
Michał Tomczak

**Rekonstrukcja warunków środowiskowych północno-zachodniej części Morza
Południowochińskiego podczas ostatnich 140 000 lat: podejście wieloskaźnikowe**

Rozprawa doktorska

(streszczenie)

Opieka naukowa:

*Prof. dr hab. Andrzej Witkowski
Uniwersytet Szczeciński*

*Dr. Jérôme Kaiser
Leibniz Institute for Baltic Sea
Research Warnemünde*

Wydział Nauk o Ziemi, Uniwersytet Szczeciński, kwiecień 2017

Prezentowana praca została przygotowana w ramach projektu badawczego zatytułowanego "Środowisko sedymentacyjne i ewolucja klimatu Zatoki Beibu wraz z przyległymi obszarami w okresie od późnego plejstocenu" (SECEB) i została wykonana w wyniku współpracy Uniwersytetu Szczecińskiego z Kantońską Służbą Geologii Morza (GMGS, Chiny) oraz Instytutem Badań Morza Bałtyckiego w Warnemünde (IOW, Niemcy), jako partnerem wspierającym. Autor dysertacji otrzymał dotację badawczą sfinansowaną przez Narodowe Centrum Nauki (NCN) na podstawie decyzji nr DEC-2011/01/N/ST10/07708.

Interpretacja środowiska północno-zachodniej części Morza Południowochińskiego rozpoczęła się od opisu litologii rdzeni osadów pobranych z Zatoki Beibu (Zat. Tonkijaska), podczas rejsu na chińskim statku naukowo-badawczym *Fendou 5* we wrześniu i październiku 2009 roku. Materiał badawczy pobrany podczas tego rejsu został poddany analizom w Warnemünde i Szczecinie. Udział w wyprawie, oraz dalsze badania przeprowadzono w ramach niemiecko-chińskiego projektu badawczego "BEIBU - ewolucja środowiska i antropogeniczny wpływ na Zatokę Beibu w holocenie".

Ponadto, autor rozprawy uczestniczył w lądowych wyprawach badawczych, wzdłuż chińskiego wybrzeża Morza Południowochińskiego, na wyspę Hajnan oraz w dorzeczu rzeki Perłowej. Celem udziału w tych ekspedycjach była chęć uzyskania wiedzy o uwarunkowaniach geologicznych wybrzeży morskich, a także o źródłach osadów terygenicznym doprowadzanych przez duże rzeki uchodzące do Morza Południowochińskiego.

Podstawowy materiał badawczy składa się z 3 rdzeni osadów morskich (83PC, 111PC oraz HDQ2) pozyskanych i udostępnionych autorowi przez GMGS. Osady wydobyte w tych rdzeniach zostały zdeponowane w czasie geologicznym obejmującym ostatni cykl glacjał-interglacjał. Opróbowanie powyższych rdzeni zostało wykonane przez autora pracy w trakcie staży naukowych w GMGS w latach 2010-2015. Materiał badawczy został poddany wieloskaźnikowym analizom wykonanych w laboratoriach Uniwersytetu Szczecińskiego, IOW oraz GMGS.

Wyniki badań zostały zaprezentowane podczas międzynarodowych konferencji naukowych, m.in. 34th International Geological Congress (Brisbane, 2012), Monsoon Asia Integrated Regional Study Conference (Beijing, 2014), 16th Annual Conference of the International Association for Mathematical Geosciences (New Delhi, 2014) oraz American Geophysical Union Fall Meeting (San Francisco, 2014).

Rekonstrukcja zdarzeń klimatycznych i zmian w późnym czwartorzędzie ma kluczowe znaczenie dla zrozumienia obecnego systemu klimatycznego i tworzenia prognoz na przyszłość. Osady morskie, jako jedno ze źródeł, rejestrują zmienność klimatyczną, która wskazuje na fluktuacje pomiędzy chłodniejszymi okresami glacialnymi, którym towarzyszyły spadki poziomu morza oraz cieplejszymi okresami interglacialnymi związanych z rosnącym poziomem morza. Obszary tropikalnych wód oceanicznych odgrywają istotną rolę w regulacji globalnego klimatu poprzez wymianę ciepła i wilgoci z atmosferą [Cheng, 2006; Qiu i wsp., 2014]. Morze Południowochińskie jest największym marginalnym morzem między Azją a Oceanem Spokojnym, a jego położenie sprawia, że jest wrażliwe na zmiany środowiskowe. Zapis osadów zdeponowanych na jego obszarze służy jako naturalne archiwum i laboratorium pomagające zrozumieć interakcje na linii ląd-ocean zachodzące nie tylko w tym regionie, ale i poza jego granicami. Coraz większa liczba publikacji paleoceanograficznych odzwierciedla rosnące zainteresowanie klimatem i dynamiką oceaniczną późnego plejstocenu oraz holocenu [Pelejero i wsp., 1997; Huang i wsp., 1997; Wang i wsp., 1999; Kienast i wsp., 2001a,b; Zhao i wsp., 2006; Steinke i wsp., 2010; Li i wsp., 2017]

