Geostatystyczne modelowanie geometrii serii osadowych oraz integracja danych sejsmicznych, sedymentologicznych i eustatycznych w rekonstrukcjach paleogeograficznych

Streszczenie rozprawy doktorskiej:

Linia brzegowa oraz obszar szelfu kontynentalnego podlegają ciągłym morfologicznym przemianom wskutek działalności szeregu czynników naturalnych: globalnych zmian poziomu morza; poziomych i pionowych ruchów litosfery; dynamiki osadów, na którą składają się procesy erozji, akumulacji, redepozycji i kompakcji; jak również wskutek zmian wynikających z działalności człowieka. W związku ze złożonością systemu, stworzenie geometrycznych modeli serii osadowych oraz modeli paleogeograficznych wymaga szeroko zakrojonych i kompleksowych badań obejmujących analizy sedymentologiczne, interpretację danych geofizycznych, syntezę zróżnicowanych informacji geologicznych z wielu źródeł oraz przestrzenne modelowanie (inter- i ekstrapolowanie) danych z wykorzystaniem narzędzi geostatystycznych. Rekonstrukcja paleogeografii dla różnych obszarów wymaga zastosowania spójnej metodologii z jednoczesnym uwzględnieniem regionalnych oraz lokalnych uwarunkowań. Opracowane przykłady geometrycznego modelowania serii osadowych pod takim właśnie kątem zostały przedstawione w trzech autorskich artykułach naukowych składających się na rozprawę:

1. **Miluch, J.**, Osadczuk, A., Feldens, P., Harff, J., Maciąg, Ł., Chen, H., 2021: Seismic profiling-based modeling of geometry and sedimentary architecture of the Late Pleistocene delta in the Beibu Gulf, SW of Hainan Island (South China Sea). *Journal of Asian Earth Sciences*, 205, 104611, https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2020.104611
2. **Miluch, J.**, Maciąg, Ł., Osadczuk, A., Harff, J., Jiang, T., Chen, H., Borówka, R.K., McCartney, K., 2022: Multivariate geostatistical modeling of seismic data: Case study of the Late Pleistocene paleodelta architecture (SW off-shore Hainan Island, South China Sea). *Marine and Petroleum Geology*, 136, 105467, https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2021.105467
3. **Miluch, J.**, Zhang, W., Harff, J., Groh, A., Arlinghaus, P., Denker, C., 2025: Paleogeographic numerical modelling of marginal seas for the Holocene - an exemplary study of the Baltic Sea, Earth System Dynamics, 16(2), 585-605, https://doi.org/10.5194/esd-16-585-2025

