

Upwelling na Morzu Bałtyckim – znaczenie i metody detekcji

Aleksandra Cupiał

Wydział Oceanografii i Geografii, Instytut Oceanografii

E-mail: a.cupial@o2.pl

Tutor: mgr inż. Agnieszka Wochna

Centrum GIS

Słowa kluczowe – *Bałtyk, OBIA, SST, teledetekcja, upwelling*

Wstęp

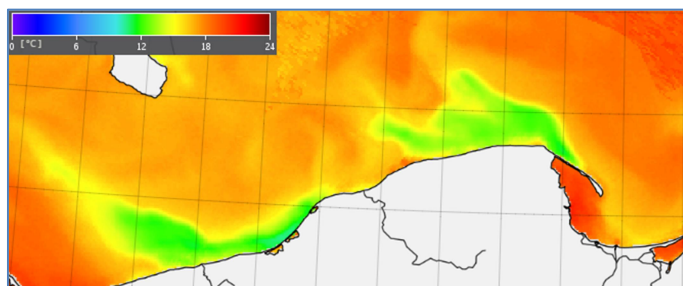
W ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat zdjęcia i mapy satelitarne na stałe zagościły w nauce i monitoringu jako jedna z najbardziej podstawowych metod zbierania danych (Castilla i in., 2008). Dzięki nim w szybki, stosunkowo łatwy i tani sposób można zdobyć informacje z dużego obszaru o wielu parametrach środowiska. Ponadto, dzięki obrazowaniu satelitarnemu naukowcy uzyskali nową perspektywę, z której mogą patrzeć na zjawiska zachodzące na Ziemi (Kruczyński, 2006). Danymi zdobywanymi przez aparaturę obrazującą, umieszczoną na satelitach może być rozkład zachmurzenia, zawartość chlorofilu w wodach powierzchniowych, czy temperatura powierzchni morza (SST; z ang. Sea Surface Temperature) (Siegel i in., 1996). Ciągłe pozyskiwanie informacji na temat SST, służy do zrozumienia zmienności tego parametru, detekcji i analizy globalnych zmian klimatu. Ponadto pozwala na wizualizację wielu procesów, które mają miejsce w oceanie. Tymi procesami, związanymi z gradientem temperatury są: systemy prądów, wirów, fronty czy rejonu upwellingu, widoczne dzięki wspomnianym gradientom na mapach SST (Seelye, 2004).

Upwelling na Bałtyku

Upwelling, o którym będzie mowa w niniejszej pracy, jest procesem powszechnie występującym w morzach i oceanach świata (Lehmann i in., 2008; Nieto i in., 2012). W wyniku działania siły wiatru następuje przemieszczenie wód powierzchniowych. Zgodnie z zasadą zachowania masy, na powierzchnię wynoszone są wody z większych głębokości (Leppäranta i in., 2009). Zwykle wody wynoszone na powierzchnię z głębszych rejonów oceanu mają inne wartości podstawowych parametrów: najczęściej są zimniejsze i bogatsze w składniki odżywcze (np. fosfor, krzem) (Kowalewski, 2005). Należy przy tym zaznaczyć, że, jeżeli upwelling zajdzie w rejonach polarnych lub zimą, na przykład przy krawędzi lodu, wody podpowierzchniowe będą miały wyższą temperaturę niż woda znajdująca się na powierzchni (A. Herman, komunikacja ustna).

Badania upwellingu na Bałtyku sięgają 1834 roku, kiedy Aleksander von Humboldt płynąc ze Szczecina do Kaliningradu i z powrotem, zarejestrował nagły spadek w temperaturze wód powierzchniowych o około 10°C, występujący niedaleko brzegu. Z powodu niedokładnego rozpoznania procesu badania nad nim były prowadzone bardzo przypadkowo – nie było bowiem wiadomo kiedy zjawisko wystąpi w danym regionie (Lehmann, 2008). Jedną z podstawowych prac

pokazujących rozkład stref upwellingu na Bałtyku jest artykuł z Bychkovej i Viktorova z 1987 roku. Autorzy korzystają z danych satelitarnych w widzialnej i podczerwonej części spektrum promieniowania elektromagnetycznego. Dzięki zastosowanej metodzie wyróżniają 22 stref występowania upwellingu w centralnej części Morza Bałtyckiego. Z owych 22 stref w okolicach Polski znajdują się trzy: strefa upwellingu Helskiego, Łebskiego i Kołobrzckiego. Widoczne są na Ryc.1 jako obszary zaznaczone na zielono o wyraźnie niższej temperaturze. Rozpływ wód z upwellingu Helskiego jest połączony z rozplywem wód upwellingu Łebskiego.