Wyniki badań przedstawione w niniejszej pracy przyczynią się do lepszego zrozumienia zmienności klimatu w skalach glacialno-interglacialnych w Azji Południowo-Wschodniej. Celem niniejszego opracowania jest odkodowanie reakcji zmiennych środowiskowych na zmiany klimatyczne oraz oszacowanie parametrów oceanograficznych wód powierzchniowych, takich jak temperatura, zasolenie i produkcja pierwotna, jak również zmiany poziomu morza i ich wpływ na środowisko depozycyjne. Realizację tak szerokiego celu pracy zrealizowano stosując używane obecnie w badaniach paleoceanograficznych tzw. podejście wielowskaźnikowe (ang. multi-proxy approach).

Główną hipotezę badawczą niniejszej pracy można sformułować następująco:

Regionalne warunki klimatyczne i oceanograficzne podczas ostatniego cyklu glacialno-interglacialnego na północnej krawędzi kontynentalnej Morza Południowochińskiego znajdują odzwierciedlenie w osadach zdeponowanych zarówno na szerokich obszarach szelfowych (Zatoka Beibu), jak i w przyległych głębokich basenach sedymentacyjnych. Analizy wielowskaźnikowe, w tym analiza litologiczna, biofacji i oznaczeń biomarkerów pozwalają na jakościową i ilościową rekonstrukcję parametrów klimatycznych i oceanograficznych, takich jak regionalny poziom morza, temperatury powierzchni morza (SST) i zasolenia (SSS) oraz paleo-produktywności, w czasie geologicznym obejmującym ostatnie 140 000 lat.

W celu weryfikacji tak postawionej hipotezy sformułowano szereg pytań badawczych:

- Jak środowiska depozycyjne obszarów płytko- i głębokowodnych odzwierciedlają, przez wskaźniki osadowe, zmiany klimatu i dynamiki oceanograficznej?
- Jaki jest charakter i amplituda wahań poziomu morza, i jaki jest ich wpływ na górną warstwę kolumny wody oraz środowisko dyspozycyjne na północno-zachodniej krawędzi kontynentalnej Morza Południowochińskiego?
- Czy dynamika klimatu, która miała miejsce w okresie późnego czwartorzędu w wysokich szerokościach geograficznych, odzwierciedlona została przez zmiany charakterystyk subtropikalnych wód powierzchniowych Morza Południowochińskiego (system naczyń połączonych)?
- W jakim stopniu zmiany w systemie cyrkulacji monsunowej w Azji Południowo-Wschodniej i fluktuacji poziomu morza wpływały na produkcję pierwotną i jak zbiorowiska fitoplanktonu reagowały na zmiany w środowisku morskim?

Aby odpowiedzieć na te pytania, wykonano następujące zadania badawcze:

1. Odtworzenie zmian środowiskowych, które wystąpiły podczas ostatniego cyklu glacialnego na północno-zachodniej krawędzi kontynentalnej Morza Południowochińskiego.
2. Rekonstrukcja parametrów oceanograficznych, takich jak temperatura, zasolenie, produkcja pierwotna i bilans substancji biogenicznych.
3. Identyfikacja czynników wywołujących zmienność klimatu oraz warunków oceanograficznych, oraz analizy zależności pomiędzy wskaźnikami oceanograficznymi a wschodnio-azjatyckim systemem monsunowym, zmianami poziomu morza i promieniowaniem słonecznym.
4. Wykorzystanie i weryfikacja (wybranych) wskaźników oceanograficznych i sedymentologicznych w celu odtworzenia środowisk sedymentacyjnych w północno-zachodniej części Morza Południowochińskiego.

