

mgr Artur Nowicki

„*Interannual changes of Baltic coastal upwelling based on numerical models and satellite data*”
„*Międzyletnia zmienność przybrzeżnego upwellingu w Bałtyku na podstawie modeli numerycznych oraz danych satelitarnych*”

Upwelling przybrzeżny jest zjawiskiem, podczas którego masy wodne wynoszone są z głębszych warstw, zazwyczaj poniżej termokliny, na powierzchnię. Główną przyczyną występowania tego zjawiska jest połączenie działania siły Coriolisa oraz wiatrów wiejących nad powierzchnią wody. Zgodnie z teorią Ekmana transport mas wodnych w warstwie zwanej warstwą Ekmana ma kierunek prostopadły do kierunku wiatru, który ten ruch wywołał. Jeśli wiatr wieje w odpowiednim kierunku równoległe do linii brzegowej przez wystarczająco długi czas, woda z warstwy Ekmana jest odpychana od brzegu. Woda z głębszych warstw, zwykle znacznie zimniejsza i bogata w składniki pokarmowe, jest wynoszona w to miejsce. Powoduje to zaopatrzenie w składniki pokarmowe warstwy eufotycznej, co stymuluje wzrost pierwotnych producentów prowadząc często do gwałtownych i obwitych zakwitów glonów. Upwelling na Morzu Bałtyckim jest zjawiskiem bardzo częstym. W niektórych rejonach jest on obecny ponad 1/3 czasu i może sięgać nawet kilkadziesiąt kilometrów w głąb morza.

Głównym celem pracy doktorskiej było poszerzenie wiedzy oraz lepsze zrozumienie zjawiska upwellingu oraz jego charakterystyki jako istotnego elementu napędzającego procesy biologiczne zachodzące w ekosystemie Morza Bałtyckiego, poprzez analizę jego międzyletniej zmienności. Drugim celem było stworzenie narzędzia dostarczającego aktualnych danych oraz prognoz dotyczących tego zjawiska, które mogą być wykorzystane w dalszych badaniach naukowych. Aby osiągnąć wyżej postawione cele wykorzystano model 3D CEMBS, który był rozwijany oraz ulepszany w ciągu ostatnich lat w Pracowni Modelowania Procesów Ekohydrodynamicznych w Instytucie Oceanologii Polskiej Akademii Nauk. Składa się on z aktywnych modułów oceanu, lodu oraz ekosystemu, pasywnych modułów danych lądu i atmosfery oraz modułów asymilacji danych satelitarnych oraz automatycznej detekcji upwellingów przybrzeżnych. Ten ostatni posłużył za jedno z dwóch źródeł danych analizowanych w mojej pracy doktorskiej. Drugim źródłem danych były pomiary satelitarne.

Na pracę doktorską składają się cztery oryginalne artykuły naukowe, w których opisane są kolejne etapy wykonywanych badań. Pierwsze dwa artykuły skupiają się na opisie zaimplementowanego systemu asymilacji danych satelitarnych oraz walidacji wpływu tego rozwiązania na poprawę wyników temperatury w warstwie powierzchniowej pozyskiwanych z modelu 3D CEMBS. Aby poprawić jakość wyników otrzymywanych z modelu 3D CEMBS opracowano moduł asymilacji danych satelitarnych, który wykorzystuje do asymilacji analizę Cressmana. W celu weryfikacji modułu asymilacji danych satelitarnych SST przeprowadzono dokładną analizę statystyczną bazując na symulacjach modelowych, danych satelitarnych MODIS oraz pomiarach in-situ z bazy ICES. Analiza wykazała pozytywny wpływ asymilacji na dokładność modelu. Model z asymilacją wykazywał się większą korelacją z danymi *in situ* oraz mniejszymi błędami. Trzeci artykuł skupia się na walidacji wyników modelu ze szczególnym uwzględnieniem poprawności odwzorowania termicznej stratyfikacji pionowej, która jest niezbędna do poprawnego działania wspomnianej już metody detekcji upwellingu. W tym celu wykorzystano dane pomiarowe uzyskane w trakcie rejsów badawczych statku *r/v Oceania* po południowym Bałtyku w latach 2011-2013. Wyniki modelowe zostały porównane z profilami pomiarowymi wykonywanymi przy użyciu sondy Seabird 49 CTD ciągniętej za statkiem. Porównanie pionowych profili uzyskanych na podstawie obliczeń modelowych z wynikami uzyskanych w trakcie rejsów wykazało, że pionowa zmienność temperatury jest dobrze zachowana w wynikach modelowych. Wyraźnie widoczna pionowa stratyfikacja termiczna pozwoliła założyć, że model 3D CEMBS można z powodzeniem wykorzystać do detekcji upwellingów opisywaną metodą. Czwarty artykuł opisuje metodę detekcji

upwellingu oraz omawia dynamikę zmian międzyletnich tego zjawiska. Do analizy użyto średnich dziennych wartości temperatury powierzchniowej z lat 2010-2016, co dało łącznie ponad tysiąc map dla każdego ze źródeł danych. Bazując na pozyskanych danych przygotowano serię map obrazujących częstość występowania upwellingów przybrzeżnych wzdłuż całego wybrzeża Bałtyku, w postaci średniej z całego badanego okresu, jak również z podziałem na lata oraz miesiące. Przeanalizowano również serie czasowe występowania upwellingów dla wybranych lokalizacji i porównano je z pomiarami temperatury oraz z panującymi warunkami wiatrowymi. Wyliczono również szereg parametrów statystycznych pozwalających na liczbowe oszacowanie wyników. Ponadto, otrzymane wyniki porównano też z wynikami wcześniejszych badań. Główne miejsca częstego występowania upwellingów zostały zlokalizowane wzdłuż szwedzkiego wybrzeża oraz na Zatoce Fińskiej. Wzdłuż zachodniego wybrzeża Bałtyku upwelling był obecny przez ponad 30 % czasu, zwłaszcza w okolicach Głębi Landsort oraz na południe od niej. Zjawisko to było też obecne przez około 25 % czasu wzdłuż wschodniego wybrzeża wyspy Oland, 23 % na Zatoce Fińskiej, 20 % po obu stronach Gotlandii oraz na zatoce Botnickiej. Upwelling wzdłuż polskiej linii brzegowej występował z podobną częstotliwością, jednak tutaj wyniki oparte na danych modelowych były znacznie niższe od tych uzyskanych na podstawie danych satelitarnych. Nieco rzadziej, ok. 5 % czasu, upwelling występował również wzdłuż wybrzeży Litwy oraz Łotwy. Porównanie uzyskanych wyników z poprzednimi badaniami umożliwiło obserwację długoterminowych tendencji omawianego zjawiska. Szeregi czasowe analizowane w tej pracy były zbyt krótkie, aby ocenić obecność trendów w częstotliwościach upwellingu. Niemniej jednak porównanie z wynikami poprzednich badań wskazuje na niewielki wzrost jego częstotliwości wzdłuż szwedzkiego wybrzeża i północnego wybrzeża Zatoki Fińskiej. Sugeruje to, że ogólne trendy są utrzymane. Należy jednak pamiętać, że zbiory danych wykorzystywane w tych analizach pochodzą z różnych źródeł i mogą być niespójne, a metoda wykrywania upwellingu została nieznacznie zmodyfikowana.