

Instytut Oceanologii
Polskiej Akademii Nauk



AGNIESZKA KUJAWA

**Bioróżnorodność i kompozycja izotopowa otwornic bentosowych Svalbardu
w warunkach atlantyfikacji Arktyki Europejskiej.**

Rozprawa doktorska wykonana pod kierunkiem promotora

Prof. dr hab. Marka Józefa Zajączkowskiego

oraz promotora pomocniczego

Dr Joanny Pawłowskiej

w

Instytucie Oceanologii Polskiej Akademii Nauk

Sopot, 2021

Institute of Oceanology
Polish Academy of Sciences



AGNIESZKA KUJAWA

**Biodiversity and isotopic composition of benthic foraminifera from
Svalbard in the atlantification of the European Arctic.**

Doctoral dissertation carried out under the supervisor

Prof. Marek Józef Zajczkowski

and co- supervisor

Ph.D. Joanna Pawłowska

in

Institute of Oceanology Polish Academy of Sciences

Sopot, 2021

Serdecznie dziękuję prof. dr. hab. Markowi Zajączkowskiemu za poświęcony mi czas, cierpliwość, cenne wskazówki oraz możliwość przeżycia niesamowitej arktycznej ekspedycji.

Ponadto szczególnie dziękuję dr Joannie Pawłowskiej za nieocenioną pomoc oraz wsparcie udzielane mi od samego początku mojej naukowej przygody w IO PAN.

Dziękuję również za wszystkie wskazówki, udzieloną pomoc oraz wsparcie dr Magdalenie Łączkiej, dr Maciejowi Telesińskiemu, dr Małgorzacie Kucharskiej oraz mgr Natalii Szymańskiej.

Specjalne podziękowania składam również mojej rodzinie za wiarę we mnie i nieustanną motywację.

Niniejsze badania zostały przeprowadzone przy wsparciu finansowym grantu Preludium pt.: Otwornice bentosowe fiordów i otwartego morza Svalbardu, ufundowanego przez Narodowe Centrum Nauki; nr grantu 2016/23/N/ST10/01351, kierownik grantu: Agnieszka Kujawa. Projekt realizowany był w Instytucie Oceanologii Polskiej Akademii Nauk w Sopocie pod opieką prof. Marka Józefa Zajączkowskiego.

Spis treści:

1. Wstęp.....	21
2. Rejon badań.....	26
2.1 Svalbard.....	26
2.2 Isfjorden.....	29
2.3 Wijdefjorden.....	29
2.4 Rijpfjorden.....	30
2.5 Południowo-wschodnie Nordaustlandet (SE Nordaustlandet)	30
2.6 Wschodnia Edgeøya (E Edgeøya)	30
3. Charakterystyka otwornic	34
4. Materiały i metody	43
4.1 Prace terenowe.....	43
4.2 Analiza laboratoryjna i opracowanie wyników	44
Analiza granulometryczna.....	44
Analiza otwornicowa.....	44
Analiza statystyczna.....	47
Analiza izotopów stabilnych.....	47
5. Wyniki	49
5.1 Warunki oceanograficzne.....	49
5.1.1 Isfjorden	49
5.1.2 Wijdefjorden	49
5.1.3 Rijpfjorden	49
5.1.4. Stacja N.....	50
5.1.5 Południowo-wschodnie Nordaustlandet	50
5.1.6 Wschodnia Edgeøya	50
5.2 Skład granulometryczny osadu.....	55
5.2.1 Isfjorden	55

5.2.2 Wijdefjorden.....	55
5.2.3 Rijpfjorden	55
5.2.4 Stacja N	55
5.2.5 Południowo-wschodnie Nordaustlandet	56
5.2.6 Wschodnia Edgeøya	56
5.3 Fauna otwornicowa	59
5.3.1 Liczebność i bioróżnorodność fauny otwornicowej.....	59
5.3.2 Skład gatunkowy fauny otwornicowej.....	63
5.3.3 Analiza izotopów stabilnych	82
6. Dyskusja.....	85
6.1 Warunki oceanograficzne	85
6.2 Analiza otwornicowa.....	88
6.2.1 Zachodni Svalbard	88
6.2.2 Północny Svalbard	96
6.2.3 Wschodni Svalbard	102
7. Podsumowanie.....	111
8. Wnioski.....	116
9. Literatura.....	118

Streszczenie po polsku:

Arktyka jest to obszar na który zmiany klimatu mają większy wpływ niż na jakikolwiek inny rejon (Comiso, 2003). Globalne ocieplenie prowadzi m.in. do recesji lodowców oraz zmniejszania się zasięgu lodu morskiego (Johannessen i in., 2004). Postępowanie tego procesu może doprowadzić do sytuacji, że w okresie letnim Arktyka będzie całkowicie pozbawiona lodu morskiego (Bitz i in., 2006). Rejon Svalbardu jest szczególnie narażony, ponieważ zmniejszanie się objętości oraz zasięgu lodu morskiego w tym obszarze jest związane ze zmiennością cyrkulacji wód w pobliskiej Cieśninie Fram (Saloranta i Haugan, 2001). Cieśnina ta jest zlokalizowana na zachód od Svalbardu i jest głównym miejscem wymiany wód między Oceanem Arktycznym i Atlantyckim (Aagaard i in., 1987; Menze i in., 2019). Ostatnie badania dowiodły, że napływ ciepłych wód atlantyckich (AW) szczególnie przyczynia się do zmniejszania się morskiej pokrywy lodowej, i poprzez ogrzewanie warstwy podlodowej, prowadzi do znacznej utraty jej masy (Ivanov i in., 2016; Polyakov i in., 2017). Wszystko to wskazuje, że atlantyfikacja, czyli intensyfikacja napływu AW do Arktyki, ma istotny wpływ na właściwości i funkcjonowanie ekosystemów (Hop i in., 2019).

Napływ AW reguluje przepływ ciepła do fiordów Svalbardu, warunkując rozmieszczenie powierzchniowych mas wodnych, lodu morskiego oraz zasięg lodowców (Allaart i in., 2020). Warunki hydrograficzne obszaru Svalbardu są kształtowane poprzez mieszanie się AW, wód arktycznych (ArW) oraz wytopiskowych (Cottier i in., 2005). Prąd Zachodniospitsbergeński (ang. *West Spitsbergen Current*; WSC) transportuje AW w kierunku północnym wzdłuż zachodniego szelfu Svalbardu, jednocześnie Prąd Wschodniospitsbergeński (ang. *East Spitsbergen Current*; ESC) niesie zimne i mniej zasolone masy wodne z Morza Barentsa wokół Przylądka Sørkapp i dalej na północ. Wzmocniony napływ AW prowadzony za pośrednictwem WSC prowadzi do zwiększonego przepływu ciepła do fiordów zachodniego Svalbardu (Nilsen i in., 2008). Zwiększony napływ AW w rejonie Morza Barentsa prowadzi do redukcji sezonowego lodu morskiego, jak również ogranicza sływ wieloletniego lodu morskiego z północy. Proces atlantyfikacji przyczynia się również do topnienia lodowców oraz ich wycofywania w głąb lądu na całym obszarze Svalbardu (Holland i in., 2008; Luckman i in., 2015). Przewidywanie skutków zmian związanych z wpływem AW do Arktyki w dużej mierze oparte jest o wiedzę na temat zmian warunków środowiskowych w przeszłości i ich konsekwencji w funkcjonowaniu ekosystemu. Tego typu badania prowadzi się z wykorzystaniem biologicznych wskaźników zachowanych w osadach i deponowanych na dnie zbiorników wodnych.

Najpopularniejszą grupą organizmów wykorzystywaną do odtwarzania paleośrodowisk są otwornice. Skorupki tych organizmów dobrze zachowują się w osadach morskich, umożliwiając wykorzystanie ich jako wskaźnika zmian warunków środowiskowych, takich jak temperatura i zasolenie wód, ale również dostępność tlenu i produktywność (Hald i in., 2001). Rozmieszczenie otwornic bentosowych w fiordach Svalbardu jest uwarunkowane występowaniem gradientów środowiskowych. W sąsiedztwie lodowców warunki hydrograficzne są niestabilne, a zespoły otwornicowe charakteryzują się małą liczebnością i dominacją kilku gatunków oportunistycznych. W zewnętrznych częściach fiordów warunki środowiskowe są bardziej stabilne, przez co występuje tam większe bogactwo i różnorodność tych organizmów, a także wzrost liczby gatunków związanych z AW (Hald i Korsun, 1997; Majewski i Zajązkowski, 2007). Z tego powodu otwornice mogą być potencjalnie wykorzystywane jako wskaźniki atlantyfikacji. Jednak wpływ tego procesu na zbiorowiska otwornic bentosowych do tej pory nie był szczegółowo badany.

Jednym z kluczowych pośrednich źródeł informacji (tzw. *proxy*) wykorzystywanych w badaniach paleoceanograficznych i paleoklimatycznych jest analiza składu izotopowego skorupki otwornic. Pozwala ona na rekonstrukcję objętości lodu, temperatury wód oraz zmian cyrkulacji oceanu (Shackleton i Opdyke, 1973; Zajązkowski i in., 2010a). Stosunek zawartości izotopów stabilnych tlenu ($\delta^{18}\text{O}$) odzwierciedla przede wszystkim skład izotopowy wody morskiej, który jest efektem jej zasolenia i temperatury. Z kolei skład izotopowy węgla ($\delta^{13}\text{C}$) w skorupkach otwornic zależy w dużej mierze od ilości świeżej materii organicznej dostarczonej do dna (Zajązkowski i in., 2010a; 2010b).

Celem niniejszej rozprawy doktorskiej jest zbadanie składu gatunkowego, liczebności i bioróżnorodności oraz składu izotopowego skorupki otwornic bentosowych w rejonie szelfu Svalbardu w warunkach postępującej atlantyfikacji tego obszaru. Dodatkowym celem jest wyznaczenie taksonów otwornic, które mogą być wykorzystywane jako wskaźniki atlantyfikacji.

Do badań wyznaczono 18 stacji pomiarowych w rejonie Svalbardu, różniących się pomiędzy sobą warunkami oceanograficznymi oraz sedymentacyjnymi. Krótkie rdzenie osadów powierzchniowych (10 cm) zostały pobrane w 2016 roku z S/Y Oceania w czasie rejsu AREX 2016. Spośród wyznaczonych do badań stacji pomiarowych 10 znajdowało się w fiordach (Isfjorden, Wijdefjorden i Rijpfjorden), a 8 pozostałych na szelfie w okolicach Nordaustlandet oraz Edgeøya. Takie rozmieszczenie stacji badawczych w rejonie Svalbardu umożliwiło porównanie zbiorowisk otwornic występujących w obszarach o odrębnych warunkach środowiskowych. Ponadto, uzyskane dane będą stanowić ważne odniesienie

w interpretacji danych paleoceanograficznych, szczególnie dla okresów charakteryzujących się zwiększonym napływem AW.

Analiza danych CTD wskazała, że środowisko morskie zachodniego Svalbardu w drugiej połowie lata 2016 znajdowało się pod silnym wpływem AW oraz TAW. Analiza zgrupowań otwornic w fiordach zachodniego Svalbardu (Isfjorden i Wijdefjorden) wykazała dominację gatunków korelowanych z wyższą temperaturą oraz występowaniem AW, co wskazywało na silną atlantyfikację tego rejonu. Wysoka bioróżnorodność otwornic oraz grupa gatunków atlantyckich zdominowana przez wapienny *N. labradorica* oraz aglutynujące *A. glomeratum* i *R. turbinatus* świadczyły o zaawansowanej atlantyfikacji Isfjorden. Natomiast środowisko morskie Wijdefjorden znajdowało się pod wyraźnym wpływem warunków lokalnych tj. dopływu wód roztopowych z lodowców w głębi fiordu i wpływu paku lodowego z Oceanu Arktycznego. Jednak wysoka liczebność otwornic oraz gatunki atlantyckie w Wijdefjorden również świadczyły o jego atlantyfikacji. Poza atlantyckim gatunkiem *N. labradorica* w fiordzie tym dominował również gatunek *B. frigida* wiązany nie tylko z wpływem AW ale również z sezonowym występowaniem lodu morskiego. W obu fiordach $\delta^{18}\text{O}$ osiągał wysokie wartości, typowe dla środowisk zdominowanych przez AW. Wyższe wartości stosunku stabilnych izotopów tlenu ($\delta^{18}\text{O}$) w skorupkach otwornic były obserwowane w Isfjorden niż Wijdefjorden, co potwierdza silniejszy wpływ AW w Isfjorden. Z kolei niższe wartości $\delta^{13}\text{C}$ w fiordach zachodniego Svalbardu świadczyły o intensywnej produkcji pierwotnej i eksporcie świeżej materii organicznej do dna w czasie wiosennej kalcyfikacji skorupki otwornic.

Wyniki analiz z rejonu północnego Svalbardu (Rijpfjorden oraz stacja N) wykazały, że pod koniec lata 2016 znajdował się on głównie pod wpływem TAW. Na obu stacjach warunki oceanograficzne były kształtowane przez AW oraz zimne wody z Oceanu Arktycznego niosące pak lodowy. W Rijpfjorden zanotowano również WCW, której obecność była efektem corocznego napływu wieloletniego lodu morskiego z północy do wnętrza fiordu. Postępująca atlantyfikacja Rijpfjorden znajdowała potwierdzenie w wynikach analiz otwornicowych, tj. wysokiej bioróżnorodności oraz przewadze gatunków aglutynujących. Istotny wpływ AW na środowisko Rijpfjorden potwierdzony został również przez obecność gatunku *M. affinis*, który pierwszy raz został odnotowany na północy Svalbardu. Również atlantycki gatunek *B. frigida* wskazał nie tylko na wpływ AW w Rijpfjorden ale również na formowanie się lodu morskiego w okresie zimowym. Bioróżnorodność otwornic na stacji N była niższa, głównie przez wpływ zimnych wód z Oceanu Arktycznego oraz obecność wieloletniego lodu morskiego - czynników ograniczających wpływ AW. Wszystkie stacje

północnego Svalbardu były zdominowane przez atlantycki gatunek *A. glomeratum* wraz z gatunkiem *T. nana* wiązanych z zimnymi wodami i lodem morskim. Ponadto, grupa gatunków atlantyckich osiągała podobną liczebność jak grupa arktyczna na wszystkich stacjach północnego Svalbardu, co wskazywało, że rejon ten znajduje się w stanie przejściowym z arktycznego do atlantyckiego, które potwierdziły mieszający się wpływ AW oraz Oceanu Arktycznego w tym rejonie. Również wysokie wartości $\delta^{18}\text{O}$ w skorupkach otwornic z północnego Svalbardu wskazywały na jego postępującą atlantyfikację.

Pomiary CTD wykazały, że środowisko morskie wschodniego Svalbardu (rejon Nordaustlandet oraz Edgeøya) znajdowało się pod słabszym wpływem AW oraz TAW w porównaniu do obszaru zachodniego oraz północnego. Stacje badawcze zlokalizowane zarówno w rejonie Nordaustlandet, jak i Edgeøya, charakteryzowały się bliskością lodowców uchodzących do otwartego morza, jednak lodowce te różnią się stopniem recesji. Warunki w obrębie Nordaustlandet szczególnie latem kształtowane były głównie przez zimne wody roztopowe i stosunkowo niewielką ilość zawiesiny. Dlatego bezpośrednio przed czołem lodowca nie obserwowano wpływu AW oraz TAW. Bioróżnorodność otwornic była dość niska u wybrzeży Nordaustlandet, ale wzrastała wraz z odległością od czoła lodowca, co razem z wysoką liczebnością otwornic wskazywały na wpływ AW w rejonie Nordaustlandet. Z kolei środowisko morskie rejonu Edgeøya były kształtowane przez warunki lokalne wynikające z obecności lodowca, który znajduje się w fazie stagnacji. Subglacialne wypływy przy dnie w porze letniej dostarczały duże ilości wód roztopowych bogatych w zawiesinę powodując silne zaburzenia środowiskowe w strefie naddennej. Czynniki te sprawiły, że warunki środowiskowe w obrębie Edgeøya są bardzo zmienne i niestabilne, co było przyczyną niskiej bioróżnorodności oraz liczebności otwornic w tym rejonie.

Cały obszar wschodniego Svalbardu odznaczał się dominacją gatunków oportunistycznych *C. reniforme* oraz *E. clavatum*, które świadczyły o zmiennym i silnie zaburzonym środowisku. Środowisko w rejonie Nordaustlandet oraz Edgeøya było kształtowane przez mieszające się wody w strefie frontalnej, co prowadziło do szybkich zmian w zbiorowiskach otwornic. W obszarze Nordaustlandet dominował również gatunek *B. frigida*, który wskazuje na wpływ AW oraz TAW, ale także na obecność wieloletniego lodu morskiego docierającego w rejon Nordaustlandet wraz z wodą z Oceanu Arktycznego. Pomimo dominacji kilku arktycznych gatunków w rejonie Edgeøya, obecność gatunków atlantyckich: *N. labradorica*, *A. glomeratum* i *R. turbinatus* sugerowała pojawianie się krótkookresowych, ale intensywnych napływów AW. Kompozycja izotopowa skorupki otwornic pochodzących ze wschodniego Svalbardu była bardzo zmienna, co również

sugerowało, że cały ten obszar charakteryzował się bardzo zmiennymi warunkami środowiskowymi ze względu na mieszanie się różnych mas wodnych oraz tworzenie się wód lokalnych.

Wyniki niniejszej pracy potwierdzają, że atlantyfikacja rejonu Svalbardu postępuje od strony zachodniej w kierunku północnym i dalej na wschód archipelagu. Fiordy zachodniego Svalbardu są silnie zatlantyfikowane, na stacjach północnego Svalbardu AW ulega silnej transformacji w kontakcie z lodem morskim i ArW. Natomiast rejon wschodni archipelagu znajduje się dopiero w fazie inicjalnej atlantyfikacji przy bardzo silnym udziale LW oraz wód Morza Barentsa. Proces atlantyfikacji znalazł odzwierciedlenie w zmianach liczebności, bioróżnorodności oraz składu izotopowego skorupki otwornic, co wskazuje, że organizmy te mogą być wykorzystywane jako wskaźnik atlantyfikacji. Uzyskane dane mogą stanowić ważne odniesienie w badaniach paleoceanograficznych, zwłaszcza tych dotyczących wpływu AW na ekosystemy arktyczne.

Summary in english:

The Arctic is generally recognized as an area where climate changes have a disproportionately high impact than in the other regions (Comiso, 2003). Global warming is leading to recession of glaciers and diminishing of sea ice (Johannessen et al., 2004). If the warming will proceed, we can expect that in the near future the Arctic will be completely free of sea ice during summer (Bitz et al., 2006). The Svalbard region is particularly impacted because the decrease in the volume and extent of sea ice in this area is related to the variability of water circulation in the nearby Fram Strait (Saloranta and Haugan, 2001). The Fram Strait is the main gateway for ocean and atmospheric heat exchange between the Arctic and Atlantic Oceans (Aagaard et al., 1987; Menze et al., 2019). Recent studies have shown that the influx of warm Atlantic waters (AW) significantly contributes to the loss of sea ice and leads to a significant loss of mass by heating the sub-ice layer (Ivanov et al., 2016; Polyakov et al., 2017). Therefore, the increasing inflow of AW to the Arctic, the so-called “atlantification”, has a significant impact on the functioning of marine ecosystems (Hop et al., 2019).

The hydrographic conditions of the Svalbard area are shaped by the mixing of AW, Arctic (ArW) and melt waters (Cottier et al., 2005). The influx of AW regulates the heat flow to the Svalbard fjords, determining the distribution of surface water masses, sea ice coverage and the range of glaciers (Allaart et al., 2020). The majority of AW is transported northwards by the West Spitsbergen Current (WSC) along the western shelf of Svalbard, while the East Spitsbergen Current (ESC) carries cold and less saline ArW from the Barents Sea around Cape Sørkapp and further north. The increased influx of AW transported by the WSC leads to increased heat flow into the fjords on the west Svalbard coastline (Nilsen et al., 2008). Also, the increased AW inflow in this area leads to the reduction of winter sea ice in the Barents Sea and north of Svalbard and to the reduction of the inflow of pack ice from the north. The atlantification process results also in the enhanced glaciers retreat in the Svalbard region (Holland et al., 2008; Luckman et al., 2015). However, to assess the impact of atlantification on the Arctic ecosystems, it is crucial to track the changes of AW inflow in the past. The reconstruction of past environmental conditions is based mainly on biological indicators deposited in sediments.

Foraminifera are one of the groups of organisms which are commonly used to reconstruct past marine environments. This is possible mainly due to the excellent preservation of their tests in marine sediments, enabling the use of foraminifera as a proxy for environmental conditions such as e.g., water temperature, salinity, and productivity (Hald et

al., 2001). The distribution patterns of benthic foraminifera in Svalbard fjords are associated with the occurrence of the environmental gradients. In the vicinity of glacier's, environmental conditions are unstable and foraminiferal assemblages are characterized by a low abundance and a strong dominance of a few opportunistic species. In the outer zones of the fjords, environmental conditions are more stable and thus, there is a greater abundance and diversity of foraminifera as well as a higher number of species associated with the AW (Hald and Korsun, 1997; Majewski and Zajączkowski, 2007). Therefore, foraminifera can potentially be used as indicators of atlantification. However, the impact of atlantification on foraminifera assemblages has not been studied in detail.

Apart from foraminiferal abundance and diversity, the isotopic composition of foraminiferal tests provides valuable information in paleoceanographic and paleoclimatic studies. This analysis allows for a reconstruction of e.g., ice volume, water temperature and changes in ocean circulation (Shackleton and Opdyke, 1973; Zajączkowski et al., 2010a). The stable oxygen isotopes ratio ($\delta^{18}\text{O}$) mainly reflects the isotopic composition of seawater, which is results from water's salinity and temperature. The ratio of carbon isotopes ($\delta^{13}\text{C}$) in the foraminifera tests depends on the amount of fresh organic matter delivered to the bottom (Zajączkowski et al., 2010a; 2010b).

The aim of this doctoral dissertation is to investigate the species composition, abundance, biodiversity, and isotopic composition of the benthic foraminifera tests in the Svalbard shelf area, in the conditions of progressive atlantification of this area. An additional goal is to identify foraminifera taxa that may be used as potential indicators of atlantification.

Eighteen sampling stations, with different hydrographic and sedimentary conditions, were chosen for the study. Sampling stations were located in the Svalbard region: ten of them were located in the fjords (Isfjorden, Wijdefjorden and Rijpfjorden) and eight were located close to the fronts of tidewater galciers in the region of Edgeøya and Nordaustlandet. At each station, short sediment cores (10 cm) have been collected during the AREX 2016 cruise with R/V *Oceania*. Such sampling strategy allowed to correlate different environmental conditions with foraminiferal abundance and distribution. Moreover, the obtained data will constitute an important reference for the interpretation of paleoceanographic data, especially for periods characterized by increased influx of AW.

The CTD data indicated that the marine environment of western Svalbard in the summer 2016 was strongly influenced by AW and TAW. The analysis of foraminifera communities in the western Svalbard fjords (Isfjorden and Wijdefjorden) showed that species composition was driven mainly by higher sea surface temperature and the presence of AW,

which indicated a strong atlantification of this region. The advanced atlantification of Isfjorden was reflected in high biodiversity of foraminifera and the dominance of atlantic species group, mainly calcareous *N. labradorica* and agglutinated *A. glomeratum* and *R. turbinatus*. On the other hand, the marine environment in Wijdefjorden was influenced also by local conditions, i.e. the inflow of meltwater from glaciers and the proximity of an ice pack from the Arctic Ocean. However, the high abundance of foraminifera as well as the presence of atlantic species in Wijdefjorden also revealed its atlantification. Apart from the atlantic species *N. labradorica*, the foraminiferal community was also dominated by *B. frigida*. This species is associated with the influence of AW, but also with the occurrence of seasonal sea ice. In both fjords $\delta^{18}\text{O}$ reached high values, typical for AW-dominated environments. The values of the ratio of stable oxygen isotopes ($\delta^{18}\text{O}$) in foraminifera tests were observed to be higher in Isfjorden than in Wijdefjorden, which confirms the stronger influence of AW in Isfjorden. On the other hand, lower $\delta^{13}\text{C}$ values in the fjords of western Svalbard proved an enhanced primary productivity and export of fresh organic matter to the bottom during the period of spring calcification of foraminifera tests.

During the summer 2016, the northern Svalbard (Rijpfjorden and station N) was under the influence of TAW and cold waters from the Arctic Ocean carrying ice pack. In Rijpfjorden, WCW has also been recorded. The presence of WCW was a result of the annual influx of perennial sea ice. The progressive atlantification of Rijpfjorden was reflected by the high foraminiferal biodiversity and the prevalence of agglutinating species. The significant environmental impact of AW on Rijpfjorden was also confirmed by the presence of *M. affinis*, which was recorded in the northern Svalbard for the first time. Also, the atlantic species *B. frigida* indicated both the influence of AW in Rijpfjorden and the formation of sea ice in winter. Foraminiferal biodiversity at the station N was lower due to the influence of cold waters from the Arctic Ocean as well as by the presence of perennial sea ice. All stations in the northern Svalbard were dominated by the atlantic species *A. glomeratum* along with the species *T. nana*, which is associated with the presence of cold waters and sea ice. Also, the fact that the atlantic species group reached a similar abundance to the arctic group in the northern Svalbard indicated that the region was in the transition from Arctic to Atlantic state. Relatively high values of $\delta^{18}\text{O}$ in foraminiferal tests also indicated the progressive atlantification of the northern Svalbard.

The marine environment of the eastern Svalbard (region of Nordaustlandet and Edgeøya) was less influenced by AW and TAW compared to the western and northern areas. Both Nordaustlandet and Edgeøya regions were open marine settings in front of large

tidewater glaciers. Oceanographic conditions within the Nordaustlandet area, were mainly influenced by cold meltwater and a relatively small amount of suspended solids. Therefore, no influence of AW and TAW was observed in the vicinity of the glacier front. However, water masses of Atlantic origin were present in the glacier-distant stations. The biodiversity of foraminifera increased with distance from the glacier front. Together with the high abundance of foraminifera it indicated an impact of AW in the Nordaustlandet area. On the other hand, the marine environment of the Edgeøya region was shaped by the presence of a stagnant glacier. Near-bottom subglacial outflows provide large amounts of turbid meltwater, causing severe environmental disturbances. Therefore, the influence of AW and TAW in this area was not observed. The environmental conditions near Edgeøya were very variable and unstable, which resulted in low biodiversity and abundance of foraminifera.

The entire area of eastern Svalbard was characterized by the dominance of opportunistic species *C. reniforme* and *E. clavatum*, which are characteristic for highly disturbed environment near the glaciers. Environment of Nordaustlandet and Edgeøya was shaped by the mixing of water in the frontal zone, which leads to rapid changes in the benthic foraminifera assemblages. Near the Nordaustlandet area, the species *B. frigida* was one of the dominants, which indicates the influence of AW and TAW, but also the presence of sea ice, most likely transported to the Nordaustlandet area from the Arctic Ocean. Despite the absence of AW in the Edgeøya area during the summer 2016, the presence of the atlantic species *N. labradorica*, *A. glomeratum* and *R. turbinatus* suggested occurrence of a short-term of the AW. Isotopic composition of eastern Svalbard foraminifera tests also suggested that the entire area was characterized by very variable environmental conditions due to the mixing of different water masses and the formation of local waters.

The results of this study confirm that the atlantification of the Svalbard region proceeds from the west to the north and further to the east coast of the archipelago. The fjords of western Svalbard are in the advanced stage of atlantification. In the northern Svalbard, AW undergoes a strong transformation in contact with sea ice and the ArW. The eastern region of the archipelago is in the initial stage of atlantification with a very strong influence of locally formed waters and waters of the Barents Sea. The atlantification process was reflected in changes in the abundance, biodiversity and isotopic composition of foraminifera tests, indicating that these organisms can be used as an indicator of atlantification. The obtained data can be an important reference in paleoceanographic studies, especially those focusing on the impact of AW on Arctic ecosystems.

1. Wstęp

Arktyka z uwagi na czułość kriosfery uznawana jest za obszar, gdzie zmiany klimatu mają nieproporcjonalnie duży wpływ na środowisko (Comiso, 2003). Recesja lodowców oraz zmniejszanie się zasięgu lodu morskiego w Arktyce są najwidoczniejszymi i jednocześnie najważniejszymi oznakami postępującego globalnego ocieplenia (Johannessen i in., 2004). Jeśli ten proces będzie postępował, można się spodziewać, że w najbliższej przyszłości Arktyka będzie całkowicie wolna od lodu morskiego w okresie letnim (Bitz i in., 2006). W odpowiedzi na współczesne ocieplenie klimatu lodowce Svalbardu cofały się średnio o 0,5 km rocznie (Lefauconnier i in., 1994), a ich miąższość zmniejszyła się o około 1,3 m w ciągu ostatnich 30 lat (Gulliksen i Svensen, 2004). Zmniejszanie się objętości i zasięgu lodu morskiego w rejonie Svalbardu jest możliwe głównie przez zmienność cyrkulacji wód w Cieśninie Fram (Saloranta i Haugan, 2001). Cieśnina ta położona na zachód od Svalbardu, jest główną bramą dla wymiany ciepła oceanicznego i atmosferycznego między Oceanem Arktycznym i Atlantyckim (Aagaard i in., 1987; Jakobsson i in., 2007; Crews i in., 2018; Renner i in., 2018; Menze i in., 2019). Cieśnina Fram nie tylko pozwala na adwekcję ciepła do wysokich północnych szerokości geograficznych, ale również na eksport lodu morskiego z Arktyki w kierunku niższych szerokości geograficznych. Większość arktycznego lodu morskiego (~ 90%; Rudels, 2009) i około 50% słodkiej wody (Serreze i in., 2006) jest eksportowana przez Cieśninę Fram. Z kolei Spielhagen i in. (2011) stwierdzili, że najsilniejszy napływ wód atlantyckich (AW) do Oceanu Arktycznego miał miejsce w ciągu ostatnich 30 lat. Ostatnie obserwacje wykazały, że ciepłe wody oceaniczne w coraz większym stopniu przyczyniają się do utraty lodu morskiego, ponieważ AW coraz łatwiej dociera do warstwy podlodowej, ogrzewając ją od spodu i prowadząc do utraty jej masy (Ivanov i in., 2016; Bartels i in., 2017; Polyakov i in., 2017). Zjawisko to, zwane atlantyfikacją ma zasadniczy wpływ na właściwości i funkcjonowanie ekosystemów arktycznych (Carmack i Wassmann, 2006; Polyakov i in., 2017; Szymańska i in., 2017; Hop i in., 2019).

W skali Archipelagu Svalbard intruzja AW jest odpowiedzialna za zwiększony przepływ ciepła do systemów fiordów, gdzie wpływa na rozmieszczenie powierzchniowych mas wodnych, lodu morskiego i na zasięg lodowców (Nilsen i in., 2008; Allaart i in., 2020). Warunki hydrograficzne w rejonie Svalbardu zostały w ostatnich latach opisane przez wielu autorów, których badania wskazują na postępujące zmiany hydrograficzne, w tym obszarze (Svendsen i in. 2002; Cottier i in. 2005, 2007; Hop i in. 2006; Walczowski i Piechura, 2011; Walczowski i in., 2012; Dalpadado i in., 2016). Środowisko morskie w rejonie Svalbardu jest

kształtowane głównie przez mieszające się AW, wody arktyczne (ArW) i wody wytopiskowe z lodowców (Svendsen i in., 2002; Cottier i in., 2005; Nilsen i in., 2008). Prąd Zachodniospitsbergeński (ang. *West Spitsbergen Current*; WSC) transportuje AW na północ wzdłuż zachodniej krawędzi szelfu Svalbardu, podczas gdy Prąd Wschodniospitsbergeński (ang. *East Spitsbergen Current*; ESC) niesie zimne i mniej zasolone masy wodne z Morza Barentsa wokół Przylądka Sørkapp i dalej na północ wzdłuż zachodniego szelfu Svalbardu. Intruzja AW za pośrednictwem WSC jest odpowiedzialna za zwiększony przepływ ciepła do systemów fiordów zachodniego Svalbardu (Nilsen i in., 2008; Allaart i in., 2020). Ze względu na cyrkulację WSC wzdłuż jego zachodniego wybrzeża, Svalbard podlega wpływowi wód cieplejszych niż jakiegokolwiek inne miejsce w Arktyce, co zapewnia temu obszarowi stosunkowo łagodny klimat (Hop i in., 2019). Rozprzestrzenianie się AW zwiększa tempo topnienia lodowców prowadząc do ich wycofywania się w głąb lądu (Holland i in., 2008; Straneo i in., 2010; Jackson i in., 2014; Luckman i in., 2015). Ponadto dynamiczna wymiana mas wodnych w obrębie Svalbardu powoduje, że w cyklu rocznym wody na szelfie i w przyległych fiordach przechodzą od zimowej dominacji zimnej i mniej zasolonej ArW do stanu letniej dominacji ciepłej i zasolonej AW (Saloranta i Svendsen, 2001; Svendsen i in., 2002; Cottier i in., 2005; Nilsen i in., 2008; Nilsen i in., 2016).

Fiordy stanowią wyjątkową strefę przejściową między lądem a otwartym morzem, dlatego dostarczają cennych informacji na temat zarówno zmian klimatycznych, jak i oceanicznych (Syvitski i Shaw, 1995; Cottier i in., 2005). Fiordy Svalbardu są szczególnie narażone na skutki zmian klimatycznych (Schiermeier, 2007; Bałazy i Kukliński, 2018). Do niedawna fiordy Svalbardu zaliczano do typu subpolarnego, czyli zamarzających w okresie zimowym (Syvitski i in., 1987). Jednak od 2005 roku przechodzą intensywny proces atlantyfikacji i praktycznie nie zamarzają (Zajączkowski i in., 2010b). Główną przyczyną tych zmian jest rosnąca ilość AW niesionej przez WSC, która zwiększa zawartość ciepła w oceanie (Walczowski i in., 2012; Muilwijk i in., 2018). Szelf kontynentalny, przylegający do zachodniego wybrzeża Svalbardu, jest przecinany przez koryta (rynny) na głębokości 200-400 m prowadzące dalej do fiordów. Główny przepływ WSC prowadzony jest na głębokości około 500 m, stąd rozprzestrzenianie AW w kierunku fiordów Svalbardu jest zależne od częstotliwości sztormów zimowych (Nilsen i in., 2016; Promińska i in., 2018; Graham i in., 2019). Według Nilsena i in. (2008) krytycznym parametrem kontrolującym wymianę fiord-szelf jest różnica gęstości między masami wody we fiordzie i na szelfie. Lokalna produkcja lodu w okresie zimowym i tworzenie się wód wzbogaconych solanką determinuje gęstość lokalnych mas wodnych, co jest kluczowym czynnikiem umożliwiającym AW wnikanie do

fiordów wiosną i latem. Kolejnym czynnikiem decydującym o zmianach ekosystemów fiordowych jest cofanie się czoł lodowców i odsłanianie nowych zatok przylodowcowych (Błaszczuk i in., 2013). W wyniku topnienia arktycznych lodowców wzrasta dostawa wód wytopiskowych do fiordów, powodując napływ dużych ilości materiału teryogenicznego i zwiększanie tempa akumulacji osadów (Zajączkowski i in., 2004). Wzrost koncentracji zawiesiny redukuje grubość warstwy eufotycznej i tym samym, ogranicza produkcję pierwotną. W konsekwencji ilość materii organicznej w osadach wewnętrznych części fiordów jest niższa niż w ich centralnych oraz zewnętrznych częściach (Włodarska-Kowalczyk i in., 2013). Procesy te decydują o liczebności i rozmieszczeniu fauny bentosowej w fiordach (Włodarska-Kowalczyk i in., 2007).

W przeciwieństwie do dobrze poznanego środowiska hydrograficznego fiordów, szczególnie zachodniego Spitsbergenu, warunki oceanograficzne, w tym proces sedymentacji materiału osadowego, przed czołami lodowców sięgających otwartego morza we wschodniej części Svalbardu jest słabo poznany. Dowdeswell i in. (2015) odnotowali w okolicy lodowca Austfonna (Nordaustlandet) liczne wypływy wód wytopiskowych (ponad 40), które mają swoje ujścia w klifie lodowcowym o długości ponad 200 km. Z kolei środowisko morskie w rejonie stagnującego lodowca Edgeøytjøkulen (Edgeøya), jest kształtowane głównie przez subglacjalne wypływy przy dnie, które w porze letniej dostarczają duże ilości wód roztopowych bogatych w zawiesinę, powodując silne zaburzenia środowiskowe w strefie naddennej (Dowdeswell i Bamber, 1995). Ponadto przed czołami lodowców uchodzących do otwartego morza nie zawsze występuje typowe dla fiordów przejście pomiędzy strefą proksymalną a dystalną z charakterystyczną zmianą kompozycji granulometrycznej oraz typu osadów (Kjaer i in., 2004). Czynniki te sprawiają, że warunki środowiskowe w obrębie lodowców Austfonna oraz Edgeøytjøkulen są bardzo zmienne i niestabilne, szczególnie bezpośrednio przed ich czołami. Oprócz warunków lokalnych środowisko morskie wschodniego Svalbardu jest warunkowane przede wszystkim wpływem zimnych i często pokrytych lodem wód z Morza Barentsa (Hansen i Knudsen, 1995). Jednak obecnie nawet w tym obszarze obserwuje się wyraźne zmniejszanie zasięgu lodu morskiego. Graham i in. (2019) przeprowadzili obserwacje w obszarze Morza Barentsa i stwierdzili, że nastąpiło zmniejszenie zasięgu lodu morskiego o 47% w porównaniu z zapisem satelitarnym sprzed lat. Zachodnie Morze Barentsa charakteryzuje się ponadto różnymi masami wód powierzchniowych, takimi jak wody polarne, AW i ArW. Sugeruje się, że głównym czynnikiem powodującym ostatnio obserwowane zmniejszenie zasięgu lodu morskiego jest zwiększona adwekcja AW do Arktyki (Kinnard i in., 2011; Barben i in., 2013). Interakcja

między lodem morskim a AW ma również wpływ na regulację zasolenia (Rudels i in., 1996; Dieckmann i Hellmer, 2010). W związku z tym Morze Barentsa, jest kluczowym obszarem badań, ponieważ stanowi ważną, boczną bramę dla dopływu AW do Oceanu Arktycznego (Broecker, 1991). Redukcja zimowego lodu morskiego na Morzu Barentsa i na północ od Svalbardu zbiega się ze zwiększonym przepływem AW w tym rejonie, tym samym ograniczając spływ wieloletniego lodu z północy do rejonu wschodniego Svalbardu. Wskazuje to, że proces atlantyfikacji jest prawdopodobnie kluczowym mechanizmem utraty lodu morskiego również w rejonie wschodniego Svalbardu (Polyakov i in., 2017).

Otwornice (Foraminifera) jest to jedna z grup organizmów wykorzystywanych do odtwarzania paleośrodowisk. Jest to możliwe głównie dzięki dobremu zachowywaniu się ich skorupki w osadach morskich, co umożliwia wykorzystanie otwornic jako wskaźnika zmian warunków środowiskowych, np. temperatury oraz zasolenia wód, dostępności tlenu i produktywności (Hald i in., 2001; Ślubowska i in., 2005). Rozmieszczenie otwornic bentosowych w fiordach Svalbardu jest uwarunkowane występowaniem gradientów środowiskowych. W sąsiedztwie lodowców warunki środowiskowe są niestabilne, a zespoły otwornicowe charakteryzują się małą liczebnością i dominacją kilku gatunków oportunistycznych. W zewnętrznych częściach fiordów warunki środowiskowe są bardziej stabilne, przez co występuje tam większe bogactwo i różnorodność tych organizmów, a także wzrost liczby gatunków związanych z AW (Hald i Korsun, 1997; Majewski i Zajączkowski, 2007; Zajączkowski i Włodarska-Kowalczyk, 2007; Włodarska-Kowalczyk i in., 2013), dlatego mogą być potencjalnie wykorzystywane jako wskaźniki atlantyfikacji. Ostatnie badania dowiodły, że wiele różnych organizmów może dostarczać informacji o atlantyfikacji. Vihtakari i in. (2018) na podstawie badań zawartości żołądków ptaków morskich stwierdzili, że skład ich diety odzwierciedla zmiany zachodzące w ekosystemach morskich, m.in. intensyfikację napływu AW. Ponadto Weydmann-Zwolicka i in. (2021) w swoich badaniach sugerowali, że niektóre gatunki zooplanktonu mogą być wskaźnikiem atlantyfikacji. Jednak wpływ tego procesu na zbiorowiska otwornic bentosowych do tej pory nie był badany. Ponieważ temperatura wody przydennej jest jednym z najważniejszych czynników abiotycznych kontrolujących rozmieszczenie otwornic (Murray i Alve, 2016), ważne jest poznanie, jak będą się zmieniać zespoły otwornicowe w procesie zachodzących zmian oceanograficznych/klimatycznych.

