

Magdalena Łacka

„An interplay between sea ice and thermohaline circulation during Younger Dryas – a multiproxy record of paleoceanographic changes in the European Arctic”

Jednym z największych problemów XXI wieku są szeroko pojęte zmiany klimatyczne, wynikające ze stałego wzrostu średniej rocznej temperatury przy powierzchni Ziemi. Efekty tego wielkoskalowego ocieplenia są szczególnie odczuwalne w Arktyce. W wyniku wzrostu średnich rocznych temperatur następuje przyspieszona recesja lodowców, które dostarczając wody wytopiskowe, podnoszą poziom wody w oceanach. Dostawa tak dużej ilości wody słodkiej, poza zagrożeniem powodziowym dla miast nadmorskich będzie miała również wpływ na cyrkulację oceaniczną. Głównym dostawcą ciepła do rejonów arktycznych jest prąd północnoatlantycki (ang. *North Atlantic Current*; dalej skrót NAC), niosący ciepłe i słone wody z rejonów równikowych na północ. W Morzach Nordyckich wody atlantyckie niesione powierzchniowym NAC ulegają schłodzeniu a tym samym stają się cięższe i toną, tworząc północnoatlantyckie wody głębinowe (ang. *North Atlantic Deep Waters*; dalej skrót NADW). NADW spływa w kierunku Oceanu Południowego tworząc powrotne prądy oceaniczne. Cyrkulacja ta, zwana termohalinową (ang. *Atlantic Meridional Overturning Circulation*; dalej skrót AMOC), transportuje około 1.2×10^{15} W ciepła na 24°N w wyniku czego w regionie Północnego Atlantyku a szczególnie w północnozachodniej Europie jest o wiele cieplej niż gdzie indziej na świecie na tej samej szerokości geograficznej. Od lat 70. XX-go wieku obserwuje się wyraźne osłabienie efektywności AMOC w wyniku dostawy do Oceanu Atlantyckiego dużych ilości wód słodkich z topniejącej czaszy lądolodu grenlandzkiego. Dalsze osłabianie AMOC może mieć daleko idące konsekwencje dla klimatu całej północnej hemisfery.

Aby w pełni zrozumieć mechanizmy i konsekwencje zmian klimatycznych obserwowanych współcześnie i móc przewidywać ich kierunek w przyszłości konieczne jest szczegółowe poznanie naturalnych zmian klimatu i środowiska w ostatnich tysiącach. Taką możliwość dają badania rdzeni osadów morskich. Poprzednie badania paleoceanograficzne pokazały, że znaczące wahania w sile AMOC związane z dostawą słodkich wód z topniejących lądolodów do Północnego Atlantyku były odnotowywane w trakcie Plejstocenu a każde z nich odgrywało znaczącą rolę w gwałtownych zmianach klimatycznych. Jedną z takich gwałtownych zmian klimatu był młodszy dryas (12,800-11,500 cal yr BP). Okres ten jest jednym z najdokładniej opisanych stadiów klimatycznych ale jednocześnie ciągle trwają spory dotyczące przyczyny tego nagłego i krótkotrwałego ochłodzenia.

Badania prezentowane w niniejszej pracy zostały oparte o rdzeń osadów morskich pobrany w Storfjordrennie (południowy Spitsbergen). Storfjordrenna jest idealnym miejscem badań zmian jakie dokonują się w ostatnich latach w Arktyce oraz tych, które zachodziły po ustąpieniu lądolodu. Znajduje się ona na styku zachodniej części Svalbardu będącej pod silnym wpływem wód atlantyckich a częścią wschodnią, zdominowaną przez zimne i wysłodzone wody arktyczne Morza Barentsa. Rekonstrukcja warunków środowiskowych została przeprowadzona z wykorzystaniem analizy mikropaleontologicznej otwornic bentosowych i planktonicznych, analizy izotopów stabilnych tlenu i węgla w skorupkach otwornic bentosowych, analizę granulometryczną, ze szczególnym uwzględnieniem frakcji IRD, analizy podatności magnetycznej, spektroskopii fluorescencji rentgenowskiej i geochemiczną analizę mikrokonkrecji wiwianitu. Ponadto, do odtworzenia warunków panujących w wodach powierzchniowych wykorzystano analizę alkenonów, czyli substancji organicznej produkowanej przez fitoplankton z klasy *Prymnesiophyceae*; w wodach polarnych przez kokolitofory z gatunku *Emiliania huxleyi*. Zależność typu wiązań pomiędzy

atomami węgla w alkenonach a temperatura/zasoleniem wody poskutkowało stworzeniem biomarkera pozwalającego na odtwarzanie warunków panujących w eufotycznej warstwie oceanu.

