danych opadowych w spływ powierzchniowy za pomocą procedury liczby krzywych SCS (Soil Conservation Service) w skumulowaną objętość spływu i czas koncentracji (czas od początku zdarzenia opadowego do całego obszaru zlewni przyczyniające się do przepływu na wylocie). Model SWAT działała w trybie operacyjnym produkując dane wymuszające do modelu EcoPuckBay dla granicy ład-woda w obrębie wewnętrznej Zatoki Puckiej

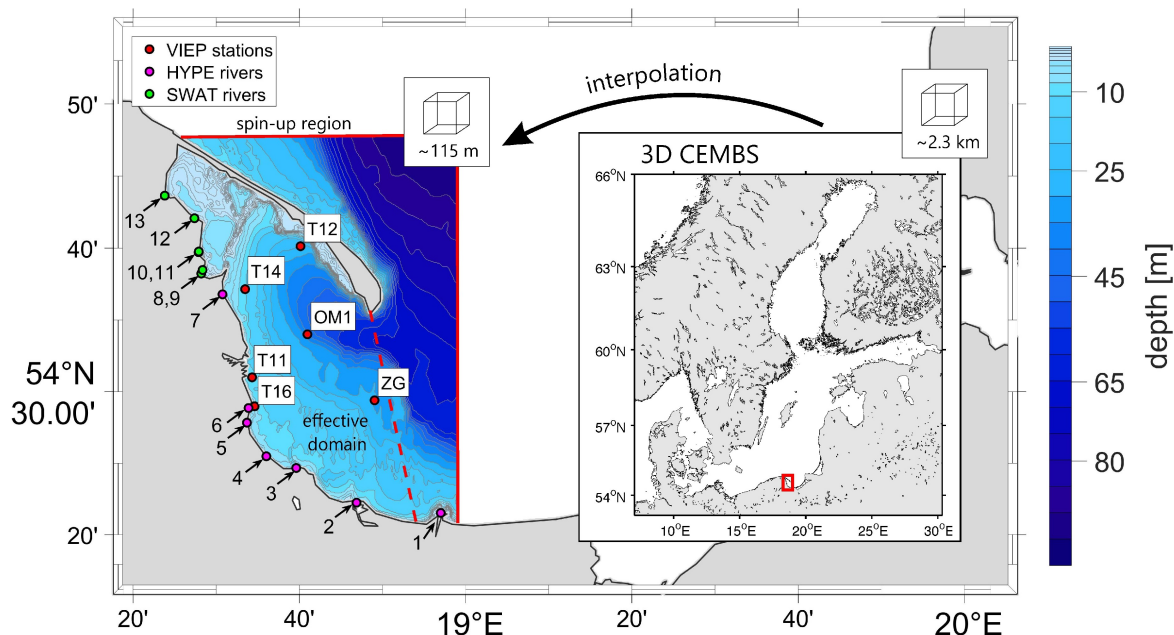
Obszar działania modelu SWAT nie obejmuje całości domeny efektywnej modelu EcoPuckBay. SWAT dostarcza informacje jedynie o rzekach leżących w obrębie Gminy Pucka, natomiast do modelu EcoPuckBay uchodzą również cieki leżące na południe od Redy, tj. Przekop Wisły, Wisła Śmiała, Wisła Martwa, Potok Oliwski, Kamienny Potok, Kacza oraz Zagórska Struga. Wobec tego do pełnej informacji o strumieniach wody słodkiej dla modelu EcoPuckBay należało pozyskać te dane z innego istniejącego modelu hydrologicznego. Do tego celu wykorzystywane są wartości liczbowe z symulacji modelu HYPE na podstawie historycznych szeregów czasowych (dostępne lata: 1980–2010). Jego domena geograficzna obejmuje zasięgiem całą Europę, a dane o objętości wody słodkiej mają tę samą rozdzielczość czasową co SWAT (średnie dzienne). Z modelu HYPE wyodrębniono cztery podzlewnie – po jednej dla każdego z ujść Wisły oraz jedną dla pozostałych rzek na podstawie równego podziału.

Warunki na granicy woda-woda

Wyniki modelu 3D EcoPuckBay są ograniczone do efektywnego obszaru Zatoki Puckiej. Cała siatka modelu obejmuje jednak szerszy obszar zaznaczony na rysunku poniżej (Rysunek 2). Ma to na celu zapewnienie prawidłowej symulacji warunków brzegowych. Wzdłuż linii północnej granicy modelu 3D EcoPuckBay odbywa się wymiana informacji z prognostycznym modelem 3D CEMBS o rozdzielczości horyzontalnej 2.3km (patrz Rysunek 2 i www.cembs.pl). Wyniki z 3D CEMBS (www.cembs.pl) służą do wymuszania pól parametrów hydrodynamicznych w modelu 3D EcoPuckBay poprzez sekwencyjną wymianę informacji.

Podstawowe równania modułu hydrodynamicznego

Podstawą modułu hydrodynamicznego modelu 3D EcoPuckBay jest model POP wykorzystujący trójwymiarowe równania ruchu z założeniem hydrostatyki i Boussinesq'a. Główne równania modelu w układzie sferycznym przedstawiono w artykule (Dybowski i inni, 2019).



Rysunek 2. Efektywna domena modelu z topografią, lokalizacjami stacji pomiarowych wykorzystywanych do oceny oraz lokalizacje ujść cieków wodnych objętych domeną. Zielone kropki oznaczają rzeki, które dostarczone są przy użyciu modelu hydrologicznego SWAT.

Walidacja i wyniki symulacji modułu hydrodynamicznego

Do oceny modelu EcoPuckBay wykorzystano dwa źródła pomiarów in situ. Obejmują one pomiary wykonane podczas działań monitorujących przez Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska w Gdańsku oraz pionowych profili temperatury i zasolenia zarejestrowane w 2018 r. podczas jednej z kampanii pomiarowych r/v „Oceania” wzdłuż południowego wybrzeża Bałtyku. Ponadto przetworzono również dane liczbowe dotyczące parametrów fizycznych obliczone za pomocą systemu modeli NEMO-Nordic, które pochodzą z bazy danych Marine Copernicus. Krótki opis wszystkich baz danych wykorzystanych do celów oceny modułu hydrodynamicznego został przedstawiony w artykule (Dybowski i inni. 2019).