Ryc. 1. Rozkład temperatur wód przybrzeżnej części Morza Bałtyckiego [1]

Z badań wynika, że zwykle upwelling Kołobrzcki rozciąga się na obszarze rzędu 5000 km², Łebski 4200 km². Natomiast upwelling występujący koło półwyspu Helskiego osiąga rozmiary 1400 km² (Krężel i in., 2005). Forma upwellingu jaka występuje na Bałtyku to upwelling przybrzeżny. Gdy wiatr wieje równoległe do położonej po jego lewej stronie linii brzegowej, siły związane z rotacją Ziemi sprawiają, że wody powierzchniowe są odpychane od brzegu, a wspomniana zasada zachowania masy generuje wynoszenie wód na powierzchnię. Dzięki różnicy temperatur, sięgającej nawet 10°C, zjawisko to najłatwiej zaobserwować jest latem (Leppäranta, 2009). Sam proces, mimo że być może nie jest bardzo spektakularny, ma ważne i daleko idące konsekwencje. Można rozważać kilka jego aspektów: wpływ na mieszanie wód (Jankowski, 2002), transport masy i ciepła między wodą a atmosferą (Bychkova i in., 1987). Powoduje to zmianę lokalnych warunków atmosferycznych, a także pobudza produkcję pierwotną poprzez wynoszenie soli biogenicznych (Kowalewski i in., 2005).

Wpływ upwellingu na otoczenie

Ponieważ wiejące nad Bałtykiem latem (czerwiec, lipiec, sierpień) wiatry są dużo słabsze niż zimą (Leppäranta, 2009), upwelling staje się jednym z ważniejszych procesów mieszających wody w tym czasie (Jankowski, 2002). Wody wynoszone przez upwelling organizują się w trzy typy struktur: centrum, gdzie proces jest najsilniejszy, strefę frontalną na jego brzegach i podłużne jęzory chłodniejszej wody tworzące tzw. filamenty (Gurova i in., 2013). Zatem wody głębinowe mogą być transportowane na większe odległości na powierzchni w postaci filamentów, czy też tworzących się z nich wirów. Dobrym przykładem takiego zjawiska może być sytuacja w Zatoce Fińskiej. Kahru (1995) podaje za prawdopodobne, że transport wód upwellingu przez filamenty, od wybrzeża Finlandii do Estonii jest bardziej dynamiczny niż stały prąd płynący w zatoce. Ze względu jednak na nieregularność procesu upwellingu i problemy ze stałym monitoringiem związane z częstą obecnością chmur nad obszarem powodują, że dokładne prędkości procesu i jego dynamika nie są znane. Jako, że upwelling jest procesem dynamicznym pojawiają się rozważania na temat jego możliwej roli w transporcie zanieczyszczeń, , głównie wycieków olejowych (Kahru i in., 1995).

Pojawienie się wód o innej temperaturze na powierzchni morza będzie miało wpływ na zmiany stabilności morskiej warstwy granicznej (ang. *Marine boundary layer*, MBL). Ochłodzenie powierzchni wody, poprzez wymianę ciepła (Bychkova i in., 1987) przekłada się na ochłodzenie powietrza w MBL. W wyniku tego procesu, warstwy powietrza o niższych temperaturach będą bliżej ziemi niż warstwy cieplejsze. W efekcie wzrośnie stabilność w dolnej warstwy troposfery. To z kolei powoduje mniejsze tarcie wiatru i mniejsze prędkości wiatru nad danym obszarem (Gurova i in., 2013). Niskie prędkości wiatru występujące nad Bałtykiem latem prawdopodobnie mogą być dodatkowo osłabiane wystąpieniem upwellingu.