Pierwszy z trzech przedstawionych do oceny artykułów skupiał się na analizie danych sejsmicznych z Morza Południowochińskiego pod kątem rekonstrukcji geometrii paleodelty, odkrytej na szelfie kontynentalnym, na południowy zachód od wyspy Hajnan w ramach analizy danych geofizycznych[1]. Zidentyfikowanie warstwy, z występującymi w niej charakterystycznymi dla osadów deltowych klinoform, stanowiło punkt wyjścia do uruchomienia polsko-chińskiego projektu badawczego ‘Ewolucja "delty Hainan" na północno-zachodnim szelfie Morza Południowochińskiego jako reakcja na paleośrodowiskowe zmiany od późnego plejstocenu (ERES)’. W ramach tego projektu kandydat był odpowiedzialny za interpretowanie danych geofizycznych oraz analizy sedymentologiczne. W analizowanych profilach sejsmicznych wyróżniono refleksy R1 i R2 odpowiadające powierzchniom erozyjnym, stanowiącym strop oraz spąg osadów deltowych, których wiek na podstawie datowania metodą OSL określono odpowiednio na 56 kyr BP i 65 kyr BP. Następnie wykorzystano geostatystyczne narzędzia interpolacji w celu wymodelowania powierzchni stropu i spągu, jak również stworzenia modeli miąższości serii deltowej oraz post-deltowej. Dane litologicznych ze 100-metrowego rdzenia osadów ZBW umożliwiły wyznaczenie prędkości rozchodzenia się dźwięku w poszczególnych jednostkach. Rzutowanie punktów, w których na profilach sejsmicznych zidentyfikowano wcięcia erozyjne, na wymodelowane powierzchnie umożliwiło zrekonstruowanie 2 generacji systemów kanałów rozprowadzających. Analiza pozornych kątów zapadania klinoform deltowych w punktach przecięć profili pozwoliła na wyliczenie prawdziwych kątów oraz prawdziwych azymutów, dzięki czemu potwierdzono hipotezę, że osady budujące paleodeltę pochodzą z wyspy Hajnan. Na podstawie modelu miąższości, parametrów osadu oraz dostępnych danych datowania metodą OSL, możliwe było oszacowanie objętości oraz masy osadów budujących paleodeltę oraz wyliczenie rocznej dostawy osadu rzędu $282 \pm 20*10^6$ t/rok. Depozycja tak dużej ilości osadów mogła być wynikiem dramatycznie silnego wietrzenia skał budujących wyspę Hajnan, prawdopodobnie spowodowanego ekstremalnymi warunkami klimatycznymi, wahaniami poziomu morza i tektonicznym podnoszeniem się wyspy. Publikacja była elementem kompleksowych badań „Delty Hajnan’, która może stanowić potencjalny „hot spot” dla badań paleoklimatycznych dla okresu ostatniego zlodowacenia. Ponadto stwierdzono, iż paleodelta w Zatoce Beibu i powiązane obszary przybrzeżne i lądowe mogą służyć jako idealny region do

[1] Chen, H., Harff, J., Qiu, Y., Osadczuk, A., Zhang, J., Tomczak, M., Cui, Z., Cai, G., 2015. Last Glacial Cycle and Seismic Stratigraphic Sequences at the West Offshore of Hainan Island, Northwestern of the South China Sea. Spec. Publ. Ser., Geol. Soc. Lond. 429, 99–121. https://doi.org/10.1144/SP429.9

badań „source-to-sink”, obejmujących dynamikę klimatu pod kątem występowania ekstremalnych zjawisk klimatycznych i geozagrożeń.

Drugi artykuł skupia się na metodologicznym aspekcie geometrycznego modelowania osadów paleodelty, który zakładał dobór najbardziej optymalnych parametrów modelu w procesie interpolacji metodą krigingu. W modelowaniu wykorzystywano model sferyczny oraz zagnieżdżony model gaussowski-potęgowy; w obu przypadkach uwzględniając wpływ efektu samorodkowego. Proces wielokrotnego interpolowania tego samego zestawu danych z wykorzystaniem zmiennych parametrów oraz walidacja krzyżowa wyników, udowodniły, że najbardziej optymalną metodą interpolacji danych sejsmicznych był model zagnieżdżony z minimalną wartością efektu samorodkowego. Pomimo faktu iż wymodelowana wartość cechowała się minimalnie gorszym „dopasowaniem” w bliskim sąsiedztwie profili, wariancja krigingu w przestrzeniach pomiędzy profilami była zdecydowanie niższa niż w przypadku bardziej popularnego modelu sferycznego. Zbadano również wpływ przyjętej metodologii (w kontekście modelu krigingu jak i rozdzielczości siatki) na wysokość wariancji oraz szacowania objętości osadu. W artykule przedstawiono ponadto metodę ekstrapolacji danych na obszar, dla którego brak było danych sejsmicznych, obejmujący terytorialne wody wietnamskiej części Zatoki Beibu. W celu ekstrapolacji wykorzystano istniejące rekonstrukcje zmian linii brzegowej, które umożliwiły poczynienie założeń dotyczących charakterystyki wypełniania się basenu sedymentacyjnego. Wykonano również analizy zmian morfologii dna Zatoki Beibu. Modele przepływu (flow models), które pozwalają na rekonstrukcję kierunków transportu i akumulacji osadów, zostały policzone na podstawie zrekonstruowanych powierzchni stropu i spągu serii deltowej, dzięki czemu dostarczyły kolejnych argumentów potwierdzających hipotezę o wyspie Hajnan będącej źródłem osadów. Wizualizacja zmian kąta nachylenia dna zatoki pozwoliła opisać ewolucję basenu, pokazując agradacyjny wzór ułożenia warstw odpowiadający szybkiej dostawie osadów przy jednoczesnym wzroście poziomu morza pomiędzy 65 a 56 kyr BP.