Weryfikacja i wyniki symulacji modułu hydrodynamicznego zostały zaprezentowane przedstawiona w artykule (Dybowski i inni. 2019).

Portal internetowy

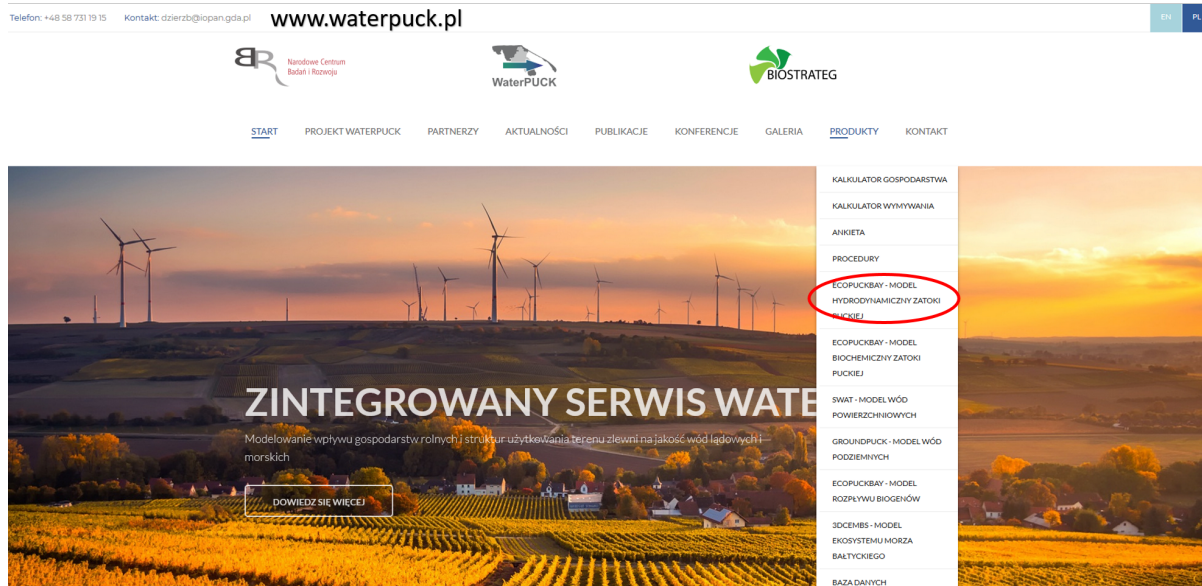
Szybki dostęp do wiedzy eksperckiej jest bardzo cenny, szczególnie w kontekście podejmowania decyzji przez władze. Aby spełnić te wymagania, opracowano serwis internetowy. Jest to jedna z kluczowych usług utworzonych w ramach projektu WaterPUCK, w ramach której udostępnione są wyniki wszystkich modeli zawartych w Zintegrowanym Serwisie Informacyjno-Predykcijnym WaterPUCK (Rysunek 3).



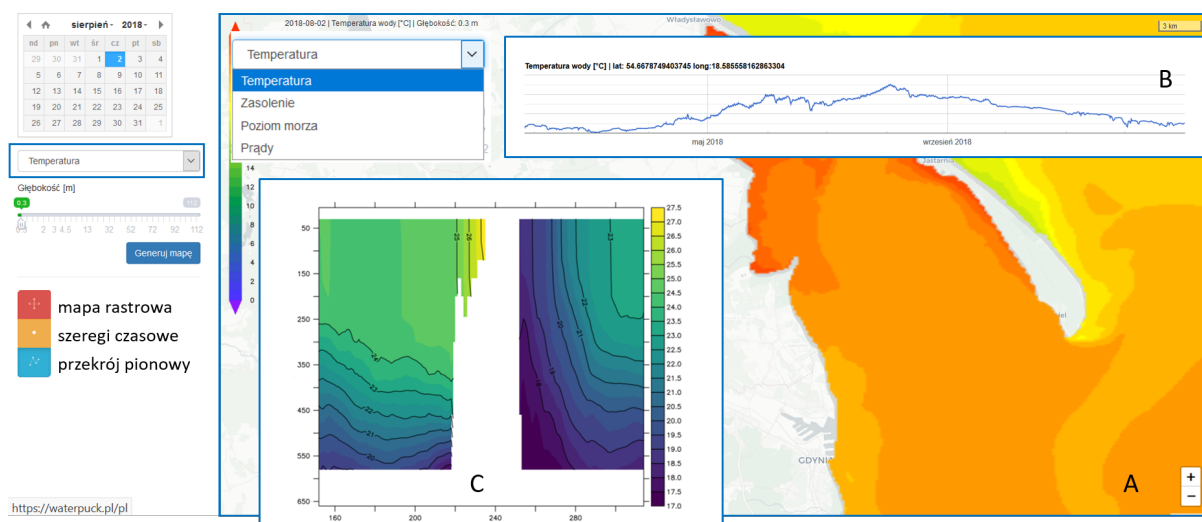
Rysunek 3. Strona projektu WaterPUCK i wyboru PRODUKTÓW

Ta strona działa dynamicznie w trybie operacyjnym, umożliwiając wizualizację map prognoz, szeregów czasowych i przekrojów pionowych.

Usługa udostępniona na stronie internetowej pozwala generować mapy wybranych parametrów hydrodynamicznych z modelu 3D EcoPuckBay rejonu Zatoki Puckiej i zachodniej części Zatoki Gdańskiej. Dostęp do tej usługi można uzyskać ze strony internetowej projektu (www.waterpuck.pl) po wybraniu „Usługi” z menu nawigacyjnego i wybraniu „EcoPuckBay - Model hydrodynamiczny Zatoki Puckiej” (Rysunek 4). Obecnie usługa ma zasięg czasowy od 2014 z bieżącą 48 – godzinną prognozą. Teraz można generować mapy rastrowe (Rysunek 5a) dla poszczególnych głębokości, które reprezentują kolejny poziom pionowy modelu. Ponadto możliwe jest tworzenie szeregów czasowych (Rysunek 5b) dla ustalonych okresów w wybranej lokalizacji (po wcześniejszym ustaleniu lub wskazaniu żądanej szerokości i długości geograficznej), a także przekrojów WE i / lub SN, umożliwiając analizę zmienność stanu parametru w całym słupie wody (Rysunek 5c).