Jednym z najszerzej rozpatrywanych oddziaływań upwellingu z otoczeniem jest jego wpływ na produkcję pierwotną i rozwój organizmów. Latem, gdy następuje szczytowy okres rozwoju wielu organizmów morskich, wody powierzchniowe często mogą być pozbawione wystarczającej ilości soli biogenicznych. Upwelling jest na tyle silnym prądem wznoszącym, że w wyniku jego działania, na powierzchnię wyniesione zostaną związki między innymi azotu, fosforu czy krzemu (Fonselius, 1994). Należy jednak zwrócić uwagę, że nie zawsze upwelling przekłada się na natychmiastowy wzrost produkcji pierwotnej (Kowalewski, 2005). Badania wykazały spadek produkcji pierwotnej w centrum upwellingu Helskiego. Potwierdza to analiza zdjęć z czujników optycznych (np. MODIS - *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) znajdujących się na satelitach. Dane pokazują, że koncentracje materii zawieszanej w wodzie są zredukowane w strefach rozplywu wód z upwellingu. Zaobserwowano jednak strefę wzmożonej produkcji pierwotnej, która była przesunięta w stosunku do centralnego obszaru zjawiska. Jej przesunięcie wynika najprawdopodobniej z faktu, że dla większości organizmów temperatura jaką ma woda w centrum upwellingu jest zbyt niska. W związku z tym dopiero gdy maksymalna koncentracja soli biogenicznych zostanie osiągnięta w rejonach, gdzie temperatura jest odpowiednia dla fitoplanktonu, na przykład na obrzeżach rozplywu upwellingu, produkcja pierwotna wzrośnie (Kowalewski, 2005).

Jak widać upwelling ma wiele różnorodnych skutków. Ponadto, ponieważ jest to jeden z procesów silnie związany z kierunkiem i prędkością wiatru, jak i z temperaturą morza, jego badanie i monitoring jest niezbędny. Celem będzie tu sprawdzenia możliwych powiązań z obserwowanymi zmianami klimatu (K. Bradtke, komunikacja ustna). Powstaje jednak pytanie jak to robić.

Satelitarne metody badania upwellingu

Wraz z rozwojem technik satelitarnych rozwinęły się też metody badania upwellingu przybrzeżnego. Zdecydowana większość z nich bazuje na analizie temperatury wody w miejscu pojawiania się wód wynoszonych w trakcie trwania procesu (Krężel i in., 2005; Gurova i in., 2013). W czasie pionierskich badań oprócz danych o temperaturze wykorzystywano również zmiany w kolorze i jasności morza. Na zdjęciach satelitarnych bowiem wody wynoszone z głębin widoczne są jako spadek jasności wody, który mówi o wystąpieniu „czystych” wód (org. *clear, pure water*). Jeśli chodzi o kolor, zauważono, że w czasie zakwitów sinic, miejsca występowania upwellingu będą pozbawione zwiększonej ilości tych organizmów (Bychkova i in., 1987). Korzystając jedynie z obserwacji różnic temperatury na danych pochodzących z AVHRR (ang. *Advanced Very High Resolution Radiometer*) analizę upwellingu przeprowadził Jacek Urbański (Urbański, 1994). W innej pracy, również korzystającej z danych pochodzących z AVHRR, lecz nowszej generacji, za pomocą algorytmów podanych przez operatorów satelitów możliwe było przekształcenie danych pomiarowych w mapy rozkładu temperatur z dokładnością do 1°C (Krężel i in., 2005). W obu pracach wykorzystywane było promieniowanie podczerwone do wyznaczenia miejsc wystąpienia upwellingu, a wybór samych zdjęć był dokonywany ręcznie (Urbański, 1994; Krężel i in., 2005).

We wspomnianych badaniach z 2005 roku, zasięg rozplywających się wód był zdefiniowany przez analizę horyzontalnego gradientu temperatury, na transekcji od brzegu w kierunku morza.

