

„Dynamika międzyletnich i sezonowych zmian temperatury, zasolenia oraz prądów morskich w fiordzie Hornsund, Spitsbergen”

Arktyczne fiordy zlokalizowane wzdłuż zachodniego wybrzeża Spitsbergenu są szczególnie wrażliwe na zmiany klimatyczne ze względu na obecność Prądu Zachodniospitsbergeńskiego (WSC) niosącego ciepłą i słoną Wodę Atlantycką (AW) na północ do Oceanu Arktycznego. Po drodze AW ulega modyfikacji wskutek utraty ciepła do atmosfery oraz mieszania z wodami szelfowymi. AW wpływając ponad szelfem do fiordów stanowi istotny czynnik kształtujący warunki hydrograficzne w fiordach zachodniego Spitsbergenu.

W ostatnich latach wzrosła częstotliwość występowania ekstremalnych zdarzeń pogodowych w rejonie Svalbardu, zwłaszcza zimą. Zimy są coraz cieplejsze, z rosnącą ilością opadów deszczu i deszczu ze śniegiem. Powodem tego jest wzrost występowania sztormów, których trajektorie coraz częściej przebiegają wzdłuż zachodnich wybrzeży Spitsbergenu w kierunku Cieśniny Fram zamiast tradycyjnej trasy przez Morze Barentsa. Powoduje to napływ ciepłych mas powietrza w rejon Svalbardu. Ponadto, silne wiatry wzdłuż szelfu Spitsbergenu powodują napływ AW na szelf i do fiordów zakłócając typowo arktyczne warunki zimą oraz wpływając negatywnie na rozwój pokrywy lodowej.

Głównym celem niniejszej rozprawy doktorskiej była weryfikacja dwóch hipotez badawczych dotyczących fiordu Hornsund. Pierwsza hipoteza dotyczy spadku ilości wód pochodzenia lokalnego na rzecz wód pochodzenia atlantyckiego wskutek postępującego ocieplenia w rejonie Svalbardu. Druga hipoteza zakłada wzrost zmienności warunków hydrograficznych w Hornsundzie w odpowiedzi na wzrost częstotliwości występowania ekstremalnych zdarzeń pogodowych.

Cel osiągnięto poprzez realizację pomniejszych zadań, w tym scharakteryzowanie sezonowych zmian warunków hydrograficznych w latach 2011-2015, międzyletnich zmian warunków w latach 2001-2017 oraz analizę czynników zewnętrznych (Prąd Zachodniospitsbergeński i Sorkapski) oraz wewnętrznych (zawartość wody słodkiej, występowanie lodu morskiego, temperatura powietrza).

Materiał badawczy bazował głównie na danych temperatury i zasolenia zbieranych latem przez Instytut Oceanologii PAN w czasie rejsów AREX w rejonie Arktyki Europejskiej. Są to dane zbierane przy użyciu sondy holowanej, tj.: pomiary rejestrowane są w sposób ciągły od powierzchni do dna w czasie ruchu statku. Taki sposób pomiarów pozwala na uzyskanie wysokiej rozdzielczości pionowych rozkładów właściwości wody. Dane zbierane były zawsze w tym samym okresie roku, między 20 a 31 lipca w latach 2001-2017.

Dodatkowo w latach 2010-2015 wykonywano pomiary hydrograficzne od wiosny do późnego lata w ramach Polsko-Norweskiej współpracy w projektach AWAKE (Arctic Climate and Environment of the Nordic Seas and the Svalbard – Greenland Area) oraz AWAKE-2 (Arctic Climate System Study of Ocean, Sea Ice and Glaciers Interactions in Svalbard Area). Również w ramach tych programów na przedpolu Hornsundu zwodowano zakotwiczone systemy pomiarowe umożliwiające rejestrację temperatury, zasolenia oraz prądów morskich przez cały rok.

Dane te pokazały znaczące różnice temperatury i zasolenia wody między mooringami zlokalizowanymi w południowej i północnej części wejścia do fiordu, wskazując na wpływ rotacji Ziemi na cyrkulację wód w Hornsundzie. Efekt ten potwierdzono obliczeniami promienia deformacji Rossby'ego dla warunków letnich, który wyniósł 3.7 km. Wartość ta jest prawie trzykrotnie mniejsza od średniej szerokości fiordu. Oznacza to, że słona, ciepła

woda wpływa do fiordu wzdłuż brzegu południowego, a po modyfikacji wskutek mieszania z wodami fiordowymi, mniej słona i chłodniejsza woda wypływa wzdłuż brzegu północnego. Ponadto w pracy pokazano, że w zimie występują napływy ciepłej i słonej wody do fiordu. W oparciu o obserwację oraz dostępną literaturę stwierdzono, że napływ AW na szelf i do fiordów zimą prawdopodobnie występuje co roku, przy czym zasięg napływu determinowany jest wymuszeniami atmosferycznymi.

Struktura kolumny wody zmienia się sezonalnie i ma względnie jednorodny charakter zimą, natomiast latem dominuje struktura trójwarstwowa. Kolumna wody latem składa się z wysłodzonej wody powierzchniowej, warstwy ciepłych wód adwekcyjnych oraz chłodniejszej warstwy głębinowej. Warstwa głębinowa w głównym basenie fiordu składa się z wód pochodzenia atlantyckiego, a w Brepollen dominuje bardzo zimna i gęsta woda stanowiąca pozostałości po zimie.