Wyjście z ostatniego glacjału w Storfjordrennie charakteryzowało się dynamicznym przechodzeniem pomiędzy stadiałami: starszy dryas, młodszy dryas, preborealna oscylacja, a interstadiałami: Bølling, Allerød, wczesny holocen. Fazy stadialne były wywoływane zwiększonymi ilościami wód wytopiskowych z topniejących lądolodów półkuli północnej, co prowadziło do zwiększonej stratyfikacji kolumny wody, z mocno wysłodzonymi wodami zalegającymi na powierzchni oraz silną halokliną tworzącą się pomiędzy różnymi masami wody. Umożliwiało to tym samym rozwój sezonowej/wieloletniej pokrywy lodowej na powierzchni rynny, doprowadzając do pogorszenia się warunków tlenowych przy dnie. Poza samym początkiem młodsze dryasu, gdzie nastąpiło zupełnie zamrożenie powierzchni Storfjordrenny utrzymujące się kilka dekad umożliwiające tworzenie się przy dnie mikrokonkrety wiwianitu, schłodzona woda atlantycka była stale obecna w warstwie podpowierzchniowej. Obecnie podobna struktura wód jest obserwowana w północno-wschodniej części Morza Barentsa, zdominowanej przez wysłodzone i chłodniejsze wody z Oceanu Arktycznego. Podczas interstadiałów również zachodziło formowanie się pokrywy lodowej, jednakże była ona ograniczona do sezonu zimowego. Intensywny napływ wód atlantyckich pod cieńszą warstwę wód arktycznych sprawiał, że haloklina nie była tak samo silna jak podczas stadiałów a tym samym była ułatwiona wentylacja wód przydennych.

Spośród wszystkich stadiałów, w czasie wyjścia z maksimum ostatniego zlodowacenia, młodszy dryas trwał najdłużej, przy czym tylko jego początek charakteryzował się całkowitym zatrzymaniem AMOC. W późniejszej fazie odnotowano funkcjonowanie AMOC w stanie pośrednim, czego wynikiem była produkcja wód mniej zasolonych (ang. *North Atlantic Intermediate Water*). Było to spowodowane obecnością dużej ilości wody słodkiej na powierzchni Północnego Atlantyku i jego silną stratyfikacją. Biorąc pod uwagę fakt, że poziom wody w oceanie światowym w młodszym dryasie wzrósł nieznacznie oraz na podstawie danych ze Storfjordrenny i innych danych opublikowanych dla rejonu Północnego Atlantyku autorka niniejszej pracy wnioskuje, że zatrzymanie AMOC na początku młodszego dryasu zostało spowodowane przez oberwanie się części szelfowej lądolodu laurentyjskiego. Lodowiec szelfowy, który jest zanurzony w wodzie, nie ma bezpośredniego wpływu na poziom wody w oceanie światowym. Dostarczenie ogromnej ilości wody słodkiej z topniejącego fragmentu bariery lodowej zatrzymało AMOC na kilkadziesiąt lat. Po tym czasie, cyrkulacja oscylując wracała do stanu sprzed jej zatrzymania. Wyjście z młodszego dryasu odbyło się w Storfjordrennie w postaci dużych wahań w występowaniu pokrywy lodowej, natlenieniu jej wód przydennych czy produktywności wód powierzchniowych. Oscylacja ta była związana z dynamicznym przechodzeniem pomiędzy produkcją głębokich i pośrednich wód, z dużym udziałem ciągłej dostawy wód słodkich z wycofujących się pozostałości lądolodów. Prawdopodobnie ochłodzenie w trakcie oscylacji preborealnej było również efektem tych wahań.

Przeprowadzone badania pozwoliły również na potwierdzenie użyteczności dwóch nowych wskaźników w badaniach paleoceanograficznych. Po pierwsze, udział procentowy alkenonów z czterema wiązaniami podwójnymi pomiędzy atomami węgla z których są zbudowane do wszystkich alkenonów, które zostały znalezione w osadzie ($\%C_{37,4}$) wraz ze stężeniem całkowitym alkenonów (ΣC_{37}) może służyć jako jakościowy wskaźnik występowania wód arktycznych/polarnych na powierzchni oceanu. Po drugie, stosunek magnezu do wapnia uzyskany metodą spektroskopii fluorescencji rentgenowskiej (XRF) może być wykorzystany w środowisku morskim do wnioskowania o natlenieniu wód przydennych. Niskie wartości Mn/Fe wskazują na możliwość wystąpienia warunków redukcyjnych przy dnie.