Skład izotopowy skorupki otwornic bentosowych jest szeroko wykorzystywany w badaniach paleoceanograficznych i paleoklimatycznych do rekonstrukcji globalnej objętości lodu, temperatury wód oraz zmian w cyrkulacji oceanu (Shackleton i Opdyke, 1973;

Shackleton i in., 1983; Keigwin i in., 1994; Ślubowska-Woldengen i in., 2007; Rasmussen i Thomsen, 2009; Zajączkowski i in., 2010a). Woda roztopowa w zlodowaconych fiordach nie oddziałuje bezpośrednio na bentosową faunę otwornicową ze względu na natychmiastowe wypieranie jej do powierzchni, jednak zimą sygnał izotopowy powierzchniowej wody roztopowej dochodzi do warstwy przydennej na skutek mieszana się kolumny wody przez proces konwekcji i usuwanie solanki podczas formowania lodu morskiego (Svendsen i in., 2002; Zajączkowski i in., 2010a). Ponadto zmiany pokrywy lodu morskiego i mętności wód powierzchniowych wpływają na produkcję pierwotną poprzez kontrolę miąższości strefy eufotycznej (Zajączkowski i in., 2010b). Procesy te można rejestrować poprzez badania składu izotopowego skorupki otwornic. Stosunek zawartości izotopów stabilnych tlenu ($\delta^{18}\text{O}$) odzwierciedla głównie skład izotopowy wody morskiej, efekt zasolenia i temperatury. Z kolei skład izotopowy węgla ($\delta^{13}\text{C}$) w skorupkach otwornic w dużym stopniu zależy od ilości świeżej materii organicznej wyeksportowanej do dna (Zajączkowski i in., 2010a; 2010b). Jednak pomiary przeprowadzone na różnych gatunkach otwornic ujawniły, że skład izotopowy tlenu i węgla wbudowywanego w skorupki otwornic wykazuje odchylenia od składu izotopowego węglanu wapnia wytrącanego z wód dennych w których żyją (Rohling i Cooke, 1999). Odchylenia te przypisuje się tak zwanym preferencjom życiowym otwornic (ang. *vital effect*), które należy wziąć pod uwagę w badaniach środowiskowych i są one szeroko opisywane w literaturze dla poszczególnych gatunków (Grossman, 1987; Ivanova i in., 2008; Zajączkowski i in., 2010a).

Głównym celem niniejszej rozprawy doktorskiej jest zbadanie składu gatunkowego, liczebności i bioróżnorodności oraz składu izotopowego skorupki otwornic bentosowych w rejonie szelfu Svalbardu w warunkach postępującej atlantyfikacji tego obszaru. Dodatkowym celem jest wyznaczenie taksonów otwornic, które mogą być wykorzystywane jako wskaźniki atlantyfikacji.

Badania zostały przeprowadzone w fiordach oraz przed czołami dużych lodowców uchodzących do otwartego morza w rejonie Svalbardu. Istotą badań jest poznanie składu gatunkowego, rozmieszczenia, bioróżnorodności i kompozycji izotopowej ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$) skorupki współczesnych otwornic żyjących w powierzchniowych osadach fiordów Svalbardu: Isfjorden, Wijdefjorden, Rijpfjorden oraz w osadach na przedpolu Edgeøysjøkulen oraz Austfonna. Uzyskane dane pozwolą na dokładne opisanie przestrzennej zmienności fauny otwornicowej w rejonie Svalbardu w warunkach ocieplenia klimatu, ale również będą stanowić ważne odniesienie w interpretacji danych paleoceanograficznych, szczególnie dla okresów charakteryzujących się zwiększonym napływem wód atlantyckich.

2. Rejon badań

2.1 Svalbard

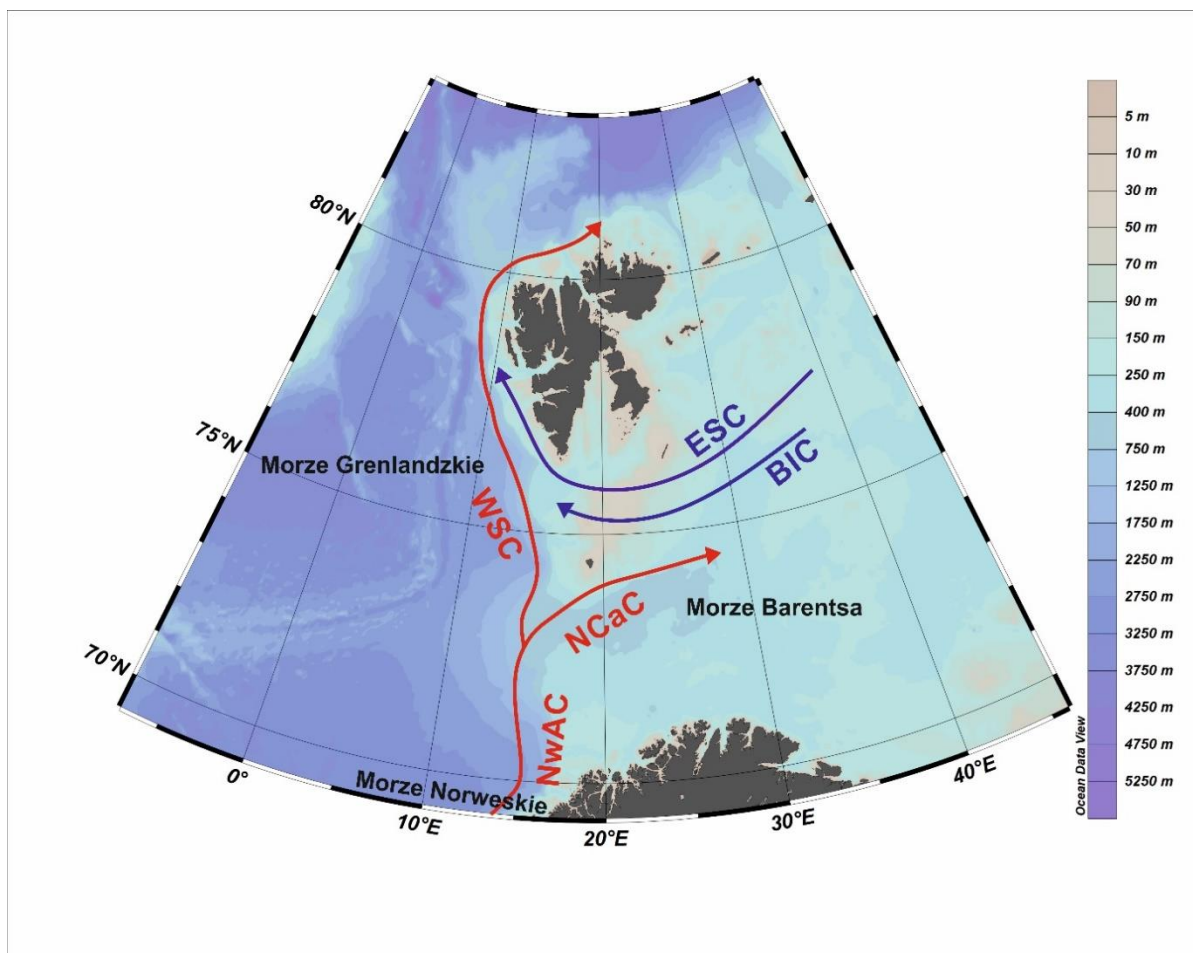
Archipelag Svalbard (Ryc. 2.1) leży na Oceanie Arktycznym między 74° i 81° szerokości geograficznej północnej oraz 10° i 35° długości geograficznej wschodniej (Szczuciński i in., 2009; Dalpadado i in., 2016). Złożony jest z kilkudziesięciu wysp o całkowitej powierzchni ok. 62 000 km². Największe z nich to: Spitsbergen, Nordaustlandet, Edgeøya i Barentsøya (Szczuciński i in., 2009). Archipelag otoczony jest od wschodu wodami Morza Barentsa, od północy okołobiegunowym basenem arktycznym oraz od zachodu Morzem Grenlandzkim (Siwecki i Swerpel, 1979). Krajobraz Svalbardu jest kształtowany przede wszystkim przez lodowce, które stanowią ponad 60% jego powierzchni. Pozostały obszar archipelagu stanowią góry i niziny, przy czym zaledwie 10% powierzchni jest pokryta roślinnością (Gulliksen i Svensen, 2004).



Ryc. 2.1. Archipelag Svalbard (źródło:

https://www.cestynasever.cz/spicberky/images/spitsbergen_map.jpg z dnia 07.09.2020).

Warunki oceanograficzne w rejonie Svalbardu są determinowane głównie przez wpływ ciepłych i słonych AW oraz zimnych ArW, a także wód mieszanych, które utworzyły się lokalnie (Ślubowska-Woldengen i in., 2008; Dalpadado i in., 2016; Hop i in., 2019). AW jest transportowana na północ przez Norweski Prąd Atlantycki (ang. *Norwegian Atlantic Current*; NwAC), który jest uważany za główne źródło ciepłej i słonej wody w Arktyce (Aagaard i Greisman, 1975), następnie rozgałęzia się na Morzu Barentsa do WSC oraz Prądu Przyładka Północnego (ang. *North Cape Current*; NCaC; Loeng, 1991; Blindheim i Østerhus, 2005; Pawłowska i in., 2020). AW wraz z ArW jest transportowana do Morza Barentsa przez WSC oraz Prąd Wyspy Niedźwiedziej (ang. *Bear Island Current*; BIC; Hopkins, 1991; Pawłowska i in., 2020). WSC transportuje AW na północ, wzdłuż zachodniego wybrzeża Spitsbergenu (Ślubowska-Woldengen i in., 2008; Dalpadado i in., 2016; Hop i in., 2019). Wschodnia część archipelagu znajduje się pod wpływem zimnego ESC, który transportuje ArW z Oceanu Arktycznego i Morza Barentsa (Saloranta i Svendsen, 2001; Dalpadado i in., 2016; Hop i in., 2019; Pawłowska i in., 2020; Ryc. 2.2). AW jest definiowana jako wody o temperaturze $\geq 3^{\circ}\text{C}$ oraz zasoleniu > 34.65 , natomiast zimna ArW ma temperaturę od -1.5 do 1.0°C oraz zasolenie od 34.3 do 34.8 (Manley, 1995; Cottier i in., 2005). W rejonach przybrzeżnych powstają wody transformowane, których temperatura i zasolenie zależą od tempa mieszania wyżej wymienionych mas wodnych oraz od warunków lokalnych. Skogseth i in. (2005) wymienili sześć lokalnych mas wód: wody roztopowe (ang. *meltwater*; MW), wody frontu polarnego (ang. *polar front water*; PW), wody wschodniego Spitsbergenu (ang. *East Spitsbergen Water*; ESW), wody z szelfu wzbogaconego solanką (ang. *brine-enriched shelf water*; BSW), wody powierzchniowe Storfjorden (ang. *Storfjorden surface water*; SSW) i zmodyfikowaną wodę atlantycką (ang. *modified Atlantic Water*; MAW). BSW powstaje w wyniku uwolnienia dużych ilości solanki i intensywnego tworzenia się lodu morskiego (Haarpaintner i in., 2001; Skogseth i in., 2004; Pawłowska i in., 2020). Mieszanie się AW oraz ArW na szelfie zachodniego wybrzeża Svalbardu prowadzi do powstania Transformowanych Wód Atlantyckich (ang. *Transformed Atlantic Water*; TAW), charakteryzujących się temperaturą od 1.0 do 3.0 oraz zasoleniem > 34.65 (Cottier i in., 2005; Dalpadado i in., 2016; Nilsen i in., 2016). Gęste i zimne wody zimowe (ang. *Winter Cooled Water*; WCW) mogą występować w fiordach przy dnie przez cały rok. W rejonie Svalbardu występują również wody powierzchniowe (ang. *Surface Waters*; SW), a także wody lokalne (ang. *Local Waters*; LW) oraz wody pośrednie (ang. *Intermediate Waters*; IW), które występują głównie w wewnętrznych częściach fiordów Svalbardu (Promińska i in., 2017; Tab. 2.1).



Ryc. 2.2. Mapa przedstawiająca rozmieszczenie prądów w Arktyce. Norweski Prąd Atlantycki - NwAC, Prąd Zachodniopitsbergeński - WSC, Prąd Wschodniopitsbergeński - ESC, Prąd Norweski - NCaC, Prąd Wyspy Niedźwiedziej - BIC (Pawłowska i in., 2020; zmodyfikowany).

Tab. 2.1. Parametry mas wodnych występujących w rejonie archipelagu Svalbardu (Cottier i in., 2005).

Masy wodne	Skrót	Parametry	
		Temperatura [°C]	Zasolenie
Woda atlantycka	AW	> 3.0	> 34.65
Woda arktyczna	ArW	-1.5 - 1.0	34.3 - 34.8
Transformowana woda atlantycka	TAW	1.0 - 3.0	> 34.65
Zimna woda zimowa	WCW	< -0.5	34.4 - 35.0
Woda powierzchniowa	SW	> 1.0	< 34.0
Woda lokalna	LW	-0.5 - 1.0	34.3 - 34.85
Woda pośrednia	IW	> 1.0	34.0 - 34.65

2.2 Isfjorden

Isfjorden (IS) stanowi największy system fiordów na Spitsbergenie (Bałazy i Kukliński, 2013; Forwick i Vorren, 2009; Forwick i Vorren, 2011). Długość fiordu wynosi około 100 km, szerokość w centralnej części osiąga 25 km, natomiast głębokość oscyluje wokół 300 m, osiągając maksymalne 425 m głębokości u ujścia fiordu (Forwick i Vorren, 2009; Forwick i Vorren, 2011; Rasmussen i in., 2012; Ryc. 2.3). Osady powierzchniowe w Isfjorden składają się głównie z pyłu i łu (Forwick i Vorren, 2009; Hooke i Elverhøi, 1996). Do fiordu uchodzą liczne rzeki, którymi dostarczana jest zawieszona materia organiczna i nieorganiczna oraz słodka woda - efekt topnienia otaczających lodowców. Ujście fiordu jest szerokie i otwarte, nic nie ogranicza swobodnej wymiany wód pomiędzy otwartym morzem a fiordem (Hald i Korsun, 1997; Bałazy i Kukliński, 2013; Nilsen i in., 2016). Warunki oceanograficzne w Isfjorden kształtuje przede wszystkim napływ zewnętrznych mas wodnych m.in. AW oraz ArW. Wielu naukowców podkreśla, że wpływ AW w Isfjorden jest największy spośród fiordów Spitsbergenu (Nilsen i in., 2008; Pavlov i in., 2013). Fiord ten jest pod niewielkim wpływem lodowców, a napływ AW i dostawa ciepła tworzą warunki bez lodu (Zajączkowski i Włodarska-Kowalczyk, 2007; Nilsen i in., 2008; Forwick i Vorren, 2009; Bałazy i Kukliński, 2013; Dalpadado i in., 2016).

2.3 Wijdefjorden

Wijdefjorden (WIJ) jest zlokalizowany na północno-zachodnim wybrzeżu Svalbardu (Ryc. 2.3). Jest to najdłuższy fiord (około 110 km) w rejonie archipelagu Svalbard. Jego głębokość zazwyczaj nie przekracza 200 m, wyróżniają się w nim dwa baseny o maksymalnej głębokości 245 m oraz 170 m znajdujące się w wewnętrznej części fiordu. Jest to wydłużony, wąski fiord, bez basenów bocznych o stosunkowo równej linii brzegowej. Powierzchniowe osady fiordu składają się głównie z drobnego, jednorodnego oraz bioturbowanego mułu (Görlich, 1988). Ujście fiordu nie jest ograniczone progiem (Kowalewski i in., 1990), umożliwiając swobodną wymianę wód z Oceanem Arktycznym. Na wybrzeżu Wijdefjorden uchodzi do morza pięć lodowców, dwa znajdują się wzdłuż najgłębszego basenu, natomiast trzy pozostałe na jego zachodnim brzegu (Hald i Korsun, 1997). Warunki oceanograficzne fiordu są kształtowane głównie przez wpływ AW oraz LW. Ponadto fiord ten charakteryzuje się dużym dopływem wód wytopiskowych pochodzących z lodowców, a także spływem rzeczny i powierzchniowym (Normann i in., 1987).

2.4 Rijpfjorden

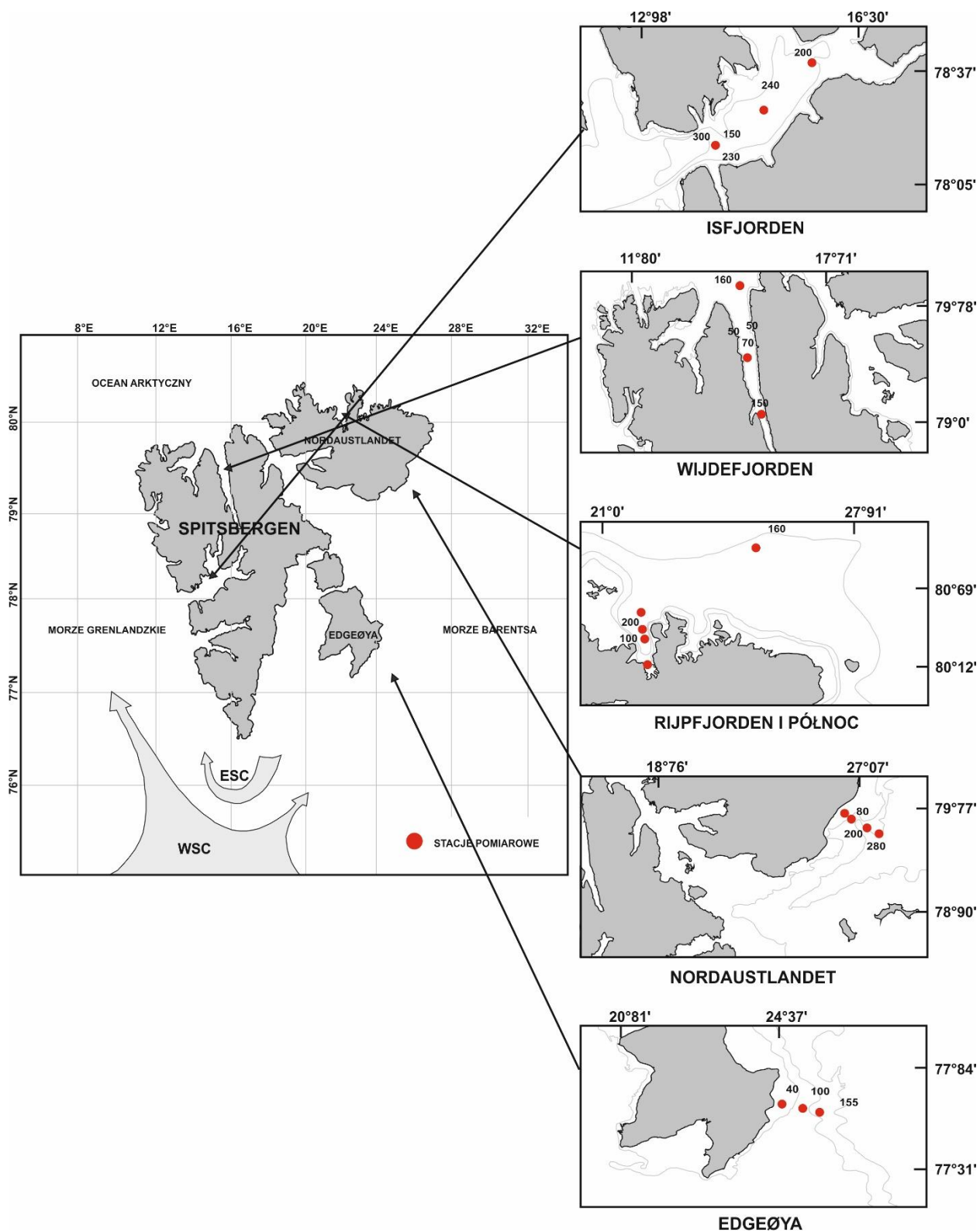
Rijpfjorden (RIJ) to zwrócony ku północy fiord, zlokalizowany na Nordaustlandet, największej wyspie północno-wschodniego Svalbardu (Dalpadado i in., 2016; Ryc. 2.3). Jego długość wynosi 30 km, a głębokość średnio 200-250 m. W połowie długości przecina go nieregularny próg (Leu i in., 2011; Wang i in., 2013). Fiord ten charakteryzuje się skalnym podłożem pokrytym cienką warstwą mułu na płytszych głębokościach, natomiast w głębszych odcinkach dominują miękkie osady (Ambrose i in., 2006). Rijpfjorden jest powszechnie uważany za typowy arktyczny fiord, będący pod wpływem ArW, który zamarza każdej zimy i jest pokryty lodem przez co najmniej 9 miesięcy w roku (Ambrose i in., 2006; Leu i in., 2011; Wang i in., 2013; Weydmann i in., 2013; Dalpadado i in., 2016; Cottier i in., 2019). Wiatr często wnosi dryfujący pak lodowy do wnętrza fiordu również w miesiącach letnich (Ambrose i in., 2006; Leu i in., 2011). Do fiordu dostaje się również AW od strony północnej (Hop i in., 2019). Rejon na północny-wschód od Rijpfjorden (Ryc. 2.3), na krawędzi szelfu znajdują się również w zasięgu działania WSC oraz wieloletniego paku lodowego.

2.5 Południowo-wschodnie Nordaustlandet (SE Nordaustlandet)

Nordaustlandet (NAL) jest drugą pod względem wielkości wyspą archipelagu Svalbard o powierzchni około 15 000 km² (Ryc. 2.3). Jest położona na północny-wschód od Spitsbergenu, oddzielona od niego Cieśniną Hinlopen. Otaczają ją od północy Ocean Arktyczny oraz Morze Barentsa od wschodu i południa. Znaczna część Nordaustlandet leży pod rozległymi pokrywami lodowcowymi o powierzchni około 11 150 km² (Dowdeswell i in., 1986): głównie Austfonna (około 8 000 km²; Dowdeswell i Drewry, 1989; Dowdeswell i in., 2008) oraz Vestfonna (około 2500 km²). Nordaustlandet jest jednym z największych zlodowaconych obszarów Arktyki (Dowdeswell i Drewry, 1985; Dowdeswell i in., 1986; Fransner i in., 2017). Austfonna ma najdłuższą linię brzegową spośród Arktycznych lodowców (około 230 km), ponadto dostarcza ok. 45% słodkiej wody spływającej ze Svalbardu z topniejących gór lodowych (Dowdeswell i in., 2008). Południowo-wschodnie wybrzeże wyspy znajduje się pod wpływem ArW, natomiast północno-wschodnie charakteryzuje się obecnością powierzchniowej warstwy ArW, pod którą występuje AW (Knies i in., 2006; Carroll i in., 2008).

2.6 Wschodnia Edgeøya (E Edgeøya)

Edgeøya (EDG) jest trzecią pod względem wielkości wyspą archipelagu Svalbard, o powierzchni 5 150 km² (Reimers, 2012; Ryc. 2.3). Od wschodu wyspę otacza Morze Barentsa, natomiast na północy znajduje się Cieśnina Freemansundet oddzielająca ją od Barentsøya, zaś na zachodzie Storfjorden oddziela Edgeøya od Spitsbergenu (Dowdeswell i Bamber, 1995). Obszar na wschód od Edgeøya pozostaje pod wpływem ArW z niewielkim udziałem AW pojawiających się tu w warstwie pośredniej (Knies i in., 2006). Wyspa pokryta jest lodem w 42% (Dowdeswell i Bamber, 1995). Największe lodowce są to: Edgeøyjøkulen (1365 km²), Digerfonna (270 km²) oraz Storskavlen (190 km²). Lodowiec u wschodniego ujścia Edgeøyjøkulen tworzy długi odcinek lodowych klifów, uchodzących do płytkich wód przybrzeżnych północno-zachodniego Morza Barentsa. Wody wytopiskowe dostarczają duże ilości materiału osadowego bezpośrednio do przybrzeżnych wód morskich (Dowdeswell i Drewry, 1989; Dowdeswell i Bamber, 1995).



Ryc. 2.3. Mapa rejonu badań z zaznaczonymi stacjami pomiarowymi; Isfjorden, Wijdefjorden, Rijpfjorden, północna stacja N, Południowo-wschodnie Nordaustlandet oraz Wschodnia Edgeøya.

Tab. 2.2. Lokalizacja stacji pomiarowych.

Stacja	Głębokość [m]	Szerokość geograficzna		Długość geograficzna	
		N	E	N	E
IS1	191	78° 24.000'	15° 35.690'		
IS2	240	78° 15.890'	14° 51.200'		
IS3	230	78° 09.800'	14° 07.100'		
WIJ1	160	79° 53.815'	15° 19.066'		
WIJ2	93	79° 29.359'	15° 33.475'		
WIJ3	154	79° 09.464'	16° 00.085'		
RIJ1	202	80° 05.374'	22° 12.966'		
RIJ2	260	80° 18.464'	22° 10.951'		
RIJ3	260	80° 22.354'	22° 05.736'		
RIJ4	155	80° 30.288'	22° 02.996'		
PÓŁ	167	81° 00.507'	25° 20.859'		
NAL1	42	79° 42.727'	26° 34.955'		
NAL2	82	79° 40.506'	26° 48.952'		
NAL3	147	79° 36.241'	27° 30.196'		
NAL4	275	79° 33.185'	28° 00.347'		
EDG1	41	77° 42.925'	24° 12.853'		
EDG2	71	77° 41.147'	24° 39.384'		
EDG3	114	77° 39.751'	25° 00.162'		

3. Charakterystyka otwornic

Powszechnie przyjęta klasyfikacja otwornic jest oparta na podziale z 1964 roku wg Loeblich i Tappana:

Królestwo: Protista

Podkrólestwo: Protozoa

Typ: Sarcostigophora

Podtyp: Sarcodina

Nadgromada: Rhizopoda

Gromada: Granuloreticulosa

Rząd: Foraminiferida*

*(nieformalnie Foraminifera)

Systematyka otwornic od dawna stanowi problematyczne zagadnienie. Wyodrębnienie jednostek taksonomicznych różnego poziomu nadal jest kwestią sporną wśród naukowców (Murray, 2006; Pawłowski, 2009). Badacze otwornic borykają się również z niespójnym nazewnictwem gatunków oraz rodzajów tych organizmów (Boltovskoy, 1990). Wzrost zainteresowania otwornicami nastąpił na przełomie XIX i XX w., głównie z powodu ich przydatności w badaniach stratygraficznych, ewolucyjnych i paleontologicznych. Po uznaniu otwornic jako przydatnych wskaźników do określania wieku oraz rekonstrukcji paleośrodowisk, badania nad tymi organizmami znacznie się rozwinęły (Murray, 2006; Pawłowski, 2009). Najpierw badacze zaczęli opracowywać metody precyzyjnej biochronologii z wykorzystaniem tych organizmów (Kitazato i Bernhard, 2014). Kolejnym krokiem było wykorzystywanie otwornic do odtwarzania warunków paleoceanograficznych z wykorzystaniem składu izotopowego ich skorupki (Murray, 2006; Pawłowski, 2009). Do dziś kompozycja izotopowa skorupki tych organizmów stanowi główne narzędzie do interpretacji zapisów paleoceanograficznych (Murray, 2006; Pawłowski, 2009; Kitazato i Bernhard, 2014).

Rozpoczęcie nowoczesnych badań molekularnych w końcu XX wieku pozwoliło na znaczne rozszerzenie wiedzy na temat ewolucji otwornic, a zastosowanie tej metodyki badawczej w paleoceanografii dało nowe narzędzie do odtwarzania warunków w dawnych oceanach (Kitazato i Bernhard, 2014). Pierwsze badania molekularne udowodniły, że otwornice są jedną z najszybciej ewoluujących grup organizmów (de Vargas i in., 1997).

Ponadto w ostatnich latach nastąpił znaczny przełom nad badaniami materiału genetycznego dzisiejszych otwornic (Pawłowski, 2000; Pawłowski, 2009; Pawłowski i Holzmann, 2014). Pawłowski (2000) opisuje cztery główne aspekty na których koncentrują się wspomniane badania:

- (1) pochodzenie otwornic;
- (2) związki między głównymi grupami otwornicowymi;
- (3) ewolucja otwornic;
- (4) genetyczne zróżnicowanie wewnątrzgatunkowe (m.in. obecność gatunków kryptycznych lub polimorfizm wewnątrz genomu).

Badania molekularne otwornic wciąż są rozwijane, jednak wykazały już niezwyklej potencjał nie tylko do rozwiązania problemów związanych z systematyką otwornic, ale także do lepszego zrozumienia podstawowych zagadnień związanych z biologią tych organizmów. Taksonomia otwornic nieuchronnie zmienia się wraz z postępującymi badaniami, dlatego autorzy zajmujący się problematyką tych organizmów są zgodni twierdząc, że istnieje wyraźna potrzeba zintegrowania badań nad cyklami życiowymi oraz genetyką otwornic w celu określenia prawidłowej i spójnej klasyfikacji taksonomicznej (Murray, 2006; Pawłowski 2009).

Najstarsze znane skamieniałości otwornic pochodzą z późnego prekambriu (Vachard i in., 2010; Heinz i Geslin, 2012). Dziś organizmy te są wszechobecne na wszystkich szerokościach geograficznych, występują w wodach morskich oraz brakicznych. Zasadniają dna płytkich wód przybrzeżnych, a także głębokie strefy oceanów, w tym również środowiska ekstremalne tj. rowy głębinowe oraz pokryte lodem obszary polarne (Pawłowski, 2009; Koho i in., 2011; Heinz i Geslin, 2012; Kitazato i Bernhard, 2014). Otwornice to organizmy jednokomórkowe (Koho i in., 2011; Heinz i Geslin, 2012), ich cechą charakterystyczną są skorupki o różnych kształtach oraz rozmiarach, które mogą być jedno- lub wielokomorowe (Murray, 2006; Pawłowski, 2009; Ryc. 3.1). Wielkość skorupki, w zależności od gatunku, może wynosić średnio od kilkudziesięciu do 500 μm , choć niektóre osobniki mogą osiągać nawet powyżej 1 cm. Cytoplazma otwornicy zlokalizowana jest wewnątrz skorupki zakończonej otworem, który nosi nazwę apertury. Otwór ten służy do wysuwania retikulopodiów (nitkowatych wypustek ektoplazmy), za pomocą których otwornice realizują wiele procesów życiowych tj. oddychanie, przyczepianie do podłoża lub poruszanie, odżywianie, budowanie skorupki, a także biorą udział w rozmnażaniu (Travis i Bowser, 1991; Goldstein, 1999; Murray, 2006; Pawłowski, 2009; Koho i in., 2011). Istnieją trzy główne typy ruchu rektikulopodiów: rozciąganie, zginanie w celu utworzenia sieci oraz wycofywanie.

Reorganizację retikulopodiów uznaje się za autonomiczną, reaguje na bodźce środowiskowe, na przykład przyczepność podłoża (Travis i in., 2002; Murray, 2006). Retikulopodia wytwarzają mukopolisacharydy, które działają jak klej i czyszczą podłoże w poszukiwaniu pożywienia, które skupia się wokół apertury organizmu (Travis i Bowser, 1991; Murray, 2006). Skład ścian skorupki otwornic, ich struktura (ułożenie, ilość komórek) oraz kształt apertury są to cechy taksonomiczne, stosowane w bardziej szczegółowej klasyfikacji otwornic na wyższym poziomie (Murray, 2006; Pawłowski, 2009).



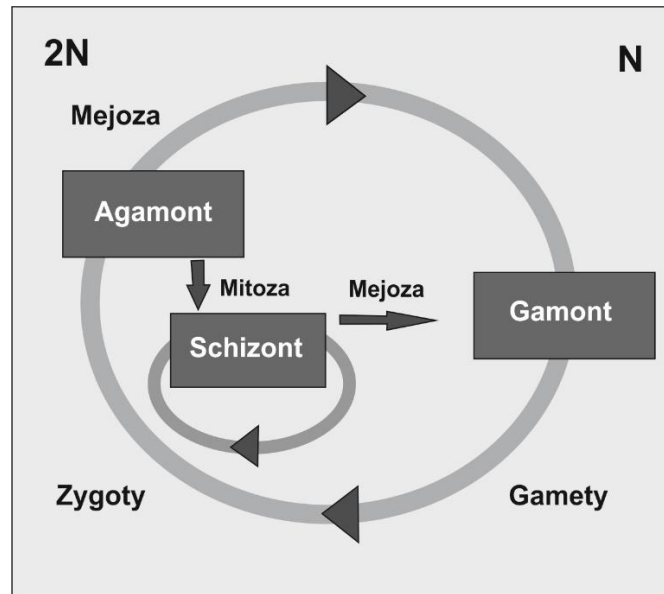
Ryc. 3.1. Różnorodność kształtów i ułożenia komórek w skorupkach wybranych gatunków otwornic (źródło: Kujawa i in., w przygotowaniu; zmodyfikowany).

Chociaż istnieją również gatunki otwornic bezokrywowych, których komórka pokryta jest grubym glikokaliksem, jednak zdecydowana ich większość posiada skorupkę (Murray, 2006; Pawłowski, 2009). Większość autorów wyróżnia występowanie trzech typów skorupki otwornic: organiczną, aglutynowaną oraz wapienną (Pawłowski, 2009; Kitazato i Bernhard, 2014). Skorupka organiczna zbudowana jest z polisacharydów (cukrów złożonych) i materiału białkowego, aczkolwiek jej dokładny skład nie jest znany. Skorupka aglutynowana budowana jest przez otwornice z ziaren piasku i innych cząsteczek mineralnych zebranych przez nią ze środowiska np. fragmenty innych organizmów, które są wbudowywane w warstwę polisacharydową. Skorupka węglanowa składa się z warstwy organicznej, wzmocnionej kryształami kalcytu lub aragonitu (węglan wapnia). Kryształy węglanu wapnia mogą być różnorodnie rozmieszczone, z tego względu wyróżnia się trzy typy skorupki węglanowej: szkliste, porcelanowe i granulowane (Brusca i Brusca, 2003; Pawłowski, 2009). Gdy kryształy są zorientowane w jednym kierunku, tworzą przejrzystą ścianę skorupki szklistej. Alternatywnie mogą być rozmieszczone losowo i tworzyć nieprzezroczystą skorupkę porcelanową. Istnieje również niewielka grupa otwornic, która posiada skorupki krzemionkowe (opal lub chalcedon). Rodzaje skorupki są charakterystyczne dla poszczególnych głębokości akwenów (Pawłowski, 2009). Otwornice zaopatrzone w skorupki wapienne występują do 4000 m (w Oceanie Atlantyckim nawet do 6000 m), jest to uwarunkowane głębokością kompensacji węglanowej, która powoduje wzrost rozpuszczalności węglanu wapnia wraz z rosnącym ciśnieniem (Thurman, 1982; Murray, 1991). Poniżej tej głębokości w zespołach otwornicowych dominują gatunki o skorupkach organicznych i aglutynowanych (Pawłowski, 2009). Murray (2006) omawia sześć możliwych funkcji dla skorupki otwornic: 1) zapewnia schronienie przed niekorzystnymi warunkami środowiskowymi; 2) służy jako zbiornik na wydaloną materię; 3) wspomaga rozmnażanie; 4) kontroluje pływalność; 5) zapewnia ochronę przed drapieżnikami; 6) wspomaga wzrost komórki. Wymienione funkcje nie wykluczają się wzajemnie. Niektóre cechy skorupki określane przez taksonomistów jako „ozdoba” również są funkcjonalne, np. zęby w aperturze służą do rozbijania skupisk pożywienia, żebra kanalizują cytoplazmę, a kolce pomagają ustabilizować skorupkę na miękkich podłożach. Skorupki otwornic doskonale zachowują się w osadach morskich, dzięki temu są nośnikami cennych informacji (*proxy*) o współczesnych jak i historycznych warunkach środowiskowych (Hald i in., 2001; Ślubowska i in., 2005; Szymańska i in., 2017).

Dostępność pokarmu jest najważniejszym czynnikiem decydującym o występowaniu otwornic w środowisku (Gustafsson i Nordberg, 2001). Są to organizmy cudzożywne, odżywiające się na drodze fagocytozy. Gatunki roślinożerne ograniczają się do żerowania w strefie eufotycznej, odżywiając się głównie glonami i bakteriami (Muller, 1975; Lee i in., 1980; Murray, 2006), przy czym świeżo zdeponowany fitoplankton jest opisywany przez naukowców jako preferowany pokarm dla niektórych taksonów szelfowych (Erskian i Lipps, 1987; Gustafsson i Nordberg, 2001) oraz wielu otwornic zasiedlających morskie głębiny (Gooday i Turley, 1990; Gustafsson i Nordberg, 2001). Występują również drapieżniki polujące np. na małe skorupiaki i larwy (Pawłowski, 2009), a także gatunki wszystkożerne które konsumują szczątki roślin i zwierząt, wyróżnia się nawet gatunki pasożytnicze żerujące na innych otwornicach (Brusca i Brusca, 2003). Niekiedy organizmy te mogą występować w symbiozie z glonami, które wdostają się do wnętrza skorupki otwornic (Pawłowski, 2009). Potencjalne korzyści tej strategii są trojaki: pozyskiwanie energii z fotosyntezy przeprowadzanej przez glony, wzmocnienie zwapnienia skorupki oraz wchłanianie przez glony metabolitów żywiciela. Niektóre gatunki otwornic mogą wykorzystywać więcej niż jedną strategię żywieniową, ponadto istnieją dowody na podział zasobów między osobnikami w celu ograniczenia konkurencji międzygatunkowej (Murray, 2006).

Klasyczny cykl życiowy otwornic składa się z regularnych przemian rozmnażającego się bezpłciowo agamonta i rozmnażającego się płciowo gamonta (Ryc. 3.2). Gamont jest zwykle bezjądrowy, podczas gdy agamont jest wielojądrowy. Gamont wytwarza ameboidalne lub wiciowate gamety, które łączą się, tworząc zygoty. Zygoty rozwijają się w diploidalne agamonty. Kiedy agamonty osiągną dojrzałość, ich jądra przechodzą dwa podziały mejotyczne. Embrionalne gamonty powstają w wyniku wielokrotnego rozszczepienia cytoplazmy. Ze względu na pośrednie położenie podziału mejotycznego, który występuje przed wielokrotnym rozszczepieniem agamontu, faza gamontu jest haploidalna, podczas gdy faza agamontu jest diploidalna. Ten typ przemiany pokoleń nazywany jest heterofazowym i jest znany głównie u roślin. U niektórych otwornic cykl klasyczny ulega modyfikacji, jak ilustruje ryc. 3.2, w mniejszym lub większym stopniu agamont przechodzi podział mitotyczny zamiast mejozy i wytwarza kolejne pokolenie rozmnażające się bezpłciowo, zwane schizontem. Schizont może przejść mejozę prowadzącą do powstania gamonta lub może wejść w cykl kolejnych bezpłciowych reprodukcji, podczas których nowe pokolenie schizontów jest produkowane przez wielokrotne rozszczepienie cytoplazmy rodzicielskiej (Murray, 2006; Pawłowski, 2009). Organizmy, które powstają w fazie bezpłciowej mają większe skorupki od osobników powstałych na drodze rozmnażania płciowego (Radwańska,

1999). Ponadto u otwornic o większych rozmiarach rozmnażanie bezpłciowe jest częstsze niż rozmnażanie płciowe (Röttger i Schmaljohann, 1976; Murray, 2006).



Ryc. 3.2. Schemat przedstawiający cykl życiowy otwornic (Pawłowski, 2009; zmodyfikowany).

Wśród otwornic bentosowych wyróżniamy dwie strategie życiowe: epifauna, osobniki poruszające się po powierzchni podłoża lub przyczepiające się do innych organizmów oraz infauna przemieszczająca się w głąb osadów (Murray, 2006). Gatunki epifauny mogą być osadzone (Sturrock i Murray, 1981; Murray, 2006), przyczepione (Kitazato, 1981; Sturrock i Murray, 1981; Murray, 2006) lub wolnożyjące (Murray, 2006). Osobniki przyczepiają się do podłoża lub innego organizmu przy użyciu kleju organicznego (mukopolisacharyd; Langer, 1993). Obserwacje otwornic wykazały, że nawet niektóre rzekomo osiadłe gatunki mają okresy ruchu (Gross, 2000). Niektórzy autorzy rozszerzają termin epifauny na gatunki infauny żyjące w 1 cm osadu (Corliss, 1991; Murray, 2006). Gatunki należące do infauny również mogą być przyczepione lub wolnożyjące. Formy wolnożyjące tworzą małe norki, gdy przemieszczają się przez osad (Kitazato, 1994; Gross, 2000). Fakty te pokazują, że aktywność życiowa otwornic jest kontrolowana przez otaczające warunki środowiskowe, a terminy epifauna i infauna mają luźne zastosowanie tylko w niektórych przypadkach (Murray, 2006).

Otwornice pełnią ważną rolę w obiegu materii w środowisku (Murray, 2006). Nie tylko stanowią bazę pokarmową dla innych organizmów, ale również konsumują duże ilości detrytusu i bakterii. W związku z powyższym, organizmy te stanowią istotny element obiegu węgla w środowisku morskim, łącząc ze sobą poszczególne poziomy łańcucha pokarmowego. Co więcej, otwornice w procesie formowania wapiennych skorupki pobierają ze środowiska

jony HCO_3^- (Gooday i in., 1992; Moodley i in., 2000; Pawłowski, 2009), dzięki czemu uczestniczą w procesie naturalnej sekwestracji węgla w osadzie (ang. *carbon burial*). Dodatkowo, niektóre organizmy np. wieloszczety wykorzystują skorupki otwornic jako miejsce schornienia oraz składania jaj (Brusca i Brusca, 2003; Pawłowski, 2009).

Cechy typowe dla organizmów należących do rzędu Foraminiferida, są to:

- krótki cykl życiowy (Kramer i Botterweg, 1991; Dijkstra i in., 2013),
- duży potencjał fosylizacyjny (Murray, 2006; Pawłowski, 2009),
- szeroki zasięg występowania (Murray, 2006; Dijkstra i in., 2013),
- wysoka tolerancja na niesprzyjające warunki (Alve i Bernhard, 1995; Gross, 2000).