Wartość progowa wyznaczająca granicę wód była różna w zależności od miejsca, które analizowano. Wynika to z faktu, że średni gradient temperatury jest inny w przypadku każdego z upwellingów przy polskim wybrzeżu (Krężel i in., 2005). Jednak nie tylko radiometry pasywne pomagają badać upwelling. Korzystając z danych radarowych, a także z modelu BSIOM (*Sea Ice-Ocean Model of the Baltic Sea*), jako środka wspomagającego, Gurova przeprowadziła analizę upwellingu wzdłuż wybrzeży Litwy i Łotwy (Gurova i in., 2013). Taka analiza była możliwa, ponieważ porównanie danych wskazało dużą korelację między danymi temperatury powierzchniowej wody, a wskaźnikami szorstkości powierzchni (ang. *roughness*). Wykorzystano istnienie trzech podstawowych mechanizmów, które pozwoliły wykryć upwelling na zdjęciach radarowych: (1) wzrost stabilności morskiej warstwy granicznej atmosfery (wynikający z ochłodzenia się przypowierzchniowych warstw powietrza, co przekłada się pośrednio na spadek prędkości wiatru, a zatem spadek szorstkości), (2) wzrost lepkości wód powierzchniowych, (3) obecność biologicznych surfaktantów w rejonie upwellingu, wpływających na wzrost gładkości powierzchni morza (Gurova i in., 2013). Powyższa metoda analizy upwellingu wymaga dużego zaangażowania od osoby która ją przeprowadza, na każdym niemal jej etapie. Czy jest to *preprocessing*, na który składa się między innymi wybór obszarów wolnych od chmur albo korekcja geometryczna, czy też sama analiza, polegająca z kolei m. in. na przeliczaniu danych w pikselach na wartości radiacji i tworzenie map temperatur. Oba te etapy niosą ze sobą możliwość popełnienia błędu. Ponadto w czasie wyboru zdjęć do późniejszej analizy parametrów statystycznych, dwie osoby mogą mieć inne zdanie na temat uwzględnienia danego zdjęcia (Shlova i in., 2013). Badania upwellingu z danych satelitarnych wykorzystują przede wszystkim analizę pikselową map temperatury (Krężel i in., 2005). Z jej pomocą wyznaczane są gradienty temperatur występujące w rejonie upwellingu, jego zasięg, czy częstość występowania. Jednak wybór zdjęć, na których prowadzone są dalsze analizy dokonywany jest ręcznie przez badaczy. Są to stosunkowo niedawne badania i według wiedzy autora, nie pojawiła się jeszcze metoda automatycznego wykrywania upwellingów Morza Bałtyckiego na zdjęciach satelitarnych. Jednym z problemów, na jakie można natrafić w czasie próby ich wykrywania jest fakt, że na zdjęciach mogą pojawić się inne obiekty, których wartości temperatury w pikselach będą porównywalne z tymi jakie będą w miejscach występowania upwellingu. Przykładem mogą być chmury czy wody przemieszczające się wraz z frontem termicznym (Bychkova i in., 1987). Sposobem rozwiązania takich problemów, a także drogą do opracowania narzędzia pozwalającego na monitoring upwellingu może być zastosowanie klasyfikacji obiektowej.

Klasyfikacja obiektowa

OBIA – (*Object-Based Image Analysis*) czyli klasyfikacja obiektowa jest jedną z metod analizy zdjęć satelitarnych. Polega ona na dzieleniu obrazu na segmenty, a następnie przez porównywanie ich między sobą a także z otoczeniem, dokonywaniu klasyfikacji do wcześniej ustalonych grup. Jej główną różnicą w stosunku do innych metod analizy danych satelitarnych polega na tym, że jako podstawową swoją jednostkę analizy bierze nie piksele, z których składa się obraz rastrowy, ale wyróżnione wcześniej segmenty (Castilla i in., 2008). Ponadto gama charakterystyk, którymi można opisać segmenty jest olbrzymia (Definiens, 2012). Rozwój tej metody związany jest przede wszystkim z udoskonalaniem czujników zbierających dane satelitarne. W przeszłości rozdzielczość zdjęć satelitarnych było dużo mniejsza niż obecnie. Przekłada się to na fakt, że wielkość obiektu widzianego na zdjęciu jest dużo większa niż wielkość piksela. W związku z czym w analizie zdjęcia piksel po pikselu łatwo można zgubić wzorce widoczne jedynie przy szerszym spojrzeniu. Obiekty, w które zorganizowane są piksele w czasie klasyfikacji obiektowej charakteryzują się tym, że jak najdokładniej odzwierciedlają jakiś obiekt istniejący w rzeczywistości. Następnie obiekty te poddaje się dalszej analizie. Jednak analiza pikselowa nie pozostała zapomniana przez twórców

OBIA. W rzeczywistości wykorzystuje ona wiele rozwiązań wcześniej wymyślonych, poddając je jedynie pewnym modyfikacjom (Castilla i in., 2008).