Warunki środowiskowe panujące w północno-zachodniej części Morza Południowochińskiego podczas późnego plejstocenu i holocenu zostały zrekonstruowane przy użyciu: biomarkerów (stężeń alkenonów w osadach), stosunku Mg/Ca, proporcji izotopów trwałych $\delta^{15}\text{N}$ i $\delta^{13}\text{C}$ zawartych w osadach, a także izotopów $\delta^{18}\text{O}$ zawartych w skorupkach planktonicznych otwornic, stosunku C/N, jak również całkowitej ilości węgla organicznego (TOC), uzupełnionych o analizę zbiorowisk okrzemek występujących

w planktonie, osadach powierzchniowych a także w osadach z badanych rdzeni.

Wyniki zawarte w przedstawionej rozprawie wykazały istnienie związków pomiędzy wskaźnikami środowiskowymi a zmianami klimatycznymi w skali globalnej. Tłem dla tych wzajemnych relacji są będące skutkiem globalnych zmian klimatu zmiany poziomu morza. Dane odczytane z analizy osadów morskich ukazują zapis istotnych zdarzeń klimatycznych podczas późnego czwartorzędu. Ujawniają one także różnicę zmienności cyrkulacji monsunowej pomiędzy okresami glacialnymi i interglacialnymi na obszarze Azji Południowo-wschodniej. Co więcej, wyniki przeprowadzonych badań sugerują, że zmiany w intensywności monsunowej oraz wymianie mas wodnych z sąsiadującymi basenami mórz tropikalnych stanowią mechanizm napędowy dla zmian środowiskowych oraz fizyko-chemicznych parametrów wód powierzchniowych Morza Południowochińskiego podczas ostatnich 140 tysięcy lat.

Podczas analizowanego okresu czasu, poziom morza zmieniał się wielokrotnie. Osiągał on najwyższe poziomy w interglacjalach tj., w holocenie i eemie. W eemie poziom morza był wyższy od współczesnego o ok. 4 m (± 2) (126 tys. lat temu). Najniższe wartości poziom morza osiągał w okresach maksimum glacialnych (MIS 2, MIS 6), notując wartości niższe od obecnego nawet o 124 m (135 tys. lat temu). Najniższa wartość SST została zrekonstruowana dla okresu późnego MIS 6 i jest szacowana na 22,4°C (134,7 tys. lat temu). Podczas ostatniego cyklu glacialnego najniższa SST jest szacowana na 22,9°C i została zarejestrowana podczas MIS 4 (60,6 tys. lat temu), a także podczas MIS 2 (15,0 tys. lat temu). Oznacza to, że nie zdarzyło się to podczas maksimum ostatniego zlodowacenia (19-23 tys. lat temu).

W okresach glacialnych, w warunkach znacznie niższego poziomu wód, obszar powierzchni zajmowanej przez Morze Południowochińskie zmniejszył się o ok. 50%. Efektem tego było zamknięcie większości cieśnin łączących je z sąsiednimi basenami mórz tropikalnych. Ograniczana była w ten sposób wymiana wód. Jedyne połączenie z Oceanem Spokojnym była Cieśnina Luzon, łącząca Morze Południowochińskie z Zachodnim Pacyfikiem, oraz w ograniczonym zakresie Cieśnina Mindoro, jako połączenie z Morzem Sulu [Wang i wsp., 1995]. Mniejsza powierzchnia parowania, szczególnie w południowej części Morza Południowochińskiego przełożyła się w okresach zimnych na zdecydowanie niższą ilość opadów. Spadek poziomu morza spowodował również ekspozycję na wpływy atmosferyczne rozległych obszarów szelfowych. Skutkowało to rozwojem procesów wietrzenia i erozji mimo istniejącej szaty roślinnej [Wang i wsp., 2009]. Wartości

$\delta^{13}\text{C}$ oraz TOC dla okresu MIS 2 – MIS 4 oraz MIS 6 wskazują na wzmożoną dostawę biogenów i materii organicznej pochodzenia lądowego.