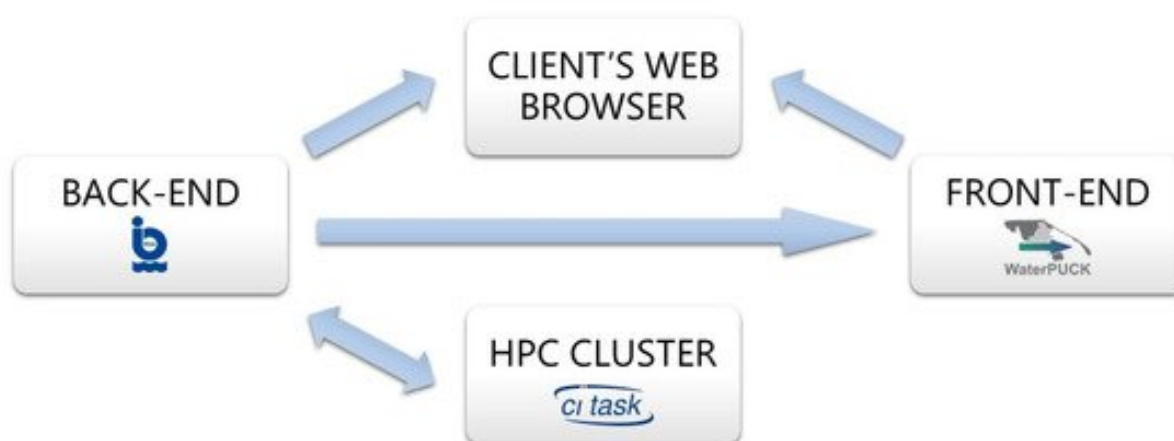


Rysunek 4. Strona projektu WaterPUCK i wyboru produktu „EcoPuckBay – Model Hydrodynamiczny Zatoki Puckiej”.



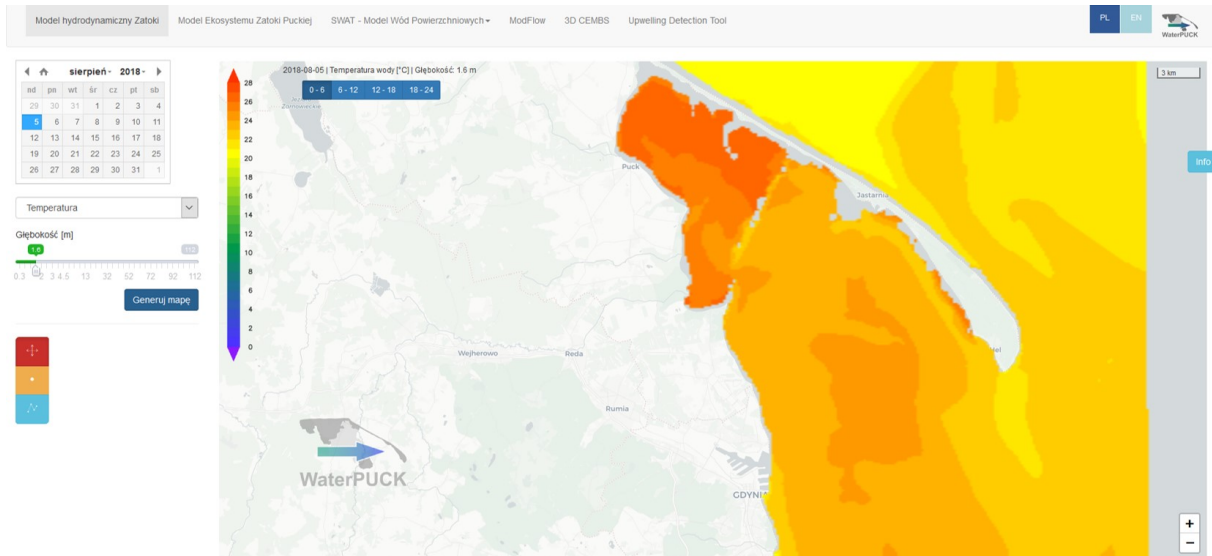
Rysunek 5. Zrzut ekranu menu nawigacyjnego i wyników dla usługi portalu internetowego „EcoPuckBay - Model hydrodynamiczny Zatoki Puckiej” (A) mapa rastrowa (B) szeregi czasowe (C) przekrój pionowy wybranego parametru.

Portal działa w oparciu o technologię front-end/ back-end. Mechanizmy odpowiedzialne za wyświetlanie (front-end) są oddzielone od przetwarzania danych (back-end). To rozwiązanie pozwala zbudować portal o wysokich możliwościach skalowania, tj. zwiększający liczbę obsługiwanych połączeń jednocześnie. Ponadto oddzielenie wyświetlania od przetwarzania danych zapewnia dodatkowe bezpieczeństwo serwera i umożliwia niezależny rozwój obu części. Warstwa frontonu odpowiedzialna za wizualizację danych została stworzona w technologii Bootstrap i przystosowana do obsługi z urządzeń mobilnych. Back-end odpowiedzialny za przetwarzanie danych i przenoszenie ich do części front-end został stworzony w technologii RESTful-API. Technologia ta opiera się na komunikacji między częściami portalu przy użyciu zapytań bezstanowych (rysunek 6).