Wszystkie te cechy sprawiają, że otwornice są bardzo dobrymi bioindykatorami zarówno sezonowych jak i wieloletnich zmian środowiskowych (Barbieri i in., 2006). Otwornice bentosowe są powszechnie wykorzystywane do wnioskowania o zmianach paleoceanograficznych w Arktyce i okazały się bardzo cenne ze względu na ich dużą liczebność i różnorodność w obszarach szelfowych (Polyak i in., 2002; Wollenburg i in., 2007; Ślubowska-Woldengen i in., 2008; Pawłowska i in., 2017; Jernas i in., 2018). Skład gatunkowy i liczebność otwornic oraz skład izotopowy ich skorupki może dostarczyć informacji o takich parametrach środowiska jak np. temperatura, zasolenie, produktywność, ale również o globalnych zmianach zasięgu zlodowaceń w przeszłości. Niezwykle istotna dla paleoceanografii jest analiza stabilnych izotopów tlenu ($\delta^{18}\text{O}$) w skorupkach otwornic. Zawartość ^{18}O dostarcza informacji przede wszystkim o obecności lodu (Shackleton i Opdyke, 1973). Duxbury i in. (2002) podkreślali występowanie dwóch rodzajów izotopów tlenu w środowisku morskim: powszechny ^{16}O oraz rzadki ^{18}O . Pozyskany z otoczenia tlen jest wykorzystywany przez otwornice przy budowie wapiennych struktur, a dzięki trwałości obu izotopów stosunek $^{18}\text{O}:^{16}\text{O}$ nie ulega zmianie nawet po śmierci organizmu. Opisane proporcje izotopów tlenu dostarczają wielu cennych informacji nie tylko o temperaturze wód w przeszłości ale również pozwala wnioskować o kierunku w jakim postępują zmiany klimatu. Podczas zlodowacenia dochodzi do ubytku ^{16}O z danego akwenu, ponieważ uwolniona z oceanu para wodna zostaje zmagazynowana w powstałej pokrywie lodowej. Dzieje się tak, ponieważ cząsteczki wody zawierające ^{16}O są lżejsze od tych zawierających ^{18}O , dlatego w trakcie parowania ubywają znacznie szybciej ze zbiornika wodnego. Na skład izotopowy skorupki otwornic wpływają również czynniki środowiskowe np. gdy spada temperatura, organizmy te wbudowują więcej ^{18}O w swoje struktury.

Rekonstrukcja zmian paleoceanograficznych z wykorzystaniem otwornic bentosowych jest silnie uzależniona od wiedzy o ich adaptacji do zmian zachodzących w środowisku (np. skład osadów, zawartość tlenu w osadach, fizyczne zaburzenia osadów oraz dopływ węgla organicznego do dna), ponieważ kontrolują rozmieszczenie żywych zbiorowisk otwornic bentosowych (Hald i Korsun, 1997; Lloyd, 2006; Pawłowska i in., 2011; Jernas i in., 2018). Sposoby, w jakie czynniki środowiskowe kontrolują rozmieszczenie organizmów, pozostają słabo poznane. W przypadku czynników ograniczających mają one związek z pomyślną egzystencją (w tym z możliwością odżywiania i rozmnażania). Progi krytyczne to dolna i górna granica przeżycia (po za tym przedziałem organizm umrze), a w ramach tych granic istnieją właśnie progi krytyczne, przy których czynnik zaczyna powodować poważny stres dla organizmu. W uproszczeniu przyjmuje się, że w optymalnych warunkach organizm osiągnie maksymalną obfitość (Murray, 2006). Otwornice mają zdolność wytrzymywania (przez kilka dni lub dłużej) skutków niektórych czynników, które przekroczyły spodziewane progi krytyczne (np. anoksja; Bernhard i Gupta, 1991; Murray, 2006). Wiele otwornic to oportunistyczne osobniki, które występują w małych ilościach przez cały czas, nawet gdy warunki są dalekie od optymalnych, ale gdy tylko zmieniają się na ich korzyść, szybko zwiększają swoją liczbę. Czynnikiem kontrolującym wydają się być zdolność radzenia sobie ze stresem środowiskowym na obszarach podlegających szybko zmieniającym się warunkom (Alve, 2003; Murray, 2006). Murray (2006) wskazuje procesy regulujące funkcjonowanie i rozmieszczenie zbiorowisk otwornic, podkreśla jednak że trudno zidentyfikować, który jest najważniejszy:

Czynniki abiotyczne:

- zasolenie – zakres tolerowany przez otwornice jest szeroki, od wody słodkiej do silnie zasolonej (od 0 do co najmniej 70);
- temperatura – otwornice występują w rejonach o każdym klimacie, jednak górna granica temperatury dla organizmów morskich wynosi około 45°C;
- zawartość rozpuszczonego tlenu – jego stężenie zależy od temperatury i zasolenia wody, krytyczny zakres dla otwornic to od niedotlenienia do dysoksji;
- obecność składników odżywczych;
- intensywność pływów;
- rodzaj podłoża;

Czynniki biotyczne:

- konkurencja – wewnątrz gatunkowa lub międzygatunkowa;

- przestrzeń;
- dostępność pożywienia.

Wymienione czynniki środowiskowe są ze sobą powiązane, w efekcie kształtując strukturę zbiorowisk otwornic. Każdego roku zgodnie z naturalnym cyklem życia następuje: transport, osiedlanie się i wzrost larw jako początkowe okresy zbiorowisk otwornic bentosowych. Czynniki środowiskowe mogą je ograniczać lub napędzać, poprzez śmiertelność zaraz po osiedleniu się organizmu lub rozproszenie larw. Niskie temperatury, sezonowe przepływ węgla do dna morskiego i fizyczne zaburzenia osadów, w tym sedymentacja glacialnego materiału mineralnego, również regulują czasową i przestrzenną zmienność fauny dennej (Włodarska-Kowalczyk i in., 2005; Murray, 2006; Pawłowska i in., 2011).

4. Materiały i metody

4.1 Prace terenowe

W celu przeprowadzenia badań pobrano materiał z 18 stacji pomiarowych podczas rejsu statku badawczego S/Y Oceania w sierpniu 2016 roku. Na każdej stacji pobrano 3 rdzenie osadów o długości 10 cm z wykorzystaniem rdzeniownika grawitacyjnego o średnicy rurek 4,5 cm. Długość rdzeni została wybrana na podstawie badań Zajączkowskiego i in. (2010a) oraz Kucharskiej i in. (2018), którzy odnotowali żywe osobniki otwornic w górnych 10 cm osadów. Na kilku stacjach rdzeniownik nie spenetrował osadów do 10 cm głębokości, stąd analizowane rdzenie na stacjach IS 3, WIJ 1, WIJ 2, RIJ 4, NAL 2 oraz NAL 3 mają długości odpowiednio: 8 cm, 4 cm, 5 cm, 8 cm, 7 cm, 5 cm. Analizy zostały przeprowadzone na 4 cm każdego z pobranych rdzeni, tak by uzyskane wyniki były porównywalne między wszystkimi stacjami pomiarowymi. Zazwyczaj w przypadku badań nad otwornicami wykorzystywano powierzchnię dwucentymetrową warstwę osadu, w tej pracy zdecydowano się na przeprowadzenie analiz w czterocentymetrowej warstwie ze względu na porównywanie różnych środowisk (fiordowego oraz szelfowego), o innym stopniu uwodnienia osadów. We wnętrzach fiordów, w strefie kontaktu wody słodkiej i słonej często dochodzi do flokulacji drobnych zawiesin i ich gwałtownego zrzutu. Osady powstające w takich warunkach są bardzo silnie uwodnione i tworzą w okresie letnim półpłynną warstwę na ogół nie nadającą się do zasiedlenia przez otwornice (Zajączkowski, 2002; Majewski i Zajączkowski, 2007; Zajączkowski i Włodarska-Kowalczyk, 2007). Bezpośrednio po pobraniu, w celu uniknięcia przemieszania lub uszkodzenia rdzeni, pocięto je na warstwy o grubości 1 cm. Osad przeznaczony do analiz otwornicowych zabarwiono roztworem 70% etanolu i różu bengalskiego (2 g/l) w celu wyróżnienia spośród wszystkich otwornic osobników żywych (Schönfeld i in., 2012). Próbkę przeznaczoną do analiz granulometrycznych umieszczono w lodówkach w temperaturze 4°C. Temperaturę, zasolenie oraz koncentrację zawiesiny wody morskiej na badanych stacjach mierzono z wykorzystaniem sondy Mini CTD Sensordata SD202, w interwałach 1-sekundowych. Koncentrację zawiesiny jako zmętnienie wody w jednostkach FTU (*Formazine Turbidity Unit*) przedstawiono w postaci interpolowanych wykresów wykonanych w programie Surfer 8.0. Na stacji pomiarowej N został pobrany pojedynczy rdzeń, dlatego wykonanie interpolacji było niemożliwe i w efekcie koncentracja zawiesiny jak i dane CTD na tej stacji zostały zilustrowane w postaci pojedynczych liniowych wykresów. Nazwy poszczególnych mas wodnych przyjęto na podstawie klasyfikacji prezentowanej przez Cottiera i in., (2005).

4.2 Analiza laboratoryjna i opracowanie wyników

Analiza granulometryczna

Mokry osad umieszczono i zważono we wcześniej przygotowanych parowniczkach. Następnie liofilizowano przez 24 h, pod ciśnieniem 1 mbar w temperaturze -20°C z wykorzystaniem liofilizatora CHRIST ALPHA 1-4 PLUS. Suchy osad zhomogenizowano w móżdziejzu i poddano analizie laserowej z użyciem miernika cząsteczek Mastersizer 2000 firmy MALVERN, który działa na zasadzie dyfrakcji laserowej. Wykorzystana metoda oparta jest na zjawisku rozpraszania światła. Światło, które przechodzi przez ciecz z zawieszonymi cząstkami osadu jest na nich rozpraszane, przy czym kąt załamania jest odwrotnie proporcjonalny do wielkości cząstek (Rawle, 1997). Równoległa i monochromatyczna wiązka światła ulega rozproszeniu, przy przejściu przez zawiesinę, następnie jest skierowana na kolisty detektor wieloelementowy, który wykonuje pomiar rozszczepionego światła w zależności od kąta rozszczepienia (Banasik i Hejduk, 2005).

Osad umieszczono w zlewce i dopełniono wodą destylowaną, następnie ustawiono na mieszadłku magnetycznym w celu uzyskania jednorodnej zawiesiny, którą za pomocą pipety dolewano do wody destylowanej umieszczonej w wannie ultradźwiękowej z podłączonym do miernika cząstek systemem rurek. Zawiesina była ciągle mieszana podczas gdy poddawano ją działaniu ultradźwięków przez 20 sekund. Przez ten czas osad był przemieszczany pomiędzy wanną ultradźwiękową a komora pomiarową. Podczas pomiarów Mastersizer 2000 wykorzystywał odwrócony model Fraunhofera, który przewiduje jak rozproszone zostanie światło wiązki przechodzące przez nieprzezroczystą tarczkę. Jednostka optyczna wyposażona jest w układ detektorów, które uzyskują wzór rozpraszania światła przez cząstki zawiesiny. Wspomniany wyżej model umożliwił aby program przewidział, które wielkości cząstek są odpowiedzialne za utworzenie danego wzoru. Uzyskane wyniki pomiarów były gromadzone w programie Mastersizer 2000. Obliczeń parametrów uziarnienia dokonano z wykorzystaniem programu Gradistat v 4.0. W celu uzyskania składu granulometrycznego osadu wykorzystano klasyfikację wg. Uddena (1914) i Wentwortha (1922).

Analiza otwornicowa

Próbki osadów przeznaczonych do analizy otwornicowej zostały przesiane na mokro z wykorzystaniem sit o średnicy oczek 500 μm , 100 μm oraz 63 μm , po wcześniejszym zważeniu osadu. Wykorzystanie sita o średnicy oczek 500 μm miało na celu zminimalizowanie mechanicznych uszkodzeń skorupki otwornic przez większe frakcje osadu.

Dlatego przy opisie wyników odnoszono się do dwóch frakcji wielkości: zsumowanych frakcji 500 μm oraz 100 μm oraz frakcji 63 - 100 μm , zwanych dalej odpowiednio: > 100 μm oraz > 63 μm . Analiza frakcji > 63 μm jest niezbędna, aby nie utracić najmniejszych osobników oraz stadiów młodocianych otwornic. Wcześniejsze badania wykazały znaczne niedoszacowanie zarówno różnorodności, jak i liczebności otwornic, gdy analizowano tylko większe frakcje (> 150 μm ; Mojtaħid i in., 2009; Schönfeld i in., 2012; Weinkauff i Milker, 2018). Przesiany materiał wysuszono i zważono z dokładnością do 0,0001 g. Próbkę w zależności od ilości osadu dzielono na podpróbki z wykorzystaniem mikrosplitera skrzynkowego. Z każdej próbki, jeśli było to możliwe wyizolowano powyżej 300 otwornic (żywych oraz martwych) z wykorzystaniem mikroskopu stereoskopowego Nikon SMZ 1500 za pomocą zwilżonego pędzelka i umieszczono w slajdach mikropaleontologicznych. Otwornice uznawano za żywe, gdy zaobserwowano zabarwione przynajmniej dwie komory skorupki. Następnie osobniki klasyfikowano do możliwie najniższego poziomu taksonomicznego. Liczebność otwornic została przedstawiona jako liczba osobników na gram suchego osadu [os./g]. Gatunki otwornic bentosowych zaklasyfikowano do grup wskaźnikowych wyznaczonych na podstawie literatury (Tab. 4.1).

Tab. 4.1. Grupy wskaźnikowe gatunków otwornic bentosowych.

Grupa wskaźnikowa	Gatunki	Źródło
Gatunki atlantyckie		
	<i>Bolivinellina pseudopunctata</i>	Lloyd, 2006; Lloyd i in., 2007, Majewski i in., 2009
	<i>Buccella frigida</i>	Lloyd i in., 2007; Majewski i in., 2009; Zajączkowski i in., 2010a
	<i>Melonis affinis</i>	Hald i Steinsund, 1996; Jennings i in., 2004 ; Łącka i in., 2015
	<i>Nonionellina labradorica</i>	Hald i Korsun, 1997; Majewski i in., 2009; Jernas i in., 2018
	<i>Adercotryma glomeratum</i>	Hald i Korsun, 1997; Majewski i in., 2009; Murray i Alve, 2016
	<i>Ammotium cassis</i>	Lloyd i in., 2007; Majewski i in., 2009; Kucharska i in., 2018
	<i>Reophax</i> sp.	Hald i Korsun, 1997; Lloyd i in., 2007; Majewski i in., 2009
Gatunki arktyczne		
	<i>Elphidium bartletti</i>	Conradsen i in., 1994; Majewski i in., 2009; Murray i Alve, 2016
	<i>Islandiella helenae</i>	Hald i Steinsund, 1996; Kubischta i in., 2011; Jernas i in., 2018
	<i>Islandiella norcrossi</i>	Korsun i Hald, 1998; Ivanova i in., 2008; Majewski i in., 2009
	<i>Stainforthia loeblichii</i>	Steinsund, 1994; Majewski i in., 2009; Jernas i in., 2018
	<i>Cuneata arctica</i>	Lloyd, 2006; Lloyd i in., 2007; Majewski i in., 2009
	<i>Spiroplectammina biformis</i>	Korsun i Hald, 1998; Majewski i in., 2009; Szymańska i in., 2017
	<i>Textularia earlandi</i>	Lloyd, 2006; Korsun i Hald, 2000; Majewski i in., 2009
Gatunki oportunistyczne		
	<i>Cassidulina reniforme</i>	Hald i Korsun, 1997; Majewski i in., 2009; Pawłowska i in., 2017
	<i>Elphidium clavatum</i>	Hald i in., 1994; Ślubowska i in., 2005; Majewski i in., 2009

Analiza statystyczna

Zakres podobieństw między próbkami oszacowano na podstawie analizy wieloczynnikowej, którą przeprowadzono dla liczebności poszczególnych gatunków. Analizowane dane poddano transformacji pierwiastkiem kwadratowym (Clarke i Green, 1988). Rozkłady podobieństw uzyskano przy użyciu miary podobieństwa Bray-Curtisa. Wyniki przedstawiono graficznie jako diagramy wiązkowe, obrazujące podstawowe grupy stacji na różnych poziomach podobieństwa, w którym stosunki odległości między wiązkami wskazują stosunki podobieństw między próbkami. Wykonano po 3 rozkłady (dla różnych frakcji wielkościowych osadu) na zbiorowiskach wszystkich otwornic (żywych oraz martwych) oraz tylko na żywych wapiennych osobnikach.

Bioróżnorodność wyrażono jako wskaźnik Shannona-Wienera:

$$H' = - \sum_{i=1}^n p_i \ln p_i,$$

gdzie p_i jest proporcją każdego okazu należącego do i -tego gatunku, do sumy wszystkich osobników (Spellerberg i Fedor, 2003), z wyższym wskaźnikiem odzwierciedlającym większą bioróżnorodność. Podobieństwo i różnorodność biologiczną obliczono za pomocą oprogramowania PRIMER 6 (Clarke i Warwick, 1994; Clarke i in., 2006; Ding i in., 2014). Skład gatunkowy otwornic został przeanalizowany przy użyciu metody Principal Component (PC), zastosowanej do dwóch zbiorów danych: 1) wszystkich (żywych i martwych) osobników; 2) tylko żywych osobników wapiennych z wykluczeniem otwornic aglutynujących, które nie ulegają wybarwieniu roztworem rózu bengalskiego. Do analiz wykorzystano program SYSTAT 11. Analizy statystyczne opierające się na liczebności zbiorowisk otwornic wykorzystują gatunki, które stanowiły powyżej 5% zbiorowiska (du Châtelet i in., 2004), dlatego uznawano je za dominujące.

Analiza izotopów stabilnych

Analiza stabilnych izotopów została przeprowadzona na gatunku *Elphidium clavatum*, który wystąpił na wszystkich stacjach pomiarowych. Spośród wcześniej wybranych otwornic wyizolowano po 12 osobników tego gatunku i umieszczono w próbkach Eppendorfa. Odpowiednio zabezpieczone próbki wysłano na Uniwersytet Stanu Floryda, gdzie przeprowadzono analizę izotopową stosując spektrometr masowy Finnigan-MAT 252 sprzężony z urządzeniem do przygotowywania węglań Kiel III. Próbki rozpuszczono w roztworze H_3PO_4 w $71^\circ C$, a skład izotopowy zmierzono na uwolnionym, kriogenicznie

oczyszczonym CO₂. Dane porównano ze standardem izotopowym NBS-19 i wyrażono w standardowej notacji w odniesieniu do VPDB. Osiągnięta precyzja analityczna wynosiła < 0,03‰ oraz < 0,05‰ odpowiednio dla $\delta^{13}\text{C}$ i $\delta^{18}\text{O}$.

5. Wyniki

5.1 Warunki oceanograficzne

5.1.1 Isfjorden

Isfjorden znajdował się pod silnym wpływem TAW. Był również (wraz z Wijdefjorden) fiordem o najwyższej temperaturze i zasoleniu wśród wszystkich stacji pomiarowych (Ryc. 5.1 A). Oprócz TAW, obserwowano również SW, IW oraz AW i wszystkie masy wodne pojawiły się na każdej stacji w tym fiordzie. Temperatura wody wynosiła od 1,4°C przy dnie do 7,7°C przy powierzchni. Zasolenie wzrastało od 28,1 w warstwie powierzchniowej do 35,5 w kierunku dna, najniższą wartość zarejestrowano na stacji IS 1, natomiast najwyższą na stacji IS 3 przy ujściu fiordu (Ryc. 5.1 A). Koncentracja zawiesiny wzrastała w kierunku ujścia fiordu. Wartości wahały się od 0,1 do 10,4 FTU, osiągając maksimum na stacji IS 3 w warstwie powierzchniowej wody (Ryc. 5.2 A).

5.1.2 Wijdefjorden

Wijdefjorden był pod silnym wpływem AW oraz TAW, charakteryzował się również najwyższym zasoleniem (wraz z Isfjorden) w całym rejonie badań (Ryc. 5.1 B). Obserwowano również SW oraz IW. Temperatura w kolumnie wody wynosiła od -0,4°C przy dnie do 5,8°C na powierzchni, najniższą wartość odnotowano na stacji WIJ 1 przy dnie. Stacja ta była również jedyną na której odnotowano SW oraz TAW. AW oraz IW obserwowano na wszystkich stacjach (Ryc. 5.1 B). Temperatura utrzymywała wartości dodatnie do 111 m na stacji WIJ 1 oraz w całej kolumnie wody na stacjach WIJ 2 oraz WIJ 3 (Ryc. 5.1 B). Zasolenie osiągało wartości od 32,5 na powierzchni wody do 35,5 przy dnie, najwyższą wartość osiągając przy ujściu fiordu (Ryc. 5.1 B). Koncentracja zawiesiny była najwyższa we wnętrzu fiordu i malała w kierunku ujścia. Odnotowana koncentracja zawiesiny wynosiła od 0,1 do 5,2 FTU z najwyższą wartością na stacji WIJ 1 w warstwie powierzchniowej (Ryc. 5.2 B).

5.1.3 Rijpfjorden

Rijpfjorden był jedynym fiordem w którym obserwowano WCW oraz najniższą temperaturę wody przy dnie (Ryc. 5.1 C). Dodatkowo odnotowano masy wodne: SW, IW, AW oraz TAW, temperatura kolumny wody wahała się od -1,7°C przy dnie do 5,2°C w warstwie powierzchniowej. Na stacji RIJ 1 temperatura wody przy dnie była najniższa. Była to również jedyna stacja, gdzie pojawiła się SW. WCW pojawiła się na trzech stacjach,

za wyjątkiem RIJ 4, która jest zlokalizowana w ujściu fiordu. Pozostałe masy wodne pojawiły się na wszystkich stacjach pomiarowych (Ryc. 5.1 C). Na stacji RIJ 4 temperatura wynosiła powyżej 0°C w całej kolumnie wody, na pozostałych stacjach dodatnia temperatura wody utrzymywała się do 132 m (Ryc. 5.1 C). Zasolenie wynosiło od 33,4 przy powierzchni do 35,4 w głębszych warstwach wody (Ryc. 5.1 C). Rippfjorden charakteryzował się najwyższą koncentracją zawiesiny we wnętrzu fiordu, która malała w stronę ujścia. Koncentracja zawiesiny wynosiła od 0,1 do 12,5 FTU z maksymalną wartością przy dnie na stacji RIJ 3 (Ryc. 5.2 C).

5.1.4. Stacja N

Stacja N, wysunięta najbardziej na północ, charakteryzowała się masami wodnymi SW, IW oraz TAW. Temperatura wody wzrastała od -0,6°C na powierzchni do 3,1°C w głębszych warstwach. Zasolenie wynosiło od 29,6 do 35,5 (Ryc. 5.1 D). Koncentracja zawiesiny wynosiła od 0 do 30 FTU, maksymalną wartość osiągając na głębokości 0,5 m (Ryc. 5.2 D).

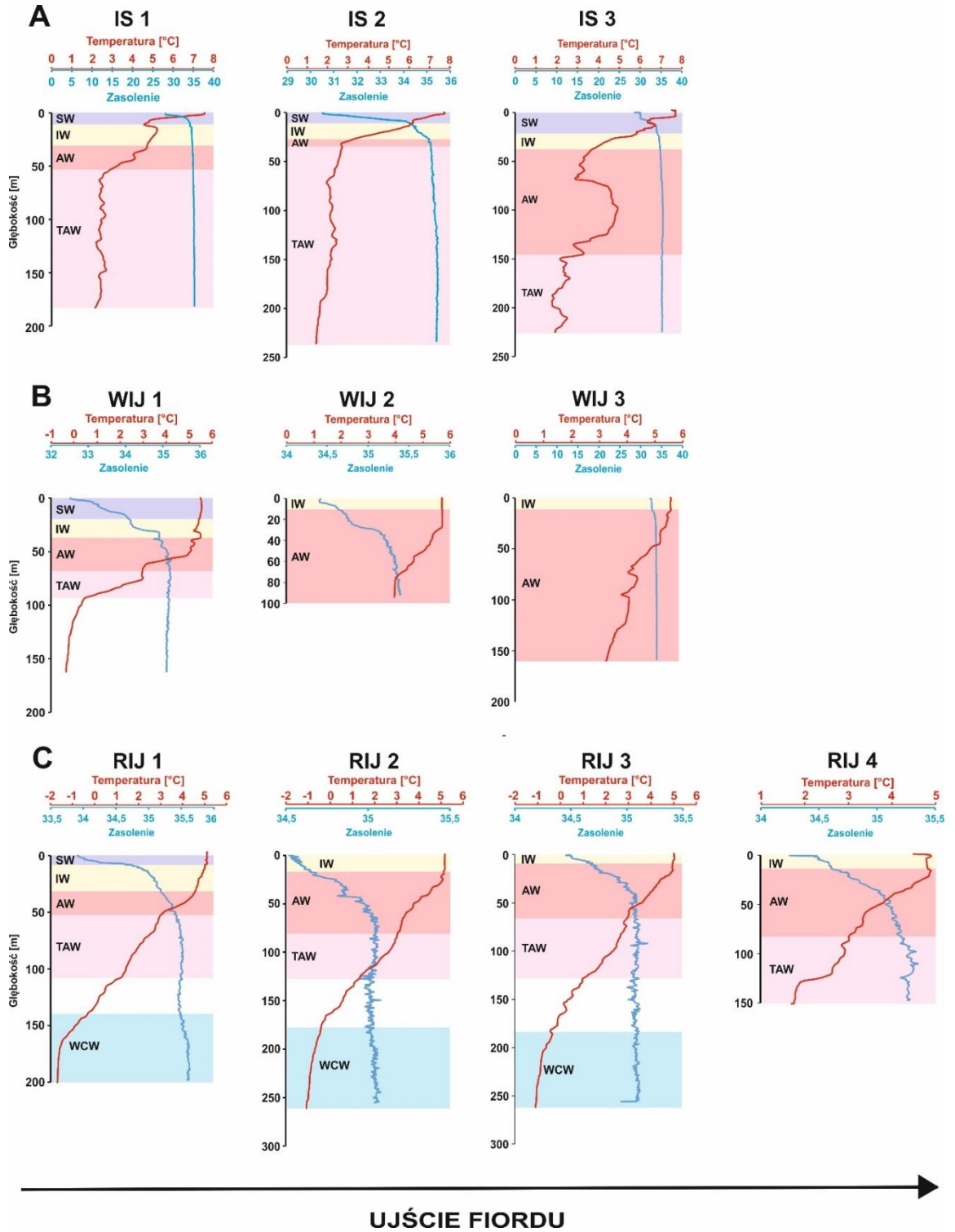
5.1.5 Południowo-wschodnie Nordaustlandet

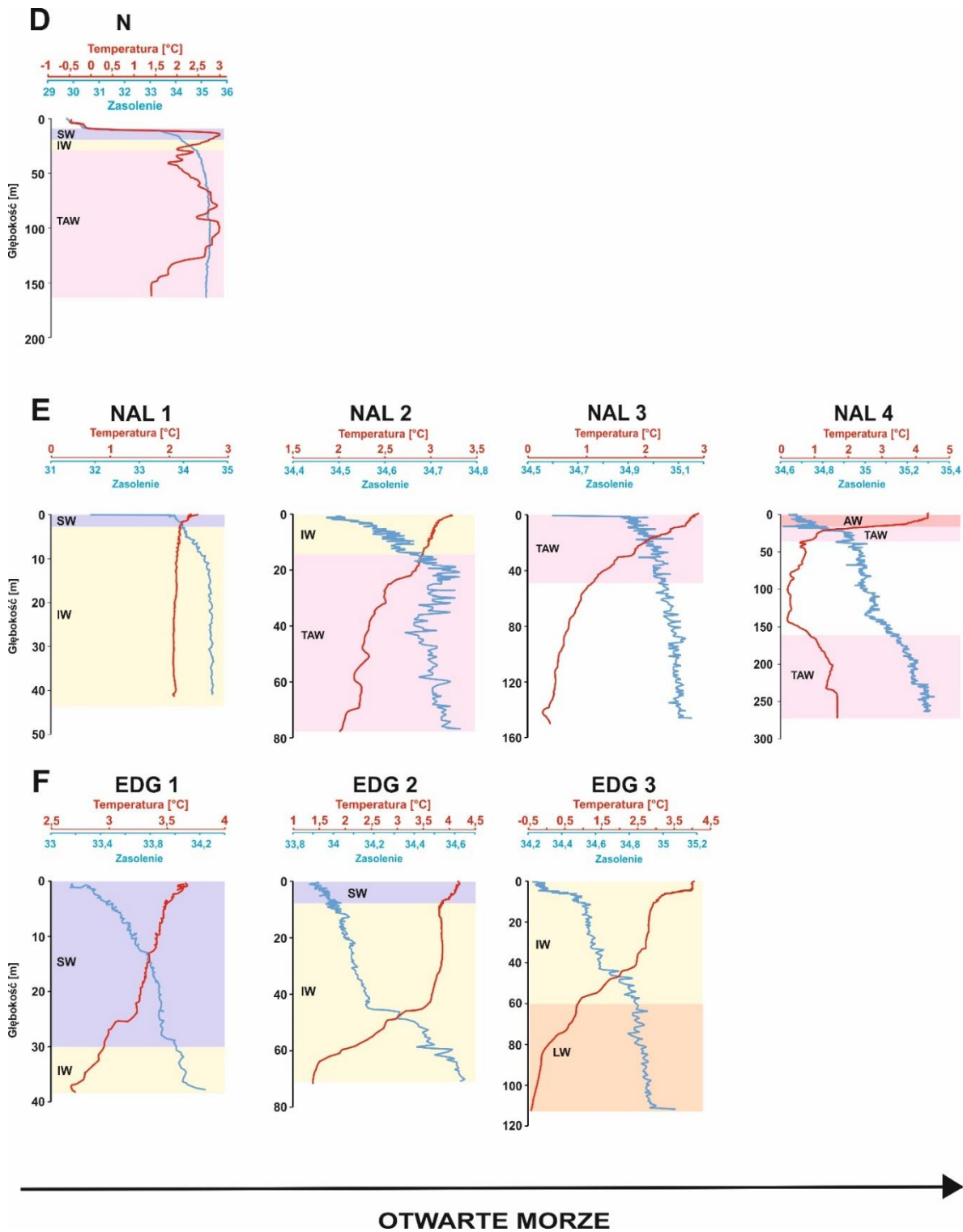
Stacje NAL 2, NAL 3 oraz NAL 4 zlokalizowane w południowo-wschodniej części Nordaustlandet były pod intensywnym TAW, AW odnotowano tylko na zewnętrznej stacji NAL 4 (Ryc. 5.1 E). Dodatkowo odnotowano: SW oraz IW, SW pojawiła się tylko na stacji NAL 1, na której jako jedynej nie wystąpiła TAW. IW pojawiła się również na stacji NAL 2. Temperatura wody wynosiła od 0,2°C przy dnie do 4,4°C przy powierzchni. Zasolenie w kolumnie wody oscylowało od 33,6 do 35,3, wzrastając na stacjach oddalonych od lodowca (Ryc. 5.1 E). Na stacji NAL 1 odnotowano najwyższą koncentrację zawiesiny z całego obszaru badań: 54,8 FTU na głębokości około 3 m, na pozostałych stacjach wynosiła < 1 (Ryc. 5.2 E).

5.1.6 Wschodnia Edgeøya

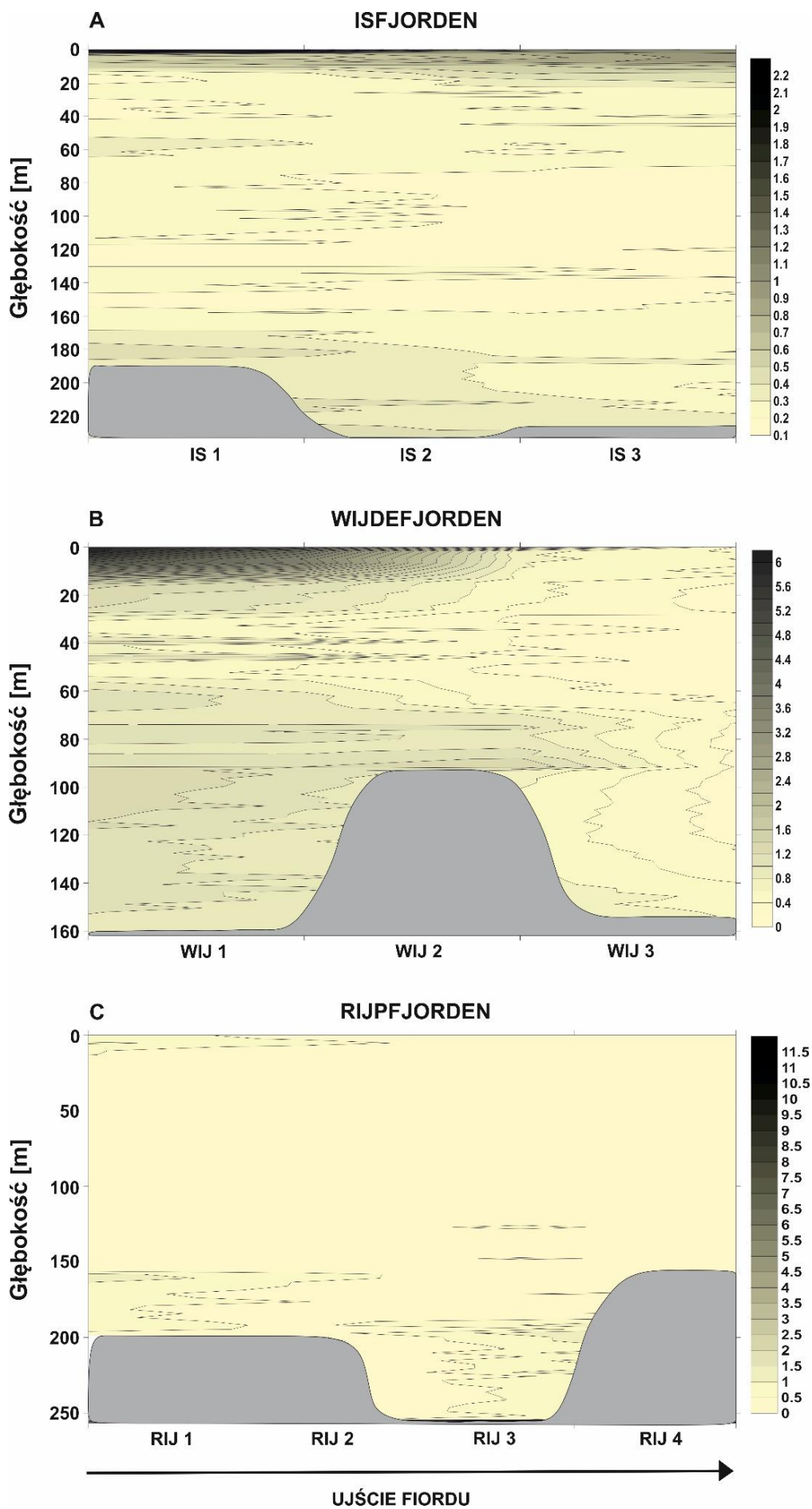
Rejon wschodniej Edgeøya jako jedyny charakteryzował się obecnością LW, a także brakiem AW oraz TAW. Dodatkowo, SW pojawiła się wyłącznie na stacji zlokalizowanej przy bezpośrednim sąsiedztwie lodowca. IW odnotowano na wszystkich stacjach pomiarowych, natomiast LW pojawiła się wyłącznie na stacji EDG 3 usytuowanej najdalej od lodowca. Kolumna wody charakteryzowała się temperaturą od -0,5°C przy dnie do 4,2°C przy powierzchni, najniższą wartość obserwowano przy dnie na stacji EDG 3. Zasolenie osiągało

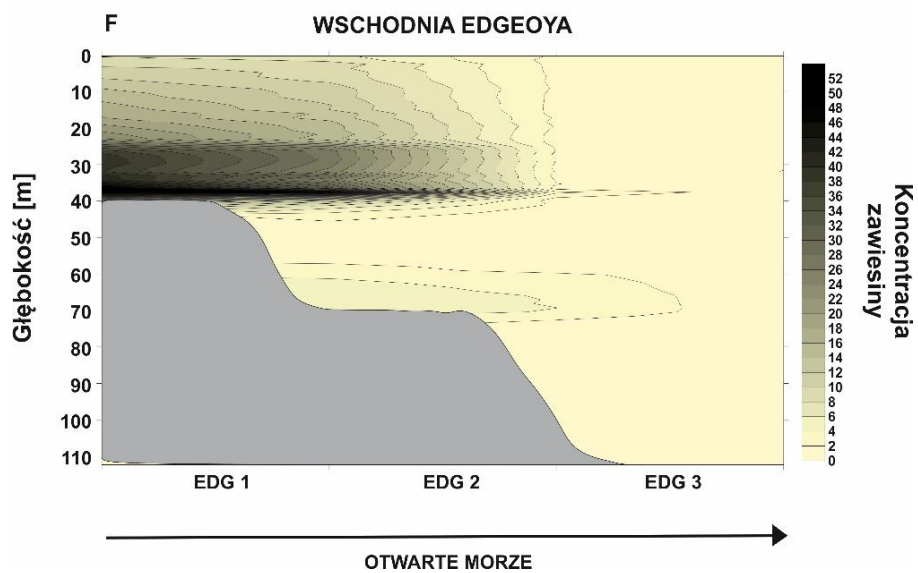
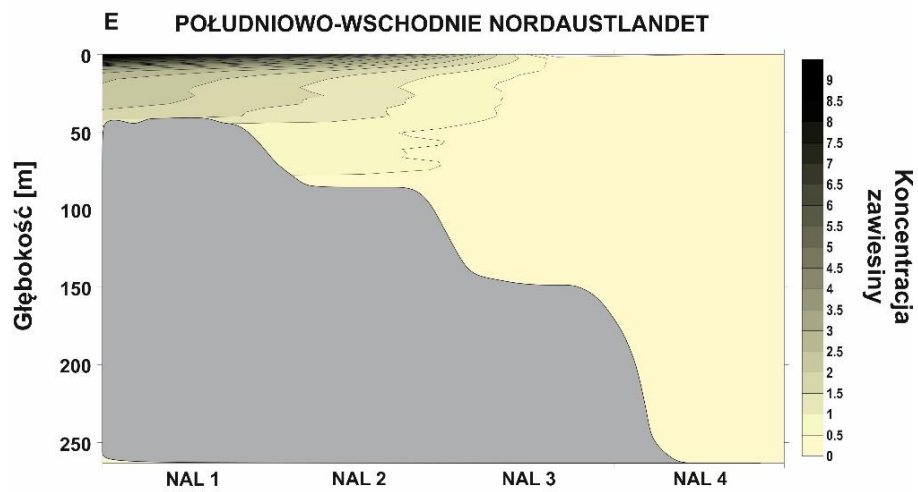
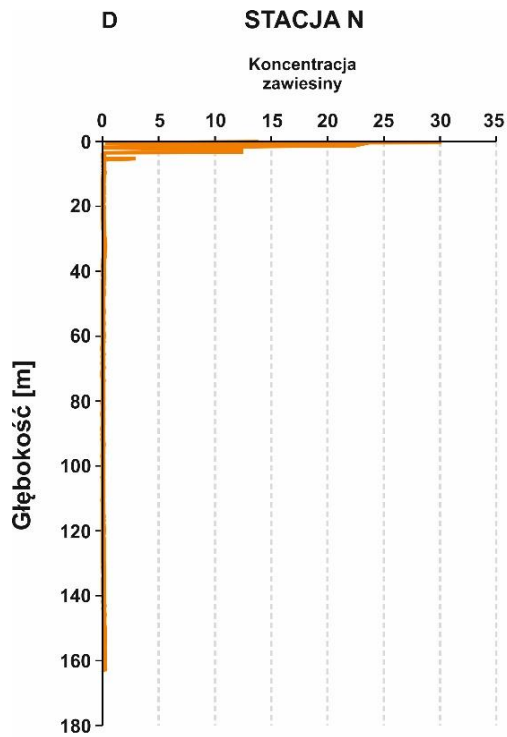
wartości od 33,2 do 34,9 w głębszych warstwach wody (Ryc. 5.1 F). Koncentracja zawiesiny była najwyższa na stacji EDG 1, wzrastała w kierunku dna aż do 48,8 FTU, na pozostałych stacjach wartości oscylowały od 0,3 do 4,3 FTU (Ryc. 5.2 F).





Ryc. 5.1. Klasyfikacja mas wodnych na podstawie Cottiera i in., (2005) w: A) Isfjorden (IS), B) Wijdefjorden (WIJ), C) Rijpfjorden (RIJ), D) północnej stacji N (stacja N), E) Południowo-wschodnim Nordaustlandet (NAL) oraz F) Wschodniej Edgeøya (EDG) na poszczególnych stacjach pomiarowych.





Ryc. 5.2. Zmiany koncentracji zawiesiny w: A) Isfjorden (IS), B) Wijdefjorden (WIJ), C) Rjipfjorden (RIJ), D) północnej stacji N (stacja N), E) Południowo-wschodnim Nordaustlandet (NAL) oraz F) Wschodniej Edgeøya (EDG) na poszczególnych stacjach pomiarowych.

5.2 Skład granulometryczny osadu

Analizowany osad zaklasyfikowano do poszczególnych frakcji wg. Uddena (1914) i Wentwortha (1922): ilastą ($< 2 \mu\text{m}$), pylastą ($2 - 63 \mu\text{m}$), piaszczystą ($63 - 2000 \mu\text{m}$) oraz żwirową ($> 2000 \mu\text{m}$). Frakcję żwirową zaobserwowano na kilku stacjach pomiarowych w niewielkich ilościach ($< 10\%$). Pył pojawiał się na każdej stacji pomiarowej w ilościach przekraczających 65% objętości całego osadu (Ryc. 5.3).