Zmienność klimatu i powodowane przez nią zmiany położenia linii brzegowej skutkowały przesunięciem ujść rzecznych. W ten sposób zmieniało się położenie centrów depozycji osadów terygeniczych. Przesuwały się one w stronę głębszych partii zbiorników morskich [Shiau i wsp., 2008]. Zmiany te są widoczne w profilowaniach sejsmo-akustycznych dna morskiego a także w profilach rdzeni osadowych pochodzących z Zatoki Beibu. Profile sejsmo-akustyczne wskazują na istnienie kanionów i dolin rzecznych wypełnionych i przykrytych osadami transgresji morskich. W profilu litologicznym rdzenia HDQ2, ale także w pozostałych badanych rdzeniach, wahania poziomu morza ujawniają się jako silne odbicia sejsmiczne (reflektory sejsmiczne). Istnienie reflektorów powiązane jest z warstwami osadów zbudowanych z osadów gruboziarnistych (żwiry, piaski) typowych dla środowiska przybrzeżnego. Osady te traktowane są jednocześnie jako wskaźniki położenia linii brzegowej w przeszłości geologicznej. Z zapisu sejsmo-akustycznego wynika, że podczas ostatniego cyklu glacialnego, w rejonie wyspy Hajnan poziom morza zmienił się co najmniej sześć razy [Chen i wsp., 2015].

Z drugiej strony, obszary, które w okresach cieplejszych stanowiły obszary szelfów kontynentalnych, były w warunkach obniżonego poziomu morza również obszarami depozycji, w szczególności zaś osadów jeziornych oraz rzeczno-deltowych. Potwierdza to odkrycie paleo-delty odkrytej na południowy zachód od wyspy Hajnan. Osady paleo-delty zostały najprawdopodobniej zdeponowane podczas okresu MIS 3 [Harff, 2016].

Zmniejszony obszar Morza Południowochińskiego oraz ograniczony napływ wód wymusiły zmianę cyrkulacji powierzchniowej wód Morza Południowochińskiego. Zmieniła się ona na cykloniczną (przeciwną do ruchu wskazówek zegara). W dużej mierze zostało to spowodowane przez przeważający na tym obszarze monsun zimowy oraz silne wiatry z północnego-wschodu. Ograniczenia w wymianie wód powierzchniowych, zwłaszcza z ciepłym Oceanem Indyjskim, doprowadziły do widocznego spadku temperatury wód powierzchniowych (SST) o ok. 2°C podczas okresów glacialnych. Spadek ten był większy niż na obszarze otwartego Pacyfiku.

Dane diatomologiczne wskazują jednak, że połączenie z Oceanem Indyjskim podczas MIS 5 kilkakrotnie podlegało aktywacji. Było to najprawdopodobniej związane z wyższym poziomem morza w trakcie tego okresu. Napływ cieplejszych wód powierzchniowych przez Szelf Sundajski zdają się potwierdzać podwyższone zawartości procentowe okrzemki z gatunku *Thalassionema nitzschioides* (do 30%), co wskazuje

jednocześnie na istnienie wciąż silnego monsunu letniego w okresie MIS 5. Zwiększony udział gatunków nerytycznych np. *Cyclotella striata* (do 80%) zachowanych w osadach ze stoku kontynentalnego potwierdza wyraźny spadek poziomu morza podczas ostatniego glacjału, szczególnie od końca MIS 5 i w trakcie MIS 4. Brak napływu ciepłych i bardziej zasolonych wód przez Szelf Sundajski nie spowodował jednak zmniejszenia gradientu SST pomiędzy północną i południową częścią basenu. Przeciwnie, obserwowany jest wzrost gradientu, lecz ma on najprawdopodobniej związek z silniejszym oddziaływaniem monsunu zimowego na północne obszary M. Południowochińskiego oraz potencjalnym napływem zimniejszych wód z Morza Wschodniochińskiego i północnego Pacyfiku. Dodatkowo, dane z badań paleotemperaturowych uzyskane z kokolitoforów i otwornic (osiągających maksimum rozwoju odpowiednio zimą i latem) wskazują na znaczny wzrost sezonowości zmian SST w będące skutkiem występowania monsunu zimowego.