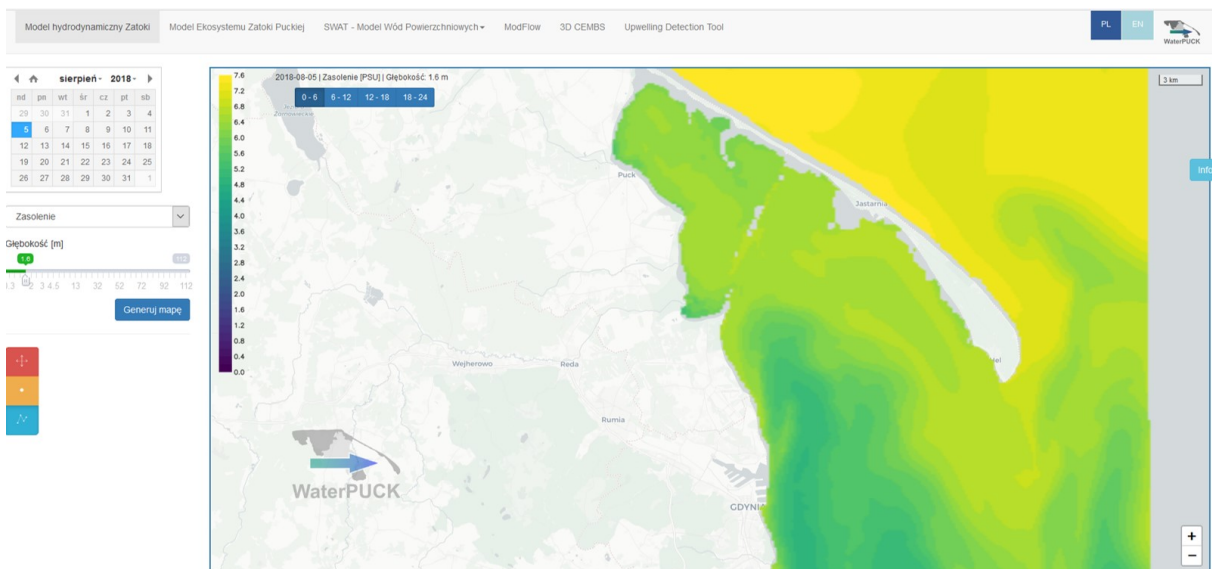


Rysunek 6. Schemat architektury usługi projektu WaterPUCK - hydrodynamiczna część modelu EcoPuckBay.

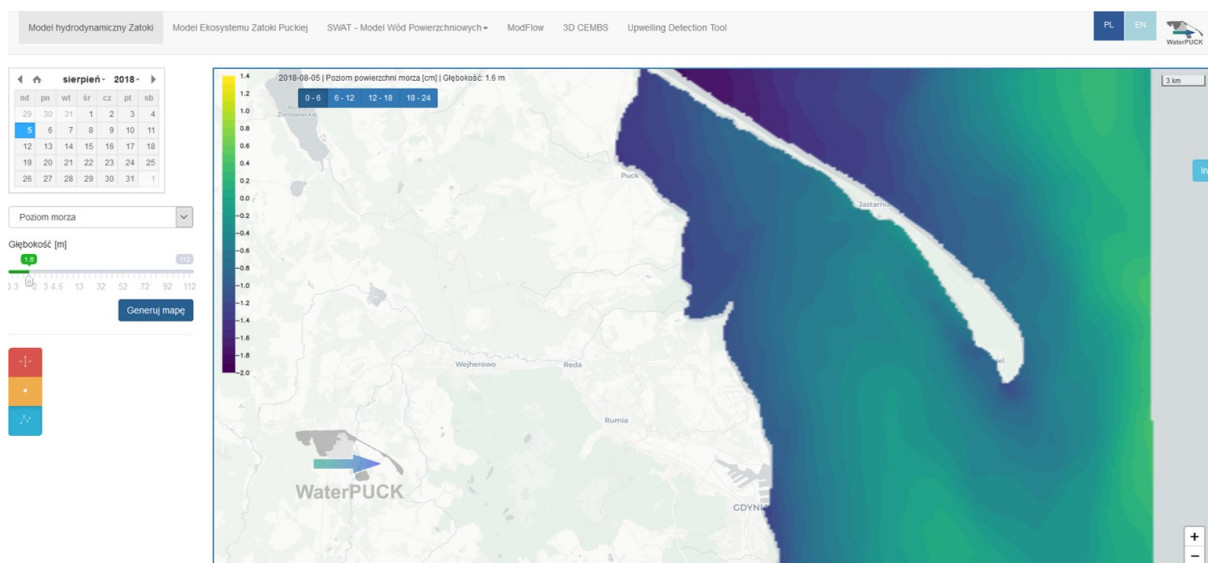
Poprzez usługę „EcoPuckBay – Model hydrodynamiczny Zatoki Gdańskiej” dostępne są prognozy następujących parametrów: temperatura wody (°C) (Rysunek 7), zasolenie (psu) (Rysunek 8), poziomu powierzchni morza (cm) (Rysunek 9) i prądy (cm/s) – wartość i kierunek (Rysunek 10).



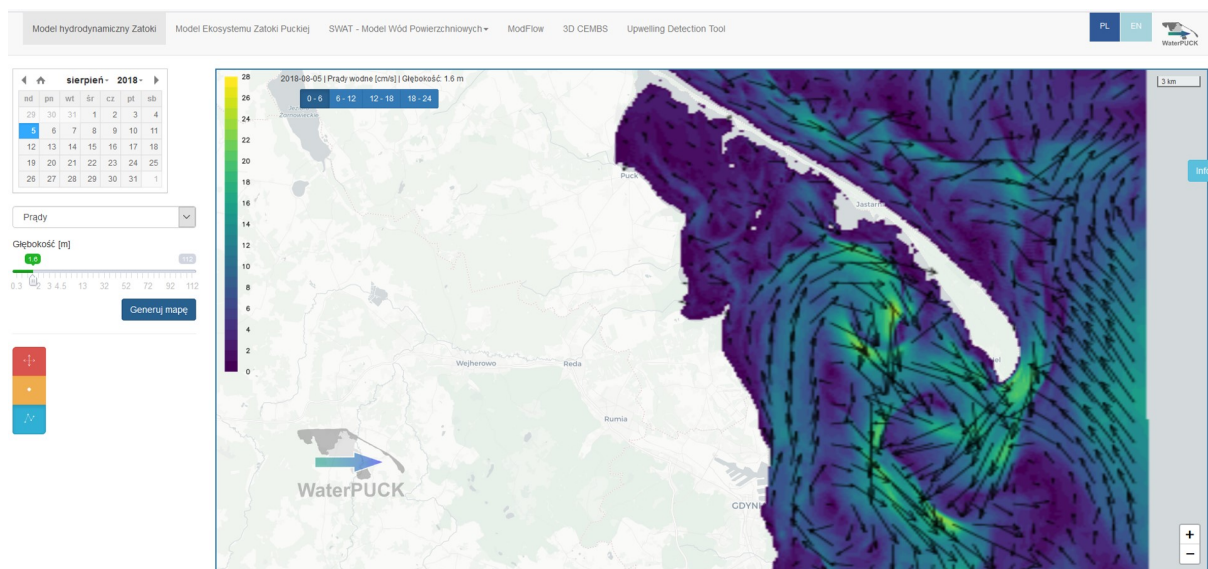
Rysunek 7. Zrzut ekranu dla usługi portalu internetowego „EcoPuckBay - Model hydrodynamiczny Zatoki Puckiej” dla zmiennej: Temperatura