5.2.1 Isfjorden

W osadach Isfjorden pył stanowił od 73% do 85%. Ił nie przekroczył 12% osadu. Frakcja piaszczysta pojawiła się w ilościach $< 10\%$, oprócz stacji IS 3, gdzie w powierzchniowej próbce piasek stanowił 23% osadu. Nie zaobserwowano żwiru (Ryc. 5.3 A).

5.2.2 Wijdefjorden

Na stacjach Wijdefjorden pył pojawił się w ilościach wahających się od 67% do 87%. Najwyższą wartość spośród wszystkich stacji w fiordzie oraz z całego obszaru badań obserwowano na stacji WIJ 2 (87%). Ił stanowił $< 10\%$ objętości osadu na wszystkich stacjach. Piasek wystąpił w ilościach $< 20\%$, maksymalną zawartość odnotowano na stacji WIJ 1, na której jako jedynej pojawił się również żwir ($< 9\%$) we wszystkich warstwach osadu (Ryc. 5.3 B).

5.2.3 Rjipfjorden

Frakcja pylasta w Rjipfjorden stanowiła od 74% do 86% na poszczególnych stacjach. Ił obserwowano w niewielkich ilościach ($< 8\%$). Piasek stanowił $< 10\%$ osadu, za wyjątkiem stacji RIJ 4, gdzie frakcja piaszczysta stanowiła nawet 24% osadu. Frakcje żwirową zarejestrowano wyłącznie na stacjach RIJ 2 oraz RIJ 4 (odpowiednio: $< 5\%$ oraz $< 1\%$; Ryc. 5.3 C).

5.2.4 Stacja N

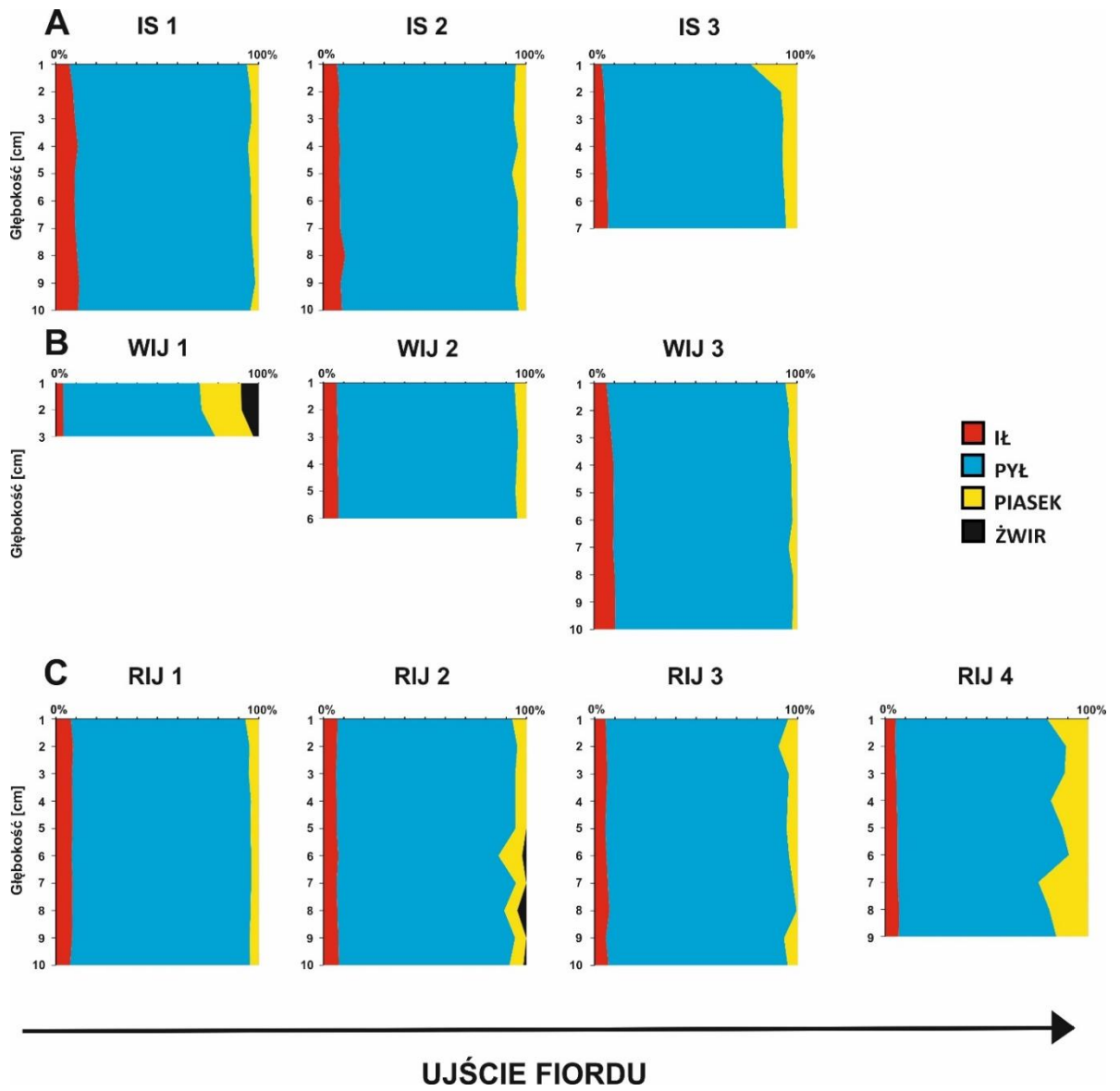
Na stacji N pył stanowił > 80% osadu. Ił oraz piasek wystąpiły w ilościach < 10%. Żwir stanowił < 1% (Ryc. 5.3 D).

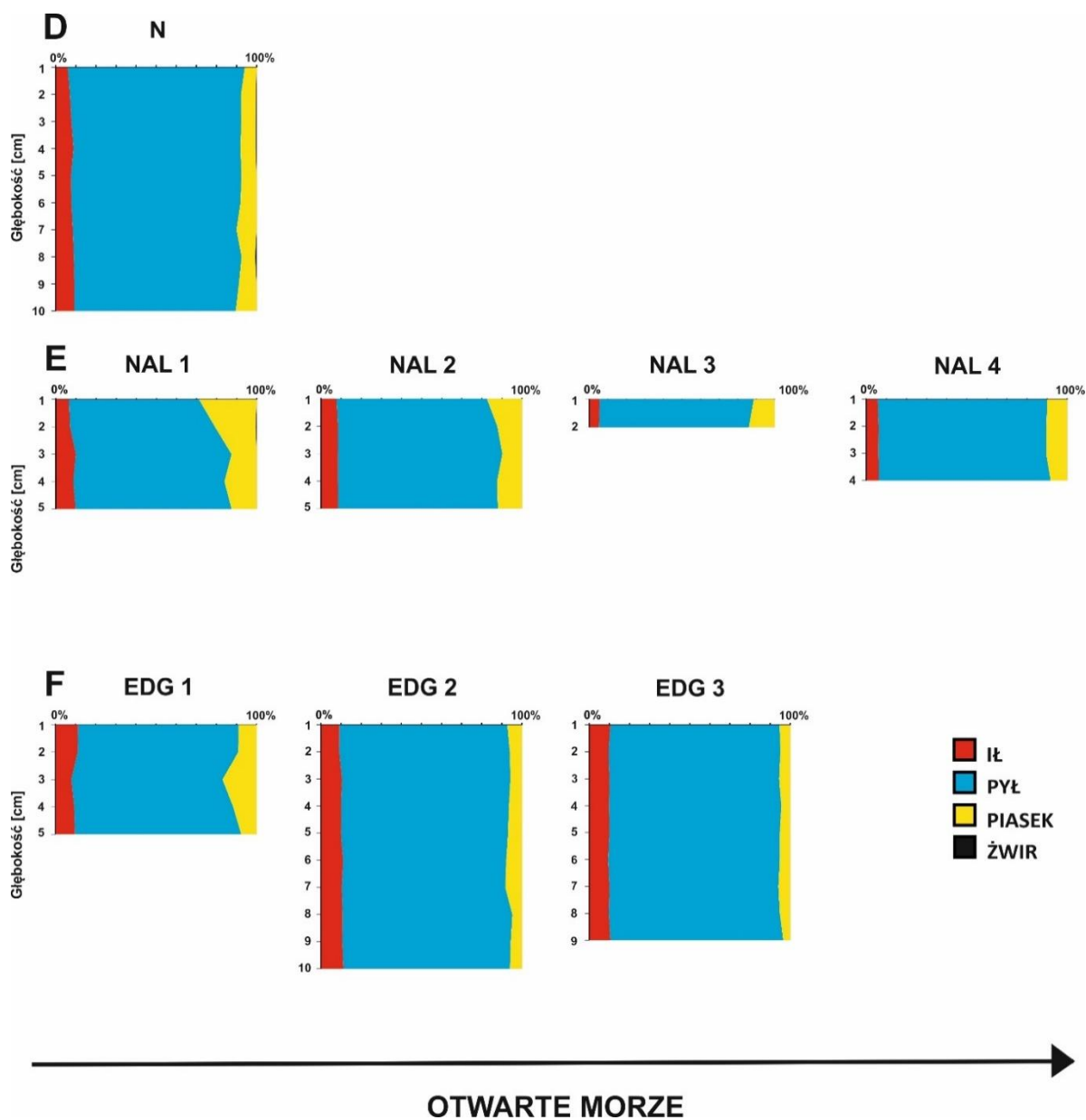
5.2.5 Południowo-wschodnie Nordaustlandet

Stacje Nordaustlandet charakteryzowały się zawartością pyłu od 65% do 83%. Udział iłu wynosił < 14%. Zawartość frakcji piaszczystej stanowiła < 29% (najwięcej spośród wszystkich stacji z całego obszaru badawczego), maksymalną ilość obserwowano na stacji NAL 1 zlokalizowanej blisko lodowca. Była to również jedyna stacja na której odnotowano obecność żwiru (< 1%; Ryc. 5.3 E).

5.2.6 Wschodnia Edgeøya

Na stacjach zlokalizowanych w rejonie wschodniej Edgeøya pył stanowił od 75% do 84% z domieszką niewielkich ilości iłu oraz piasku (odpowiednio: < 11% i < 8%). Nie zaobserwowano frakcji żwirowej (Ryc. 5.3 F).





Ryc. 5.3. Udziały procentowe [%] wybranych frakcji osadu w: A) Isfjorden (IS), B) Wijdefjorden (WIJ), C) Rjipfjorden (RIJ), D) północnej stacji N (stacja N), E) Południowo-wschodnim Nordaustlandet (NAL) oraz F) Wschodniej Edgeøya (EDG) na poszczególnych stacjach pomiarowych.

5.3 Fauna otwornicowa

5.3.1 Liczebność i bioróżnorodność fauny otwornicowej

Z materiału badawczego poddanego analizom (72 próbki – 18 stacji po 4 próbki) wybrano 38 272 okazów otwornic bentosowych (żywych oraz martwych), wśród których zidentyfikowano 56 gatunków oraz 8 rodzajów, w tym 40 gatunków i 6 rodzajów wśród osobników wapiennych oraz 10 gatunków i 2 rodzaje wśród osobników aglutynujących (Zał. 1). W Isfjorden całkowita liczebność otwornic nie przekraczała 576 os./g, najwyższą wartość odnotowano na stacji IS 3, osobniki aglutynujące stanowiły < 50% na wszystkich stacjach. Indeks H' był wysoki i wahał się od 2,2 do 2,5, maksymalną wartość osiągnął na stacji IS 1 (Ryc. 5.4 A).

Wijdefjorden charakteryzował się najwyższą całkowitą liczebnością otwornic spośród stacji pomiarowych z całego obszaru badań, maksymalną liczbę osobników odnotowano na stacji WIJ 1 (2542 os./g). Udział osobników aglutynujących był niewielki na wszystkich stacjach pomiarowych. Indeks H' wynosił ok. 2 na wszystkich stacjach (Ryc. 5.4 A).

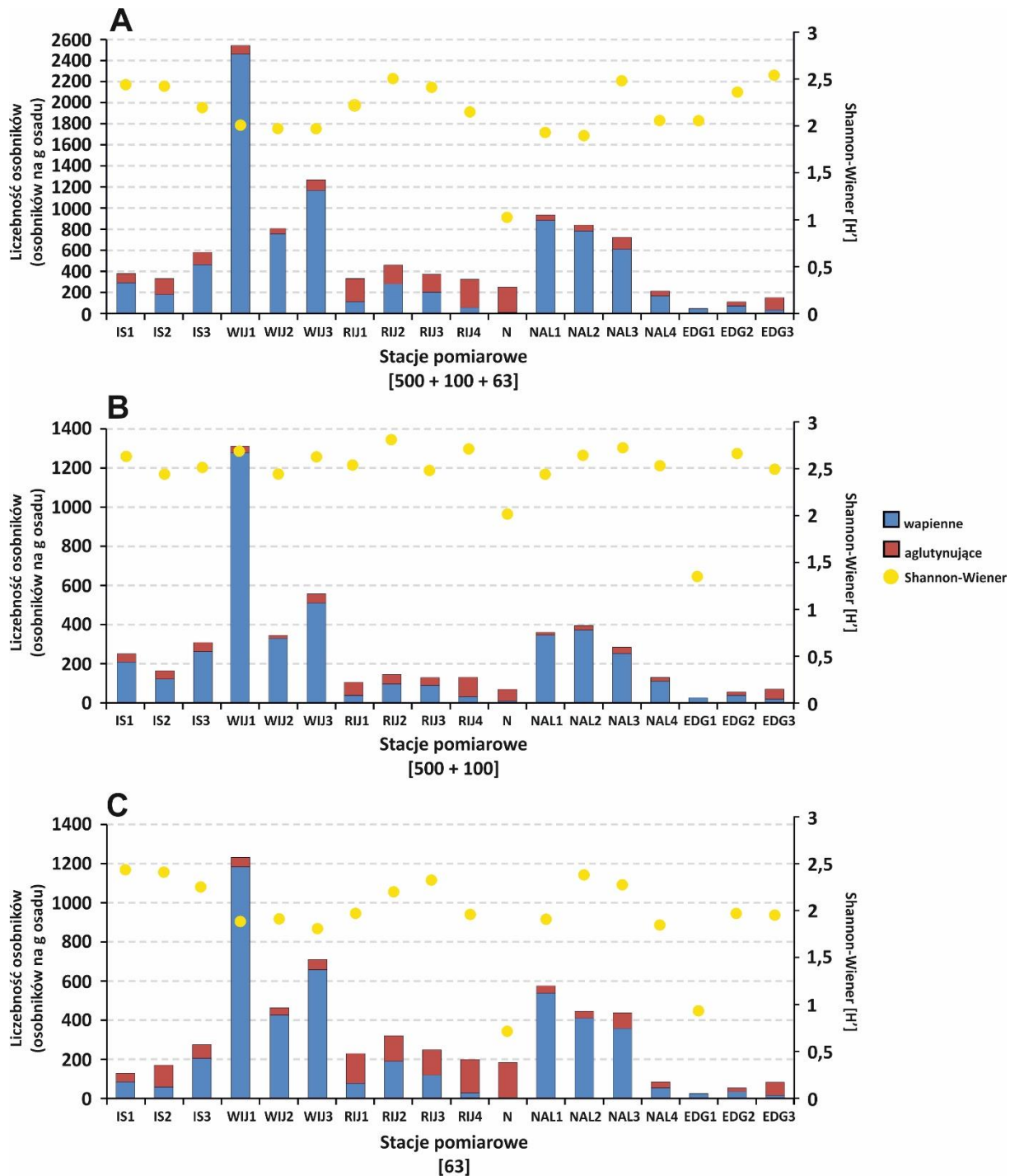
W Rippfjorden najwyższa liczebność otwornic została odnotowana na stacji RIJ 2 (458 os./g), udział osobników aglutynujących był wysoki - co najmniej 39% wszystkich otwornic. Indeks H' wynosił od 2,2 (RIJ 4) do 2,5 na stacji RIJ 2 (Ryc. 5.4 A).

Na stacji N liczebność otwornic była znacznie niższa (252 os./g) z wyraźną przewagą osobników aglutynujących oraz niskim indeksem H', który wynosił 1,1 (Ryc. 5.4 A).

Na stacjach zlokalizowanych na południowo-wschodnim Nordaustlandet liczebność otwornic nie przekraczała 935 os./g, najwyższą wartość notowano na stacji NAL 1. Udział osobników aglutynujących był niski. Wartości indeksu H' wahały się od 1,8 (NAL 2) do 2,5 (NAL 3; Ryc. 5.4 A).

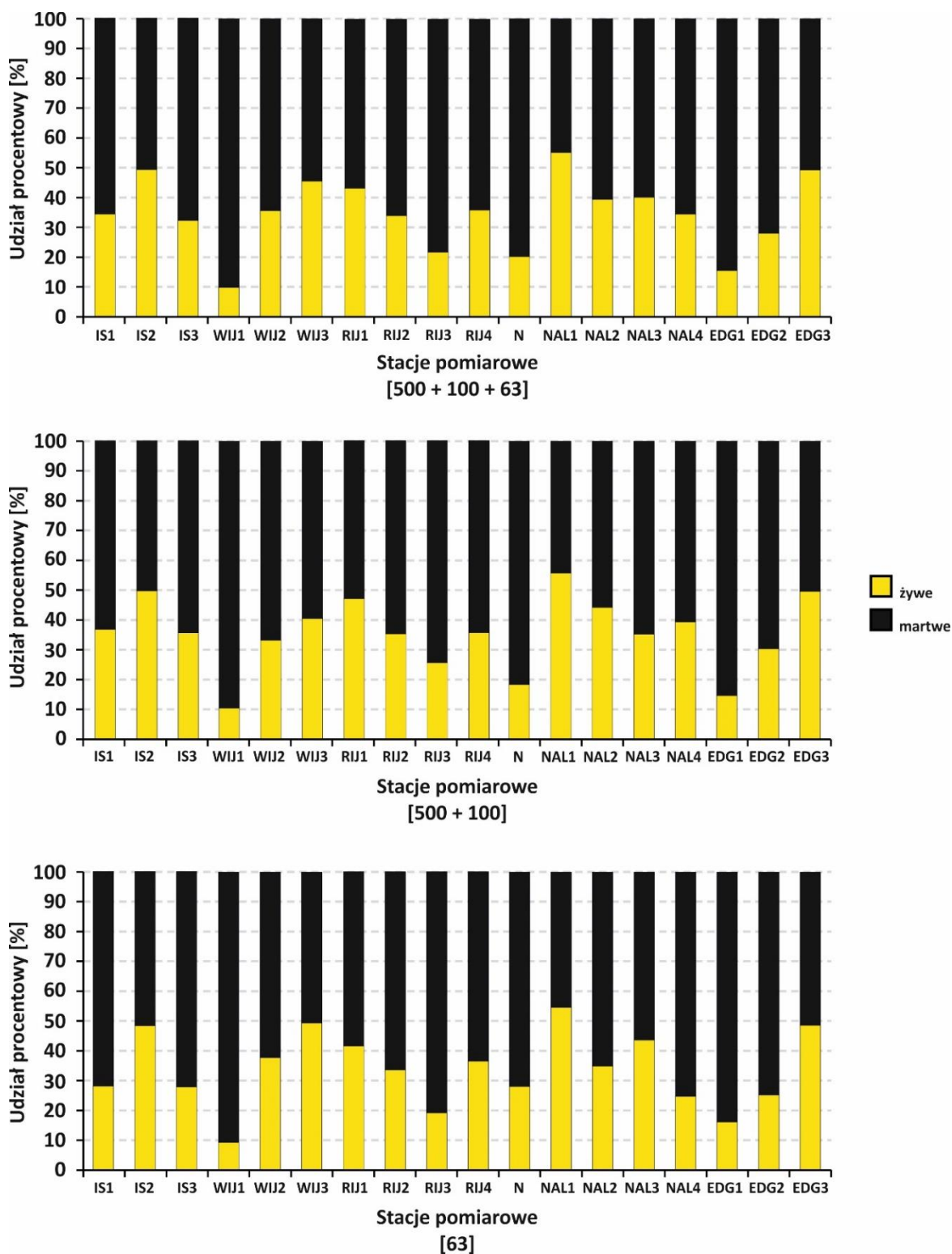
Wschodnia Edgeøya charakteryzowała się najniższą liczebnością otwornic od 47 do 152 os./g, która wzrastała wraz z oddalaniem się od lodowca. Osobniki aglutynujące pojawiły się licznie na stacji EDG 3. Indeks H' wynosił od 1,1 do 2,6, najwyższą wartość osiągając na stacji EDG 3 (Ryc. 5.4 A).

Pośród otwornic wyseparowanych z osadu na większości stacji pomiarowych w obu frakcjach wielkościowych osadu dominowały osobniki wapienne, liczebność otwornic była porównywalna i nie różniła się wyraźnie pomiędzy frakcjami. Bioróżnorodność różniła się nieznacznie dla poszczególnych frakcji. Indeks H' osiągał wyższe wartości we frakcji > 100 µm niż > 63 µm (Ryc. 5.4 B i C).



Ryc. 5.4. Zmiany liczebności otwornic bentosowych (wapiennych oraz aglutynujących) oraz bioróżnorodność Shannona-Wienera (H') w: Isfjorden (IS), Wijdefjorden (WIJ), Rijpfjorden (RIJ), północnej stacji N (N), Południowo-wschodnim Nordaustlandet (NAL) oraz Wschodniej Edgeøya (EDG) na poszczególnych stacjach pomiarowych. Frakcje wielkościowe osadu (>500 μm , 500-100 μm , 100-63 μm) są oznaczone cyframi w nawiasach kwadratowych.

Wśród otwornic wapiennych na większości stacji dominowały martwe osobniki (51 – 90%), za wyjątkiem stacji NAL 1 gdzie osobniki żywe stanowiły powyżej 50%: odpowiednio 56% i 55 % we frakcji $> 100 \mu\text{m}$ i $> 63 \mu\text{m}$, oraz stacji EDG 3 (50% osobników żywych w obu frakcjach wielkościowych) i IS 2 (50% osobników żywych we frakcji $> 100 \mu\text{m}$). Najmniej żywych otwornic odnotowano na stacji WIJ 1 gdzie w obu frakcjach zabarwione osobniki stanowiły poniżej 10% (Ryc. 5.5).

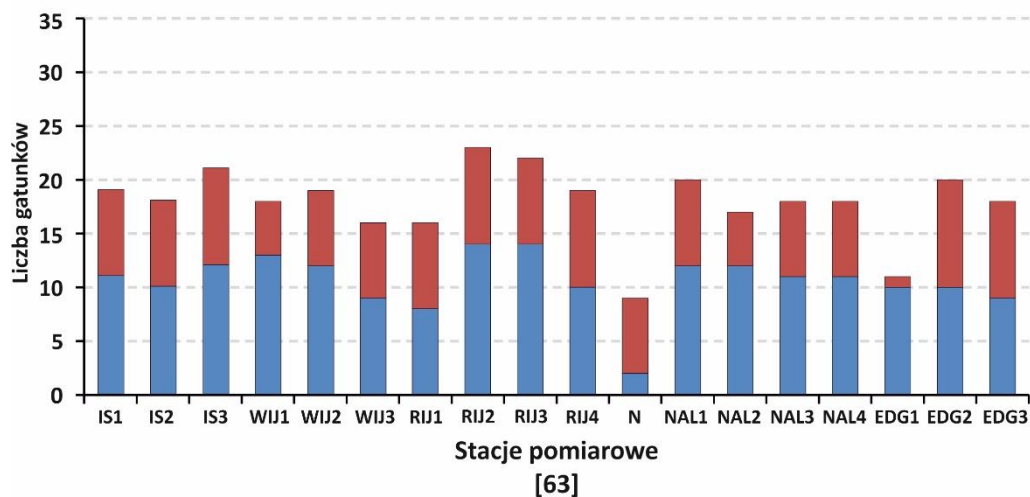
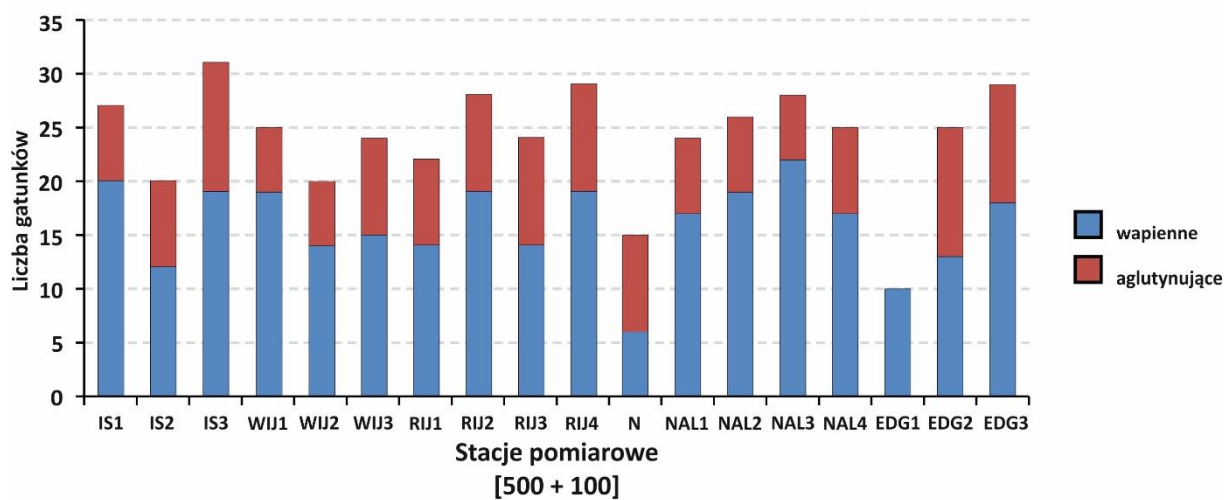
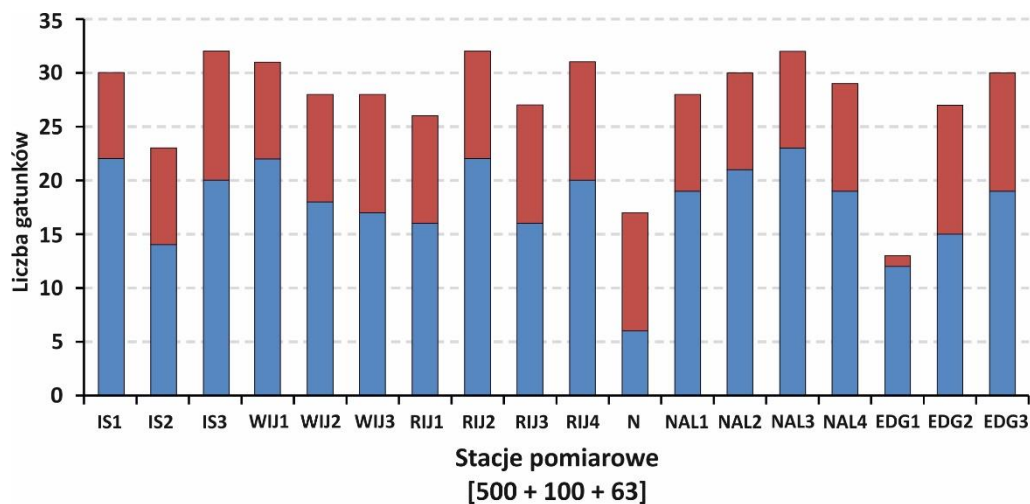


Ryc. 5.5. Zmiany liczebności wapiennych otwornic bentosowych (żywych oraz martwych) w: Isfjorden (IS), Wijdefjorden (WIJ), Rijpfjorden (RIJ), północnej stacji N (N), Południowo-wschodnim Nordaustlandet (NAL) oraz Wschodniej Edgeøya (EDG) na poszczególnych stacjach pomiarowych. Frakcje wielkościowe osadu (>500 μm, 500-100 μm, 100-63 μm) są oznaczone cyframi w nawiasach kwadratowych.

5.3.2 Skład gatunkowy fauny otwornicowej

Na większości stacji dominowały gatunki wapienne, za wyjątkiem stacji N gdzie zaobserwowano więcej gatunków aglutynujących. Największa liczba gatunków została odnotowana na stacjach RIJ 2, IS 3 oraz NAL 3 (odpowiednio: 22, 20 i 23 taksony wapienne oraz 10, 12 i 9 aglutynujących). We frakcji > 100 μm najwięcej gatunków obserwowano na stacji IS 3 (19 wapiennych i 12 aglutynujących), a najmniej na stacji EDG 1 – wyłącznie 10 gatunków wapiennych. We frakcji > 63 μm również największą liczbę gatunków zanotowano na stacji IS 3 (12 wapiennych i 9 aglutynujących), a najmniejszą na stacji N (2 wapienne oraz 7 aglutynujących).

W fiordach liczba gatunków była nieznacznie wyższa na większości stacji pomiarowych w porównaniu do tych zlokalizowanych na przedpolach lodowców. Na wszystkich stacjach pomiarowych we frakcji > 100 μm zanotowano więcej gatunków niż we frakcji > 63 μm . Na stacjach zlokalizowanych na przedpolach lodowców liczba gatunków rosła wraz z oddalaniem się od ich czół (za wyjątkiem stacji NAL 4), w fiordach nie zaobserwowano podobnego trendu (Ryc. 5.6).



Ryc. 5.6. Zmiany liczby gatunków otwornic bentosowych (wapiennych oraz aglutynujących) w: Isfjorden (IS), Wijdefjorden (WIJ), Rijpfjorden (RIJ), północnej stacji N (N), Południowo-wschodnim Nordaustlandet (NAL) oraz Wschodniej Edgeøya (EDG) na poszczególnych stacjach pomiarowych. Frakcje wielkościowe osadu (>500 μm, 500-100 μm, 100-63 μm) są oznaczone cyframi w nawiasach kwadratowych.

Największą liczbę dominujących gatunków odnotowano na stacjach RIJ 2, RIJ 3, IS 2 oraz EDG 3 (Ryc. 5.7). Najmniej dominantów pojawiło się na stacji N. Wyróżnia ją fakt, że jako jedyna była zdominowana przez jeden gatunek *Trochammina nana*, który stanowił 75% otwornic (Ryc. 5.7 D).

Gatunki oportunistyczne dominowały na niemal wszystkich stacjach pomiarowych (za wyjątkiem RIJ 4 oraz N), największy ich udział obserwowano na stacjach zlokalizowanych po wschodniej stronie Svalbardu (Nordaustlandet oraz Edgeøya), gdzie odnotowano więcej otwornic z gatunku *Cassidulina reniforme* (od 11% do 55%; Ryc. 5.7 E i F). W Isfjorden *C. reniforme* stanowiła od 6% (IS 2) do 19% na zewnętrznej stacji IS 3 (Ryc. 5.7 A). W Wijdefjorden liczebność *C. reniforme* była wyrównana, gatunek ten stanowił co najmniej 19% (Ryc. 5.7 B). W Rijpfjorden *C. reniforme* pojawiła się na wszystkich stacjach wewnętrznych fiordu za wyjątkiem jego ujścia, stanowił od 12% (RIJ 1) do 27% na stacji RIJ 2 (Ryc. 5.7 C). Na stacjach zlokalizowanych na przedpolu Nordaustlandet liczebność *C. reniforme* wahała się od 11% (NAL 3) do 28% na stacji NAL 1 usytuowanej przed czołem lodowca (Ryc. 5.7 E). Najwyższa liczebność gatunku *C. reniforme* spośród całego obszaru badawczego została odnotowana na stacji EDG 1 (55%), liczba osobników malała w miarę oddalania się od czoła lodowca (Ryc. 5.7 F). Fiordy zachodniego Svalbardu (Isfjorden oraz Wijdefjorden) były zdominowane przez gatunek *Elphidium clavatum* (od 9% do 34%; Ryc. 5.7 A i B). W Isfjorden liczebność *E. clavatum* maleje w kierunku ujścia fiordu (od 9% do 15%; Ryc. 5.7 A). Na stacjach zlokalizowanych w Wijdefjorden *E. clavatum* stanowił od 18% (WIJ 2) do 34% w ujściu fiordu (Ryc. 5.7 B). *E. clavatum* nie pojawił się w ujściu Rijpfjorden, na pozostałych stacjach stanowił od 8% do 12% (RIJ 2; Ryc. 5.7 C). Na stacjach Nordaustlandet gatunek *E. clavatum* stanowił od 24% do 34% (NAL 4; Ryc. 5.7 E). *E. clavatum* stanowił 26% na stacji EDG 1 usytuowanej bezpośrednio przed lodowcem, liczebność malała w miarę oddalania się od czoła lodowca (Ryc. 5.7 F).

Cibicidoides lobatulus jest to gatunek który wystąpił na każdej stacji pomiarowej (Zał. 1) i był gatunkiem dominującym na 10 stacjach. Jako dominant pojawił się na stacjach IS 1 (17%), IS 3 (21%), WIJ 1 (29%), WIJ 2 (35%), RIJ 3 (6%), NAL 1 (24%), NAL 2 (27%), NAL 3 (11%), EDG 1 (13%), EDG 2 (6%).

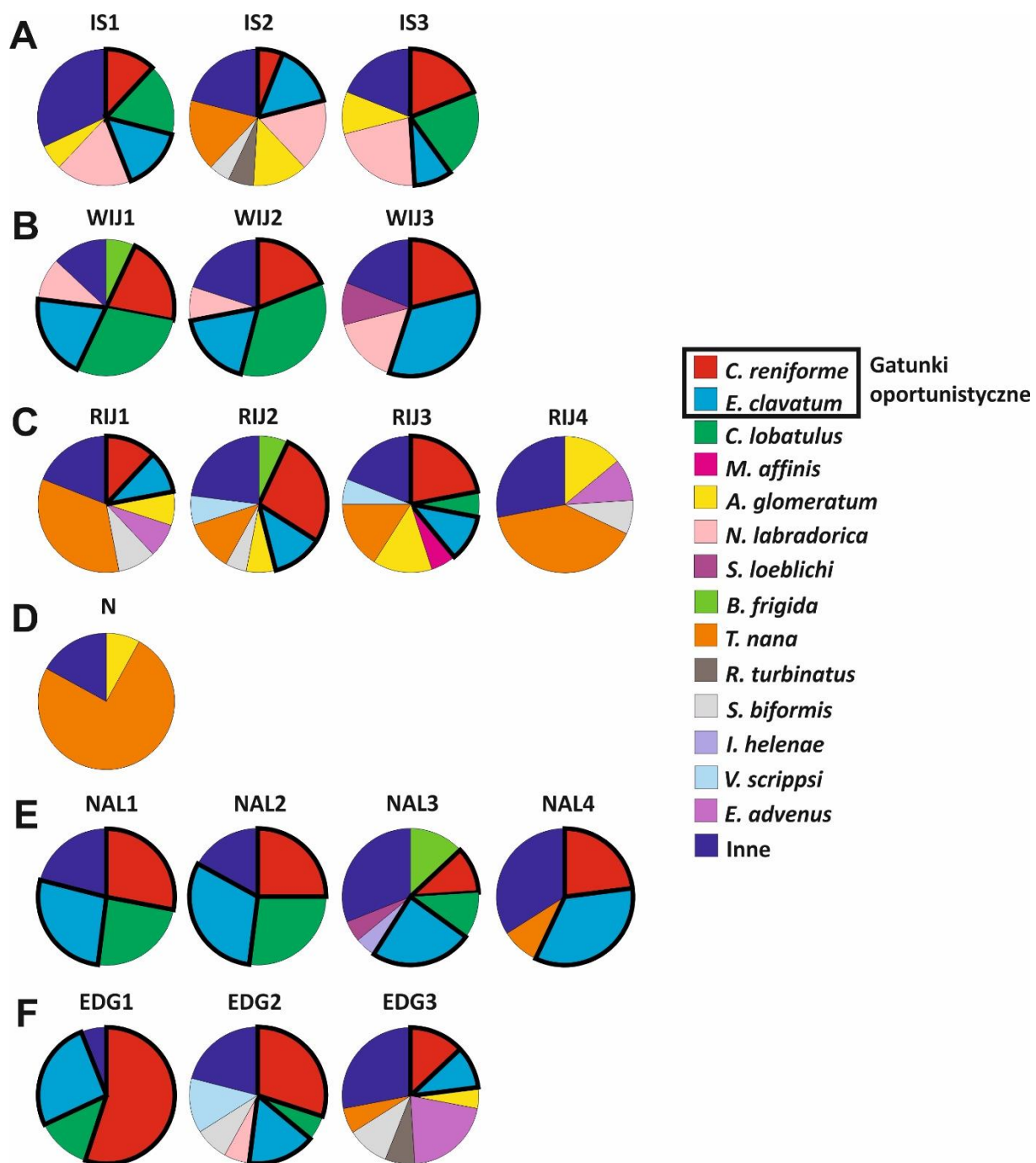
Melonis affinis (6%) odnotowano jako dominanta tylko na stacji RIJ 3 (Ryc. 5.7 C), wystąpił jednak mniej licznie na niektórych stacjach pomiarowych: IS 1, WIJ 1, WIJ 2, RIJ 1, RIJ 2, RIJ 4, NAL 2, NAL 3 oraz NAL 4. *M. affinis* nie pojawił się na stacji N oraz Edgeøya (Zał. 1).

Adercotryma glomeratum został odnotowany na stacjach IS 1 (6%), IS 2 (13%), IS 3 (10%), RIJ 1 (8%), RIJ 2 (7%), RIJ 3 (14%), RIJ 4 (14%), N (8%) oraz EDG 3 (> 5%; Ryc. 5.7 A, C, D oraz F). Jednak mniej licznie wystąpił niemal na wszystkich stacjach pomiarowych za wyjątkiem EDG 1 (Załącznik 1).

Nonionellina labradorica dominowała na wszystkich stacjach zachodniego Svalbardu w Isfjorden oraz Wijdefjorden (odpowiednio: < 17% oraz < 8%; Ryc. 5.7 A i B). Został odnotowany również na wschodniej stacji EDG 2 (6%; Ryc. 5.7 F).

Trochammina nana był dominantem na stacjach północnego Svalbardu, stanowił 75% wszystkich gatunków na stacji N oraz od 12% (RIJ 2) do 40% (RIJ 4) na wszystkich stacjach w Rijpfjorden (Ryc. 5.7 C i D). W mniejszym stopniu dominował również na stacjach IS 2, NAL 4 oraz EDG 3 (od 6% do 17%; Ryc. 5.7 A, E i F).

Stainforthia loeblichii pojawiła się jako gatunek dominujący na 2 stacjach (WIJ 3: 10% oraz NAL 3: > 5%; Ryc. 5.7 B i E). *Buccella frigida* była dominującym gatunkiem na stacjach: WIJ 1 (7%; Ryc. 5.7 B), RIJ 2 (7%; Ryc. 5.7 C) oraz NAL 3 (13%; Ryc. 5.7 E). *Recurvoides turbinatus* dominował na dwóch stacjach: IS 2 (> 5%; Ryc. 5.7 A) oraz EDG 3 (7%; Ryc. 5.7 F). *Spiroplectammina biformis* był dominującym gatunkiem na stacjach IS 2 (> 5%; Ryc. 5.7 A), RIJ 1 (9%), RIJ 2 (> 5%), RIJ 4 (8%; Ryc. 5.7 C), EDG 2 (8%) oraz EDG 3 (10%; Ryc. 5.7 F). *Islandiella helenae* stanowiła > 5% jedynie na stacji NAL 3 (Ryc. 5.7 E). *Verneulinulla scrippsi* wystąpił jako dominant na stacjach RIJ 2, RIJ 3 oraz EDG 2 stanowiąc odpowiednio: 7%, 6% oraz 13% wszystkich gatunków (Ryc. 5.7 C i F). Gatunek *Eggerelloides advenus* dominował na stacjach: RIJ 1 (8%), RIJ 4 (10%) oraz EDG 3 (21%; Ryc. 5.7; C i E).