Niska temperatura na kontynencie azjatyckim i stosunkowo wysoka temperatura zachodniego Pacyfiku podczas ostatniego cyklu glacialnego mogły skutkować wzrostem intensywności monsunu zimowego z północnego-wschodu. Efektem tego zjawiska było silniejsze mieszanie kolumny wody i zwiększona dostawa biogenów do warstw powierzchniowych oraz wzrost ich produktywności. Silniejsze wiatry w okresach glacjałów mogły również dostarczać znacznej ilości pyłu z kontynentu azjatyckiego, bezpośrednio wpływając na ilość i skład substancji biogennych dostępnych w wodach powierzchniowych. Warunki te sprzyjały zakwitom fitoplanktonu w północnej części Morza Południowochińskiego, co potwierdza zwiększony udział okrzemek w osadach. Wzrost produktywności w okresie glacialnym sugerują również analizy izotopów trwałych, $\delta^{13}\text{C}$ i $\delta^{15}\text{N}$ a także stosunek C/N i TOC. Wskazują one na całkowite zużycie azotu z wody morskiej przez miejscowy fitoplankton, stanowiący jednocześnie źródło materii organicznej zdeponowanej w osadach, oraz na nieznaczny udział materii organicznej pochodzenia lądowego. Zmiany składu i proporcji składników biogennych zapewne przyczyniały się do zmian w strukturze fitoplanktonu. Pod koniec MIS 5, prawdopodobnie ze względu na zwiększoną ilość krzemionki i żelaza dostępne w wodzie, dominujące w fitoplanktonie kokolitofory zaczęły być zastępowane przez okrzemki. Okrzemki zdominowały produkcję pierwotną w okresie MIS 1–MIS 3.

Kolejnym czynnikiem, który wpłynął zasadniczo na środowisko Morza Południowochińskiego są zmiany natężenia promieniowania słonecznego. Zwiększenie produktywności podczas MIS 3 może się wiązać ze zwiększoną insolacją podczas tego okresu. Wiązał się z tym wzrost zasięgu strefy fotycznej oraz produkcji pierwotnej. Potwierdzają to

wyniki rekonstrukcji SST oraz zasolenia wód powierzchniowych (SSS). W okresie MIS 3, w warunkach, w których basen M. Południowochińskiego był częściowo zamknięty, zwiększone SSS (ok. 34,5 g/kg), może być związane ze zwiększonym parowaniem wód powierzchniowych, których temperatura była wyższa o ok. 1°C (ok. 23,5-24,0°C) aniżeli szacowana dla MIS 2 i MIS 4. Co więcej, wartości SSS są znacznie niższe w okresach MIS 2 i MIS 4, kiedy również promieniowanie słoneczne było mniejsze.

Oprócz okresów glacialnych analizowany materiał objął dwa interglacjały: eemski, trwający od ok. 130 do 116 tysięcy lat temu oraz holocen obejmujący okres ostatnich ok. 10 tysięcy lat. Uważa się, że przez większą część okresów interglacialnych warunki klimatyczne podobne były do obserwowanych współcześnie. Wykorzystując współczesny wzór jako analogię i zakładając, że podobne mechanizmy działały w różnych okresach czasowych, można wnioskować o warunkach środowiskowych w obu wymienionych okresach. Okresy interglacjałów na obszarze objętym badaniami miały wysoką średnią temperaturę 25,7°C (holocen) i 27,7°C (eem). Oba także zostały poprzedzone okresami o minimalnych temperaturach (22,6–22,9°C) i najniższym poziomie morza (-120 do -124 m) w okresie ostatnich 140 tys. lat. Przejście z okresu glacialnego do interglacialnego wiązało się z szybką zmianą klimatu spowodowaną globalnym ociepleniem. Proces ten charakteryzował się szybkim ogrzewaniem wód powierzchniowych o 4,5–5°C podczas deglacjacji. W okresach deglacjacji SST osiągała wartości 27–28°C (MIS 5). Wzrost temperatury stowarzyszony był z szybkim wzrostem poziomu morza, nawet do 60 mm/rok w okresie deglacjacji związanej z interglacjałem eemskim [Rohling i wsp., 2009], co było tempem dwa razy szybszym aniżeli podczas ostatniej deglacjacji [Hansen i wsp., 2015].

