

## Abstract

The warming of the Arctic Ocean has accelerated in recent decades, with the European Arctic (EA), warming at globally unparalleled pace. The warming is fueled by the increasing sea water temperature, salinity, and volume of the advected Atlantic water, reaching the Arctic through the largest polar-boreal gateway, the Fram Strait, in a process referred to as the Atlantification. The inflow does not only alter the physical environment, but it also delivers boreal biota northward, hence affecting polar ecosystems functioning and biodiversity, yet the exact effects of the process remain largely unknown. In order to better understand the consequences of the progressing Atlantification on the pelagic ecosystems of the EA, the study was designed that focused on a poorly studied, but ecologically pivotal group – gelatinous zooplankton (GZ). These marine predators have largely escaped scientific attention, and are often absent from planktonic time series, due to their fragility and convoluted taxonomy, yet the existing evidence advocates that they may constitute promising indicators of water mass distribution due to their rapid life cycles, low commercial value, and hydrologically driven distribution. Here, a globally unique, 12-years-long zooplankton monitoring time series from the EA, was analyzed to obtain species-level, life cycle- and morphometrically-resolved GZ database, coupled with the hydrological data. These information were later used to answer the following questions: **1)** does the GZ distribution reflect water mass distribution in the EA? **2)** can the GZ species freely cross the passive fronts separating adjacent water masses? **3)** can the Atlantification progression be inferred from the population structure of the key boreal GZ expatriate? and **4)** what is the possible direction of the Atlantification-mediated EA's pelagic ecosystem evolution? To answer these questions a plethora of advanced statistical methods was applied to the time series data, including ordination techniques and model-building. This allowed to elucidate the intricate pattern of water mass- and oceanographic features (*e.g.*, fronts)-specific GZ indicator species, abundance signatures and population structure. Described patterns were found to persist both in the temporal and spatial scales, and limited cross-frontal GZ community exchange was described. Additionally, population of the Atlantic water indicator GZ – *Aglantha digitale* – was shown to advect northward with the flow of the West Spitsbergen Current, and the potential secondary reproductive event was inferred from the environmentally-driven changes in small-to-large jellyfish numbers ratio. Overall, the results showcased that the abundance, diversity and population structure of GZ are good indicators of the progressing Atlantification. Given that the more abundant and less speciose community of GZ was typically found in the Atlantic water, the progressing Atlantification is predicted to lead to a more gelatinous future of the pelagic ecosystems of the EA.

## Streszczenie po polsku (Abstract in Polish)

Ocieplenie Oceanu Arktycznego przyspieszyło na przestrzeni ostatnich dekad, szczególnie w europejskim sektorze Arktyki. W obszarze Arktyki Europejskiej (AE) proces ten zachodzi w najszybszym tempie w skali całego globu i jest napędzany przez wzrastającą temperaturę, zasolenie oraz objętość atlantyckiej masy wodnej, napływającej do Arktyki przez największe polarno-borealne połączenie, Cieśninę Fram, w procesie nazywanym Atlantyfikacją. Napływ wód atlantyckich nie tylko przekształca środowisko abiotyczne, ale transportuje również borealne gatunki dalej na północ, wpływając w ten sposób na bioróżnorodność i funkcjonowanie arktycznych ekosystemów, przy czym dokładne efekty tego procesu są nadal słabo rozpoznane. W celu lepszego zrozumienia wpływu postępującej Atlantyfikacji na pelagiczne ekosystemy AE, zaplanowano badania skupiające się na niedostatecznie poznanej, ale ekologicznie kluczowej grupie zwierząt – galaretowatym zooplanktonie (GZ). Te morskie drapieżniki były rzadko uwzględniane w badaniach oceanograficznych, przez co praktycznie nie występują w planktonowych seriach czasowych, co zwykle uzasadnia się delikatnością ich budowy i skomplikowaną taksonomią. Nieliczne istniejące prace naukowe, wskazują, że organizmy te, dzięki swoim krótkim cyklom życia, niskiej wartości komercyjnej, a także rozmieszczeniu zależnemu od warunków środowiskowych, mogą stanowić obiecujące wskaźniki dystrybucji mas wodnych. W związku z tym, w prezentowanej pracy przanalizowano unikalną w skali globalnej, 12-letnią serię czasową monitoringu zooplanktonu z AE, połączonego z pomiarami hydrologicznymi, celem uzyskania bazy danych o rozmieszczeniu GZ, w rozdzielczości uwzględniającej poszczególne gatunki, stadia cyklu życiowego oraz dane morfometryczne. Tak uzyskane dane wykorzystano następnie celem odpowiedzenia na pytania: **1)** czy rozmieszczenie GZ odzwierciedla układ mas wodnych w AE? **2)** czy gatunki GZ mogą bez ograniczeń przekraczać pasywne fronty oddzielające sąsiadujące masy wodne? **3)** czy postępowanie Atlantyfikacji w AE można wykryć przy użyciu struktury populacji kluczowego, borealnego gatunku GZ? oraz **4)** w jakim potencjalnym kierunku zmierza, napędzana Atlantyfikacją, ewolucja ekosystemów pelagicznych AE? Do analizy danych wykorzystano liczne zaawansowane metody statystyczne, w tym techniki ordynacyjne oraz modele statystyczne. Takie kompleksowe podejście pozwoliło na objaśnienie skomplikowanych wzorców powiązań gatunków wskaźnikowych, sygnatur liczebności oraz struktury populacji, typowych dla poszczególnych mas wodnych, oraz innych elementów cyrkulacji oceanicznej (np. frontów). Stwierdzono, że opisane wzorce utrzymują się zarówno w czasie, jak i przestrzeni, oraz że wymiana zespołów GZ przez fronty jest znikoma. Dodatkowo

wykazano, że populacja gatunku wskaźnikowego dla atlantyckiej masy wodnej – *Aglantha digitale* – dostarczana jest na północ wraz z biegiem Prądu Zachodniospitsbergeńskiego, a analizując środowiskowo-zależne zmiany stosunków liczebności osobników młodocianych i dorosłych wykryto również potencjalny drugi cykl rozrodczy tego gatunku. Reasumując, uzyskane wyniki wskazują, że liczebność, różnorodność oraz struktura populacji GZ stanowią dobre wskaźniki postępującej Atlantyfikacji. Biorąc pod uwagę, że liczniejszy, ale mniej różnorodny zespół GZ charakteryzował wody atlantyckie, to przewiduje się, że postępująca Atlantyfikacja może oznaczać bardziej „galaretowatą” przyszłość dla pelagicznych ekosystemów AE.