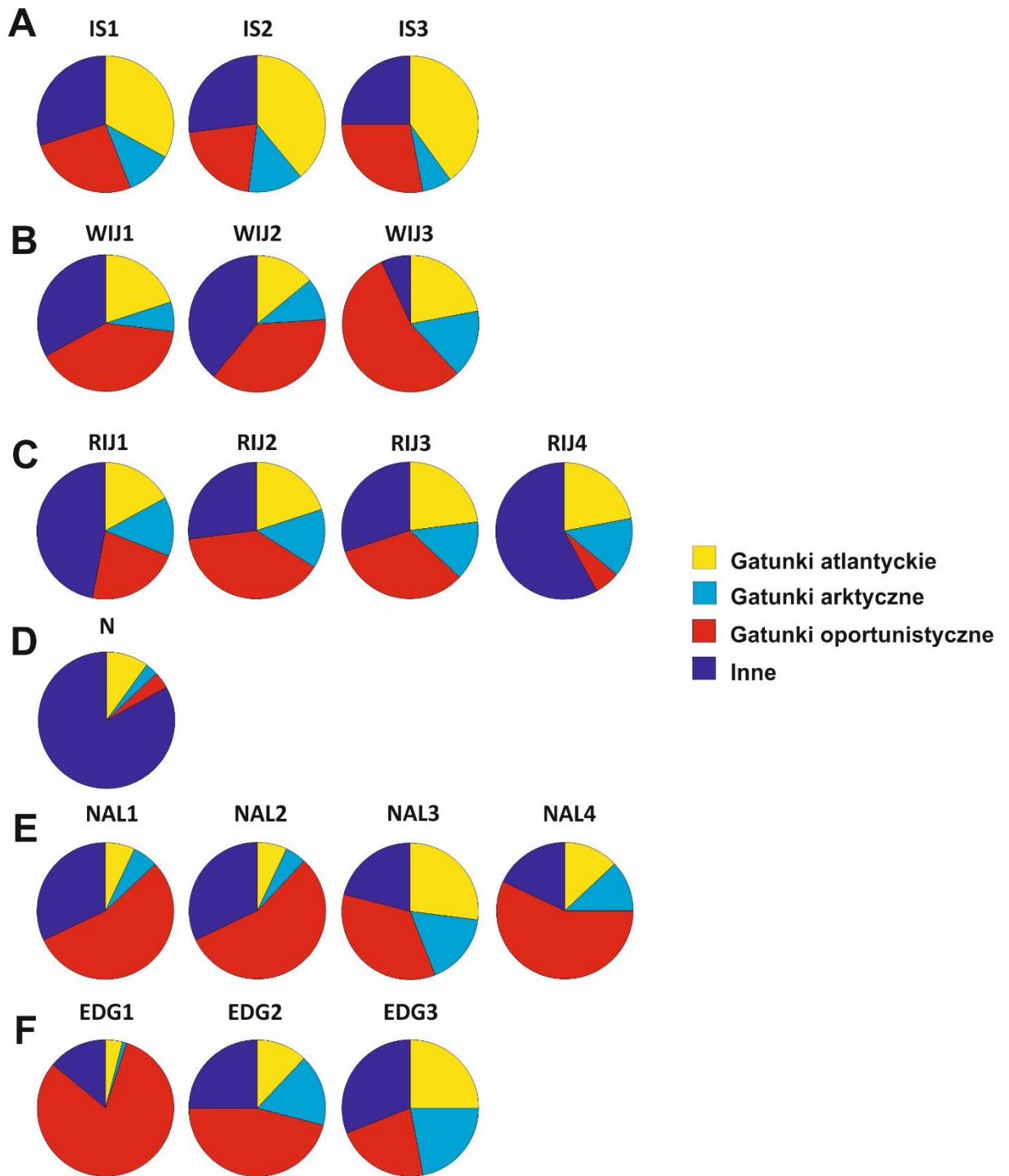


Ryc. 5.7. Dominujące gatunki otwornic bentosowych w: Isfjorden (IS), Wijdefjorden (WIJ), Rippfjorden (RIJ), północnej stacji N (N), Południowo-wschodnim Nordaustlandet (NAL) oraz Wschodniej Edgeøya (EDG) na poszczególnych stacjach pomiarowych.

Grupa gatunków oportunistycznych wyraźnie dominowała na stacjach zlokalizowanych po wschodniej części Svalbardu na przedpolach lodowców (Ryc. 5.8 E i F). Najwięcej gatunków oportunistycznych odnotowano na EDG 1 (81%), ich liczba malała w miarę oddalania się od czoła lodowca (Ryc. 5.8 F). W Isfjorden liczebność tej grupy była dość wyrównana, w Wijdefjorden liczebność wzrastała w stronę ujścia fiordu (Ryc. 5.8 A i B). W Rijpfjorden udział oportunistów był inny na każdej stacji pomiarowej (Ryc. 5.8 C). Najmniej gatunków oportunistycznych obserwowano na stacji N (4%), gdzie grupa innych gatunków stanowiła 83% (Ryc. 5.8 D).

Szczególnie wysoką liczebność gatunków atlantyckich obserwowano w Isfjorden. Wzrastała w kierunku ujścia fiordu i stanowiła największą część wszystkich taksonów na stacji IS 3 (40%; Ryc. 5.8 A). W Wijdefjorden oraz Rijpfjorden udział grupy atlantyckiej był dość wyrównany, stanowiła od 14% do 23% na poszczególnych stacjach (Ryc. 5.8 B i C). Gatunki atlantyckie na stacji N stanowiły 10% wszystkich taksonów (Ryc. 5.8 D). Stacje zlokalizowane na wschodniej części Svalbardu (Nordaustlandet oraz Edgeøya) wykazywały ten sam trend wzrostu udziału grupy atlantyckiej w miarę oddalania się od czoła lodowca (za wyjątkiem NAL 4; Ryc. 5.8 E i F). Najmniejszą liczbę gatunków atlantyckich spośród wszystkich stacji pomiarowych odnotowano na EDG 1 (4%; Ryc. 5.8 F).

Gatunki arktyczne w Isfjorden stanowiły od 7% do 13% (Ryc. 5.8 A). W Wijdefjorden notowano wzrost udziału tej grupy w kierunku ujścia fiordu (od 7% do 16%; Ryc. 5.8 B). Rijpfjorden charakteryzował się identyczną liczebnością gatunków arktycznych na wszystkich stacjach (14%; Ryc. 5.8 C). Na stacji N odnotowano tylko 3 % osobników z grupy arktycznej. Stacje zlokalizowane na przedpolu Nordaustlandet były zróżnicowane pod względem udziału arktycznej fauny otwornicowej, największy udział miały one na stacji NAL 3 (17%; Ryc. 5.8 E). W rejonie wschodniej Edgeøya obserwowano wzrost liczby gatunków arktycznych wraz z oddalaniem się od czoła lodowca, jednocześnie na EDG 3 odnotowano największy udział z pośród wszystkich stacji pomiarowych (22%), natomiast na EDG 1 najmniejszy (1%; Ryc. 5.8 F).



Ryc. 5.8. Grupy wskaźnikowe gatunków otwornic bentosowych w: Isfjorden (IS), Wijdefjorden (WIJ), Rippfjorden (RIJ), północnej stacji N (N), Południowo-wschodnim Nordaustlandet (NAL) oraz Wschodniej Edgeøya (EDG) na poszczególnych stacjach pomiarowych.

Analiza wieloczynnikowa pozwoliła na określenie podobieństwa składu gatunkowego i liczebności otwornic pomiędzy poszczególnymi stacjami pomiarowymi z których pobierano materiał badawczy. Uzyskane diagramy wiążkowe wykazały małe podobieństwo między stacją N a pozostałymi stacjami (Ryc. 5.9 i 5.10).

Na diagramie przedstawiającym podobieństwo wszystkich otwornic (żywych oraz martwych) dla skumulowanych frakcji ($500 + 100 + 63 \mu\text{m}$) widać również małe podobieństwo stacji EDG 1 w porównaniu do pozostałych (Ryc. 5.9). Z pozostałych stacji wydzieliły się dwie grupy w obrębie których zaobserwowano podobieństwo na poziomie 60%:

- 1) EDG 3, RIJ 1, RIJ 4, IS 2, IS 1, IS 3, RIJ 2, RIJ 3, NAL 3, NAL 4
- 2) NAL 1, NAL 2, WIJ 1, WIJ 2, EDG 2, WIJ 3

Analiza podobieństwa dla frakcji $> 100 \mu\text{m}$ wyróżnia dwie główne grupy o podobieństwie $< 60\%$:

- 1) RIJ 1, RIJ 4, NAL 4, RIJ 2, RIJ 3
- 2) EDG 2, WIJ 3, NAL 1, NAL 2, WIJ 1, WIJ 2, NAL 3, IS 1, IS 2, IS 3

Dodatkowo, stacja EDG3 grupuje się razem ze stacją N, natomiast stacja EDG 1 oddziela się od pozostałych.

Diagram obrazujący podobieństwo frakcji $> 63 \mu\text{m}$, również rozdziela stacje na dwie grupy:

- 1) RIJ 2, RIJ 3, IS 1, IS 3, EDG 3, RIJ 1, RIJ 4, IS 2, NAL 2
- 2) WIJ 1, WIJ 2, NAL 1, NAL 3, EDG 2, WIJ 3, EDG 1, NAL 4

w wysokim stopniu je różnicując (Ryc. 5.9).

Diagram dla skumulowanych frakcji przedstawiający podobieństwo tylko dla żywych (zabarwionych) otwornic, wskazuje na niewielkie podobieństwo stacji RIJ 4 oraz N do pozostałych stacji (Ryc. 5.10). Razem grupują się dwie stacje: EDG 1 oraz NAL 4. Pozostałe stacje dzielą się na dwie grupy na poziomie podobieństwa 60%:

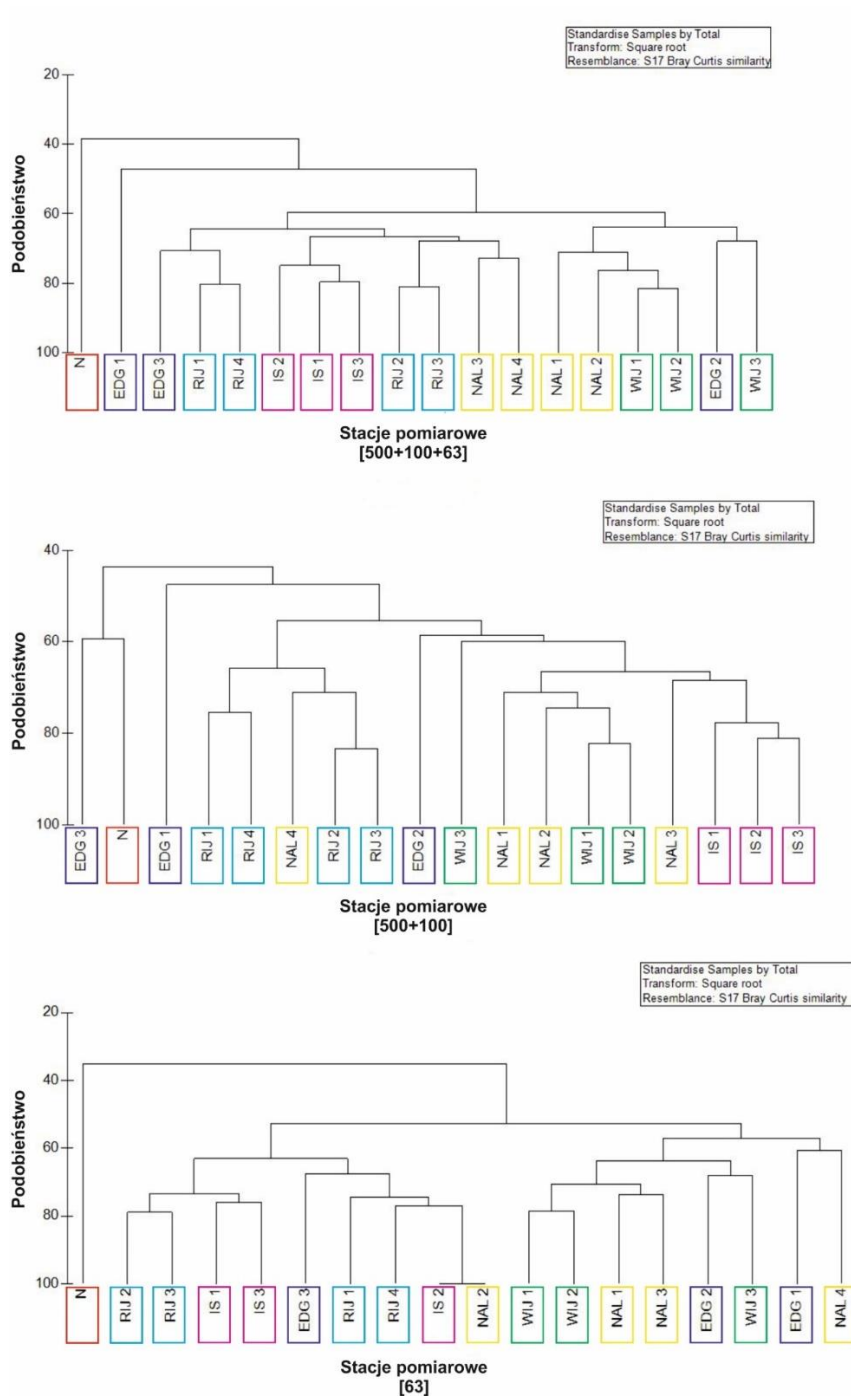
- 1) RIJ 2, NAL 3, RIJ 1, RIJ 3, NAL 2, NAL 1, WIJ 2, WIJ 3, IS 3, IS 1, IS 2
- 2) EDG 3, EDG 2, WIJ 1

Wskazuje to na wyraźny brak podobieństwa wszystkich stacji EDG w stosunku do pozostałych.

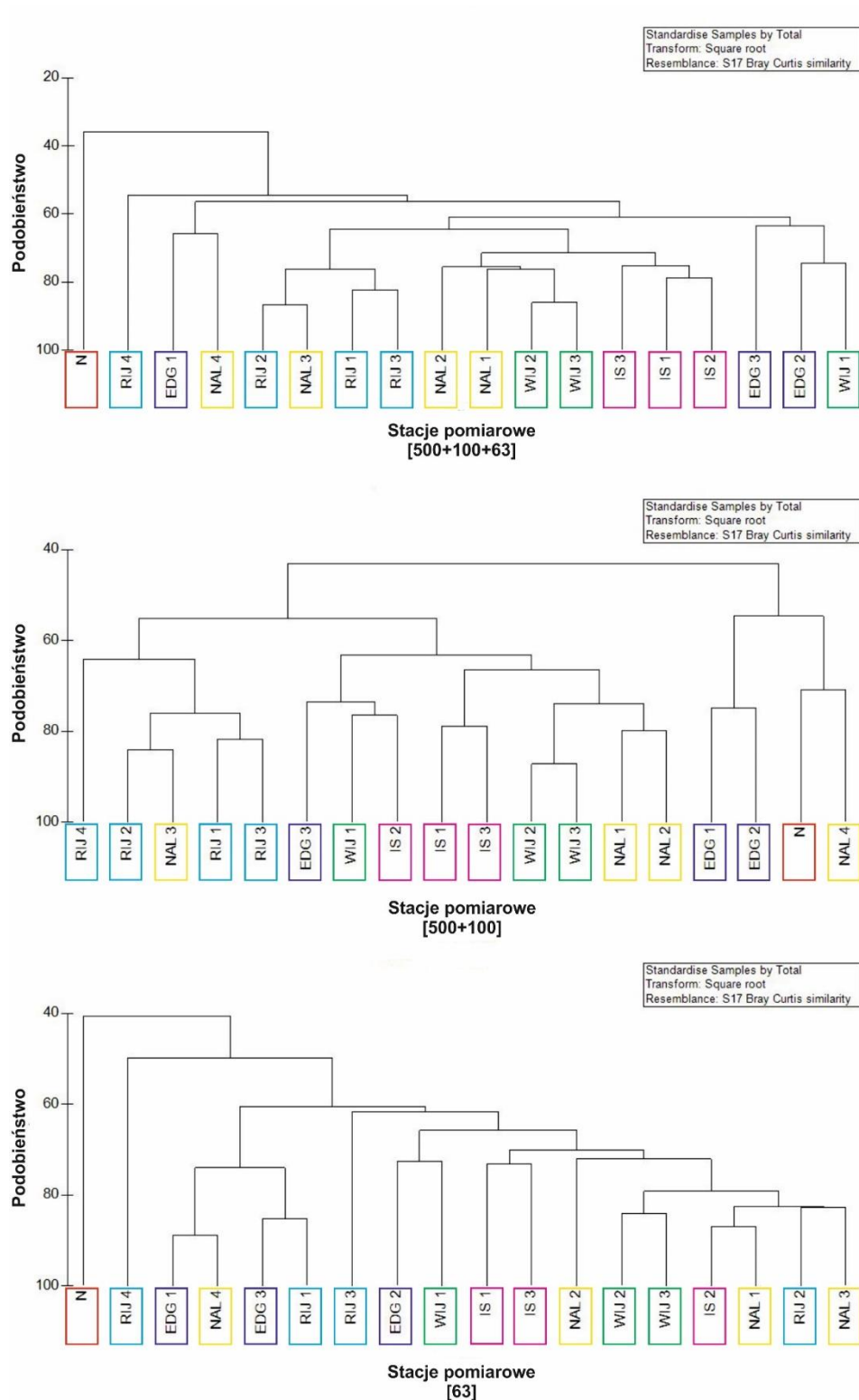
Rozkład dla żywych osobników we frakcji osadu $> 100 \mu\text{m}$ wydziela grupę (N, NAL 4, EDG 1, EDG 2) o niewielkim podobieństwie do pozostałych. Reszta stacji podzieliła się na kolejne dwie grupy na poziomie ponad 50%:

- 1) RIJ 4, RIJ 2, NAL 3, RIJ 1, RIJ 3
- 2) EDG 3, WIJ 1, IS 2, IS 1, IS 3, WIJ 2, WIJ 3, NAL 1, NAL 2

Diagram podobieństwa dla frakcji osadu 63 μm , różnicuje stacje w wysokim stopniu uniemożliwiającym wyodrębnienie grup o wysokim poziomie podobieństwa (Ryc. 5.10).



Ryc. 5.9. Podobieństwo składu gatunkowego i liczebności wszystkich otwornic (żywych oraz martwych) w: Isfjorden (IS), Wijdefjorden (WIJ), Rijpfjorden (RIJ), północnej stacji N (N), Południowo-wschodnim Nordaustlandet (NAL) oraz Wschodniej Edgeøya (EDG) na poszczególnych stacjach pomiarowych. Frakcje wielkościowe osadu (>500 µm, 500-100 µm, 100-63 µm) są oznaczone cyframi w nawiasach kwadratowych. Obrazowania w różnych kolorach grupują stacje pomiarowe należące do konkretnego obszaru badań.



Ryc. 5.10. Podobieństwo składu gatunkowego i liczebności żywych otwornic w: Isfjorden (IS), Wijdefjorden (WIJ), Rijpfjorden (RIJ), północnej stacji N (N), Południowo-wschodnim Nordaustlandet (NAL) oraz Wschodniej Edgeøya (EDG) na poszczególnych stacjach pomiarowych. Frakcje wielkościowe osadu (>500 µm, 500-100 µm, 100-63 µm) są oznaczone cyframi w nawiasach kwadratowych. Obramowania w różnych kolorach grupują stacje pomiarowe z jednej lokalizacji.

Analiza głównych składowych (PC) wyjaśniła 90,69% całkowitej zmienności dla zbioru wszystkich otwornic bentosowych (żywych oraz martwych) z wykorzystaniem 4 komponentów. Każdy PC był określany przez gatunek dominujący oraz gatunki akcesoryczne. PC były określane jako zgrupowania otwornicowe (FA) nazwane od gatunków dominujących (Tab. 5.1; Ryc. 5.11).

1) *C. lobatulus* FA

Zgrupowanie odnotowano na wszystkich stacjach zachodniego Svalbardu oraz niektórych zlokalizowanych u wschodniego wybrzeża, zbiorowiska nie obserwowano na stacjach północnego Svalbardu. Zgrupowanie notowano na stacjach IS 1, IS 2, IS 3, WIJ 1, WIJ 2, WIJ 3, NAL 1, NAL 2, NAL 3 oraz EDG 1. Gatunkiem dominującym był *C. lobatulus*, tłumaczący 30,81% całkowitej zmienności zbiorowiska (Tab. 5.1 oraz Ryc. 5.11 A) wraz z gatunkami akcesorycznymi, które osiągały wartości (ang. *scores*) dodatnie: *N. labradorica*, *E. clavatum*, *C. reniforme*, *B. frigida* oraz wartości ujemne: *V. scrippsi* i *E. advenus* (Tab. 5.1).

2) *T. nana* FA

Zbiorowisko pojawiło się na wszystkich stacjach północnego Svalbardu oraz jednej stacji zlokalizowanej na jego zachodniej stronie. Zgrupowanie obserwowano na stacjach IS 2, RIJ 1, RIJ 2, RIJ 3, RIJ 4 oraz N. Dominującym gatunkiem w zgrupowaniu był *T. nana*, który tłumaczył 21,35% zmienności zbiorowiska (Tab. 5.1 oraz Ryc. 5.11 B), wraz z gatunkami akcesorycznymi: *A. glomeratum* i *S. biformis* (Tab. 5.1), o dodatnich wartościach *scores*.

3) *C. reniforme* FA

Odnutowano na niektórych stacjach zachodniego, północnego oraz wschodniego Svalbardu. Zgrupowanie było istotne dla stacji WIJ 1, WIJ 2, WIJ 3, RIJ 2, RIJ 3, NAL 1, NAL 2, NAL 3, NAL 4, EDG 1 oraz EDG 2. Gatunkiem dominującym był *C. reniforme*, który tłumaczył 27,42% całkowitej zmienności zbiorowiska (Tab. 5.1 oraz Ryc. 5.11 C), z gatunkami dodatkowymi o wartościach dodatnich: *E. clavatum*, *V. scrippsi* oraz ujemnych: *A. glomeratum*, *R. turbinatus* i *N. labradorica* (Tab. 5.1).

4) *E. clavatum* FA

Zgrupowanie wystąpiło na niektórych stacjach zachodniego oraz wschodniego Svalbardu, nie pojawiło się na jego północnym wybrzeżu. Zbiorowisko zostało odnotowane na stacjach IS 2, WIJ 3, NAL 3, NAL 4, EDG 3. *E. clavatum* był gatunkiem dominującym, tłumaczącym 11,10% całkowitej zmienności zbiorowiska (Tab. 5.1 oraz Ryc. 5.11 D) wraz z gatunkami akcesorycznymi, które osiągały wartości dodatnie: *N. labradorica*, *E. advenus*,

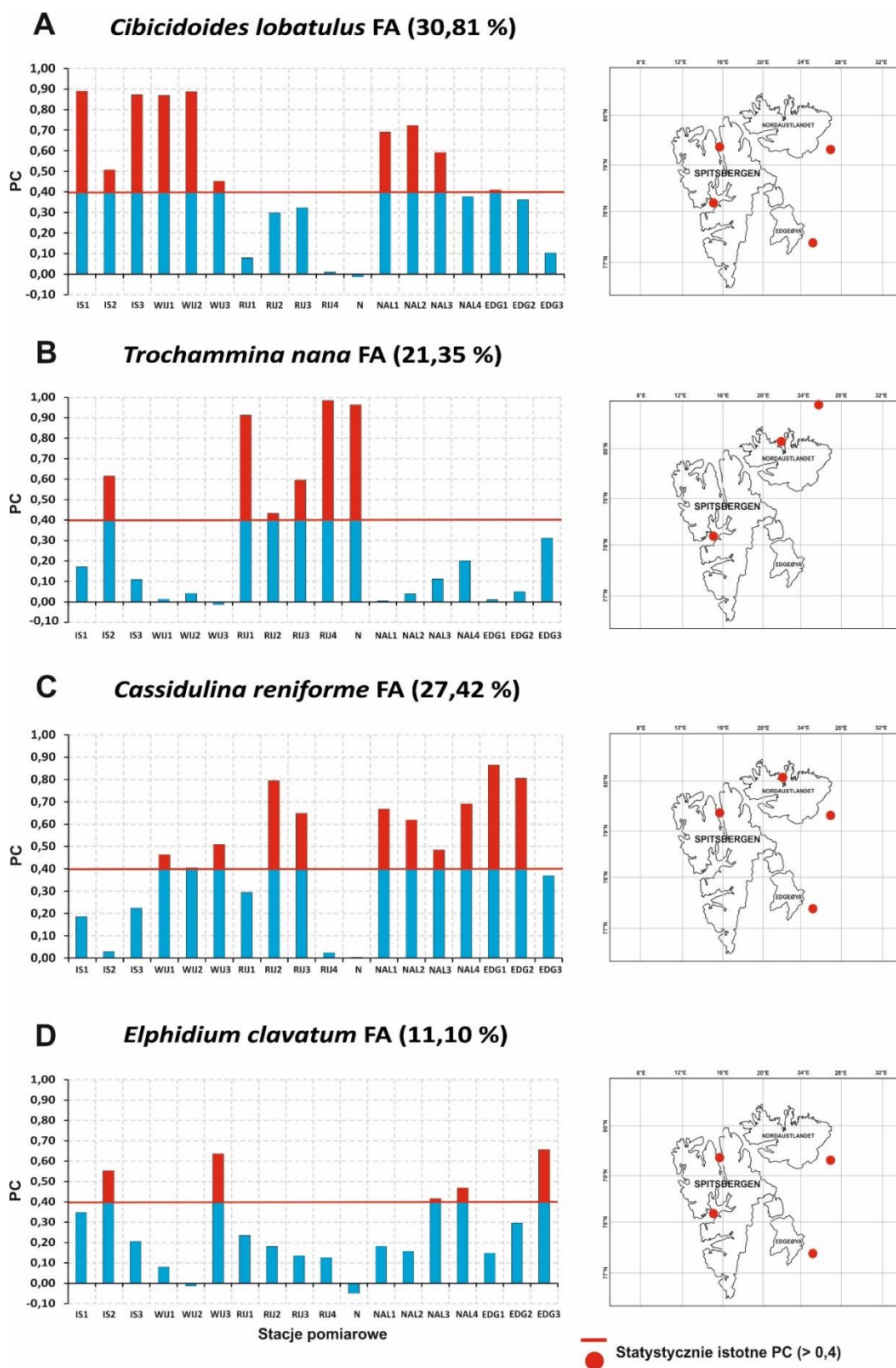
R. turbinatus, *S. biformis*, *S. loeblichii*, *A. glomeratum* oraz wartości ujemne: *C. lobatulus* oraz *T. nana* (Tab. 5.1),

Tab. 5.1. Analiza wieloczynnikowa zbiorowisk otwornic bentosowych. Najistotniejsze gatunki dla danego FA są oznaczone poprzez podkreślenie oraz pogrubienie czcionki. Analiza PC została przeprowadzona na wszystkich (żywych oraz martwych) otwornicach bentosowych.

	<i>C. lobatulus</i>	<i>T. nana</i>	<i>C. reniforme</i>	<i>E. clavatum</i>
	FA	FA	FA	FA
Całkowita wariancja	30,81%	21,35%	27,42%	11,10%
<i>Astacolus hyalacrulus</i>	-0,22	-0,23	-0,13	-0,28
<i>Astrononion hamadaense</i>	-0,21	-0,21	-0,14	-0,27
<i>Bolivina robusta</i>	-0,19	-0,22	-0,15	-0,27
<i>Bolivinellina</i>				
<i>pseudopunctata</i>	-0,15	-0,38	0,00	0,32
<i>Buccella frigida</i>	0,80	-0,04	0,16	0,20
<i>Buccella tenerrima</i>	-0,22	-0,22	-0,13	-0,28
<u>Cassidulina reniforme</u>	1,08	0,30	6,85	0,06
<u>Cibicidoides lobatulus</u>	6,43	-0,01	-0,18	-3,49
<i>Dentalina frobisherensis</i>	-0,23	-0,23	-0,13	-0,26
<i>Discorbis vilardeboanus</i>	-0,23	-0,23	-0,09	-0,30
<i>Elphidium bartletti</i>	-0,20	-0,23	-0,14	-0,25
<u>Elphidium clavatum</u>	2,34	-0,42	2,65	4,52
<i>Elphidium sp.</i>	-0,21	-0,23	-0,13	-0,29
<i>Favulina melo</i>	-0,22	-0,23	-0,13	-0,29
<i>Favulina squamosa</i>	-0,22	-0,23	-0,13	-0,29
<i>Fissurina marginata</i>	-0,21	-0,23	-0,12	-0,29
<i>Fissurina sp.</i>	-0,23	-0,21	-0,11	-0,31
<i>Glandulina laevigata</i>	-0,22	-0,22	-0,13	-0,29
<i>Globobulimina arctica</i>	-0,17	-0,22	-0,18	-0,23
<i>Globobulimina turgida</i>	-0,17	-0,22	-0,14	-0,22
<i>Hyalinea balthica</i>	-0,20	-0,22	-0,14	-0,28
<i>Hyalinonetrion gracillimum</i>	-0,04	-0,12	-0,12	0,03
<i>Islandiella helenae</i>	0,01	-0,19	0,07	0,33
<i>Islandiella norcrossi</i>	0,05	-0,12	0,02	-0,44

<i>Lagena baggi</i>	-0,22	-0,22	-0,12	-0,28
<i>Lagena</i> sp.	-0,22	-0,22	-0,13	-0,28
<i>Lagena striata</i>	-0,22	-0,22	-0,13	-0,29
<i>Melonis affinis</i>	-0,39	0,30	0,46	-0,27
<i>Miliammina</i> sp.	-0,22	-0,22	-0,13	-0,28
<i>Nonionellina labradorica</i>	3,75	-0,10	-3,24	3,36
<i>Oolina borealis</i>	-0,21	-0,22	-0,11	-0,30
<i>Oolina lineata</i>	-0,22	-0,22	-0,13	-0,28
<i>Parafissurina himatiostoma</i>	-0,22	-0,22	-0,13	-0,29
<i>Parafissurina lateralis</i>	-0,22	-0,23	-0,12	-0,28
<i>Patellina corrugata</i>	-0,22	-0,22	-0,12	-0,29
<i>Procerolagena mollis</i>	-0,23	-0,22	-0,11	-0,26
<i>Pyrgo williamsoni</i>	-0,22	-0,23	-0,12	-0,27
<i>Quinqueloculina arctica</i>	-0,24	-0,16	-0,10	-0,29
<i>Quinqueloculina seminula</i>	-0,23	-0,22	-0,11	-0,29
<i>Quinqueloculina</i> sp.	-0,22	-0,22	-0,13	-0,29
<i>Reussoolina laevis</i>	-0,22	-0,23	-0,13	-0,27
<i>Robertina arctica</i>	-0,21	-0,21	-0,13	-0,28
<i>Stainforthia loeblichii</i>	0,22	-0,14	-0,20	1,43
<i>Trifarina fluens</i>	-0,15	-0,24	-0,16	-0,18
<i>Triloculina trihedra</i>	-0,23	-0,22	-0,09	-0,29
<i>Uvigerina</i> sp.	-0,22	-0,22	-0,13	-0,28
<i>Adercotryma glomeratum</i>	0,82	2,27	-0,77	0,87
<i>Ammodiscus</i> sp.	-0,23	-0,03	-0,11	-0,25
<i>Ammotium cassis</i>	-0,22	-0,22	-0,12	-0,29
<i>Cuneata arctica</i>	-0,39	-0,17	0,03	-0,01
<i>Eggerelloides advenus</i>	-1,28	0,55	-0,31	3,32
<i>Labrospira crassimargo</i>	-0,24	0,11	-0,19	0,50
<i>Leptohalysis catella</i>	-0,22	-0,22	-0,13	-0,29
<i>Recurvoides turbinatus</i>	-0,03	0,18	-0,82	1,71
<i>Reophax regularis</i>	-0,22	-0,18	-0,14	-0,29
<i>Reophax scorpiurus</i>	-0,54	-0,16	0,03	0,42
<i>Siphonaperta agglutinata</i>	-0,23	-0,23	-0,12	-0,27

<i>Spiroplectammina biformis</i>	-0,49	0,88	0,21	1,70
<i>Spiroplectammina</i> sp.	-0,16	-0,04	-0,08	-0,19
<i>Textularia earlandi</i>	-0,35	-0,01	0,14	0,14
<i>Textularia kattegatensis</i>	-0,26	-0,25	-0,04	-0,27
<u>Trochammina nana</u>	-0,24	<u>7,73</u>	-0,11	-0,75
<i>Verneuilinulla scrippsi</i>	-0,82	0,02	1,42	-0,48
<i>Quinqueloculina stalkerii</i>	-0,23	-0,22	-0,09	-0,26



Ryc. 5.11. Analiza głównych składowych dla otwornic bentosowych (żywych oraz martwych) w: Isfjorden (IS), Wijdefjorden (WIJ), Rijpfjorden (RIJ), północnej stacji N (N), Południowo-wschodnim Nordaustlandet (NAL) oraz Wschodniej Edgeøya (EDG) na poszczególnych stacjach pomiarowych.

Analiza głównych składowych wyjaśniła 89,10% całkowitej zmienności dla zbioru żywych otwornic wapiennych z wykorzystaniem 3 komponentów (Tab. 5.2; Ryc. 5.12).

1) *E. clavatum* FA

Zbiorowisko wystąpiło na niektórych stacjach zlokalizowanych u zachodniego oraz północnego wybrzeża Svalbardu, a także na wszystkich stacjach jego wschodniej części. Zgrupowanie obserwowano na stacjach IS 2, WIJ 1, RIJ 1, RIJ 2, RIJ 3, N, NAL 1, NAL 2, NAL 3, NAL 4, EDG 1, EDG 2 oraz EDG 3. Gatunek dominujący *E. clavatum* tłumaczył 70,89% całkowitej zmienności zbiorowiska (Tab. 5.2 oraz Ryc. 5.12 A), wraz z gatunkami akcesorycznymi *C. reniforme* o dodatniej wartości *scores* oraz *C. lobatulus* o wartości ujemnej (Tab. 5.2).

2) *N. labradorica* FA

Obserwowano na niektórych stacjach zachodniego Svalbardu oraz jednej stacji zlokalizowanej na jego wschodnim wybrzeżu, nie pojawiło się na północnej części. Zgrupowanie odnotowano na stacjach IS 1, IS 2, IS 3, WIJ 2, WIJ 3 oraz EDG 3. *N. labradorica* była gatunkiem dominującym, który tłumaczył 10,74% zmienności zbiorowiska (Tab. 5.2 oraz Ryc. 5.12 B), z gatunkami dodatkowymi o wartościach dodatnich: *C. lobatulus*, *E. clavatum* oraz wartości ujemnej: *M. affinis* (Tab. 5.2).

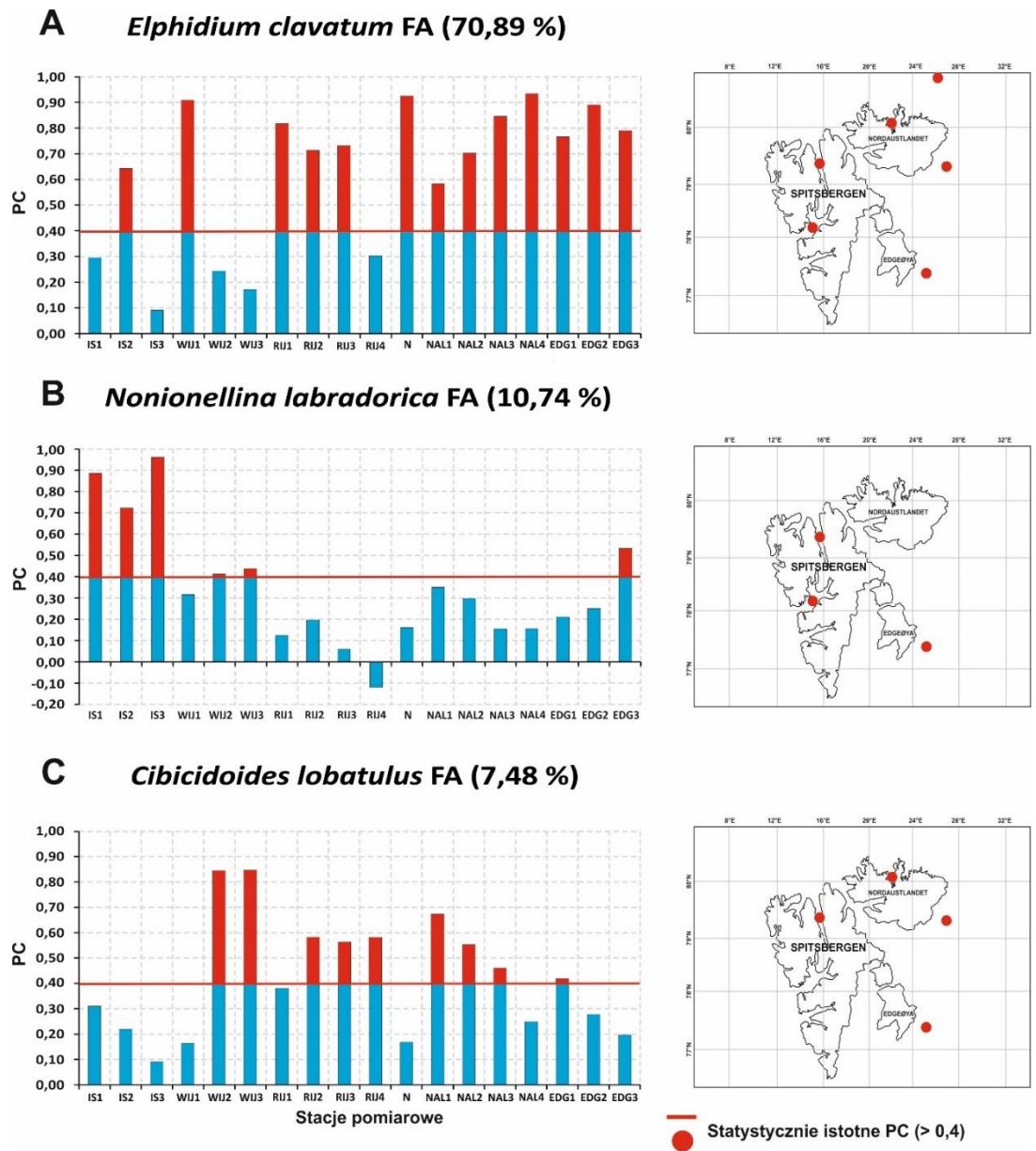
3) *C. lobatulus* FA

Zbiorowisko pojawiło się na niektórych stacjach zachodniego, północnego oraz wschodniego Svalbardu. Zgrupowanie obserwowano dla stacji WIJ 2, WIJ 3, RIJ 2, RIJ 3, RIJ 4, NAL 1, NAL 2, NAL 3 i EDG 1. Gatunkiem dominującym był *C. lobatulus*, który tłumaczył 7,48% zmienności zbiorowiska (Tab. 5.2 oraz Ryc. 5.12 C) wraz z gatunkami akcesorycznymi o wartościach dodatnich: *C. reniforme*, *M. affinis*, *E. clavatum*, *B. frigida* oraz wartości ujemnej: *N. labradorica* (Tab. 5.2).

Tab. 5.2. Analiza wieloczynnikowa zbiorowisk otwornic bentosowych. Najistotniejsze gatunki dla danego FA są oznaczone poprzez podkreślenie oraz pogrubienie czcionki. Analiza PC została przeprowadzona na żywych otwornicach wapiennych.

	<i>E. clavatum</i>	<i>N. labradorica</i>	<i>C. lobatulus</i>
	FA	FA	FA
Całkowita wariancja	70,89%	10,74%	7,48%
<i>Astacolus hyalacrulus</i>	-0,19	-0,27	-0,40
<i>Astrononion hamadaense</i>	-0,19	-0,28	-0,36
<i>Bolivinellina pseudopunctata</i>	-0,06	-0,02	-0,26

<i>Buccella frigida</i>	-0,03	-0,06	0,71
<i>Cassidulina reniforme</i>	0,84	0,42	1,19
<u>Cibicidoides lobatulus</u>	-1,69	1,17	<u>4,17</u>
<i>Dentalina frobisherensis</i>	-0,18	-0,26	-0,41
<i>Discorbis vilardeboanus</i>	-0,18	-0,27	-0,39
<u>Elphidium clavatum</u>	4,63	0,81	0,84
<i>Favulina melo</i>	-0,19	-0,26	-0,40
<i>Fissurina marginata</i>	-0,19	-0,26	-0,40
<i>Globobulimina arctica</i>	-0,20	-0,20	-0,40
<i>Globobulimina turgida</i>	-0,19	-0,24	-0,32
<i>Hyalinea balthica</i>	-0,19	-0,27	-0,40
<i>Hyalinonetrion gracillimum</i>	-0,02	-0,22	-0,24
<i>Islandiella helenae</i>	0,02	-0,21	-0,32
<i>Islandiella norcrossi</i>	-0,19	-0,29	-0,22
<i>Melonis affinis</i>	0,21	-1,49	1,13
<u>Nonionellina labradorica</u>	-0,60	<u>4,48</u>	-1,31
<i>Parafissurina lateralis</i>	-0,19	-0,26	-0,40
<i>Pyrgo williamsoni</i>	-0,19	-0,26	-0,40
<i>Quinqueloculina arctica</i>	-0,17	-0,28	-0,39
<i>Reusoolina laevis</i>	-0,19	-0,27	-0,40
<i>Robertina arctica</i>	-0,19	-0,24	-0,39
<i>Stainforthia loeblichii</i>	-0,11	-0,51	0,55
<i>Trifarina fluens</i>	-0,18	-0,19	-0,39
<i>Triloculina trihedra</i>	-0,19	-0,27	-0,39



Ryc. 5.12. Analiza wieloczynnikowa żywych otwornic wapiennych w: Isfjorden (IS), Wijdefjorden (WIJ), Rijpfjorden (RIJ), północnej stacji N (N), Południowo-wschodnim Nordaustlandet (NAL) oraz Wschodniej Edgeøya (EDG) na poszczególnych stacjach pomiarowych.