Trzeci z artykułów odnosił się do Morza Bałtyckiego. Dotyczył on kompleksowej syntezy danych z różnych źródeł, której rezultatem był regionalny model miąższości osadów holoceńskich dla tego akwenu oraz zestaw map paleogeograficznych o rozdzielczości czasowej 500 lat, obejmującej okres ostatnich 11.7 tys. lat. W celu wygenerowania modelu miąższości holocenu, zebrano szereg podzestawów danych pochodzących z publicznie dostępnych źródeł takich jak bazy danych oraz publikacji naukowych. Poszczególne podzestawy danych, na które składały się izolinie, profile bądź punkty wymagały interpolacji metodą krigingu. W przypadku obszarów, dla których nie były dostępne żadne dane, zastosowano ekstrapolację metodą co-

krigingu oraz algorytm uczenia maszynowego U-net. Stworzenie pierwszego regionalnego modelu miąższości osadów holoceńskich w Bałtyku umożliwiło oszacowanie masy oraz rocznej dostawy osadów. W pełni numeryczna paleogeograficzna rekonstrukcja Morza Bałtyckiego dla holocenu została osiągnięta dzięki zastosowaniu wzoru koncepcyjnego zmian względnego poziomu morza. Polegała ona na poprawieniu współczesnego cyfrowego modelu terenu o izostatyczną deformację skorupy ziemskiej (GIA), eustatyczną zmianę poziomu wody (uwzględniając niezależne poziomy wody podczas odłączenia paleo-Morza Północnego od Jeziora Ancylusowego) i dynamiki osadów. Utworzono zestaw paleo-cyfrowych modeli terenu (paleo-DEM) z rozdzielczością obrazu 0.01°×0.01°i rozdzielczością czasową 500 lat. Mapy paleogeograficzne zostały zweryfikowane poprzez porównanie z istniejącymi rekonstrukcjami, opartymi o obserwacje terenowe. Artykuł stanowi kolejny krok w kierunku wypracowania spójnej metodologii rekonstrukcji ewolucji mórz marginalnych podczas cykli transgresji/regresji, obejmujących nie tylko strefy klimatu zwrotnikowego i subtropikalnego, ale także morza polarne i subpolarne, na które oddziałuje regionalna dynamika pokrywy lodowej.

Przedłożone artykuły dotyczą wykorzystania różnego rodzaju danych geologicznych, dzięki którym możliwe jest geostatystyczne modelowanie geometrii serii osadowych i jej zmienności w czasie. Kompleksowa interpretacja danych sejsmicznych oraz sedymentologicznych prowadziła do interpretacji morfogenetycznej oraz umożliwiała wykonanie innych analiz przestrzennych. Wygenerowane trójwymiarowe modele miąższości osadów stanowiły, wraz z danymi eustatycznymi oraz rekonstrukcją deformacji litosfery, istotny element prowadzący do przeprowadzenia w pełni numerycznego modelowania paleogeograficznego. Przedłożone artykuły podejmują też dyskusję nad optymalną metodologią generowania trójwymiarowych modeli serii osadowych z uwzględnieniem specyfiki danych wejściowych; syntezą danych geologicznych z różnych źródeł oraz spójną metodologią rekonstrukcji paleogeograficznych, która składa się z uniwersalnego wzoru koncepcyjnego uwzględniającego regionalne uwarunkowania. Omówione zostały również potencjalne wyzwania na przyszłość, takie jak szacowanie erozji, dywersyfikacja tempa akumulacji osadów oraz szersze uwzględnienie procesów morfogenezy brzegu.