Rysunek 8. Zrzut ekranu dla usługi portalu internetowego „EcoPuckBay - Model hydrodynamiczny Zatoki Puckiej” dla zmiennej: Zasolenie



Rysunek 9. Zrzut ekranu dla usługi portalu internetowego „EcoPuckBay - Model hydrodynamiczny Zatoki Puckiej” dla zmiennej: Poziom morza



Rysunek 10. Zrzut ekranu dla usługi portalu internetowego „EcoPuckBay - Model hydrodynamiczny Zatoki Puckiej” dla zmiennej: Prądy

Aby wyświetlić prognozę dla wybranej zmiennej w obszarze Zatoki Puckiej, należy:

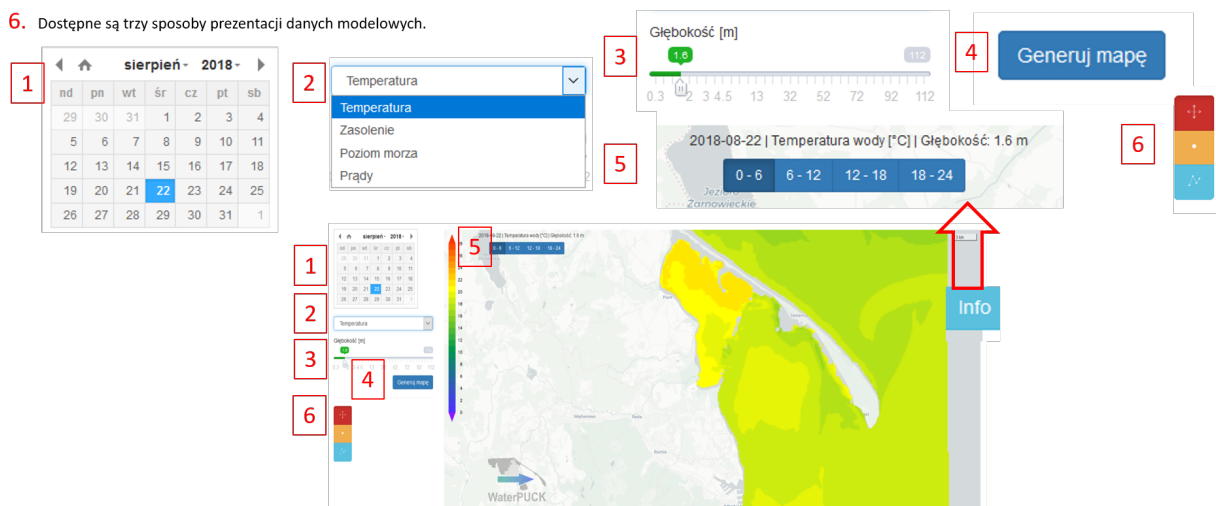
- wybierz czas prognozy (prognoza 48 h) (Rysunek 11 [1]),
- wybierz zmienną (rysunek 11 [2]),
- wybierz głębokość dla których chcesz zobaczyć wyniki modelu (rysunek 11 [3]),
- po wybraniu wszystkich parametrów naciśnij: „Generuj mapę” (rysunek 11 [4]).
- wybierz średnią sześciogodzinną dla której chcesz wygenerować mapę (rysunek 11 [5]).
- wybierz jedną z trzech dostępnych sposobów prezentacji danych modelowych (rysunek 11 [6]).

Ostatecznie mapa wyników pojawi się na ekranie.

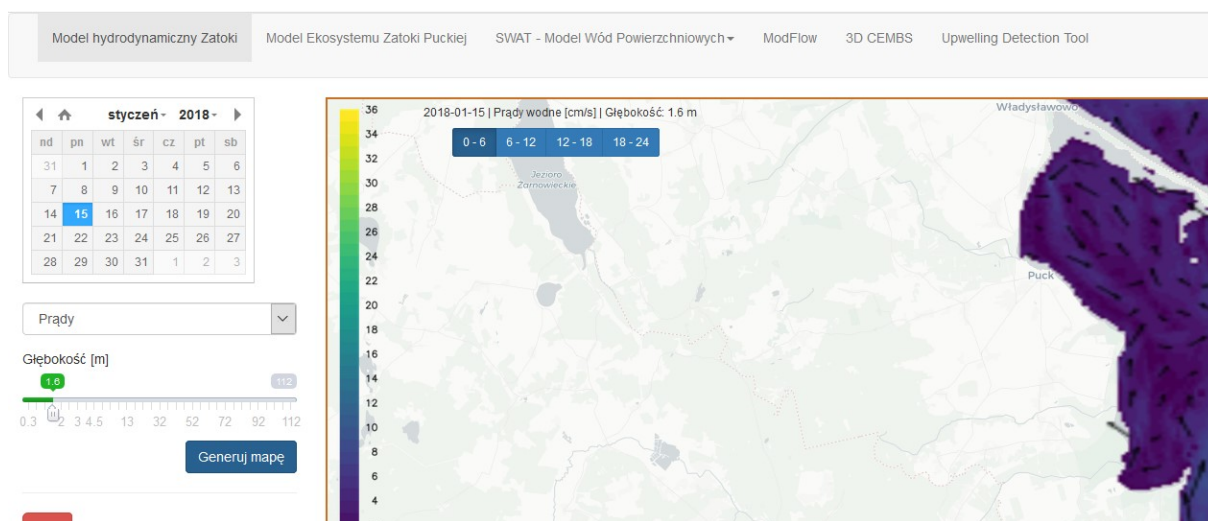
W serwisie dostępne są trzy sposoby prezentacji danych modelowych: rozkład przestrzenny (Rysunek 12), punktowa seria czasowa (Rysunek 13) i przekrój pionowy (Rysunek 14),