Cykl sezonowy w Hornsundzie podobny jest do schematy przedstawionego dla innych fiordów arktycznych. Stwierdzono, że termicznie Hornsund zbliżony jest do fiordów w północno-wschodniej części Svalbardu wykazując niższe wartości temperatury niż w innych fiordach zlokalizowanych wzdłuż zachodniego wybrzeża Spitsbergenu. Z kolei długość sezonów zbliżona jest do innych fiordów zlokalizowanych wzdłuż zachodniego wybrzeża Spitsbergenu.

Wykazano, że główny basen fiordu jest pod przeważającym wpływem wód pochodzenia atlantyckiego, z temperaturą i zasoleniem wyższym o odpowiednio 1.28°C i 0.25 od temperatury i zasolenia w Brepollen. Średnie wieloletnie wartości temperatury i zasolenia w powyższych obszarach wynosiły odpowiednio $2.25 \pm 0.08^{\circ}\text{C}$ i 34.07 ± 0.80 w głównym basenie fiordu oraz $0.97 \pm 1.42^{\circ}\text{C}$ i 33.82 ± 1.06 w Brepollen.

Na podstawie obserwacji wzdłuż osi fiordu latem zaproponowano trzy typy warunków hydrograficznych. Typ atlantycki występował w okresie, gdy w fiordzie dominowały wody pochodzenia atlantyckiego (2002, 2006, 2007, 2013, 2014, 2016 i 2017). Typ arktyczny-lokalny związany był z dominacją Prądu Sorkapskiego (SC) na szelfie oraz wód lokalnych w fiordzie (2003, 2010, 2012 i 2015) a typ arktyczny-regionalny związany z dominacją SC, który dodatkowo transportował lód morski z Morza Barentsa (2001, 2004, 2008, 2009 i 2011).

W pracy po raz pierwszy podjęto próbę parametryzacji Wody Arktycznej (ArW) w celu określenia jej wpływu na wody Hornsundu. W efekcie ArW została zdefiniowana jako woda o zasoleniu niższym od 34.62. Wykazano, że średnie wartości temperatury i zasolenia ArW wynosiły $2.57 \pm 0.85^{\circ}\text{C}$ i 34.37 ± 0.18 . Z kolei udział ArW w rejonie szelfu wynosił średnio $36 \pm 28\%$ i był nieco niższy niż udział AW ($41 \pm 29\%$).

Wykazano, że temperatura i zasolenie wody w Hornsundzie istotnie zależy od tego, która masa wody (AW czy ArW) dominuje w rejonie szelfu. Ponadto, stwierdzono, że w ostatnich latach nastąpił znaczny wzrost częstotliwości występowania AW w rejonie szelfu, który przyczynia się do wzrostu ilości wód pochodzenia atlantyckiego w fiordzie.

Największe zmiany obserwowano w występowaniu Wychłodzonej Wody Zimowej (WCW) latem. Obserwowana latem w Brepollen poniżej podwodnego progu, WCW może być wskaźnikiem warunków zimowych. Ostatnie lata pokazały, że ilość WCW latem zmienia się w cyklu dwuletnim, co drugi rok od lata 2012 WCW prawie w ogóle nie występuje. Jest to w zgodzie z ostatnimi obserwacjami wskazującymi na coraz cieplejsze zimy oraz spadek pokrywy lodowej w fiordzie. Wykazano silną zależność właściwości WCW od temperatury powietrza zimą oraz ilością dni ze stałą pokrywą lodową (indeks DFI).

Średnia objętość wody słodkiej (*FVV*) w fiordzie latem wynosiła $0.50 \pm 0.21 \text{ km}^3$. Na przestrzeni lat *FVV* wykazuje dużą zmienność w zależności od typu występujących warunków hydrograficznych. Najwyższe wartości *FVV* odnotowano latem 2011 (typ

arktyczny-regionalny), natomiast najniższe wartości obserwowano latem 2014 (typ atlantycki).

W oparciu o obserwacje i literaturę problemową stwierdzono, że Hornsund znajduje się pod najmniejszym wpływem AW w porównaniu do innych fiordów zlokalizowanych wzdłuż zachodniego wybrzeża Spitsbergenu. Powodem jest efekt blokowania wejścia do fiordu przez Prąd Sorkapski, którego wody w rejonie południowego Spitsbergenu są dużo chłodniejsze i bardziej wysłodzone.

Podsumowując, Hornsund ma wiele cech wspólnych z innymi fiordami zlokalizowanymi wzdłuż zachodniego Spitsbergenu. Dane przedstawione w niniejszej pracy zwracają uwagę na znaczenie badań Prądu Sorkapskiego jako czynnika równie ważnego jak Prąd Zachodniospitsbergeński, wpływający na zmiany warunków hydrograficznych fiordów zachodniego Spitsbergenu. Szczegółowe badania interakcji obu prądów umożliwiłyby jakościowe i ilościowe oszacowanie transformacji wód w kierunku północnym co przyczyniłoby się do lepszego zrozumienia wpływu czynnika oceanicznego na fiordy zachodniego Spitsbergenu.