5.3.3 Analiza izotopów stabilnych

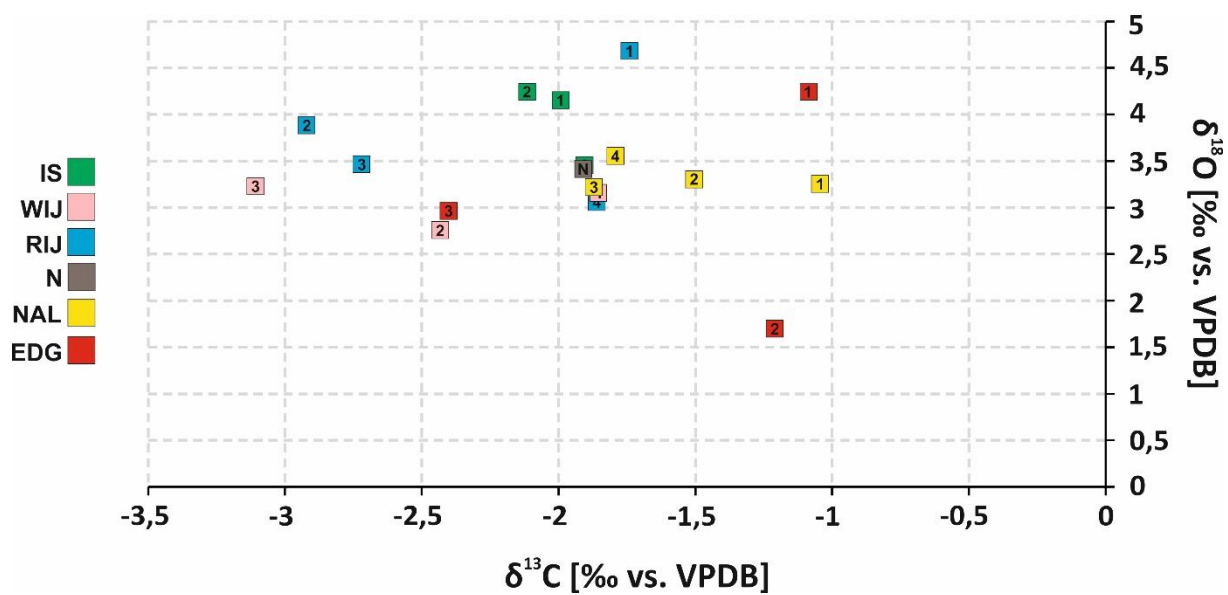
Wyniki analizy kompozycji stałych izotopów węgla oraz tlenu w skorupkach otwornic na poszczególnych stacjach pomiarowych są przedstawione w Tab. 5.3 oraz na Ryc. 5.13. Najwyższe wartości $\delta^{18}\text{O}$ odnotowano w skorupkach otwornic ze stacji IS 1, IS 2, RIJ 1 i EDG 1 (od 4,15‰ VPDB do 4,68‰ VPDB). Najwyższa wartość 4,68‰ VPDB obserwowano na stacji RIJ 1. Stacje IS 3, WIJ 1, WIJ 2, WIJ 3, RIJ 2, RIJ 3, RIJ 4, N, NAL 1, NAL 2, NAL 3, NAL4, EDG 3 charakteryzowały się zbliżonymi wartościami $\delta^{18}\text{O}$ w skorupkach otwornic, od 2,96‰ VPDB do 3,88‰ VPDB. Najniższą wartość $\delta^{18}\text{O}$ notowano na stacji EDG 2: 1,68 ‰ VPDB (Tab. 5.3; Ryc. 5.13).

Najwyższe wartości $\delta^{13}\text{C}$ odnotowano w skorupkach osobników pochodzących ze stacji NAL 1 (-1,04‰ VPDB), EDG 1 i EDG 2 (odpowiednio: -1,09‰ VPDB; -1,2‰ VPDB). Zbliżoną zawartość izotopów $\delta^{13}\text{C}$ obserwowano na wszystkich stacjach Isfjorden, WIJ 1, RIJ 1, N, NAL 2, NAL 3 oraz NAL 4 (od -2,11‰ VPDB do -1,50‰ VPDB). W skorupkach otwornic ze stacji WIJ 3, RIJ 2 i RIJ3 notowano najniższe wartości $\delta^{13}\text{C}$ (odpowiednio: -3,11‰ VPDB; -2,92‰ VPDB i -2,72‰ VPDB; Tab. 5.3; Ryc 5.13).

W przypadku otwornic ze stacji zlokalizowanych w Rjipfjorden odnotowano wzrost $\delta^{18}\text{O}$ z ujścia fiordu w kierunku wnętrza fiordu. Na stacjach zlokalizowanych w Wijdefjorden zaobserwowano wzrost $\delta^{13}\text{C}$ z ujścia fiordu w kierunku jego wnętrza (Tab. 5.3; Ryc. 5.13). Ogółem osobniki z gatunku *E. clavatum* nie wykazywały wyraźnego trendu zmian w stabilnym składzie izotopowym wzdłuż osi fiordu lub wraz z oddalaniem się od szelfu.

Tab. 5.3. Wyniki analiz izotopów stabilnych węgla i tlenu ($\delta^{13}\text{C}$ i $\delta^{18}\text{O}$) w skorupkach otwornic bentosowych (żywych oraz martwych) w: Rijpfjorden (RIJ), Wijdefjorden (WIJ), Isfjorden (IS), północnej stacji N (N), Południowo-wschodnim Nordaustlandet (NAL) oraz Wschodniej Edgeøya (EDG) na poszczególnych stacjach pomiarowych.

Stacja	$\delta^{13}\text{C}$ VPDB	$\delta^{18}\text{O}$ VPDB
IS 1	-1,99	4,15
IS 2	-2,11	4,24
IS 3	-1,90	3,45
WIJ 1	-1,87	3,22
WIJ 2	-2,43	2,75
WIJ 3	-3,11	3,23
RIJ 1	-1,74	4,68
RIJ 2	-2,92	3,88
RIJ 3	-2,72	3,47
RIJ 4	-1,86	3,16
N	-1,91	3,41
NAL 1	-1,04	3,25
NAL 2	-1,50	3,29
NAL 3	-1,86	3,05
NAL 4	-1,79	3,55
EDG 1	-1,09	4,22
EGD 2	-1,21	1,68
EDG 3	-2,40	2,96



Ryc. 5.13. Kompozycja stabilnych izotopów $\delta^{13}\text{C}$ oraz $\delta^{18}\text{O}$ w skorupkach otwornic bentosowych (żywych oraz martwych) w: Isfjorden (IS), Wijdefjorden (WIJ), Rjipfjorden (RIJ), północnej stacji N (N), Południowo-wschodnim Nordaustlandet (NAL) oraz Wschodniej Edgeøya (EDG) na poszczególnych stacjach pomiarowych.

6. Dyskusja

6.1 Warunki oceanograficzne

Wszystkie stacje zlokalizowane w fiordach zachodniego Svalbardu, znajdowały się pod wpływem AW oraz TAW (Ryc. 5.1 A i B). Dane literaturowe wskazują, że Isfjorden znajduje się pod intensywnym wpływem AW oraz ArW. Wymieszanie tych mas wodnych prowadzi do powstania na szelfie TAW, która wpływa do wnętrza fiordu (Nilsen i in., 2008; Forwick i Vorren, 2009; Bałazy i Kukliński, 2013). Proces atlantyfikacji fiordów zachodniego Svalbardu został szczegółowo opisany przez Nilsena i in. (2016), gdzie autorzy podkreślali, że największa objętość AW jest transportowana przez WSC na głębokości 500 m. W przypadku intensyfikacji przepływu WSC rdzeń tego prądu podnosi się na mniejszą głębokość pokonując granicę szelfu i tym samym zasilając fiordy ciepłą AW.

Badania Nilsena i in. (2016) wykazały, że niemal jednorodna kolumna AW może zostać wprowadzona do Isfjorden, kiedy płynie na głębokości powyżej izobaty 150 m. W takiej sytuacji miesza się z LW fiordu podnosząc ich zasolenie i temperaturę. Wielu badaczy również notowało obecność SW oraz IW w Isfjorden, co świadczy o intensywnym wpływie wód roztopowych z lodowców uchodzących do fiordu oraz spływem rzeczonym (Zajączkowski i Włodarska-Kowalczyk, 2007; Nilsen i in., 2008; Bałazy i Kukliński, 2013). Natomiast niewielka ilość zawiesiny towarzysząca wodom roztopowym notowana w centralnej części Isfjorden w trakcie poboru próbek (do 10,4 FTU; Ryc. 5.2 A) wynika z dużej odległości stacji badawczych od źródeł materiału terygenicznego tj. czół lodowców i ujść rzecznych.

Wszystkie stacje pomiarowe zlokalizowane w Wijdefjorden były pod silnym wpływem AW oraz TAW (Ryc. 5.1 B). Obserwacje te są zgodne z rezultatami prowadzonych wcześniej badań (Allaart i in., 2020; Svendsen i in., 2002). Autorzy podkreślali intensywny wpływ TAW w Wijdefjorden oraz intruzję AW do ujścia fiordu. Natomiast Walczowski i Piechura (2006) oraz Nilsen (2007) stwierdzili, że fiord ten zazwyczaj znajduje się pod silniejszym wpływem ArW natomiast obecność AW notowana jest jedynie podczas sporadycznej wysokiej aktywności WSC. Rezultaty niniejszej rozprawy mogą sugerować zwiększający się napływ AW, który w przyszłości może prowadzić do stałej obecności AW w Wijdefjorden, a nie, jak do tej pory, tylko sporadycznej. Przeprowadzone pomiary CTD wskazują, że Wijdefjorden znajdował się również pod silnym wpływem IW. Ponadto w wewnętrznej części fiordu obserwowano SW oraz wysoką koncentrację zawiesiny, która

małała w stronę ujścia fiordu (Ryc. 5.1 B; 5.2 B). Opisane warunki oceanograficzne mogą być efektem intensywnego wpływu wód roztopowych z lodowców w głębi fiordu.

Wszystkie stacje północnego Svalbardu znajdowały się pod wpływem TAW, dodatkowo stacje zlokalizowane w Rijpfjorden znajdowały się pod wpływem AW (Ryc. 5.1 C i D).

Obecna w Rijpfjorden AW napływa do fiordu z szelfu (Brown i in., 2013; Błachowiak-Samołyk i in., 2015). Jednak Brown i in. (2013) w swoich badaniach podkreślali niewielki wpływ AW w Rijpfjorden w porównaniu do dominującej ArW. Wyniki prezentowane w niniejszej rozprawie wskazują jednak na intensywny napływ AW oraz TAW (Ryc. 5.1 C), co może dowodzić wzmożonej aktywności Svalbard Branch tj. wschodniej odnogi WSC płynącej w kierunku wschodnim wzdłuż północnego wybrzeża Svalbardu (Klitgaard-Kristensen i in., 2013; Menze i in., 2019). Odnotowana w Rijpfjorden najniższa temperatura wody przy dnie wynikająca z obecności WCW (Ryc. 5.1 C), potwierdza arktyczny charakter fiordu. Formowanie się WCW związane jest corocznym napływem wieloletniego lodu morskiego z północy, co znacząco wspomaga proces schładzania wód fiordowych od jesieni i przyspiesza formowanie się zimowej pokrywy lodowej (Brown i in., 2013; Wang i in., 2013; Ambrose i in., 2006). Podczas tworzenia się lodu wytrącana solanka opada na dno i gromadzi się w zagłębieniach. Następnie miesza się z otaczającymi wodami lokalnymi, zmniejszając nieco swoją gęstość ale zachowując niską temperaturę (Haarpaintner i in., 2001; Łącka i in., 2015). Ponad warstwą WCW powstaje wyraźna pyknoklina ograniczająca wymianę wód z warstwami powyżej, w których również zauważalna jest stratyfikacja (Ryc. 5.1 C). Pomimo, że do Rijpfjorden nie uchodzi bezpośrednio żaden lodowiec, najwyższą koncentrację zawiesiny notowano na powierzchni wody we wnętrzu fiordu (Ryc. 5.2 C), co jest związane z zasilaniem rzeczonym.

Stacja N jako jedyna charakteryzowała się ujemną temperaturą wody na powierzchni (Ryc. 5.1 D), co miało związek z bliskością wieloletniego paku lodowego (< 10 km) w czasie pomiarów CTD. Na tej stacji w warstwie powierzchniowej zanotowano również znaczne zmętnienie wody, sięgające 30 FTU (Ryc. 5.2 D), co może mieć związek z zakwitem fitoplanktonu na granicy pól lodowych (Sakshaug i Slagstad, 1992; Wheeler i in., 1996; Berge i in., 2015). Dane CTD z głębszych warstw wody na stacji N wskazują na obecność TAW, co jest prawdopodobnie wynikiem zmieszania się AW z LW (Rudels i in., 1999; Ślubowska i in., 2005). Według Rasmussen i in. (2007) AW wpływając do Oceanu Arktycznego zapada się pod pakiem lodowym, ogrzewa go powodując znaczące zmniejszenie jego grubości, a miejscami nawet jego zanik, pozostawiając LW w warstwie powierzchniowej.

Stacje zlokalizowane na wschodnim wybrzeżu Svalbardu znajdowały się pod zdecydowanie słabszym wpływem AW oraz TAW (Ryc. 5.1 E i F), które były odnotowane jedynie w rejonie Nordaustlandet. Nie zanotowano wpływu AW oraz TAW na stacjach usytuowanych u wybrzeży Edgeøya oraz w bezpośrednim sąsiedztwie lodowca Austfonna (Nordautslandet) (Ryc. 5.1 F).

Stacje pomiarowe zlokalizowane u wschodniego wybrzeża Nordaustlandet w większości znajdowały się pod wpływem IW (Ryc. 5.1 E), powstającymi w wyniku mieszania SW oraz AW (Cottier i in., 2005). W rejonie Nordaustlandet TAW występowała na większości stacji, natomiast AW pojawiła się jedynie na stacji najbardziej oddalonej od lodowca (Ryc. 5.1 E). Pomimo, że stan wiedzy na temat warunków oceanograficznych występujących u wschodniego wybrzeża Svalbardu jest wciąż niedostateczny, przedstawione wyniki pokrywają się z niewielką ilością dostępnych danych literaturowych. Carroll i in. (2008) odnotowali w tym rejonie silny wpływ ArW, które są niezbędne do powstania TAW, dominujących na większości badanych stacji. Lydersen i in. (2002) podkreślali powszechną w ostatnich latach obecność AW w obszarze północnego Svalbardu oraz napływ tych wód od południa do Storfjordrenna i Storfjorden. Prezentowane w niniejszej pracy wyniki wskazują, że rejon wschodniego Svalbardu zasilany jest AW od strony północnej, a napływ AW na wschód w południowej części Svalbardu ogranicza się do głębokich rozcięć na szelfie. Podobnie wnioskuje Hop i in. (2019), którzy z uzyskanych modeli oraz zapisów temperatur z północnego wybrzeża Svalbardu sugerowali, że obszar ten będzie szczególnie dotknięty ociepleniem. Również Slagstad i in. (2015) oraz Polyakov i in. (2017) podkreślali silny wpływ AW na północne wybrzeże Svalbardu.

Warunki oceanograficzne w rejonie wschodniej Edgeøya są silnie warunkowane wpływem zimnych wód z Morza Barentsa (Hansen i Knudsen, 1995). Tłumaczy to pojawienie się LW na stacji EDG 3 najbardziej oddalonej od lodowca (Ryc. 5.1 F). Pozostałe stacje w profilu na wschód od Edgeøya znajdowały się pod wpływem wód roztopowych z lodowca, skutkując tworzeniem się SW oraz IW. Tłumaczy to również wysoką koncentrację zawiesiny na stacji EDG 1, której maksimum odnotowano przy dnie (48,5 FTU; Ryc. 5.2 F), co prawdopodobnie było spowodowane wypływem wód subglacjalnych (Dowdeswell i Bamber, 1995). Rejon wschodniego wybrzeża Edgeøya jako jedyny nie znajdował się pod wpływem AW oraz TAW. Możliwe, że warunki oceanograficzne opisane powyżej tj. wypływy spod lodowca lub wpływ wód lokalnych były na tyle silne aby zniwelować wpływ AW lub świadczy to, że AW płynąca z północnego wybrzeża Svalbardu (Ślubowska-Woldengen i in., 2007; Ślubowska-Woldengen i in., 2008; Klitgaard-Kristensen i in., 2013)

nie dociera do wschodniego rejonu Edgeøya, a jej wpływ osiąga jedynie obszar południowo-wschodniego Nordaustlandet.

6.2 Analiza otwornicowa

Wyniki niniejszej rozprawy wskazują na wyraźny podział stacji pomiarowych ze względu na różnice w napływie AW w obrębie Svalbardu. Dlatego dalszą dyskusję dotyczącą analiz otwornicowych zdecydowano się poprowadzić począwszy od fiordów zachodniego Svalbardu, następnie stacji zlokalizowanych odpowiednio w rejonie północnego oraz wschodniego Svalbardu.

6.2.1 Zachodni Svalbard

Fiordy zachodniego Svalbardu charakteryzowały się większą liczebnością oraz liczbą gatunków otwornic wapiennych niż aglutynujących (Ryc. 5.4 oraz 5.6). Isfjorden charakteryzował się wysokim indeksem H', przy jednoczesnej dość niskiej liczebności otwornic (Ryc. 5.4 A), przy czym zarówno liczebność otwornic, jak i liczba gatunków wzrastały w kierunku ujścia fiordu (Ryc. 5.4 A i 5.6). Z kolei w Wijdefjorden obserwowano wyjątkowo wysoką liczebność otwornic, jednak indeks H' był wyraźnie niższy niż w Isfjorden (Ryc. 5.4 A). Cechą wspólną tych fiordów był intensywny napływ AW. Łącka i Zajączkowski (2016) w swoich badaniach podkreślali, że obecność AW zazwyczaj skutkuje większą liczebnością oraz bioróżnorodnością otwornic, co potwierdzają wyniki niniejszej rozprawy dotyczące Isfjorden. Pawłowska i in. (2017) wnioskowali, że napływ AW wiąże się z wystąpieniem dużej liczby gatunków o małej liczebności, natomiast tam, gdzie wpływ AW jest słabszy obserwuje się mniej gatunków o większej liczebności. Wyniki niniejszej rozprawy pokrywają się z tymi wnioskami, gdyż w centralnej i zewnętrznej części Isfjorden obserwowano więcej gatunków dominujących niż w Wijdefjorden, aczkolwiek poszczególne grupy dominantów w Wijdefjorden były bardziej liczne (Ryc. 5.7 A i B), wskazując na silniejszy wpływ AW w Isfjorden niż Wijdefjorden. Ponadto Murray i Alve (2016) podkreślali, że zaburzenia środowiskowe w wewnętrznej części Wijdefjorden, będące efektem bliskości lodowców, powodują niższą różnorodność fauny bentosowej.

W obu fiordach zachodniego Svalbardu martwe otwornice stanowiły > 50%. Jednak pomimo, że Wijdefjorden charakteryzował się najwyższą liczebnością otwornic, szczególnie w wewnętrznej stacji fiordu, martwe osobniki stanowiły tam aż 90% (Ryc. 5.5). Hald i Korsun (1997) również obserwowali w Wijdefjorden najwyższą liczebność otwornic wraz

z najniższą frekwencją żywych osobników podkreślając, że jest to środowisko o bardzo wysokiej energii, charakteryzujące się silnymi prądami przydennymi i gruboziarnistymi osadami (Ryc. 5.3 B). Jednocześnie notowali duże liczebności żywych osobników w pozostałych badanych fiordach Svalbardu, gdzie stanowiły one od 12% w zewnętrznych do 87% w wewnętrznych częściach fiordów. Autorzy sugerowali, że frekwencja żywych otwornic wzrasta w wewnętrznych częściach fiordu, gdzie wysokie tempo sedymentacji prowadzi do szybkiego zasypywania skorupki martwej fauny. Jednak wyniki niniejszej pracy nie potwierdzają tych wniosków, ponieważ na większości stacji, również we wnętrzach fiordów, obserwowano przewagę martwych osobników (Ryc. 5.5). Wyjątkowo wysoką proporcję martwych osobników można tłumaczyć wpływem pór roku, a dokładnie przejściem z pory wiosennej na letnią, co może prowadzić do obumarcia części fauny bentosowej. Potwierdzają to obserwacje Łackiej i Zajączkowskiego (2016), którzy w swoich badaniach podkreślali, że bogaty zakwit fitoplanktonu wiosną dostarcza dużą ilość materii organicznej do dna, następnie wysokie tempo akumulacji ogranicza do niej dostęp, prowadząc do masowego obumierania fauny otwornicowej z powodu braku pokarmu. W efekcie organizmy bentosowe mają ograniczony czas na rozwój. Z obserwacji Zajączkowskiego i in. (2010b) oraz Pawłowskiej i in. (2011) wynikało, że brak zimowej pokrywy lodowej powoduje zwiększanie się miąższości strefy eufotycznej oraz wcześniejszy zakwit fitoplanktonu. Jednocześnie pojawia się zooplankton, który wyżera materię organiczną z kolumny wody, więc dostawa materii organicznej do dna jest ograniczona. Silny napływ AW prowadzi do ograniczenia, a nawet braku pokrywy lodowej zimą i wiosną, a zatem znacząco może wpływać na rozwój fauny bentosowej.

Wszystkie stacje zlokalizowane w fiordach zachodniego Svalbardu odznaczały się licznym występowaniem gatunków oportunistycznych *C. reniforme*, *E. clavatum* oraz atlantyckiego *N. labradorica* (Ryc. 5.7 A i B). Na stacjach zlokalizowanych w Isfjorden dominowały gatunki zaliczane do grupy gatunków atlantyckich, z kolei w Wijdefjorden największą część zbiorowiska stanowiły gatunki oportunistyczne (Ryc. 5.8 A i B). Oportunistyczny charakter gatunków *C. reniforme* oraz *E. clavatum* został w przeszłości opisany przez wielu autorów (m.in. Hald i Korsun, 1997; Jennings i in., 2004; Zajączkowski i in., 2010a; Dijkstra i in., 2017; Pawłowska i in., 2017). Oba gatunki dobrze radzą sobie w zaburzonym środowisku w wewnętrznych częściach fiordów, także w warunkach niskiego zasolenia (Hald i in., 1994; Zajączkowski i Włodarska-Kowalczyk, 2007). Ponadto występowanie *C. reniforme* przez wielu autorów było związane z wpływem AW oraz TAW (Hald i Steinsund, 1996; Ślubowska-Woldengen i in., 2008; Zajączkowski i in., 2010a).

Potwierdzają to wyniki niniejszej rozprawy, gdyż liczne pojawienie się tego gatunku w ujściach zachodnich fiordów (Ryc. 5.7 A i B) mogło być spowodowane obserwowanym intensywnym wpływem AW. Z kolei *E. clavatum* jest zdolny do przetrwania ekstremalnych wahań natlenienia (Qvale i van Weering, 1985; Moodley i Hess, 1992; Thomas i in., 2000) oraz w silnie zanieczyszczonych/zaburzonych środowiskach (Alve, 1995; Culver i Buzas, 1995; Thomas i in., 2000), może znieść zasypywanie, wysłodzenie, a nawet przetrwać braki w dostępności pokarmu żywiąc się starą materią (Hald i Korsun, 1997). Opisane powyżej cechy czynią go wyjątkowo oportunistycznym i prawdopodobnie dlatego występuje on powszechnie w rejonie Svalbardu (Ryc. 5.7). Z badań przeprowadzonych przez Kubischta i in. (2011) wynikało, że zbiorowiska otwornicowe charakteryzujące się niską różnorodnością i jednocześnie przewagą gatunków *E. clavatum* i *C. reniforme* są typowe dla zaburzonego środowiska. Prezentowane powyżej wyniki badań przeprowadzone w Wijdefjorden potwierdzają te obserwacje. Mimo, że oba gatunki często występują razem, *E. clavatum* zwykle osiąga przewagę liczebnościową nad *C. reniforme* przy przejściu ze strefy dystalnej fiordu do proksymalnej bezpośrednio przy lodowcu (Hald i Vorren, 1987; Ślubowska i in., 2005). Jednak w fiordach zachodniego Svalbardu nie zanotowano wyraźnego trendu zmian proporcji *C. reniforme/E. clavatum*.

Wielu badaczy podkreślało związek gatunku *N. labradorica* z obecnością AW (m.in. Hald i Korsun, 1997; Korsun i Hald 1998; Pogodina, 2005; Łącka i Zajączkowski, 2016; Jernas i in., 2018; Kucharska i in., 2018), jednak Murray i Alve (2016) zaliczają go również do gatunków kosmopolitycznych. Liczne pojawienie się *N. labradorica* w Isfjorden oraz Wijdefjorden (Ryc. 5.7 A i B), może wskazywać nie tylko na intensywny wpływ AW (Hald i Korsun, 1997; Pogodina, 2005; Jernas i in., 2018) ale również na to, że oba te fiordy stanowią środowiska o wysokiej produktywności (Polyak i Mikhailov, 1996; Korsun i Hald, 2000; Zajączkowski i in., 2010a). Ponadto w obu fiordach liczebność gatunku *N. labradorica* wzrastała ku ujściu fiordu (Ryc. 5.7 A i B) co może wynikać z wyższej stabilności warunków środowiskowych i stałego dopływu AW w tych strefach (Hald i Korsun, 1997; Łącka i Zajączkowski, 2016; Szymańska i in., 2017; Kucharska i in., 2018).

Mimo, że w obu fiordach zachodniego Svalbardu widać było wyraźny napływ AW (Ryc. 5.1 A i B), jednak tylko w Isfjorden gatunki atlantyckie rzeczywiście dominowały (Ryc. 5.8 A). W Wijdefjorden dominującą grupą byli oportuniści (Ryc. 5.8 B), na co ma wpływ bliskość lodowców i zaburzeń środowiskowych z nimi związanych (Kubischta i in., 2011). W obu fiordach występował atlantycki gatunek *N. labradorica*. Ponadto w Isfjorden dominującymi gatunkami atlantyckimi były *A. glomeratum*, który pojawił się na wszystkich

stacjach oraz *R. turbinatus* obserwowany w centralnej części fiordu (Ryc. 5.7 A). Natomiast w wewnętrznej części Wijdefjorden odnotowano atlantycki gatunek *B. frigida* (Ryc. 5.7 B). Gatunek *A. glomeratum* potwierdza atlantycki charakter Isfjorden (Hald i Korsun, 1997; Murray i Alve, 2016; Szymańska i in., 2017). Ponadto niektórzy badacze wiązali występowanie *A. glomeratum* z intensywnym dopływem materii organicznej (Gooday, 1994; Kamiński i Gradstein, 2005), co po raz kolejny może wskazywać, że Isfjorden stanowi środowisko o wysokiej produktywności. Również *R. turbinatus* jest gatunkiem korelowanym z wpływem AW (Korsun i Polyak, 1989; Hald i Korsun, 1997; Majewski i Zajązkowski, 2007; Łacka i Zajązkowski, 2016). Wyniki niniejszej pracy pokrywają się również z obserwacjami Mityaeva i in. (2005), którzy sugerowali, że *R. turbinatus* preferuje środowiska odznaczające się wysoką energią i niższym tempem sedymentacji. Dodatkowo, Korsun i Polyak (1989) wiązali występowanie *R. turbinatus* z intensywną dostawą fitodetrytusów do dna. W Wijdefjorden w skład grupy atlantyckich wchodził *B. frigida*, który był opisywany jako gatunek atlantycki (Majewski i in., 2009; Zajązkowski i in., 2010a), ale także jako gatunek wskazujący na formowanie się lodu morskiego (Steinsund, 1994; Zajązkowski i in., 2010a; Kubischta i in., 2011; Szymańska i in., 2017). Wijdefjorden leży w północno-zachodniej części Svalbardu, stąd okresowo napływa w ten obszar pak lodowy z Oceanu Arktycznego. Ponadto obserwacje przeprowadzone przez Vilksa i Deonarine (1988) sugerowały, że *B. frigida* powszechnie występuje w środowiskach na styku różnych mas wodnych, szczególnie preferując wpływ IW.

Analiza wieloczynnikowa podobieństw potwierdza występowanie różnic pomiędzy zbadanymi fiordami zachodniego Svalbardu. Analiza przeprowadzona na zbiorowisku żywych i martwych otwornic wskazuje na stosunkowo niewielki stopień podobieństwa między Isfjorden a Wijdefjorden (Ryc. 5.9). W przypadku analizy wykonanej na zbiorowisku wyłącznie żywych osobników stopień podobieństwa między fiordami jest większy (Ryc. 5.10), co może wynikać z wyeliminowania ze zbioru danych otwornic aglutynujących. Liczebność osobników aglutynujących była wyższa w Isfjorden niż Wijdefjorden (Ryc. 5.4 A i B). Być może jest to spowodowane opisanym przez Halda i Korsuna (1997), a w późniejszych latach również przez Majewskiego i Zajązkowskiego (2007), preferowaniem przez te otwornice warunków atlantyckich. Autorzy obserwowali najwyższe liczebności osobników aglutynujących z dala od stref narażonych na wysokie tempo sedymentacji. Również wyniki niniejszej rozprawy wskazują, że w Isfjorden warunki oceanograficzne były korzystniejsze dla fauny aglutynującej. Również Rasmussen i in. (2012) oraz Kucharska i in. (2018) obserwowali gatunki aglutynujące w centralnej części

odpowiednio Isfjorden oraz Adventfjorden (południowej odnogi Isfjorden) podkreślając wysoką produktywność i bioróżnorodność tych fiordów. Wspomniani autorzy sugerowali się wynikami badań Majewskiego i Zajączkowskiego (2007), którzy zauważyli intruzje AW w centralnej części Adventfjorden w ciągu ostatnich 50 lat. Autorzy podkreślali, że napływ AW spowodował większą bioróżnorodność fauny otwornicowej i większą liczbę gatunków aglutynujących.

Analiza PC przeprowadzona dla wszystkich otwornic (żywych oraz martwych) wydzieliła 4 zgrupowania otwornic istotne dla fiordów zachodniego Svalbardu (Ryc. 5.11). Zgrupowanie *C. lobatulus* FA było istotne dla wszystkich stacji Isfjorden oraz Wijdefjorden (Ryc. 5.11 A; Tab. 5.1). Gatunek *C. lobatulus* dominował na większości stacji pomiarowych zachodniego Svalbardu (Ryc. 5.7 A i B). Zazwyczaj bywał korelowany z dynamicznym środowiskiem o silnych prądach dennych (Mackensen i in., 1985; Korsun i Polyak, 1989; Murray, 1991; Corner i in., 1996; Klitgaard-Kristensen i in., 2002; Ślubowska i in., 2005; Ivanova i in., 2008; Nardelli i in., 2010; Klitgaard-Kristensen i in., 2013) oraz z obecnością osadów gruboziarnistych (Klitgaard-Kristensen i in., 2002; Hansen i Knudsen, 1995). Jednak wyniki niniejszej pracy tego nie potwierdzają, ponieważ osad zarówno w Isfjorden, jak i w Wijdefjorden był zdominowany przez drobną frakcję pylastą, za wyjątkiem stacji WIJ 1 gdzie obserwowano ok. 9% udział żwiru (Ryc. 5.3 A, B). Niekiedy obecność *C. lobatulus* bywała wiązana z intensywnym przepływem AW w danym rejonie i wymywaniem drobniejszego osadu (Ślubowska i in., 2005; Klitgaard-Kristensen i in., 2002; Klitgaard-Kristensen i in., 2013). Wyjaśnienie to może być prawdziwe dla ujściowych części fiordów, gdzie może nastąpić intensyfikacja prądów przydennych, jednak jest mniej prawdopodobne w ich wnętrzach. Ponadto *C. lobatulus* często jest notowany nie tylko na powierzchni, ale i głęboko w osadzie (Szymańska i in., 2017; Golikova i in., 2018), ponieważ doskonale radzi sobie w środowiskach o wysokiej sedymentacji, jakim są fiordy zachodniego Svalbardu (Majewski i Zajączkowski, 2007). Gatunek ten do osiedlenia potrzebuje twardego substratu, aczkolwiek może do przytwierdzenia wykorzystywać np. szczątki roślin lub też migrować w głąb osadu wykorzystując puste domki osiadłych wieloszczetów (Ivanova i in., 2008). Biorąc pod uwagę powyższe można przypuszczać, iż powszechne występowanie *C. lobatulus* w fiordach zachodniego Svalbardu wiąże się z występowaniem twardego substratu (mineralnego lub organicznego) oraz z bogactwem osiadłej fauny makrozoobentosowej.

Zgrupowanie *C. lobatulus* FA obejmowało gatunki akcesoryczne, które wcześniej wymieniano jako dominujące dla fiordów zachodniego Svalbardu, o dodatnich wartościach

scores: *N. labradorica*, *E. clavatum*, *C. reniforme*, *B. frigida* oraz wartościach ujemnych: *V. scrippsi* i *E. advenus* (Tab. 5.1). Na podstawie preferencji środowiskowych gatunków o datanych wartościach *scores* można wnioskować, że omawiane zgrupowanie preferuje środowiska o wyższej temperaturze znajdujące się pod wpływem AW oraz TAW (Ryc. 5.1 A i B). Ponadto zgrupowanie może wymagać stosunkowo wysokiego tempa sedymentacji oraz twardego substratu z możliwością przyczepienia. Z kolei gatunki *V. scrippsi* i *E. advenus* były opisywane jako odporne na zanieczyszczenia środowiska oraz niedostateczne ilości tlenu (Alve, 1995; Thomas i in., 2000; Babalola i in., 2013; Babalola i in., 2017). Ponadto bywały w przeszłości korelowane z występowaniem zdegradowanej materii organicznej (Alve, 1995; Thomas i in., 2000; Tsujimoto i in., 2006). Ujemne wartości *scores* gatunków *V. scrippsi* i *E. advenus* w opisywanym zgrupowaniu wskazują, że opisanych wyżej warunków nie obserwowano w Isfjorden ani Wijdefjorden.

Zgrupowanie *C. reniforme* FA było istotne dla wszystkich stacji Wijdefjorden (Ryc. 5.11 C; Tab. 5.1). Warunki preferowane przez gatunek *C. reniforme* zostały wyżej szczegółowo opisane. Zgrupowanie to wydaje się być powiązane z niższą temperaturą oraz spływającym z północy lodem morskim, a także wysokim tempem sedymentacji. Gatunki akcesoryczne o dodatnich wartościach *scores*: *E. clavatum* i *V. scrippsi* (Tab. 5.1), również wskazują na preferencje zimnych i często mniej zasolonych wód przy dnie. Gatunki atlantyckie o ujemnych wartościach: *A. glomeratum*, *R. turbinatus*, *N. labradorica* (Tab. 5.1), wskazują na opisywany już wcześniej mniejszy wpływ AW oraz TAW w Wijdefjorden niż w Isfjorden, potwierdzając tym samym sugerowane wcześniej różnice pomiędzy tymi fiordami

Zgrupowanie *E. clavatum* FA było istotne dla pojedynczych stacji zachodniego Svalbardu (IS 2 oraz WIJ 3; Ryc. 5.11 D; Tab. 5.1). Zgrupowanie prawdopodobnie jest związane z wpływem AW oraz TAW, na co wskazuje obecność atlantyckich gatunków akcesorycznych o dodatnich wartościach *scores*: *N. labradorica*, *R. turbinatus* oraz *A. glomeratum* (Tab. 5.1). Jednak dodatnie wartości *scores* obserwowano również w przypadku gatunków arktycznych *S. biformis* i *S. loeblichii* (Tab. 5.1). Oba te gatunki bywały wiązane z intensywnym dopływem świeżej materii organicznej oraz sezonową produktywnością (Schafer i in., 1991; Gupta i Machain-Castillo, 1993; Polyak i in., 2002; Jernas i in., 2018). Także gatunek akcesoryczny *E. advenus* (Tab. 5.1) w przeszłości był wiązany z dostawą świeżej materii organicznej (Thomas i in., 2000; Tsujimoto i in., 2006). W zgrupowaniu zostały wyróżnione również gatunki akcesoryczne o ujemnych wartościach *scores*: *C. lobatulus* oraz *T. nana* (Tab. 5.1). Wcześniej opisany gatunek *C. lobatulus* może wskazywać, że zgrupowanie nie wymaga twardego substratu oraz silnych prądów przy dnie.

Gatunek *T. nana* był opisywany przez Schafera i Cole'a (1982) jako typowy dla płytkich wód arktycznych i subarktycznych. Obecność gatunków arktycznych w tym zgrupowaniu może mieć związek z charakterystycznymi dla zachodniego wybrzeża Spitsbergenu TAW, które powstają w wyniku mieszania się AW z ArW.

Analiza PC przeprowadzona wyłącznie na żywych otwornicach wydzieliła 3 zgrupowania otwornic. Niemal wszystkie zgrupowania były istotne dla fiordów zachodniego Svalbardu (Ryc. 5.12). Zgrupowanie *E. clavatum* FA było istotne dla pojedynczych stacji (IS 2, WIJ 1; Ryc. 5.12 A; Tab. 5.2). Podobne zgrupowanie było już omawiane wyżej w przypadku analizy wykonanej na wszystkich (żywych i martwych) osobnikach. Wydaje się, że omawiane zgrupowanie związane jest z wysokim tempem sedymentacji oraz zimniejszymi wodami. Wskazuje na to również fakt, że gatunkiem akcesorycznym o dodatniej wartości *scores* był również oportunistyczny *C. reniforme* (Tab. 5.2). Gatunek *C. lobatulus* był gatunkiem akcesorycznym o ujemnych wartościach *scores* (Tab. 5.2), co może wskazywać, że zgrupowanie nie jest związane z silnymi prądami przydennymi oraz twardym substratem.

Zgrupowanie *N. labradorica* FA było istotne dla niemal wszystkich stacji zachodniego Svalbardu Ryc. 5.12 B; Tab. 5.2). Wyżej omówiono szczegółowo atlantycki charakter gatunku *N. labradorica*. Ponadto w zgrupowaniu pojawiły się dwa gatunki o dodatnich wartościach *scores*: *C. lobatulus* oraz *E. clavatum* (Tab. 5.2), co po raz kolejny może dowodzić, że fiordy zachodniego Svalbardu to miejsca o wysokim tempie sedymentacji oraz wpływie prądów przydennych. Atlantycki gatunek *M. affinis* osiągał ujemne wartości *scores* w tym zgrupowaniu (Tab. 5.2). Może to wskazywać na sugerowaną już intensywną dostawę świeżej materii w Isfjorden oraz Wijdefjorden, ponieważ gatunek był już opisywany przez innych autorów jako preferujący częściowo rozłożoną materię organiczną (Korsun i Polyak, 1989; Corliss, 1991; Ślubowska i in., 2005; Zajączkowski i in., 2010a; Kucharska i in., 2018). Potwierdza to wcześniejsze obserwacje wskazujące na to, że fiordy zachodniego Spitsbergenu charakteryzują się wysoką produktywnością i szybkim przetwarzaniem materii organicznej w dobrze natlenionych wodach.

Zgrupowanie *C. lobatulus* FA było istotne dla niektórych stacji Wijdefjorden (Ryc. 5.12 C; Tab. 5.2). Podobne zgrupowanie było już omawiane wyżej w przypadku analizy wykonanej na wszystkich osobnikach, jednak w tamtym przypadku było również istotne dla Isfjorden (Ryc. 5.11 A). W omawianym zgrupowaniu dodatnie wartości *scores* osiągnęły gatunki oportunistyczne: *C. reniforme* oraz *E. clavatum*, a także gatunki atlantyckie: *M. affinis* i *B. frigida* (Tab. 5.2). Wydaje się, że zgrupowanie jest związane z wyższą

temperaturą wynikającą z napływu AW oraz TAW, ale również z sezonowym spływem lodu morskiego z północy, a także niewielką dostawą świeżej materii organicznej. W zgrupowaniu pojawił się również gatunek akcesoryczny o ujemnych wartościach *scores N. labradorica* (Tab. 5.2), co może sugerować, że środowisko Wijdefjorden jest mniej produktywnie niż Isfjorden.

Należy podkreślić, że obie analizy danych PC mogą być obarczone błędem. Analiza przeprowadzona na wszystkich otwornicach (żywych oraz martwych) niesie ryzyko, że zgrupowania mogą częściowo zawierać osobniki z kilku lat, tym samym bardziej uśredniać wynik analizy. Analiza przeprowadzona wyłącznie na żywych otwornicach jest obciążona ryzykiem błędu, który wynika z przeprowadzenia pomiarów w końcu pory letniej. Otwornice osiągają maksimum rozwoju w trakcie wiosennego zakwitów fitoplanktonu, później z powodu mniejszej dostępności pokarmu może nastąpić ich masowe obumieranie (Łacka i Zajączkowski, 2016). Ponadto analiza oparta tylko na zabarwionych osobnikach nie uwzględnia zbiorowisk otwornic aglutynujących.

Wpływ AW na fiordy zachodniego Svalbardu znajduje odzwiedlenie również w wartościach izotopów stabilnych w skorupkach otwornic. Najwyższą wartość $\delta^{18}\text{O}$ obserwowano w skorupkach otwornic ze stacji IS 1 oraz IS 2, co dobrze koreluje z wysokim udziałem AW w tym rejonie. Na stacjach zlokalizowanych w Wijdefjorden oraz IS 3 odnotowano wartości pośrednie (Ryc. 5.13; Tab. 5.3). Wysokie wartości $\delta^{18}\text{O}$ obserwowane w wewnętrznych stacjach Isfjorden świadczą o typowych warunkach atlantyckich oraz lokalnym wpływie ArW z których powstaje TAW. Niższe wartości odnotowane w Wijdefjorden oraz IS 3 mogą być związane z zimowym mieszaniem mas wodnych. Proces schładzania wody podczas zimy prowadzi do zapadnięcia SW o niższych wartościach $\delta^{18}\text{O}$. Następnie dochodzi do zmieszania zimnej SW z ciepłą i mocno zasoloną AW oraz TAW przy dnie, co skutkuje niższymi wartościami $\delta^{18}\text{O}$.

Najwyższe wartości $\delta^{13}\text{C}$ spośród stacji zachodniego Svalbardu odnotowano w skorupkach otwornic ze stacji IS 1 i IS 3 oraz wewnętrznej stacji WIJ 1. Niższe wartości $\delta^{13}\text{C}$ obserwowano na stacjach IS 2, WIJ 2 oraz WIJ 3 (Ryc. 5.13; Tab. 5.3). Rasmussen i in. (2012) w swoich badaniach podkreślali, że wyższe wartości $\delta^{13}\text{C}$ przed czołami aktywnych lodowców, dostarczających znaczące ilości zawiesiny mogą mieć związek z ograniczeniem produkcji pierwotnej w tych rejonach i większym udziałem starszej, cięższej izotopowo morskiej materii organicznej. Stosunkowo wysoka wartość $\delta^{13}\text{C}$ w wewnętrznej części Wijdefjorden potwierdza powyższe przypuszczenia o przewadze starej morskiej materii organicznej nad świeżo wyprodukowaną przed czołami lodowców. Natomiast niższe wartości

$\delta^{13}\text{C}$ w centralnej części Isfjorden oraz dwóch stacjach Wijdefjorden mogą świadczyć o intensywnej produkcji pierwotnej i eksporcie świeżej materii organicznej do dna w czasie wiosennej kalcyfikacji skorupki otwornic. Ma to związek z tym, że lżejszy, izotop węgla statystycznie częściej bierze udział w reakcjach biochemicznych. Prawdopodobnie tłumaczy to zaobserwowany spadek $\delta^{13}\text{C}$ w ujściu Wijdefjorden (Ryc. 5.13; Tab. 5.3), gdzie rokrocznie zimą i wiosną pojawia się arktyczny pak lodowy, co prowadzi do intensyfikacji wiosennych zakwitów okrzemkowych.