Celem wyświetlenia wyników modelu proszę wybrać:

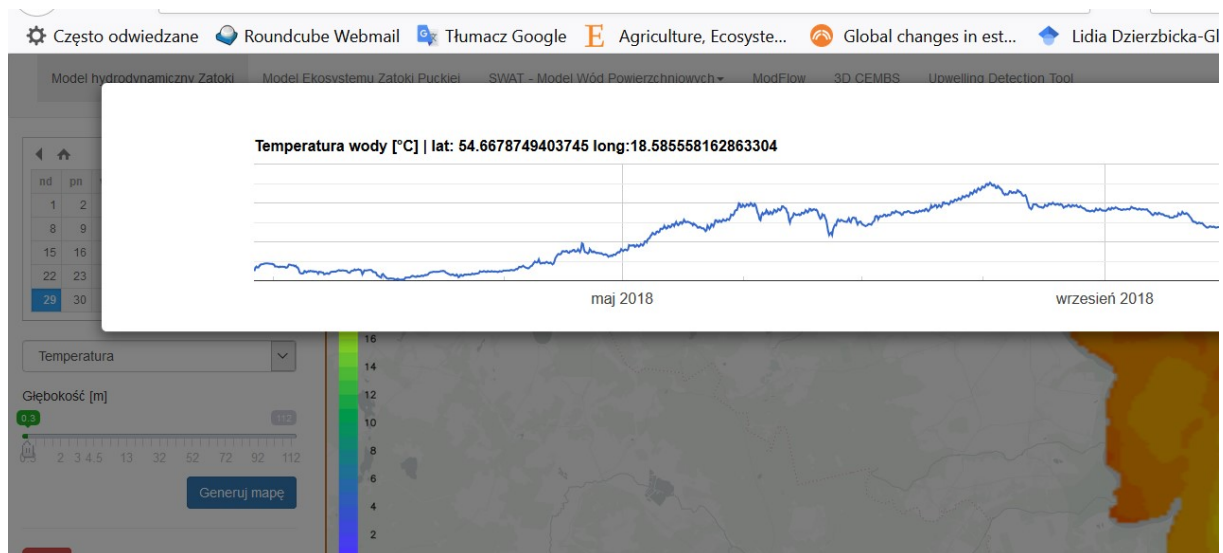
1. dzień z kalendarza
2. jedną z czterech dostępnych zmiennych hydrodynamicznych (temperatura wody, zasolenie, poziom powierzchni morza, prądy – wartość i kierunek)
3. głębokość pod poziomem morza
4. Wybór potwierdzamy przyciskiem „Generuj mapę”.
5. Prezentowane dane są przedstawiane jako średnie sześciogodzinne (4 średnie na dobę), wybranie odpowiedniej średniej jest możliwe dopiero po poprawnym wygenerowaniu mapy (patrz wyżej).
6. Dostępne są trzy sposoby prezentacji danych modelowych.



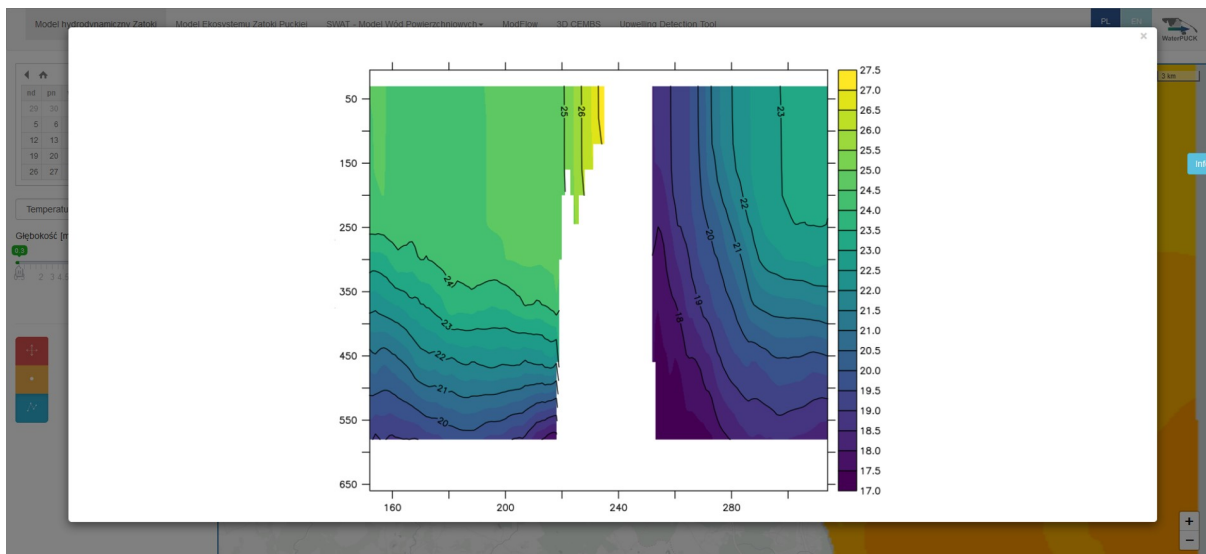
Rysunek 11. Panel wyboru poszczególnych parametrów dla wizualizacji prognozy wybranej zmiennej.



Rysunek 12. Zrzut ekranu dla usługi portalu internetowego „EcoPuckBay - Model hydrodynamiczny Zatoki Puckiej” dla sposobu prezentacji danych modelowych: rozkład przestrzenny



Rysunek 13. Zrzut ekranu dla usługi portalu internetowego „EcoPuckBay - Model hydrodynamiczny Zatoki Puckiej” dla sposobu prezentacji danych modelowych: punktowa seria czasowa



Rysunek 14. Zrzut ekranu dla usługi portalu internetowego „EcoPuckBay - Model hydrodynamiczny Zatoki Puckiej” dla sposobu prezentacji danych modelowych: przekrój pionowy

Przykładowe wyniki działania usługi „EcoPuckBay - Model hydrodynamiczny Zatoki Puckiej”