Transgresja morska na obszary szelfowe północno-zachodniej części Morza Południowochińskiego rozpoczęła się ok. 20 tys. lat temu a poziom morza wzrastał nieprzerwanie do ok. 12 tys. lat temu osiągając wartość ok. -60 m. Podczas tego procesu doszło do silnej erozji osadów zdeponowanych na obszarach szelfowych. Zatoka Beibu zaczęła otwierać się ok. 18 tys. lat temu i proces ten zakończył się ok. 7,5 tys. lat temu [Yao i wsp., 2009]. Poziom erozyjny powstały w trakcie transgresji morskiej jest wyraźnie widoczny w rdzeniach (GC) pobranych z Zatoki Beibu podczas rejsu na pokładzie R/V *Fendou 5* w 2009 roku. Około 8,6 tys. lat temu doszło do otwarcia Cieśniny Qiongzhou. Doprowadziło to do napływu zimnych wód z Morza Wschodniocińskiego, przez Cieśninę Tajwańską, która zaczęła się otwierać ok. 13 tys. lat temu, lecz pozostawała bardzo wąska przez kolejne 4 tys. lat [Shintani i wsp. 2008; Zhang i wsp., 2015]. Około 8 tys. lat temu, w wyniku pełnego otwarcia Cieśniny Qiongzhou i Cieśniny Tajwańskiej, oraz Cieśniny

Sundajskiej uformowała się współczesna cyrkulacja powierzchniowa dla obszaru M. Południowochińskiego. Linia brzegowa osiągnęła pozycję zbliżoną do współczesnej ok. 6 tys. lat temu i pozostaje stosunkowo stabilna [Zhou i wsp., 1994]. Wzrost poziomu morza otwarcie kolejnych cieśnin umożliwiły dopływ i wymianę tropikalnych mas wodnych. Szczególnie ważne było otwarcie połączenia z Oceanem Indyjskim. Dzięki silniejszemu monsunowi letniemu możliwy był napływ cieplejszych i bardziej zasolonych wód z obszaru Zachodnio-Pacyficznego Bieguna Ciepła (WPWP). Zmiany w cyrkulacji atmosferycznej przesunęły pozycję tropikalnej strefy konwergencji (ITCZ) na północ, co spowodowało transport ciepłych i wilgotnych mas powietrza nad obszar Azji południowo-wschodniej. To znacząco przyczyniło się do wzrostu ilości opadów oraz dopływu rzecznoego na obszar Morza Południowochińskiego. Zarówno wzrost opadów jak i dopływu wód rzecznych w okresach interglacjalnych powodowały spadek SSS (do ok. 33,5 g/kg), pomimo wzrostu promieniowania słonecznego podczas interglacjalów. Dodatkowo, wiele otwartych połączeń z morzami tropikalnymi skutkowało sezonowo zmieniającą się cyrkulacją monsunową zapewniającą większą wymianę wód powierzchniowych. Wzrost natężenia promieniowania słonecznego w okresach interglacjalnych nie powodował wzrostu produktywności wód powierzchniowych, co prawdopodobnie związane było z osłabieniem cyrkulacji monsunowej i w konsekwencji osłabieniem procesu pionowego mieszania kolumny wody, skutkując mniejszą ilością składników odżywczych dostępnych w powierzchniowych warstwach wody. Dodatkowo, większa wilgotność jaką uzyskał kontynent azjatycki oraz słabsze wiatry z północy, powodowały spadek natężenia transportu eolicznego nad obszar Morza Południowochińskiego.

Część wyników uzyskanych w ramach niniejszej pracy opublikowano jako Chen i wsp., [2015] i Zhang i wsp., [2015], w Clift, P.D., Harff, J., Wu, J. i Yan, Q. (red.), *River-Dominated Shelf Sediments of East Asian Seas*. Geological Society, London, Special Publications, 429. Ponadto autor jest współautorem 3 publikacji naukowych oraz jednego rozdziału w książce będących rezultatem szerszej współpracy naukowej.

W oparciu o uzyskany materiał badawczy oraz wyniki analiz wielo-wskaźnikowych autor planuje dalsze badania koncentrujące się głównie na poprawie modeli wiekowych rdzeni morskich (m.in. weryfikację osadów potencjalnie zawierających materiał piroklastyczny zdeponowanych w czasie erupcji wulkanu Toba) oraz zastosowanie dodatkowych technik rekonstrukcji temperatury wód powierzchniowych, takich jak wskaźnik TEX86, wykonanych w wysokiej rozdzielczości analitycznej.