Wyniki analiz izotopów stabilnych $\delta^{18}\text{C}$ oraz $\delta^{13}\text{C}$ w skorupkach otwornic pochodzących ze stacji zachodniego Svalbardu wskazują na występowanie warunków atlantyckich w obu fiordach. Jednak różnice w zasoleniu wód tych fiordów, produkcji pierwotnej oraz eksporcie materii organicznej do dna skutkują nieco innym składem izotopowym skorupki otwornic tam żyjących.

6.2.2 Północny Svalbard

Stacje północnego Svalbardu charakteryzowały się wyższą niż w innych rejonach liczebnością otwornic aglutynujących (Ryc. 5.4). Rijpfjorden cechował się wysokim indeksem H' oraz wysoką liczbą gatunków (Ryc. 5.4 A; 5.6), przy jednoczesnej niskiej liczebności otwornic, która malała w kierunku ujścia fiordu (Ryc. 5.4 A). Natomiast na stacji N obserwowano zarówno niską liczebność jak i liczbę gatunków otwornic (Ryc. 5.4; 5.6), również indeks H' był wyraźnie niższy niż w Rijpfjorden (Ryc. 5.4 A). Niektórzy autorzy sugerowali, że przewaga osobników należących do taksonów aglutynujących może być spowodowana preferencjami co do warunków oceanograficznych, dlatego występują one najliczniej z dala od stref narażonych na wysokie tempo sedymentacji (Majewski i Zajączkowski, 2007; Hald i Korsun, 1997). Natomiast Wollenburg i in. (2001) w swoich badaniach sugerowali, że rejony szelfu i stoku kontynentalnego charakteryzują się zwiększoną produktywnością i intensywnym rozpuszczaniem węglanów w okresie jesienno-zimowym stąd fauna otwornicowa w tych obszarach może być zdominowana przez zbiorowiska otwornic aglutynujących. Ponadto istnieją badania gdzie inni autorzy odnotowali przewagę otwornic aglutynujących również w wewnętrznych częściach fiordu (Hald i Korsun, 1997; Rasmussen, 2012).

Wysoka bioróżnorodność w Rijpfjorden (Ryc. 5.4 A) może być związana z postępującą atlantyfikacją tego fiordu, ponieważ wpływ AW często skutkuje większym bogactwem gatunkowym otwornic (Łącka i Zajączkowski, 2016; podrozdział 6.2.1). Jednak wartość indeksu H' malała w stronę ujścia Rijpfjorden oraz na stacji N (Ryc. 5.4 A). Obie

lokalizacje charakteryzowały się również najniższą liczbą gatunków dominujących (Ryc. 5.7 C i D). Może być to związane z wpływem zimnych wód z Oceanu Arktycznego oraz prawdopodobnie obecności wieloletniego lodu morskiego. Opisane warunki lokalne mogą niwelować wpływ AW na obu stacjach i stwarzać ograniczenia dla osiedlania się wielu gatunków otwornic.

Wszystkie stacje północnego Svalbardu charakteryzowały się licznym występowaniem aglutynujących gatunków *A. glomeratum* i *T. nana* (Ryc. 5.7 C i D). *A. glomeratum* został już opisany w podrozdziale 6.2.1, jako gatunek korelowany z wpływem AW oraz TAW (Hald i Korsun, 1997; Murray i Alve, 2016; Szymańska i in., 2017). Warunki oceanograficzne północnego Svalbardu udokumentowane w niniejszej rozprawie (Ryc. 5.1) potwierdzają atlantycki charakter gatunku *A. glomeratum*. Drugi, licznie występujący na stacjach północnego Svalbardu, gatunek *T. nana* został opisany przez Schafera i Cole'a (1982) jako typowy dla płytkich mórz arktycznych i subarktycznych. Schröder-Adams (1990) w swoich badaniach podkreślał, że gatunek ten występował u wybrzeży wyspy Melville, w miejscu pojawienia się wieloletniego lodu morskiego, gdzie pokrywa lodowa ogranicza napływ świeżej wody roztopowej powodując wysokie zasolenie. Ponadto gatunek ten występuje najczęściej na zboczach kontynentalnych i w zbiorowiskach głębinowych Basenu Arktycznego. Powyższe informacje pozwalają wnioskować, że wysoki udział *T. nana* na stacji N (Ryc. 5.7 D) jest związany z silnym wpływem zimnych wód z Oceanu Arktycznego oraz obecnością lodu morskiego. Ponadto du Châtelet i in. (2008) sugerowali, że występowanie osobników z rodzaju *Trochammina* jest związane z preferowanym pożywieniem, którym według autorów jest świeża materia organiczna. Natomiast inni autorzy wskazywali na występowanie otwornic z tego rodzaju tylko w strefie, do której docierają ekstremalne pływy (Albani i in., 1984; Serandrei-Barbero i in., 2010). W rejonie Svalbardu pływy ograniczone są do 1,6 m stąd czynnik ten wydaje się nie mieć wpływu na rozwój tego gatunku.

Stacje wewnętrzne w Rjipfjorden odznaczały się licznym występowaniem gatunków oportunistycznych *C. reniforme* oraz *E. clavatum* (Ryc. 5.7 C). Oportunistyczny charakter gatunków został szczegółowo opisany w podrozdziale 6.2.1. Należy jednak przypomnieć, że oba gatunki dobrze radzą sobie w zaburzonym środowisku w wewnętrznych częściach fiordów o niskim zasoleniu (Hald i in., 1994; Zajączkowski i Włodarska-Kowalczyk, 2007). Ponadto Kubischta i in. (2011) pisali, że zbiorowiska otwornicowe charakteryzujące się niską różnorodnością i jednocześnie przewagą gatunków *E. clavatum* i *C. reniforme* są typowe dla

zaburzonego środowiska. Jednak wysoki indeks H' zanotowany na stacjach wewnętrznych Rjipfjorden, nie potwierdza tych obserwacji.

M. affinis stanowił > 5% całego zbiorowiska na wewnętrznej stacji Rjipfjorden (Ryc. 5.7 C), jednak pojawił się mniej licznie również na kilku innych stacjach (Załącz. 1). Jest to pierwsza obserwacja tego gatunku na północy Svalbardu. Jest to gatunek borealny, który przez wielu autorów był wiązany z wpływem AW (Hald i Steinsund, 1996; Jennings i in., 2004; Ślubowska-Woldengen i in., 2008; Łacka i in., 2015; Kucharska i in., 2018). Ponadto Qvale i van Weering (1985) wiązali występowanie *M. affinis* z dobrze natlenionymi wodami przydennymi. Inni autorzy podkreślali, że gatunek ten preferuje częściowo rozłożoną materię organiczną (Korsun i Polyak, 1989; Corliss, 1991; Ślubowska i in., 2005; Zajączkowski i in., 2010a; Kucharska i in., 2018; podrozdział 6.2.1). Natomiast inni badacze wiązali jego obecność z osadami drobnoziarnistymi bogatymi w materię organiczną (Qvale i van Weering, 1985; Caralp, 1989; Steinsund, 1994). Obecność *M. affinis* w Rjipfjorden wskazuje na silny wpływ AW w tym rejonie, pozwalający na rozwój gatunków borealnych. Może też sugerować, że postępująca atlantyfikacja będzie prowadzić do przesuwania się zasięgów występowania kolejnych gatunków otwornic.

Gatunek *B. frigida*, dominujący na wewnętrznej stacji Rjipfjorden (Ryc. 5.7 C), był już opisywany w podrozdziale 6.2.1 jako gatunek atlantycki (Majewski i in., 2009; Zajączkowski i in., 2010a), ale także jako gatunek wskazujący na formowanie się lodu morskiego w okresie zimowym w danym rejonie (Steinsund, 1994; Zajączkowski i in., 2010a; Kubischta i in., 2011; Szymańska i in., 2017). Na podstawie opisanych wyżej cech *B. frigida* można wnioskować o formowaniu się zimowej pokrywy lodowej w Rjipfjorden. Jest to zgodne z wcześniejszymi obserwacjami wskazującymi na rokroczne występowanie pokrywy lodowej w tym fiordzie w okresie zimowo-wiosennym (Wang i in., 2013; Weydmann i in., 2013; Dalpadado i in., 2016; Hop i in., 2019).

S. biformis pojawił się jako gatunek dominujący na niektórych stacjach Rjipfjorden (Ryc. 5.7 C). Wielu autorów uważało ten gatunek za typowy dla siedlisk lodowcowo-morskich (Hald i Korsun, 1997; Korsun i Hald, 1998; Korsun i Hald, 2000; Majewski i Zajączkowski, 2007; Szymańska i in., 2017).

Wyniki prezentowane powyżej potwierdzają lokalny arktyczny charakter Rjipfjorden, z wyraźnym wpływem AW w okresie letnim (Ryc. 5.1 C), zimą jednak fiord ten ma arktyczny charakter.

Gatunkami dominującymi w Rjipfjorden były również *V. scrippsi* oraz *E. advenus* (Ryc. 5.7 C), które zostały szczegółowo opisane w podrozdziale 6.2.1. *E. advenus*

charakteryzuje się niewielką tolerancją na niskie zasolenie (Murray, 1997; Thomas i in., 2000), jednak może przetrwać nawet w wodach silnie zanieczyszczonych i ubogich w tlen (Alve, 1995; Patterson i in., 2000; Thomas i in., 2000; Babalola i in., 2013; 2017). Murray (1991) sugerował, że gatunek ten preferuje muł lub drobny piasek. W literaturze jest niewiele informacji o gatunku *V. scrippsi*, jednak Uchio (1960) notował go w próbkach razem z *E. advenus*, zwracając uwagę że toleruje on różne rodzaje lub rozmiary materiału do budowy aglutynowanych skorupki.

Grupa gatunków atlantyckich była liczniejsza od grupy arktycznej na wszystkich stacjach północnego Svalbardu (Ryc. 5.8 C i D). Natomiast grupa gatunków oportunistycznych pojawiła się najliczniej w wewnętrznej części Rjipfjorden (Ryc. 5.8 C). Stacja N była zdominowana przez grupę gatunków określonych jako inne (Ryc. 5.8 D), w której skład wchodziły gatunki aglutynujące, przede wszystkim *T. nana* (Ryc. 5.7 D). Na wszystkich stacjach północnego Svalbardu w skład grupy atlantyckiej wchodził aglutynujący gatunek *A. glomeratum*, który stanowił jedyny atlantycki gatunek dominujący na stacji N (Ryc. 5.7 C i D). Jednak w Rjipfjorden licznie występowały również inne gatunki atlantyckie: *B. frigida*, *M. affinis*, *N. labradorica* oraz aglutynujące: *R. turbinatus* oraz *Reophax scorpirus*. Świadczy to o tym, że Rjipfjorden znajduje się w stanie przejściowym z fiordu arktycznego do atlantyckiego. W skład grupy arktycznej pojawiającej się na stacji N wchodzi głównie *S. biformis*, gatunek opisywany w przeszłości przez innych autorów jako preferujący dostawy świeżej materii organicznej (Schafer i in., 1991; Gupta i Machain-Castillo, 1993). Natomiast w Rjipfjorden obserwowano również gatunki arktyczne: *I. helenae*, *Islandiella norcrossi*, *S. loeblichii* oraz aglutynujący *Cuneata arctica* (Korsun i Hald, 1998; Kubischta i in., 2011; Majewski, 2009; Jernas i in., 2018), co potwierdza wspomniany wyżej lokalny arktyczny charakter Rjipfjorden.

Analiza wieloczynnikowa przeprowadzona na wszystkich otwornicach (żywych oraz martwych) wyraźnie oddzieliła stację N od pozostałych (Ryc. 5.9). Prawdopodobnie za sprawą gatunku *T. nana*, który zdecydowanie zdominował zbiorowisko otwornic w tym rejonie (Ryc. 5.7 D). Stacje zlokalizowane w Rjipfjorden były znacznie bardziej podobne (Ryc. 5.9). Rozbieżności pomiędzy stacjami wynikają prawdopodobnie z wyraźnej dominacji oportunistycznych gatunków: *C. reniforme* oraz *E. clavatum* w wewnętrznych stacjach Rjipfjorden (Ryc. 5.7 C) co potwierdza dużą dostawę materiału osadowego w tym rejonie i zaburzenia środowiskowe z tym związane.

Analiza wieloczynnikowa przeprowadzona tylko na żywych osobnikach oddziela stacje RIJ 4 oraz N od pozostałych (Ryc. 5.10). Należy jednak pamiętać, że otwornice

aglutynujące nie były brane pod uwagę w tej analizie, stąd wspólną cechą wspomnianych stacji jest mała liczba gatunków dominujących w porównaniu do pozostałych (Ryc. 5.7 C i D).

Na rozbieżności między obiema analizami wpływa również fakt, że zbiorowisko wszystkich (żywych i martwych) otwornic dobrze odzwierciedla sytuację z wiosny, kiedy ma miejsce intensywny zakwit fitoplanktonu w warunkach podlodowych, a intensywny eksport pożywienia do dna prowadzi do masowego rozwoju organizmów bentosowych (Włodarska-Kowalczyk i in., 2013; Łącka i Zajączkowski, 2016). Natomiast analiza podobieństwa wykonana tylko dla żywych otwornic, obrazuje sytuację z późnego lata, kiedy zakwit fitoplanktonu zakończył się i obserwujemy już tylko otwornice którym udało się przeżyć w mniej korzystnych warunkach letnich (Łącka i Zajączkowski, 2016).

Spośród zgrupowań wydzielonych w analizie PC przeprowadzonej dla wszystkich otwornic (żywych oraz martwych), dwa zgrupowania otwornic były istotne dla stacji północnego Svalbardu (Ryc. 5.11). Zgrupowanie *T. nana* FA było istotne dla wszystkich północnych stacji (Ryc. 5.11 B; Tab. 5.1). Gatunek *T. nana* został opisany wyżej jako charakterystyczny dla płytkich mórz arktycznych i subarktycznych w miejscach pojawienia się wieloletniego lodu morskiego (Schafer i Cole, 1982; Schroder-Adams, 1990). Powyższe informacje pozwalają wnioskować, że zbiorowisko jest związane z silnym wpływem zimnych wód z Oceanu Arktycznego oraz częstą obecnością lodu morskiego. Jednak zgrupowanie to jest również związane z wpływem TAW, wskazują na to dodatnie wartości *scores* dla atlantyckiego gatunku *A. glomeratum* (Tab. 5.1). Z drugiej jednak strony dodatnie wartości *scores* obserwowano również w przypadku arktycznego gatunku *S. biformis* (Tab. 5.1). Gatunek ten w przeszłości bywał wiązany ze środowiskami bogatymi w materię organiczną (Schafer i in., 1991; Gupta i Machain-Castillo, 1993). Ponadto został opisany przez Alve'a (1994, 1995) jako zdolny do przetrwania w warunkach stresu środowiskowego, może to tłumaczyć jego tolerancję na TAW, pomimo arktycznego charakteru tego gatunku.

Zgrupowanie *C. reniforme* FA było istotne dla jedynie dla dwóch stacji w centralnym Rjipfjorden (Ryc. 5.11 C; Tab. 5.1). Oportunistyczny gatunek *C. reniforme* dobrze znosi wahania zmętnienia i zasolenia zimnych wód przydennych (Hald i Steinsund, 1996; Szymańska i in., 2017; Jernas i in., 2018). Ponadto gatunek ten dobrze radzi sobie w zaburzonym środowisku (Hald i Korsun, 1997; Polyak i in., 2002; Zajączkowski i Włodarska-Kowalczyk, 2007; podrozdział 6.2.1) oraz warunkach sezonowo występującego lodu morskiego (Klitgaard-Kristensen i in., 2013). Opisane wyżej cechy tłumaczą istotność zgrupowania dla środkowych stacji Rjipfjorden, które znajdują się pod wpływem lodowca

zlokalizowanego w zachodniej odnodze fiordu. Wpływ wspomnianego lodowca potwierdzają wyniki granulometrii, które wskazują na występowanie żwiru w głębszych warstwach osadu centralnej stacji RIJ 2 (Ryc. 5.3 C). Ponadto gatunki akcesoryczne o dodatnich wartościach *scores*: *E. clavatum* i *V. scrippsi* (Tab. 5.1), również wskazują na preferencje zimnych i często mniej zasolonych wód przy dnie (podrozdział 6.2.1). Natomiast gatunki atlantyckie o ujemnych wartościach: *A. glomeratum*, *R. turbinatus*, *N. labradorica* (Tab. 5.1), wskazują na słabsze oddziaływanie AW oraz TAW w centralnej części Rjipfjorden.

Analiza PC przeprowadzona wyłącznie na żywych otwornicach wydzieliła 2 zgrupowania otwornic istotne dla stacji północnego Svalbardu (Ryc. 5.12). Zgrupowanie *E. clavatum* FA było istotne dla niemal wszystkich północnych stacji (Ryc. 5.12 A; Tab. 5.2). Zgrupowanie było już omawiane w podrozdziale 6.2.1, w którym było wiązane z wysokim tempem sedymentacji oraz zimniejszymi wodami. Wskazuje na to również oportunistyczny gatunek akcesoryczny o dodatniej wartości *scores* *C. reniforme* (Tab. 5.2). Natomiast gatunek *C. lobatulus* o ujemnej wartości *scores* (Tab. 5.2) może wskazywać, że zgrupowanie nie jest związane z silnymi prądami przydennymi oraz twardym substratem.

Zgrupowanie *C. lobatulus* FA było istotne dla niektórych stacji Rjipfjorden (Ryc. 5.12 C; Tab. 5.2). Zgrupowanie również było już omawiane w podrozdziale 6.2.1. Dodatnie wartości *scores* osiągnęły gatunki oportunistyczne: *C. reniforme* oraz *E. clavatum*, a także gatunki atlantyckie: *M. affinis* i *B. frigida* (Tab. 5.2). Wydaje się, że zgrupowanie jest związane z wyższą temperaturą wynikającą z napływu AW oraz TAW, ale również z sezonowym napływem lodu morskiego z północy. Jednak gatunkiem akcesorycznym o ujemnej wartości *scores* był atlantycki *N. labradorica* (Tab. 5.2), co może potwierdzać stopniowe przechodzenie środowiska Rjipfjorden z arktycznego na atlantyckie.

Należy jednak podkreślić, że analiza danych PC przeprowadzona tylko na żywych otwornicach w przypadku stacji północnego Svalbardu jest mało reprezentatywna. Analiza oparta tylko na zabarwionych osobnikach nie uwzględnia zbiorowisk otwornic aglutynujących, które w przypadku stacji północnych stanowiły niekiedy nawet ponad 90% całego zbiorowiska.

Najwyższą wartość $\delta^{18}\text{O}$ spośród stacji północnego Svalbardu odnotowano w skorupkach otwornic z RIJ 1, jednak pozostałe stacje również odznaczały się dość wysokimi wartościami (Ryc. 5.13; Tab. 5.3). Prezentowane wyniki dobrze korelują się z obserwowanym wpływem AW oraz TAW, ponieważ w trakcie zimy dochodzi do mieszania kolumny wody powodując zapadanie się AW oraz jej mieszanie i formowanie mocno zasolonej i zimnej WCW. Wartość $\delta^{18}\text{O}$ w Rjipfjorden malała w stronę ujścia fiordu (Ryc.

5.13; Tab. 5.3), prawdopodobnie z powodu wpływu warunków lokalnych wynikających z dostawy wód brakicznych przez lodowiec zlokalizowany w zachodniej odnodze fiordu, a także z dopływu mniej zasolonych wód z Oceanu Arktycznego. Natomiast wysoka wartość $\delta^{18}\text{O}$ obserwowana na stacji N (Ryc. 5.13; Tab. 5.3) świadczy o lokalnym wpływie AW z których powstaje TAW dominująca na omawianej stacji (Ryc. 5.1 D).

Najwyższą wartość $\delta^{13}\text{C}$ spośród stacji północnego Svalbardu odnotowano w skorupkach otwornic ze stacji RIJ 1, dość wysokie wartości obserwowano również na stacjach RIJ 4 oraz N. Niższe wartości $\delta^{13}\text{C}$ obserwowano na stacjach RIJ 2 oraz RIJ 3 (Ryc. 5.13; Tab. 5.3). Wysoka wartość $\delta^{13}\text{C}$ na stacji RIJ 1, wskazuje na mniejszą produktywność w wewnętrznej części Rijpfjorden, co może wynikać z pokrywy śnieżnej, która w tym miejscu utrzymuje się najdłużej na lodzie skutecznie ograniczając dopływ światła, a tym samym rozwój fitoplanktonu w trakcie wiosennego zakwit. Z kolei wysokie wartości $\delta^{13}\text{C}$ na stacjach RIJ 4 oraz N mogą być związane z intensywniejszym napływem AW niż na pozostałych stacjach. AW podczas schładzania zapada się, następnie wpływa pod lód ogrzewając go od spodu prowadząc do jego powolnego topnienia. Proces ten może wpływać negatywnie na eksport świeżej materii organicznej do dna, natomiast może zasilać strefę przydenną w starszą morską materię organiczną o wyższej wartości $\delta^{13}\text{C}$. Niższe wartości $\delta^{13}\text{C}$ obserwowane na stacjach RIJ 2 oraz RIJ 3 świadczą o wysokim eksporcie świeżej materii organicznej w trakcie wiosennego, podlodowego zakwit fitoplanktonu.

Wyniki analiz izotopów stabilnych $\delta^{18}\text{C}$ oraz $\delta^{13}\text{C}$ w skorupkach otwornic pochodzących ze stacji północnego Svalbardu wskazują na występowanie zarówno lokalnych warunków arktycznych i typowych zakwitów okrzemkowych pod lodem morskim jak i intensywnej atlantyfikacji północnego Svalbardu.

6.2.3 Wschodni Svalbard

Niemal wszystkie stacje wschodniego Svalbardu charakteryzowały się większą liczebnością oraz liczbą gatunków otwornic wapiennych niż aglutynujących (Ryc. 5.4 oraz 5.6). Obszar Nordaustlandet charakteryzował się dość niskim indeksem H' , przy jednoczesnej wysokiej liczebności otwornic (Ryc. 5.4). Liczebność otwornic z obszaru Nordaustlandet malała wraz z oddalaniem się od lodowca przy jednoczesnym wzroście liczby gatunków (Ryc. 5.4; 5.6). Wysoka liczebność oraz liczba gatunków na stacjach z tego rejonu może być związana z obserwowanym tam wpływem AW oraz TAW (Ryc. 5.1 E). Natomiast wysoka liczebność fauny otwornicowej bezpośrednio w sąsiedztwie lodowca Austfonna, prawdopodobnie jest spowodowana lokalnym formowaniem się lodu morskiego, który

umożliwia bogaty zakwit fitoplanktonu w tym obszarze i eksport materii organicznej do dna (Fortier i in., 2002; Zajązkowski i in., 2010b). Natomiast Wassmann i in. (2006) w swoich badaniach przeprowadzonych na Morzu Barentsa stwierdzili, że produkcja pierwotna może być wyższa w otwartym morzu ze względu na intensywny wiatr, który miesza kolumnę wody docierając do głębszych warstw bogatszych w składniki odżywcze. Jednak liczebność otwornic malejąca wraz z oddalaniem się od czoła lodowca może wskazywać raczej na zmniejszającą się produkcję pierwotną w tym obszarze. Liczebność żywej bentosowej fauny otwornicowej w rejonie Nordaustlandet również spadała wraz z oddalaniem się od lodowca, co mogło być spowodowane mniejszą dostawą materii organicznej do dna (Ryc.5.5). Możliwe, że brak lodu na otwartym morzu spowodował wcześniejszy rozkwit fitoplanktonu, wabiąc tym samym zooplankton (Berge i in., 2005), który skutecznie wyzerał materię organiczną z kolumny wody ograniczając dopływ pokarmu dla fauny bentosowej (Zajązkowski i in., 2010a; Pawłowska i in., 2011; podrozdział 6.2.1).

Stacje zlokalizowane w obszarze Edgeøya odznaczały się najniższą liczebnością otwornic, która jednak wzrastała na stacjach oddalonych od lodowca. Podobny trend zaobserwowano w przypadku indeksu H' (Ryc. 5.4 A). Lodowiec Edgeøyjökulen uchodzący do morza po wschodniej stronie Edgeøya (Ryc. 2.1) jest aktualnie w stanie stagnacji i odprowadza duże ilości wód roztopowych odpływami subglacjalnymi. Świadczy o tym wyraźnie wyższa ilość zawiesiny w strefie przydennej przed jego czołem (Ryc. 5.2 F). Stąd niska liczebność i bioróżnorodność otwornic na jego bezpośrednim przedpolu. Dopiero na stacji EDG 3, oddalonej od bezpośredniego kontaktu z wodami roztopowymi lodowca dominowały otwornice aglutynujące. Wysoka liczba osobników należących do taksonów aglutynujących na tej stacji może wynikać ze znacznie niższego tempa sedymentacji (por. Majewski i Zajązkowski, 2007; Hald i Korsun, 1997; podrozdział 6.2.2).

Wszystkie stacje wschodniego Svalbardu odznaczały się licznym występowaniem oportunistycznych gatunków otwornic bentosowych *C. reniforme* oraz *E. clavatum*. Na niemal wszystkich stacjach zlokalizowanych w obrębie Nordaustlandet dominował gatunek *E. clavatum*, natomiast na wszystkich stacjach z okolic Edgeøya przeważał *C. reniforme* (Ryc. 5.7 E i F). Oportunistyczny charakter obu gatunków został już opisany w podrozdziałach 6.2.1 oraz 6.2.2. Według badań przeprowadzonych przez Halda i Korsuna (1997) liczna obecność *E. clavatum* świadczy o dostawach starej materii organicznej. Natomiast liczna obecność *C. reniforme* wskazuje na dostawę świeżego pożywienia przynajmniej raz w roku. Jednak prezentowane wyniki nie wskazują na powyższe, ponieważ liczebność oraz udział żywych otwornic wskazuje na wysoką produktywność

w obrębie Nordaustlandet oraz obecność starej materii organicznej w rejonie Edgeøya. Ponadto dane literaturowe wskazują na fakt, że *E. clavatum* jest gatunkiem skutecznie zastępującym *C. reniforme* w trudniejszych do przetrwania warunkach oceanograficznych (Hald i Vorren, 1987; Ślubowska i in., 2005). Tego również nie potwierdzają wyniki uzyskane w tym rejonie, gdyż najtrudniejsze warunki tj. duża dostawa materiału osadowego, panują w rejonie Edgeøya (Ryc. 5.2 E i F).

Gatunek *C. lobatulus* dominował na większości stacji wschodniego Svalbardu (Ryc. 5.7 E i F), a jego udział procentowy w zbiorowisku otwornic malał wraz z oddalaniem się od lodowca. Gatunek ten zazwyczaj jest korelowany z występowaniem twardego substratu (Klitgaard-Kristensen i in., 2002; Hansen i Knudsen, 1995; podrozdział 6.2.1). W rejonie wschodniego Svalbardu *C. lobatulus* najliczniej występował na stacjach charakteryzujących się zwiększonym udziałem grubszych frakcji osadu, tj. piasku i żwiru (Ryc. 5.3. E i F), co najprawdopodobniej jest efektem transportu materiału osadowego z gór lodowych.

Zewnętrzne stacje wschodniego Svalbardu charakteryzowały się dominacją aglutynującego gatunku *T. nana* (Ryc. 5.7 E i F). Gatunek ten został szczegółowo opisany w podrozdziale 6.2.2, jako typowy dla płytkich mórz arktycznych i subarktycznych. Być może obecność tego gatunku wskazuje, na dopływ wód z Oceanu Arktycznego i ich oddziaływanie na skład gatunkowy zewnętrznych stacji Nordaustlandet oraz Edgeøya.

Na środkowej stacji zlokalizowanej w sąsiedztwie Nordaustlandet notowano dominujące gatunki *B. frigida*, *I. helenae* oraz *S. loeblichii* (Ryc. 5.7 E). *B. frigida* był wcześniej opisywany jako gatunek atlantycki (Majewski i in., 2009; Zajączkowski i in., 2010a; podrozdział 6.2.1; 6.2.2) i jego wystąpienie może być związane z obserwowanymi tam AW oraz TAW (Ryc. 5.1 E). Wskazują na to również wyniki badań Halda i Korsuna (1997), którzy obserwowali *B. frigida* w zewnętrznej części fiordu Hornsund, który znajdował się pod wpływem AW. Jednak gatunek ten był również korelowany z występowaniem lodu morskiego (Steinsund, 1994; Zajączkowski i in., 2010a; Kubischta i in., 2011; Szymańska i in., 2017; podrozdział 6.2.1 oraz 6.2.2). Wieloletni lód morski dociera w rejon Nordaustlandet z północy wraz z wodą z Oceanu Arktycznego. Występowanie gatunku *I. helenae* wielu autorów wiąże z sezonowymi dostawami świeżego fitodetrytus (Hald i Steinsund, 1996; Wollenburg i in., 2004; Kubischta i in., 2011; Husum i in., 2015; Jernas i in., 2018) oraz obecnością wód sezonowo wolnych od lodu morskiego (Hald i Steinsund, 1996; Kubischta i in., 2011; Husum i in., 2015; Jernas i in., 2018). Znajduje to potwierdzenie w wynikach niniejszej rozprawy, które wskazują na dopływ materii organicznej na stacjach Nordaustlandet oddalonych od czoła lodowca Austfonna. Również obecność gatunku

S. loeblichii wydaje się potwierdzać wyżej opisane wnioski, ponieważ wielu autorów wiązało w przeszłości ten gatunek z wysoką sezonową produktywnością (Polyak i in., 2002; Jernas i in., 2018) oraz osadem bogatym w substancje organiczne (Korsun i in., 1995; Polyak i in., 2002; Jernas i in., 2018), ale również z akwenami okresowo wolnymi od lodu morskiego (Steinsund, 1994; Ślubowska i in., 2005; Majewski i in., 2009; Kubischta i in., 2011; Jernas i in., 2018).

Jednym z gatunków dominujących na centralnej oraz zewnętrznej stacji w okolicy Edgeøya był *S. biformis* (Ryc. 5.7 F). Arktyczny charakter tego gatunku został już opisany w podrozdziale 6.2.2. Lloyd (2006) odnotował *S. biformis* w zimnych polarnych wodach Zatoki Disko w południowej części Morza Baffina u zachodnich wybrzeży Grenlandii. Z kolei autorzy Jennings i Helgadottir (1994) notowali omawiany gatunek w zimnych wodach fiordów wschodniej Grenlandii. Zatem wystąpienie *S. biformis* na większości stacji w obrębie Edgeøya, może potwierdzać arktyczny charakter oraz mniejszy wpływ AW oraz TAW w tym rejonie (Ryc. 5.1 F). Z drugiej jednak strony obserwowano tam również gatunki atlantyckie: *N. labradorica* na centralnej stacji EDG 2, a także *A. glomeratum* i *R. turbinatus* na zewnętrznej stacji EDG 3 (Ryc. 5.7 F). Również Hald i Korsun (1997) obserwowali wyżej wymienione gatunki w zewnętrznych częściach fiordów Svalbardu, które znajdowały się pod wpływem AW. W późniejszych latach do podobnych wniosków doszli Pawłowska i in. (2017), którzy także obserwowali omawiane gatunki w centralnej oraz zewnętrznej części fiordu Hornsund, które były pod wpływem AW. Obecność atlantyckich gatunków *N. labradorica*, *A. glomeratum* oraz *R. turbinatus* w rejonie Edgeøya może wskazywać na krótkookresowy, ale intensywny wpływ AW, który zdominował warunki lokalne.

Grupa gatunków oportunistycznych dominowała na niemal wszystkich stacjach wschodniego Svalbardu (Ryc. 5.8 E i F), co najpewniej jest związane z bliskością lodowców i związaną z nimi dużą dostawą materiału osadowego (Kubischta i in., 2011; podrozdział 6.2.1). Wniosek ten potwierdza przede wszystkim szczególnie wysoki udział gatunków oportunistycznych obserwowany na stacji EDG 1 zlokalizowanej bezpośrednio przed czołem lodowca (Ryc. 5.8 F). Jednak obie lokalizacje charakteryzowały się występowaniem grupy gatunków atlantyckich, której udział w przypadku niemal każdej stacji pomiarowej był większy niż grupy arktycznej (Ryc. 5.8 E i F). W przypadku stacji zlokalizowanych u wybrzeży Nordaustlandet wpływ AW oraz TAW został udokumentowany własnymi pomiarami CTD w trakcie prac terenowych (za wyjątkiem NAL 1; Ryc. 5.1 E). Fakt, że udział grupy atlantyckiej na stacjach w okolicy Edgeøya jest istotny i zwiększa się wraz z oddalaniem od lodowca wskazuje, że opisywany rejon może okresowo znajdować się pod

działaniem AW. Prezentowane wyniki wskazują, że wschodni Svalbard znajduje się dopiero w fazie inicjalnej atlantyfikacji.

Analiza wieloczynnikowa podobieństw potwierdza występowanie różnic pomiędzy stacjami wschodniego Svalbardu. Analiza ta przeprowadzona na wszystkich otwornicach (żywych oraz martwych) wyraźnie oddzieliła stację EDG 1 od pozostałych (Ryc. 5.9). Było to spowodowane dominacją gatunków oportunistycznych na tej stacji, której nie obserwowano w takiej skali na innych stacjach (Ryc. 5.7 F; 5.8 F). Stacje EDG 2 oraz EDG 3 zostały rozdzielone (Ryc. 5.9), możliwe że miały na to wpływ różnice w składzie gatunkowym, malejący udział oportunistów oraz wzrastający udział gatunków atlantyckich oraz arktycznych (Ryc. 5.7 F; 5.8 F). Natomiast, stacje zlokalizowane w pobliżu Nordaustlandet były podobne, mimo niewielkich rozbieżności (Ryc. 5.9). Różnica pomiędzy stacjami wynika prawdopodobnie ze wzrastającego wpływu AW oraz udziału gatunków z nim związanych (Ryc. 5.1 E; 5.8 E). W przypadku analizy wykonanej na zbiorowisku wyłącznie żywych osobników stopień podobieństwa między stacjami w obrębie Edgeøya jest większy, natomiast wśród stacji z okolicy Nordaustlandet podobieństwo jest mniejsze (Ryc. 5.10). Różnice prawdopodobnie wynikają z wyeliminowania ze zbioru danych otwornic aglutynujących, co zostało opisane wcześniej w podrozdziałach 6.2.1 oraz 6.2.2.

Analiza PC przeprowadzona dla wszystkich otwornic (żywych oraz martwych) wydzieliła 3 zgrupowania otwornic istotne dla stacji wschodniego Svalbardu (Ryc. 5.11). Zgrupowanie *C. lobatulus* FA było istotne dla niemal wszystkich stacji z rejonu Nordaustlandet oraz EDG 1 usytuowanej bezpośrednio przed czołem lodowca (Ryc. 5.11 A; Tab. 5.1). Gatunek *C. lobatulus* dominował na większości stacji wschodniego Svalbardu (Ryc. 5.7 E i F), a jego występowanie jest najprawdopodobniej powiązane z pojawianiem się w tym rejonie osadów gruboziarnistych dostarczanych przez lodowce Austfonna oraz Edgeøyjøkulen. Najbardziej wyraźne było to w przypadku stacji NAL 1, gdzie zaobserwowano frakcję zwirową (Ryc. 5.3 E). Niekiedy obecność *C. lobatulus* bywała również wiązana z wpływem AW w danym rejonie (Ślubowska i in., 2005; Klitgaard-Kristensen i in., 2002; Klitgaard-Kristensen i in., 2013; podrozdział 6.2.1). Częściowo potwierdzają to wyniki niniejszej rozprawy, ponieważ niektóre stacje z okolicy Nordaustlandet znajdowały się pod wpływem AW oraz TAW (Ryc. 5.1 E). Ponadto zgrupowanie *C. lobatulus* FA obejmowało gatunki akcesoryczne, które wcześniej wymieniano jako dominujące dla stacji wschodniego Svalbardu, o dodatnich wartościach *scores*: *N. labradorica*, *E. clavatum*, *C. reniforme*, *B. frigida* oraz o wartościach ujemnych: *V. scrippsi* i *E. advenus* (Tab. 5.1). Wszystkie gatunki akcesoryczne zostały wcześniej

szczegółowo opisane. Na podstawie preferencji środowiskowych *N. labradorica* oraz *B. frigida* można wnioskować, że omawiane zgrupowanie preferuje środowiska znajdujące się pod wpływem AW oraz TAW. Oportunistyczne gatunki *C. reniforme* oraz *E. clavatum* wskazują na występowanie trudnych warunków środowiskowych wynikających z bliskiego położenia lodowców, które dostarczają znaczące ilości materiału osadowego w sąsiedztwie Edgeøya oraz Nordaustlandet.

Ujemne wartości *scores* dla *V. scrippsi* i *E. advenus* w opisywanym zgrupowaniu, nie dają się zinterpretować jednoznacznie. Pewnym wytłumaczeniem może być fakt, że oba te gatunki były korelowane z występowaniem zdegradowanej materii organicznej (Alve, 1995; Thomas i in., 2000; Tsujimoto i in., 2006). Wcześniej prezentowane w tej pracy wyniki wskazują na dostawę świeżej materii organicznej do dna w rejonie Nordaustlandet. Niemniej, brak dostatecznej ilości danych pozwalających na statystyczne opracowanie ich, zatem nie pozwalają na stanowcze sformułowanie zależności występowania tych gatunków od stopnia degradacji dostępnej materii organicznej w środowisku.

Zgrupowanie *C. reniforme* FA było istotne dla niemal wszystkich stacji wschodniego Svalbardu (Ryc. 5.11 C; Tab. 5.1). Warunki preferowane przez gatunek *C. reniforme* zostały szczegółowo opisane w podrozdziale 6.2.1 oraz 6.2.2. Zgrupowanie wydaje się być związane z niższą temperaturą oraz spływającym z Oceanu Arktycznego lodem morskim, a także wysokim tempem sedymentacji. Gatunki akcesoryczne o dodatnich wartościach *scores*: *E. clavatum* i *V. scrippsi* (Tab. 5.1), mogą również wskazywać na preferencje zimnych i często mniej zasolonych wód przy dnie. Gatunki atlantyckie o ujemnych wartościach *scores*: *A. glomeratum*, *R. turbinatus*, *N. labradorica* (Tab. 5.1), wskazują na mniejszy wpływ AW oraz TAW w rejonie wschodniego Svalbardu, potwierdzając tym samym sugerowane wcześniej różnice pomiędzy poszczególnymi obszarami wokół Svalbardu.

Zgrupowanie *E. clavatum* FA było istotne dla niektórych stacji wschodniego Svalbardu (NAL 3, NAL 4 oraz EDG 3; Ryc. 5.11 D; Tab. 5.1). Zgrupowanie może być związane z wpływem AW oraz TAW, na co wskazują gatunki akcesoryczne o dodatnich *scores*: gatunki atlantyckie *N. labradorica*, *R. turbinatus* oraz *A. glomeratum* (Tab. 5.1). Jednak dodatnie wartości *scores* obserwowano również w przypadku gatunków arktycznych: *S. biformis*, *S. loeblichii* (Tab. 5.1). Wyniki niniejszej rozprawy wskazują, że środowisko wschodniego Svalbardu może być kształtowane przez mieszanie się wód w strefie frontalnej, a co z tym związane szybkich zmian w zbiorowiskach otwornic. Ujemne wartości *scores* były notowane również dla gatunków *C. lobatulus* oraz *T. nana* (Tab. 5.1). Wyniki mogą wskazywać, że zgrupowanie nie wymaga twardego substratu oraz występowania silnych

prądów przy dnie. Natomiast ujemna wartość *scores* dla *T. nana* wskazuje na brak związku zgrupowania z zimnymi ArW. Wykluczające się cechy tego zgrupowania potwierdzają wcześniejsze rozważania co do mieszania się różnych mas wodnych, powodujących zmiany z warunków atlantyckich na arktyczne i odwrotnie w rejonie wschodniego Svalbardu.

Analiza PC przeprowadzona wyłącznie na żywych otwornicach wydzieliła 3 zgrupowania otwornic istotne dla stacji wschodniego Svalbardu (Ryc. 5.12). Zgrupowanie *E. clavatum* FA było istotne dla wszystkich stacji Nordaustlandet oraz Edgeøya (Ryc. 5.12 A; Tab. 5.2). Wydaje się, że omawiane zgrupowanie związane jest z wysokim tempem sedymentacji oraz zimniejszymi wodami (podrozdział 6.2.1 oraz 6.2.2) - warunkami, które sprzyjają rozwojowi oportunistycznych gatunków. Ponadto, gatunkiem akcesorycznym o dodatniej wartości *scores* był również oportunistyczny *C. reniforme* (Tab. 5.2). Gatunek *C. lobatulus* osiągał ujemne wartości *scores* (Tab. 5.2) co może wskazywać, że zgrupowanie nie jest związane z twardym substratem (podrozdział 6.2.1 oraz 6.2.2).