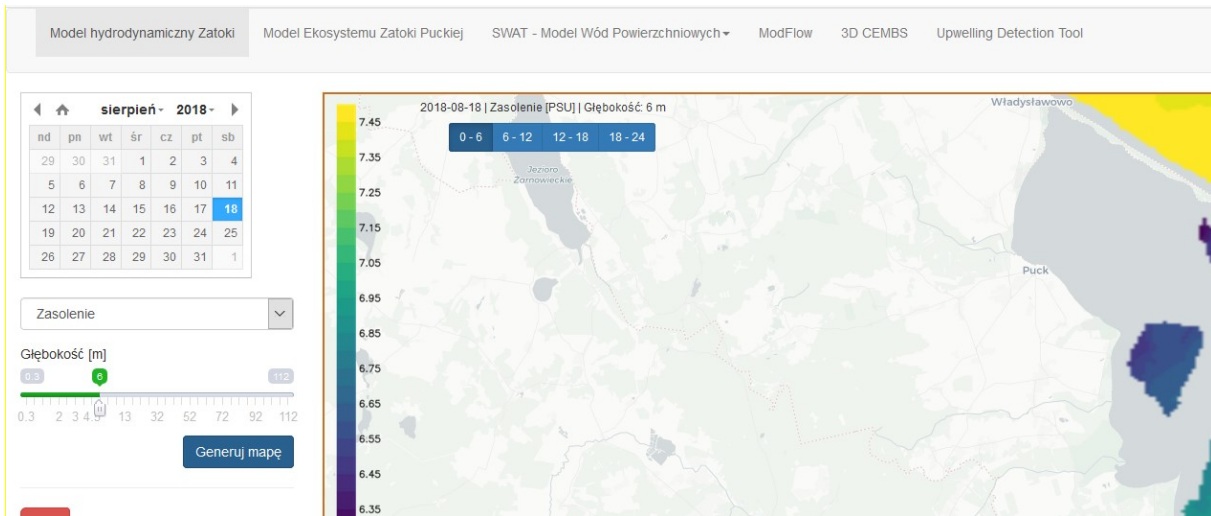
Panel wyboru użytkownika i przykładowa mapa z prognozą dla zasolenia (przypadek 1) i temperatury (przypadek 2) zilustrowano odpowiednio na Rysunkach 15 i 16.

Poniżej przedstawiono dwa przykłady dla następujących sytuacji:

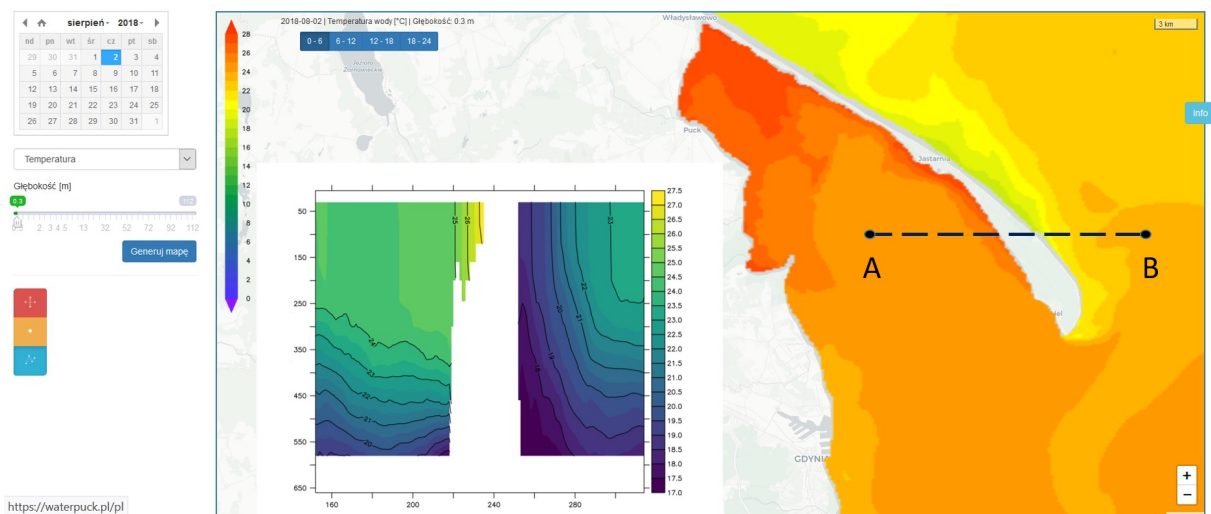
1. Wybrano następujące parametry prognozy: czas: 18.08.2018, 0-6 UTC; zmienna: zasolenie [PSU]; głębokość: 6 [m]. Po zakończeniu wyboru parametrów, naciśnij: „Generuj mapę”; następnie wybrano sposób prezentacji danych: rozkład przestrzenny,

Ostatecznie na ekranie serwis zilustrował wyniki modelu (Rysunek 15).

2. Wybrano następujące parametry prognozy: czas: 02.08.2018, 0-6 UTC; zmienna: temperatura [°C]; głębokość: 0.3 [m]. Po zakończeniu wyboru parametrów, naciśnij: „Generuj mapę”; następnie wybrano sposób prezentacji danych: przekrój pionowy – tu wybrano dwa punkty A i B (dla żądanej szerokości i długości geograficznej) umożliwiając analizę zmienności stanu wybranego parametru w słupie wody dla wybranego przekroju. Ostatecznie na ekranie serwis zilustrował wyniki modelu (Rysunek 16).