Podsumowanie

Niektóre z procesów zachodzących w obrębie środowiska morskiego i atmosfery przyjmują podobne wartości na zdjęciach satelitarnych. Często jednak ich wymiary i kształty są na tyle charakterystyczne, że można wykorzystać je w czasie analizy. Ponadto pozostają one w szczególnym stosunku do siebie, do brzegu i innych obiektów, jakie mogą zlokalizować czujniki optyczne znajdujące się na satelitach (Urbański, 2009). Jednym z takich zjawisk będzie upwelling przybrzeżny. Zaczęto już wykorzystywać klasyfikację obiektową do badań nad tym procesem, jednak na razie skupiono się na prostej analizie filamentów pochodzących z wód wyniesionych przez proces (Urbański, 2009). Ponieważ wiele lat badań pozwoliło na dokładny opis różnych parametrów upwellingów, takich jak ich średnie długości, szerokości czy gradienty temperatur (Krężel i in., 2005; Gurova i in., 2013) wydaje się, że naukowcy posiadają wiele informacji, które można wykorzystać w analizie obiektowej upwellingu. Analiza obiektowa, dążąca do stworzenia metody wykrywania obiektów w sposób zbliżony do pracy oka człowieka i bazująca na właściwościach wewnętrznych i zewnętrznych obiektów (Konik, 2014) wydaje się zatem idealnym narzędziem do dalszej analizy zjawiska i monitorowania jego wrażliwości na zmiany klimatu.

Literatura

- Bychkova I. A., Viktorov S. V., 1987. Use of satellite data for identification and classification of upwelling in the Baltic Sea. *Oceanology*, 27(2).
- Castilla G., Hay G.J., 2008. *Image objects and geographic objects*, [w]: *Object-based Image Analysis*, Springer, Berlin.
- Definiens AG, 2012. *Developer XD 2.0.4. Reference Book*. Definiens Documentation, Monachium
- Fonselius S., 1994. The upwelling of nutrients in the central Skagerrak. *Deep-Sea Research II*, 43(1), 57-71.
- Gurova E., Lehmann A., Ivanov A., 2013. Upwelling dynamics in the Baltic Sea studied by a combined SAR/infrared satellite data and circulation model analysis. *Oceanologia*, 55(3), 687-707.
- Jankowski A., 2002. Variability of coastal water hydrodynamics in the southern Baltic – hindcast modelling of an upwelling event along the Polish coast. *Oceanologia*, 44(4), 395-418.
- Kahru M., Hakansson B., Rud O., 1995. Distributions of sea-surface temperature fronts in the Baltic Sea as derived from satellite imagery. *Continental Shelf Research*, 15(6), 663-679.
- Konik M., 2014. *Charakterystyka cech rozlewów olejowych identyfikowanych w Morzu Bałtyckim za pomocą czujnika ASAR*, praca magisterska. Uniwersytet Gdański.
- Kowalewski M., 2005. The influence of Hel upwelling (Baltic Sea) on nutrient concentrations and primary production – the results of ecohydrodynamic model. *Oceanologia*, 47(4), 567-590.
- Krężel A., Ostrowski M., Szymelfenig M., 2005. Sea surface distribution during upwelling along the Polish Baltic coast. *Oceanologia* 47(4), 415-432.
- Kruczyński, Z., 2006. *Lotnicze i satelitarne obrazowanie Ziemi*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- Lehmann A., Myrberg K., 2008. Upwelling in the Baltic Sea. *Journal of Marine Systems*, 74, S3-S12.
- Leppäranta M., Myrberg K.(red.), 2009. *Physical oceanography of the Baltic Sea*, Germany: Springer.
- Nieto K., Demarcq H., McClatchie S., 2012. Mesoscale frontal structures in the Canary Upwelling System: New front and filament detection algorithms applied to spatial and temporal patterns. *Remote Sensing of the Environment*, 123, 339-346.
- Seelye, M., 2004. *An Introduction to Ocean Remote Sensing*. Cambridge: Cambridge University Press.

Siegel H., Gerth M., Schmidt T., 1996. Water exchange in the Pomeranian Bight investigated by satellite data and shipborne measurements. *Continental Shelf Research*, 16(14), 1793-1817.

Urbański J., 1994. *Upwellingi polskiego wybrzeża Bałtyku*, Uniwersytet Gdański.

Źródła internetowe

[1] <http://satbałtyk.iopan.gda.pl/> (dostęp 28.04.2016)

Krótką notką o autorze: *Studentka oceanografii ze specjalizacją fizyka morza (II rok studiów magisterskich). Aktualnie prowadzi badania nad możliwościami wykorzystania klasyfikacji obiektowej do poprawy jakości danych satelitarnych mówiących o zachmurzeniu nad Bałtykiem. Pozwoli to poprawić stan wiedzy o błędzie jakim jest obarczona maska chmur nakładana na mapy temperatury powierzchni morza i ułatwi wykrywanie frontów, upwellingu czy rozplywów rzecznych.*