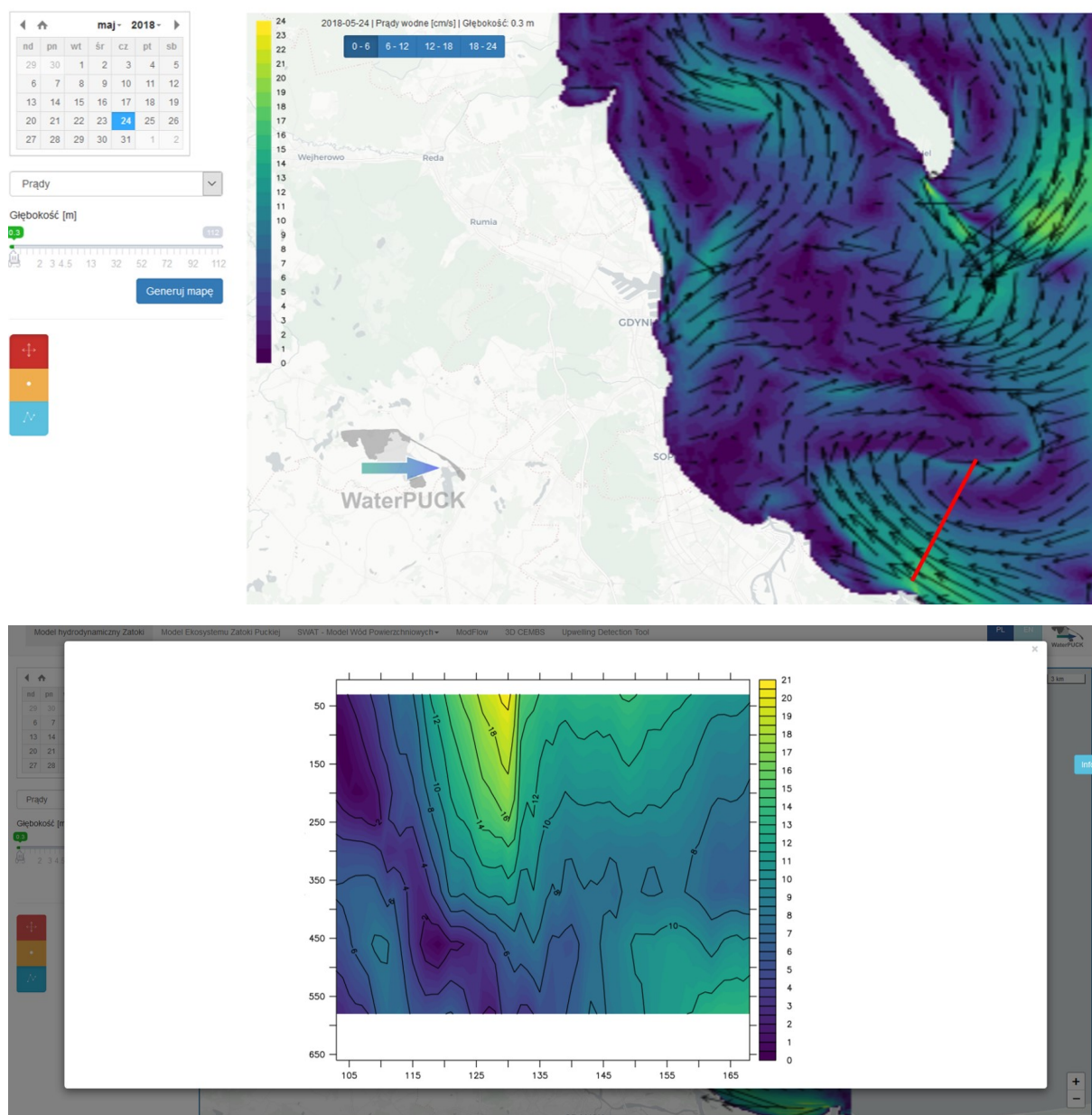


Rysunek 15. Panel wyboru poszczególnych parametrów dla wizualizacji prognozy wybranej zmiennej: zasolenie (przykład 1).



Rysunek 16. Panel wyboru poszczególnych parametrów dla wizualizacji prognozy wybranej zmiennej: temperatura (przykład 2).

Usługa portalu internetowego „EcoPuckBay - Model hydrodynamiczny Zatoki Puckiej” daje także możliwość wyznaczania i wizualizacji różnych procesów zachodzących w środowisku morskim Zatoki Puckiej (patrz przykład poniżej Rysunek 17).



Rysunek 17. Rozkład antycyklonalny prądów powierzchniowych (a) z zaznaczoną (przerywaną czerwoną) linią dla pionowego przekroju prądów (b).

Podsumowanie

Prace wykonane przez IOPAN w ramach realizacji projektu WaterPUCK opisane w WP6 raportu polegały na opracowaniu modelu ekosystemu Zatoki Puckiej 3D EcoPuckBay z modułami asymilacji danych oraz przygotowanie go do pracy w trybie operacyjnym. Jako, że modelowanie numeryczne badanego rejonu 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 EcoPuckBay uwzględnione zostały dopływy wody słodkiej z modelu SWAT i GroundPuck. Ponadto wykorzystane zostały bardzo dokładne atmosferyczne siły wymuszające z modelu prognozy pogody UM (ICM, Uniwersytet Warszawski).

Usługa udostępniona na stronie internetowej pozwala generować mapy wybranych parametrów hydrodynamicznych (temperatura, zasolenie, poziom morza i prądy, ich wartość i kierunek) z modelu 3D EcoPuckBay rejonu Zatoki Puckiej i zachodniej części Zatoki Gdańskiej. Dostęp do tej usługi jest możliwy ze strony internetowej projektu (www.waterpuck.pl) po wybraniu „Usługi” z menu nawigacyjnego i wybraniu „EcoPuckBay - Model hydrodynamiczny Zatoki Puckiej”. Uruchomienie modelu 3D EcoPuckBay w trybie operacyjnym pozwala na tworzenie 48-godzinnych prognoz badanych zmiennych hydrodynamicznych. Można generować mapy rozkładów przestrzennych badanych zmiennych dla poszczególnych głębokości, które reprezentują kolejny poziom pionowy modelu. Ponadto możliwe jest tworzenie szeregów czasowych dla okresu rocznego wybranej lokalizacji (po wskazaniu ustalonej szerokości i długości geograficznej), a także przekrojów WE i / lub SN, umożliwiając analizę zmienności stanu parametru w słupie wody.

Dzięki wykonanym pracom model 3D EcoPuckBay jest doskonałym narzędziem pozwalającym na kontrolę stanu środowiska Zatoki Puckiej na podstawie badań numerycznych jak i w sposób pośredni badań środowiskowych poprzez asymilację danych. Umożliwia śledzenie zachodzących w badanym rejonie 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

Dybowski D., Jakacki J., Janecki M., Nowicki A., Rak D. and Dzierzbicka-Glowacka L., 2019. High-Resolution Ecosystem Model of the Puck Bay (Southern Baltic Sea)—Hydrodynamic Component Evaluation. *Water*, 11, 2057. <https://doi.org/10.3390/w11102057>