Zgrupowanie *N. labradorica* FA było istotne wyłącznie dla stacji EDG 3 (Ryc. 5.12 B; Tab. 5.2). Atlantycki charakter *N. labradorica* został wcześniej szczegółowo opisany (podrozdział 6.2.1). Obecność tego zgrupowania w rejonie Edgeøya może potwierdzać krótkookresowy wpływ AW, który świadczyłby o fazie inicjalnej atlantyfikacji rejonu wschodniego Svalbardu. Gatunki o dodatnich wartościach *scores* - *C. lobatulus* oraz *E. clavatum* (Tab. 5.2) - mogą świadczyć o wysokim tempie sedymentacji oraz występowaniu twardego substratu w sąsiedztwie Edgeøya. Ujemne wartości *scores* w tym zgrupowaniu zanotowano dla atlantyckiego gatunku *M. affinis* (Tab. 5.2). Wielu autorów wiązało ten gatunek z występowaniem częściowo rozłożonej materii organicznej (Korsun i Polyak, 1989; Corliss, 1991; Ślubowska i in., 2005; Zajączkowski i in., 2010a; Kucharska i in., 2018; podrozdział 6.2.1). Zatem wyniki niniejszej pracy wskazują, na występowanie świeżej materii organicznej w rejonie Edgeøya oddalonym od czoła lodowca.

Zgrupowanie *C. lobatulus* FA, było istotne dla niemal wszystkich stacji Nordaustlandet oraz EDG 1 (Ryc. 5.12 C; Tab. 5.2). W omawianym zgrupowaniu dodatnie wartości *scores* osiągnęły gatunki oportunistyczne: *C. reniforme* oraz *E. clavatum*, a także gatunki atlantyckie: *M. affinis* i *B. frigida* (Tab. 5.2). Wydaje się, że zgrupowanie jest związane z wpływem AW oraz TAW, ale również z sezonowym spływem lodu morskiego z północy, a także niewielką dostawą świeżej materii organicznej (podrozdział 6.2.1). W zgrupowaniu tym pojawił się również atlantycki gatunek *N. labradorica* (Tab. 5.2), o ujemnych wartościach *scores*. Prezentowane dane potwierdzają wcześniejsze

przypuszczenia, że środowisko wschodniego Svalbardu znajduje się dopiero w fazie inicjalnej atlantyfikacji.

W przypadku stacji wschodniego Svalbardu, analiza PC może być obarczona błędem ze względu na występowanie różnych mas wodnych, które mieszają się w strefie frontalnej tego obszaru. Częste zmiany mas wodnych prowadzą do szybkich zmian warunków oceanograficznych z atlantyckich na arktyczne, tym samym wpływając na skład gatunkowy fauny bentosowej występującej w rejonie Nordaustlandet oraz Edgeøya.

Najwyższą wartość $\delta^{18}\text{O}$ spośród stacji wschodniego Svalbardu obserwowano w skorupkach otwornic z EDG 1. Stacje zlokalizowane w rejonie Nordaustlandet oraz EDG 3 charakteryzowały się wartościami pośrednimi. Natomiast najniższą wartość $\delta^{18}\text{O}$ obserwowano na stacji EDG 2 (Ryc. 5.13; Tab. 5.3). Wysokie wartości $\delta^{18}\text{O}$ zwykle przypisywane są wpływowi AW, jednak stacja EDG 1 znajduje się w bezpośrednim sąsiedztwie lodowca i nie stwierdzono tam obecności AW. Bardziej prawdopodobne wydaje się wymywanie węglanów z okolicznych skał i dostarczanie ich do fiordu wraz z wypływami spod lodowca. Otwornice wykorzystwały węglany dostarczone z lądu w procesie kalcyfikacji, co wpłynęło na wartości $\delta^{18}\text{O}$ na stacji EDG 1. Stosunkowo wysokie wartości $\delta^{18}\text{O}$ w rejonie Nordaustlandet oraz EDG 3 mogą być związane z okresowym wpływem AW.

Najwyższe wartości $\delta^{13}\text{C}$ spośród stacji wschodniego Svalbardu odnotowano w skorupkach otwornic z NAL 1, EDG 1 oraz EDG 2. Pośrednie wartości $\delta^{13}\text{C}$ obserwowano na pozostałych stacjach Nordaustlandet. Natomiast najniższą wartość $\delta^{13}\text{C}$ notowano na stacji EDG 3 (Ryc. 5.13; Tab. 5.3). Wysokie wartości $\delta^{13}\text{C}$ na przedpolach lodowców, mogą świadczyć o dostawie starej materii organicznej wraz z wodami wytopiskowymi z lodowców w tych obszarach (Rasmussen i in., 2012; podrozdział 6.2.1). Natomiast niższe wartości $\delta^{13}\text{C}$ na pozostałych stacjach Nordaustlandet wskazują na zwiększającą się produkcję pierwotną oraz eksport materii organicznej do dna w miarę oddalania się od czoła lodowca. Wyniki niniejszej rozprawy mogą potwierdzać te wnioski, jednak należy przypomnieć, że liczebność otwornic z tych stacji malała wraz odległością od czoła lodowca (Ryc. 5.4 A). Może to sugerować wysoką konsumpcję świeżej materii organicznej w toni wodnej przez zooplankton. Najniższa wartość $\delta^{13}\text{C}$ na zewnętrznej stacji z rejonu Edgeøya, może świadczyć o wysokiej produktywności w tym miejscu, potwierdza to również liczebność otwornic, wzrost udziału otwornic aglutynujących oraz liczba gatunków dominujących na stacji EDG 3 (Ryc. 5.4 A; 5.7 F).

Wyniki analiz izotopów stabilnych $\delta^{18}\text{O}$ oraz $\delta^{13}\text{C}$ w skorupkach otwornic pochodzących ze stacji wschodniego Svalbardu mogą być jednak niereprezentatywne. Obszar

wschodniego Svalbardu charakteryzuje się bardzo zmiennymi warunkami środowiskowymi ze względu na mieszanie się różnych mas wodnych oraz tworzenie się wód lokalnych.

7. Podsumowanie

Prezentowane w niniejszej pracy wyniki badań hydrograficznych (CTD) wskazują, że proces atlantyfikacji w obszarze Svalbardu postępuje od strony zachodniej w kierunku północnym i dalej na wschód Archipelagu. Prezentowane dane CTD pokazują stan chwilowy środowiska morskiego Archipelagu w drugiej połowie lata 2016. Skład gatunkowy, liczebność, zbiorowiska oraz kompozycja izotopowa skorupki otwornic pozwalają prześledzić długofalowe skutki procesów hydrograficznych. Stosunkowo krótki czas życia otwornic, a więc ich szybka reakcja na zmiany środowiska tak na poziomie poszczególnych gatunków jak i na poziomie zgrupowań powodują, że ta grupa organizmów szybko przystosowuje się do nowych warunków. Z drugiej strony wprowadza to swoiste przekłamania w wynikach, gdyż dynamiczna kalcyfikacja młodych organizmów w okresie wiosennego zakwitnięcia fitoplanktonu nie zawsze odzwierciedla subarktyczne warunki środowiska morskiego Svalbardu latem, gdzie gwałtowne topnienie licznych lodowców wprowadza silne zaburzenia środowiskowe i powoduje masowe obumieranie wielu gatunków otwornic. Pomimo tych ograniczeń w wykorzystaniu otwornic bentosowych jako wskaźnika procesów oceanograficznych, prezentowane w niniejszej pracy wyniki analiz otwornicowych potwierdzają wnioski z pomiarów hydrograficznych z drugiej połowy lata tj. różne stadia rozwoju atlantyfikacji środowiska morskiego Svalbardu. Zaawansowane stadium atlantyfikacji obserwowano w fiordach zachodniego Svalbardu. Dane ze stacji północnego Svalbardu wskazują na pośrednie stadium, natomiast stacje z rejonu wschodniego Svalbardu na fazę inicjalną atlantyfikacji.

Przedstawione dane CTD wskazują, że środowisko morskie zachodniego Svalbardu w drugiej połowie lata 2016 znajdowało się pod silnym wpływem AW oraz TAW. Lodowce w przeszłości uchodzące do Isfjorden wycofały się do bocznych fiordów lub zatok przylodowcowych i obecnie nie mają znaczącego wpływu na warunki lokalne występujące w centralnej części fiordu. Wysoka bioróżnorodność otwornic oraz grupa gatunków atlantyckich zdominowana przez wapienny *N. labradorica* oraz aglutynujące *A. glomeratum* i *R. turbinatus* również wskazują na zaawansowaną atlantyfikację Isfjorden. Natomiast środowisko morskie Wijdefjorden znajduje się pod silniejszym wpływem warunków lokalnych tj. dopływu wód roztopowych z lodowców w głębi fiordu i bliskość paku lodowego z Oceanu Arktycznego, które wpływają na warunki hydrograficzne fiordu, zmieniając tym samym skład fauny bentosowej. Wysoka liczebność otwornic oraz gatunki atlantyckie w Wijdefjorden świadczą jednak o jego atlantyfikacji. Poza atlantyckim gatunkiem

N. labradorica w fiordzie tym dominował również gatunek *B. frigida* wiązany nie tylko z wpływem AW ale również z sezonowym występowaniem lodu morskiego. Najistotniejszym zgrupowaniem spośród wszystkich otwornic (żywych oraz martwych) dla obszaru zachodniego Svalbardu było *C. lobatulus* FA wraz z atlantyckimi gatunkami akcesorycznymi. Spośród żywych osobników najistotniejsze było zgrupowanie *N. labradorica* FA. Oba zgrupowania wskazują na atlantyfikację zachodniego Svalbardu ze względu na gatunki korelowane z wyższą temperaturą oraz występowaniem AW. W obu fiordach $\delta^{18}\text{O}$ osiągał wysokie wartości, typowe dla środowisk zdominowanych przez AW. Wyższe wartości stosunku stabilnych izotopów tlenu ($\delta^{18}\text{O}$) w skorupkach otwornic były obserwowane w Isfjorden niż Wijdefjorden, co potwierdza silniejszy wpływ AW w Isfjorden. Z kolei niższe wartości $\delta^{13}\text{C}$ w fiordach zachodniego Svalbardu świadczą o intensywnej produkcji pierwotnej i eksporcie świeżej materii organicznej do dna w czasie wiosennej kalcyfikacji skorupki otwornic. Silnie zatlantyfikowane środowisko zachodniego Svalbardu charakteryzuje się obecnością ciepłych i zasolonych AW oraz wysoką produktywnością, co znajduje odzwierciedlenie w składzie izotopowym skorupki otwornic. Zbiorowiska otwornic w tym rejonie cechuje wysoka bioróżnorodność i liczebność oraz dominacja gatunków atlantyckich. Silny wpływ AW nie spowodował istotnych zmian w liczbie gatunków otwornic, co może świadczyć o tym, że liczba gatunków nie jest wskaźnikiem atlantyfikacji.

Północny Svalbard pod koniec lata 2016 znajdował się głównie pod wpływem TAW. Może to oznaczać, że warunki lokalne w tym obszarze miały większy wpływ na środowisko morskie niż w przypadku zachodniego Svalbardu. W Rijpfjorden występowała AW napływająca do wnętrza fiordu z szelfu. Jednak fiord ten znajdował się również pod wpływem WCW, której obecność jest efektem corocznego napływu wieloletniego lodu morskiego z północy do wnętrza fiordu. Warunki panujące na stacji N również były kształtowane przez AW oraz zimne wody z Oceanu Arktycznego niosące pak lodowy. Na postępującą atlantyfikację Rijpfjorden wskazywała wysoka bioróżnorodność otwornic oraz przewaga gatunków aglutynujących. Bioróżnorodność na stacji N była znacznie niższa, co jest efektem wpływu zimnych wód z Oceanu Arktycznego oraz obecności wieloletniego lodu morskiego - czynników ograniczających wpływ AW. Na wszystkich stacjach północnego Svalbardu dominował atlantycki gatunek *A. glomeratum* wraz z gatunkiem *T. nana* wiązany z zimnymi wodami i lodem morskim, po raz kolejny wskazując na jednoczesny wpływ AW oraz Oceanu Arktycznego w tym rejonie. Najistotniejszym zgrupowaniem spośród wszystkich otwornic (żywych oraz martwych) dla rejonu północnego Svalbardu było właśnie *T. nana* FA wraz z akcesorycznym gatunkiem atlantyckim *A. glomeratum*. Istotny wpływ AW na

Środowisko Rijpfjorden potwierdza również obecność gatunku *M. affinis*, który pierwszy raz został odnotowany na północy Svalbardu. Również atlantycki gatunek *B. frigida* świadczy nie tylko o wpływie AW w Rijpfjorden ale również na formowanie się lodu morskiego w okresie zimowym. Arktyczny gatunek *S. biformis* w Rijpfjorden świadczy o lokalnym arktycznym charakterze fiordu, wraz z obserwowanym wpływem AW w okresie letnim. Również fakt, że grupa gatunków atlantyckich osiągała podobną liczebność jak grupa arktyczna na wszystkich stacjach północnego Svalbardu w drugiej połowie lata wskazuje, że rejon ten znajduje się w stanie przejściowym z arktycznego do atlantyckiego. Również wysokie wartości $\delta^{18}\text{O}$ w skorupkach otwornic z północnego Svalbardu wskazują na jego postępującą atlantyfikację. Wysoka wartość $\delta^{13}\text{C}$ na stacji RIJ 1, wskazuje na mniejszy eksport świeżej materii organicznej do dna w wewnętrznej części Rijpfjorden. Również na stacji RIJ 4 oraz N wartości $\delta^{13}\text{C}$ były dość wysokie, wskazując na intensywniejszy udział AW niż na pozostałych stacjach. Z kolei niższe wartości $\delta^{13}\text{C}$ na stacjach RIJ 2 oraz RIJ 3 świadczą o wyższym eksporcie do dna świeżej materii organicznej w trakcie wiosennego, podlodowego zakwitu fitoplanktonu. Rijpfjorden odznaczał się wysoką bioróżnorodnością otwornic bentosowych, a cały obszar północnego Svalbardu charakteryzował się udziałem otwornic aglutynujących oraz gatunków atlantyckich. Także analizy PC oraz stosunkowo wysokie wartości $\delta^{18}\text{O}$ w skorupkach otwornic z obszaru północnego Svalbardu świadczą o jego postępującej atlantyfikacji.

Prezentowane dane CTD wskazują, że środowisko morskie wschodniego Svalbardu znajdowało się pod słabszym wpływem AW oraz TAW w porównaniu do obszaru zachodniego oraz północnego. Ponadto warunki środowiskowe w rejonie Nordaustlandet oraz Edgeøya są bardzo zróżnicowane. Mimo, że oba obszary charakteryzują się obecnością lodowca uchodzącego do otwartego morza, lodowce te różnią się stopniem regresji. Środowisko Nordaustlandet jest kształtowane przede wszystkim przez wpływ lodowca Austfonna, który mimo postępującej regresji nadal nie przeszedł do fazy stagnacji. Oznacza to, że warunki w obrębie Nordaustlandet szczególnie latem kształtowane są głównie przez zimne wody roztopowe i stosunkowo niewielką ilość zawiesiny. Dlatego bezpośrednio przed czołem lodowca nie obserwowano wpływu AW oraz TAW. Bioróżnorodność otwornic była dość niska u wybrzeży Nordaustlandet. Wzrost bioróżnorodności wraz z odległością od czoła lodowca oraz wysoka liczebność otwornic wskazuje na wpływ AW w rejonie Nordaustlandet. Natomiast wysoka liczebność fauny otwornicowej bezpośrednio w sąsiedztwie lodowca Austfonna, jest spowodowana lokalnym formowaniem się lodu morskiego, który

intensyfikuje zakwit fitoplanktonu w tym obszarze i zwiększony eksport materii organicznej do dna.

Z kolei środowisko morskie rejonu Edgeøya kształtują warunki lokalne wynikające z obecności lodowca Edgeøyjøkulen, który znajduje się w fazie stagnacji. Subglacjalne wypływy przy dnie w porze letniej dostarczają duże ilości wód roztopowych bogatych w zawiesinę powodując silne zaburzenia środowiskowe w strefie naddennej. Czynniki te sprawiają, że warunki środowiskowe w obrębie Edgeøya są bardzo zmienne i niestabilne, szczególnie bezpośrednio przed czołem lodowca Edgeøyjøkulen. Dlatego nie obserwowano wpływu AW oraz TAW w tym rejonie. Oprócz warunków lokalnych środowisko morskie obszaru Edgeøya jest również warunkowane wpływem zimnych wód z Morza Barentsa, które spowodowały wystąpienie LW na stacji EDG 3. Zmienne warunki i zaburzenia środowiskowe na przedpolu lodowca Edgeøyjøkulen są przyczyną niskiej bioróżnorodności oraz liczebności otwornic w tym rejonie.

Cały obszar wschodniego Svalbardu odznaczał się dominacją gatunków oportunistycznych *C. reniforme* oraz *E. clavatum*, które również świadczą o silnie zaburzonym środowisku. Analiza PC także wskazała zgrupowania *C. reniforme* FA oraz *E. clavatum* FA jako istotne w rejonie wschodniego Svalbardu. Zgrupowania te świadczą, że środowisko w obrębie Edgeøya oraz Nordaustlandet jest kształtowane przez mieszające się wody w strefie frontalnej, prowadząc do szybkich zmian w zbiorowiskach otwornic. Obecność gatunku *C. lobatulus* była efektem transportu materiału osadowego z gór lodowych w tym rejonie. Wskazuje na to również zgrupowanie *C. lobatulus* FA wraz z akcesorycznymi gatunkami atlantyckimi oraz oportunistycznymi. Natomiast gatunek *T. nana* na zewnętrznych stacjach wschodniego Svalbardu wskazuje na dopływ zimnych wód z Oceanu Arktycznego i ich oddziaływanie na skład gatunkowy w obrębie Nordaustlandet oraz Edgeøya. Jednak w obszarze Nordaustlandet dominował również gatunek *B. frigida*, który wskazuje na wpływ AW oraz TAW, ale także na obecność wieloletniego lodu morskiego docierającego w rejon Nordaustlandet wraz z wodą z Oceanu Arktycznego. Dominacja gatunków *I. helenae* oraz *S. loeblichii* wskazuje na intensywny dopływ materii organicznej na stacjach Nordaustlandet oddalonych od czoła lodowca Austfonna. Gatunek *S. biformis* dominował w rejonie Edgeøya wskazując na arktyczny charakter oraz mniejszy wpływ AW oraz TAW w tym obszarze. Z drugiej jednak strony obecność gatunków atlantyckich: *N. labradorica*, *A. glomeratum* i *R. turbinatus* sugeruje krótkookresowy, ale intensywny wpływ AW, który zdominował warunki lokalne w rejonie Edgeøya. Zgrupowanie *N. labradorica* FA było istotne stacji EDG 3, jego obecność w tym obszarze również wskazuje na wpływ AW. Wysoka wartość $\delta^{18}\text{O}$

w skorupkach otwornic z EDG 1 wskazuje na wpływ AW, jednak dane CTD uzyskane w lecie 2016 roku tego nie potwierdzają. Prawdopodobne jest również wymywanie węglanów z okolicznych skał i dostarczanie ich do fiordu wraz z wypływami spod lodowca co może mieć wpływ na wartość $\delta^{18}\text{O}$ w skorupkach otwornic żyjących w tym rejonie. Wysokie wartości $\delta^{18}\text{O}$ w rejonie Nordaustlandet oraz na stacji EDG 3 mogą być również związane z okresowym wpływem AW oraz TAW. Niska wartość $\delta^{13}\text{C}$ na zewnętrznej stacji z rejonu Edgeøya, wskazuje na intensywny eksport świeżej materii organicznej do dna w tym miejscu. Niska bioróżnorodność w obszarze wschodniego Svalbardu świadczy, że znajduje się on w fazie inicjalnej atlantyfikacji. Niska liczebność otwornic z rejonu Edgeøya oraz obecność gatunków preferujących skrajnie różne warunki środowiskowe w całym obszarze wschodniego Svalbardu wskazuje na mieszanie się różnych mas wodnych. Analizy PC oraz kompozycja izotopowa skorupki otwornic pochodzących ze wschodniego Svalbardu sugerują, że cały ten obszar charakteryzuje się bardzo zmiennymi warunkami środowiskowymi ze względu na mieszanie się różnych mas wodnych oraz tworzenie się wód lokalnych.

8. Wnioski

- Proces atlantyfikacji w obszarze Svalbardu postępuje od strony zachodniej w kierunku północnym i dalej na wschód archipelagu. Fiordy zachodniego Svalbardu są silnie zatlantyfikowane, na stacjach północnego Svalbardu AW ulega silnej transformacji w kontakcie z lodem morskim i ArW. Natomiast rejon wschodni archipelagu znajduje się dopiero w fazie inicjalnej atlantyfikacji przy bardzo silnym udziale LW oraz wód Morza Barentsa.
- Proces atlantyfikacji w rejonie Svalbardu powoduje zmiany liczebności i składu gatunkowego fauny otwornicowej, co wskazuje, że organizmy te mogą być wykorzystywane jako wskaźniki atlantyfikacji.
- Intensyfikacja napływu AW na szelf i dalej do zachodnich i północnych fiordów Svalbardu powoduje zwiększanie zasięgów występowania gatunków borealnych. Obecność *M. affinis* w Rijpfjorden jest pierwszą w historii obserwacją tego atlantyckiego gatunku na północy.
- Potencjalnymi wskaźnikami atlantyfikacji są: liczebność, bioróżnorodność oraz kompozycja gatunkowa otwornic związanych z wpływem AW. Uzyskane wyniki nie potwierdzają założenia, że liczba gatunków ma związek z procesem atlantyfikacji wód wokół Svalbardu.
- Zmienne warunki środowiskowe wschodniego Svalbardu wynikają z mieszania się różnych mas wodnych oraz tworzenie się LW. Duże zróżnicowanie fauny otwornicowej z tego rejonu w badaniach paleoceanograficznych może być wykorzystane jako wskaźnik reorganizacji hydrograficznej środowiska morskiego.
- Analizy PC wykonane na całym zbiorowisku otwornic oraz tylko na żywych organizmach dowiodły, że gatunki aglutynujące stanowią ważne ogniwo w badaniach nad liczebnością i składem gatunkowym otwornic w rejonie Svalbardu. Stąd też uzyskane wyniki wskazują, że tylko badania nad całym

zbiorowiskiem (żywych oraz martwych) otwornic mogą mieć zastosowanie w badaniach paleoceanograficznych.

- Analiza całego zbiorowiska otwornic (tj. żywych i martwych osobników) jest bardziej reprezentatywna dla całego cyklu rocznego niż analiza wykonana wyłącznie na żywych osobnikach.
- Analiza izotopów stabilnych dostarcza więcej istotnych informacji o właściwościach środowiska morskiego niż analiza PC, ponieważ wyniki tej ostatniej uzyskane w próbkach zebranych w jednym sezonie nie pokazują postępu zmian środowiskowych. Wyniki analizy izotopów stabilnych reprezentują uśrednione warunki środowiskowe z całego roku, dlatego są skuteczniejszym narzędziem w badaniach przeprowadzanych na próbkach z jednego roku.
- Uzyskane wyniki potwierdzają wcześniejsze sugestie innych autorów, że gatunek *N. labradorica* może być wykorzystywany jako wskaźnik napływu AW w badanym obszarze, a nie tylko jako wskaźnik strefy frontalnej w morzach.
- Ze względu na powszechne występowanie gatunku *C. lobatulus* na wszystkich stacjach pomiarowych w skrajnie różnych warunkach środowiskowych, gatunek ten powinien być zaliczony do grupy oportunistów. Dodatkowym warunkiem występowania tego gatunku jest obecność twardego, niekoniecznie mineralnego substratu.

9. Literatura

Aagaard K., Greisman P., (1975). *Toward new mass and heat budgets for the Arctic Ocean*. Journal of Geophysical Research, 80, 27, 3821-3827.

Aagaard K., Foldvik A., Hillman S.R., (1987). *The West Spitsbergen Current: disposition and water mass transformation*. Journal of Geophysical Research, Oceans, 92, C4, 3778-3784.

Albani A.D., Favero V., Barbero R.S., (1984). *Benthonic foraminifera as indicators of intertidal environments*. Geo-marine letters, 4, 1, 43-47.

Allaart L., Müller J., Schomacker A., Rydningen T.A., Håkansson L., Kjellman S.E., Mollenhauer G., Forwick M., (2020). *Late Quaternary glacier and sea-ice history of northern Wijdefjorden, Svalbard*. Boreas, 49, 3, 417-437.

Alve E., (1994). *Opportunistic features of the foraminifer *Stainforthia fusiformis* (Williamson): evidence from Frierfjord, Norway*. Journal of Micropalaeontology, 13, 1, 24-24.

Alve E., (1995). *Benthic foraminiferal distribution and recolonization of formerly anoxic environments in Drammensfjord, southern Norway*. Marine Micropaleontology, 25, 2-3, 169-186.

Alve E., Bernhard J.M., (1995). *Vertical migratory response of benthic foraminifera to controlled oxygen concentrations in an experimental mesocosm*. Marine Ecology Progress Series, 137-151.

Alve E., (2003). *A common opportunistic foraminiferal species as an indicator of rapidly changing conditions in a range of environments*. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 57, 3, 501-514.

Ambrose J.W.G., Carroll M.L., Greenacre M., Thorrold S.R., McMahon K.W., (2006). *Variation in *Serripes groenlandicus* (*Bivalvia*) growth in a Norwegian high-Arctic fjord*:

Evidence for local-and large-scale climatic forcing. Global Change Biology, 12, 9, 1595-1607.

Babalola L.O., Patterson R.T., Prokoph A., (2013). *Foraminiferal evidence of a late Holocene westward shift of the aleutian low pressure system.* The Journal of Foraminiferal Research, 43, 2, 127-142.

Babalola L.O., Riveiros N.V., Kamiński M.A., Patterson R.T., (2017). *The wall structure of the agglutinated foraminifer Eggerella advena: its reassign-ment to the genus Eggerelloides, and description of Eggerelloides belizensis n. sp.* Grzybowski Foundation Special Publication, 22, 9-15.

Bałaży P., Kukliński P., (2013). *Mobile hard substrata - An additional biodiversity source in a high latitude shallow subtidal system.* Estuarine, Coastal and Shelf Science, 119, 153-161.

Bałaży P., Kukliński P., (2018). *Year-to-year variability of epifaunal assemblages on a mobile hard substrate—Case study from high latitudes.* Marine Ecology, 39, 6, e12533.

Banasik K., Hejduk L., (2005). *Badanie granulometrii rumowiska unoszonego w małej rzece nizinnej.* Acta Agrophysica, 5, 2, 253-262.

Berben S.M.P., Husum K., Cabedo-Sanz P., Belt S.T., (2014). *Holocene sub-centennial evolution of Atlantic water inflow and sea ice distribution in the western Barents Sea.* Climate of the Past, 10, 1, 181-198.

Barbieri R., Hohenegger J., Pugliese N., (2006). *Foraminifera and Environmental Micropaleontology.* Environmental Micropaleontology, 61, 1-3.

Bartels M., Titschack J., Fahl K., Stein R., Seidenkrantz M.S., Hillaire-Marcel C., Hebbeln D., (2017). *Atlantic Water advection vs. glacier dynamics in northern Spitsbergen since early deglaciation.* Climate of the Past, 13, 12, 1717-1749.

Berge J., Johnsen G., Nilsen F., Gulliksen B., Slagstad D., (2005). *Ocean temperature oscillations enable reappearance of blue mussels *Mytilus edulis* in Svalbard after a 1000 year absence*. Marine Ecology Progress Series, 303, 167-175.

Berge J., Renaud P.E., Darnis G., Cottier F., Last K., Gabrielsen T.M., Johnsen G., Seuthe L., Węśławski J.M., Leu E., Moline M., Nahrgang J., Søreide J.E., Varpe Ø., Lønne O.J., Daase M., Falk-Petersen S., (2015). *In the dark: a review of ecosystem processes during the Arctic polar night*. Progress in Oceanography, 139, 258-271.

Bernhard J.M., Gupta B.K.S., (1999). *Foraminifera of oxygen-depleted environments*. Springer, Dordrecht. In Modern foraminifera 201-216.

Bitz M.C., Holland M.M., Tremblay B., (2006). *Future abrupt reductions in the summer Arctic sea ice*. Geophysical Research Letters, 33.

Blindheim J., Østerhus S., (2005). *The Nordic Seas, main oceanographic features*. Geophysical Monograph-American Geophysical Union, 158, 11.

Błachowiak-Samołyk K., Wiktor J.M., Hegseth E.N., Wold A., Falk-Petersen S., Kubiszyn A.M., (2015). *Winter Tales: the dark side of planktonic life*. Polar Biology, 38, 1, 23-36.

Błaszczuk M., Jania J.A., Kolondra L., (2013). *Fluctuations of tidewater glaciers in Hornsund Fjord (Southern Svalbard) since the beginning of the 20th century*. Polish Polar Research, 34, 327-352.

Boltovskoy D., Dinofrio E.O., Alder V.A., (1990). *Intraspecific variability in Antarctic tintinnids: the *Cymatocylis affinis/convallaria* species group*. Journal of Plankton Research, 12, 2, 403-413.

Broecker W.S., (1991). *The great ocean conveyor*. Oceanography, 4, 2, 79-89.

Brown T.A., Hegseth E.N., Belt S.T., (2015). *A biomarker-based investigation of the mid-winter ecosystem in Rijpfjorden, Svalbard*. Polar Biology, 38, 1, 37-50.

- Brusca R.C., Brusca G.J., (2003). *Invertebrates S.E. Sinauer Associates*. Incorporated, Sunderland, Massachusetts, 165-167.
- Caralp M.H., (1989). *Size and morphology of the benthic foraminifer Melonis barleeanum; relationships with marine organic matter*. The Journal of Foraminiferal Research, 19, 3, 235-245.
- Carmack E., Wassmann P., (2006). *Food webs and physical–biological coupling on pan-Arctic shelves: unifying concepts and comprehensive perspectives*. Progress in Oceanography, 71, 2-4, 446-477.
- Carroll M.L., Denisenko S.G., Renaud P.E., Ambrose Jr.W.G., (2008). *Benthic infauna of the seasonally ice-covered western Barents Sea: patterns and relationships to environmental forcing*. Deep Sea Research Part II, Topical Studies in Oceanography, 55, 20-21, 2340-2351.
- du Châtelet A.E., Debenay J.P., Soulard R., (2004). *Foraminiferal proxies for pollution monitoring in moderately polluted harbors*. Environmental Pollution, 127, 27-40.
- Clarke K.R., Green R.H., (1988). *Statistical design and analysis for a 'biological effects' study*. Marine Ecology – Progress Series, 46, 213-226.
- Clarke K.R., Warwick R.M., (1994). *Change in marine communities: an approach to statistical analysis and interpretation*. Natural Environment Research Council, Plymouth Marine Laboratory.
- Clarke R., Somerfield J., Chapman G., (2006). *On resemblance measures for ecological studies, including taxonomic dissimilarities and a zero-adjusted Bray–Curtis coefficient for denuded assemblages*. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 330, 1, 55-80.
- Comiso J.C., (2003). *Warming Trends in the Arctic from Clear Sky Satellite Observations*. American Meteorological Society.

Conradsen K.E.L.D., Bergsten H.E.L.E.N.E., Knudsen K.L., Nordberg K.J.E.L.L., Seidenkrantz M.S., (1994). *Recent benthic foraminiferal distribution in the Kattegat and the Skagerrak, Scandinavia*. Cushman Foundation special publication, 32, 53-68.

Corner G.D., Steinsund P.I., Aspeli R., (1996). *Distribution of recent benthic foraminifera in a subarctic fjord-delta: Tana, Norway*. Marine Geology, 134, 1-2, 113-125.

Corliss B.H., (1991). *Morphology and microhabitat preferences of benthic foraminifera from the northwest Atlantic Ocean*. Marine Micropaleontology, 17, 3-4, 195-236.

Cottier F., Tverberg V., Inall M., Svendsen H., Nilsen F., Griffiths C., (2005). *Water mass modification in an Arctic fjord through cross-shelf exchange: The seasonal hydrography of Kongsfjorden, Svalbard*. Journal of Geophysical Research, 110, C12.

Cottier F., Nilsen F., Inall M., Gerland S., Tverberg V., Svendsen H., (2007). *Wintertime warming of an Arctic shelf in response to large-scale atmospheric circulation*. Geophysical Research Letters, 34.

Cottier F., Skogseth R., David D., Berge J., (2019). *Temperature time-series in Svalbard fjords. A contribution from the "Integrated Marine Observatory Partnership" In: Orr et al (eds). The State of Environmental Science in Svalbard – an annual report. Svalbard Integrated Arctic Earth Observing System (SIOS), 216.*

Crews L., Sundfjord A., Albretsen J., Hattermann T., (2018). *Mesoscale eddy activity and transport in the Atlantic Water inflow region north of Svalbard*. Journal of Geophysical Research, Oceans, 123, 1, 201-215.

Culver S.J., Buzas M.A., (1995). *The effects of anthropogenic habitat disturbance, habitat destruction, and global warming on shallow marine benthic foraminifera*. The Journal of Foraminiferal Research, 25, 3, 204-211.

Dalpadado P., Hop H., Rønning J., Pavlov V., Sperfeld E., Buchholz F., Rey A., Wold A., (2016). *Distribution and abundance of euphausiids and pelagic amphipods in Kongsfjorden*,

Isfjorden and Rijpfjorden (Svalbard) and changes in their relative importance as key prey in a warming marine ecosystem. Polar Biology, 39, 1765-1784.

Dieckmann G.S., Hellmer H.H., (2010). *The importance of sea ice: an overview.* Sea ice, 2, 1-22.

Dijkstra N., Junttila J., Carroll J., Husum K., Hald M., Elvebakk G., Godtliebsen F., (2013). *Baseline benthic foraminiferal assemblages and habitat conditions in a sub-Arctic region of increasing petroleum development.* Marine environmental research, 92, 178-196.

Dijkstra N., Junttila J., Skirbekk K., Carroll J., Husum K., Hald M., (2017). *Benthic foraminifera as bio-indicators of chemical and physical stressors in Hammerfest harbor (Northern Norway).* Marine pollution bulletin, 114, 1, 384-396.

Ding F., Wu D., Zhang Q., Zheng J., Zhou Q., (2014). *Characterization of eubacterial and archaeal community diversity in the pit mud of Chinese Luzhou-flavor liquor by nested PCR–DGGE.* World Journal of Microbiology and Biotechnology, 30, 2, 605-612.

Dowdeswell J.A., Drewry D.J., (1985). *Place names on the Nordaustlandet ice caps, Svalbard.* Polar Record, 22, 140, 519-523.

Dowdeswell J.A., Drewry D.J., Cooper A.P.R., Gorman M.R., (1986). *Digital mapping of the Nordaustlandet ice caps from airborne geophysical investigations.* Annals of Glaciology, 8, 51-58.

Dowdeswell J.A., Drewry D.J., (1989). *The dynamics of Austfonna, Nordaustlandet, Svalbard: surface velocities, mass balance, and subglacial melt water.* Annals of Glaciology, 12, 37-45.

Dowdeswell J.A., Bamber J.L., (1995). *On the glaciology of Edgeøya and Barentsøya, Svalbard.* Polar Research, 14, 2, 105-122.

Dowdeswell J.A., Ottesen D., Evans J., Cofaigh C.O., Anderson J.B., (2008). *Submarine glacial landforms and rates of ice-stream collapse.* Geology, 36, 10, 819-822.

Dowdeswell J.A., Hogan K.A., Arnold N.S., Mugford N.I., Wells M., Hirst J.P.P., Decalf C., (2015). *Sediment-rich meltwater plumes and ice-proximal fans at the observations and modeling*. *Sedimentology*, 12-20.

Duxbury A.C., Duxbury A.B., Sverdrup K.A., (2002). *Oceany świata*. Wydawnictwo Naukowe PWN, 636.

Erskian M.G., Lipps J.H., (1987). *Population dynamics of the foraminiferan *Glabratella ornatissima* (Cushman) in northern California*. *The Journal of Foraminiferal Research*, 17, 3, 240-256.

Fortier M., Fortier L., Michel C., Legendre L., (2002). *Climatic and biological forcing of the vertical flux of biogenic particles under seasonal Arctic sea ice*. *Marine Ecology Progress Series*, 225, 1-16.

Forwick M., Vorren T., (2009). *Late Weichselian and Holocene sedimentary environments and ice rafting in Isfjorden, Spitsbergen*. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 280, 258-274.

Forwick M., Vorren T., (2011). *Stratigraphy and deglaciation of the Isfjorden area, Spitsbergen*. *Paleogeography, Norwegian Journal of Geology / Norsk Geologisk Forening*, 90, 4, 163-179.

Fransner O., Noormets R., Flink A., Hogan K., O'Regan M., Jakobsson M., (2017). *Glacial landforms and their implications for glacier dynamics in Rippfjorden and Duvefjorden, northern Nordaustlandet, Svalbard*. *Journal of Quaternary Science*, 32, 3, 437-455.

Gulliksen B., Svensen E., (2004). *Svalbard and life in Polar Oceans*. Kom, 160.

Goldstein S.T., (1999). *In Modern Foraminifera* (ed. Gupta B.K.S). Kluwer, Dordrecht, The Netherlands, 37-55.

Golikova E., Kniazeva O., Korsun S., (2018). *Multiyear data on benthic foraminifera in a glaciated fjord of Svalbard*. *Data in brief*, 17, 363-392.

Gooday A.J., Turley C.M., (1990). *Responses by benthic organisms to inputs of organic material to the ocean floor: a review*. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 331, 1616, 119-138.

Gooday A.J., Levin L.A., Linke P., Heeger T., (1992). *The role of benthic foraminifera in deep-sea food webs and carbon cycling*. Springer, Dordrecht. In *Deep-sea food chains and the global carbon cycle*, 63-91.

Gooday A.J., (1994). *The biology of deep-sea foraminifera; a review of some advances and their applications in paleoceanography*. *Palaios*, 9, 1, 14-31.

Görlich H., (1988). *The Constitution of the Federal Republic of Germany. Essays on the Basic Rights and Principles of the Basic Law with a Translation of the Basic Law*.(ed. Ulrich Karpen). *Baden–Baden: Nomos Verlagsgesellschaft*. *Fundamental Constitutional Rights: Content, Meaning and General Doctrines*.

Graham R.M., Itkin P., Meyer A., Sundfjord A., Spreen G., Smedsrud L.H., Liston G.E., Cheng B., Cohen L., Divine D., Fer I., Fransson A., Gerland S., Haapala J., Hudson S.R., Johansson A.M., King J., Merkouriadi I., Peterson A.K., Provost C., Randelhoff A., Rinke A., Rösel A., Sennéchaël N., Walden V.P., Duarte P., Assmy P., Steen H., Granskog M.A., (2019). *Winter storms accelerate the demise of sea ice in the Atlantic sector of the Arctic Ocean*. *Scientific reports*, 9, 1, 1-16.

Gross C.G., (2000). *Neurogenesis in the adult brain: death of a dogma*. *Nature Reviews Neuroscience*, 1, 1, 67-73.

Grossman E.L., (1987). *Stable isotopes in modern benthic foraminifera; a study of vital effect*. *The Journal of Foraminiferal Research*, 17, 1, 48-61.

Gulliksen B., Svensen E., (2004). *Svalbard and life in Polar Oceans*. Kom forlag, Oslo.

Gupta B.K.S., Machain-Castillo M.L., (1993). *Benthic foraminifera in oxygen-poor habitats*. Marine Micropaleontology, 20, 3-4, 183-201.

Gustafsson M., Nordberg K., (2001). *Living (stained) benthic foraminiferal response to primary production and hydrography in the deepest part of the Gullmar Fjord, Swedish West Coast, with comparisons to Høglund's 1927 material*. The Journal of Foraminiferal Research, 31, 1, 2-11.

Haarpaintner J., Gascard J.C., Haugan P.M., (2001). *Ice production and brine formation in Storfjorden, Svalbard*. Journal of Geophysical Research, Oceans, 106, C7, 14001-14013.

Hald M., Vorren T.O., (1987). *Foraminiferal stratigraphy and environment of Late Weichselian deposits on the continental shelf off Troms, Northern Norway*. Marine Micropaleontology, 12, 129-160.

Hald M., Steinsund P I., Dokken T., Korsun S., Polyak L., Aspeli R., (1994). *Recent and Late Quaternary distribution of Elphidium excavatum f. clavatum in arctic seas*. Cushman Foundation for Foraminiferal Research, 141.

Hald M., Steinsund P.I., (1996). *Benthic foraminifera and carbonate dissolution in the surface sediments of the Barents and Kara Seas*. Berichte zur Polarforschung, 212, 285-307.

Hald M., Korsun S., (1997). *Distribution of modern benthic foraminifera from fjords of Svalbard European Arctic*. Journal of Foraminiferal Research, 2, 101-122.

Hald M., Dahlgren T., Olsen T.E., Lebesbye E., (2001). *Late Holocene paleoceanography in Van Mijenfjorden, Svalbard*. Polar Research, 20, 23-35.

Hansen A., Knudsen K.L., (1995). *Recent foraminiferal distribution in Freemansundet and Early Holocene stratigraphy on Edgeøya, Svalbard*. Polar Research, 14, 2, 215-238.

Heinz P., Geslin E., (2012). *Ecological and biological response of benthic foraminifera under oxygen-depleted conditions: evidence from laboratory approaches*. Springer, Dordrecht, 287-303.

- Holland D.M., Thomas R.H., de Young B., Ribergaard M.H., Lyberth B., (2008). *Acceleration of Jakobshavn Isbræ triggered by warm subsurface ocean waters*. *Nature Geoscience*, 1, 10, 659-664.
- Hooke R., Elverhøi A., (1996). *Sediment flux from a fjord during glacial periods, Isfjorden, Spitsbergen*. *Global and Planetary Change*, 12, 237-249.
- Hop H., Falk-Petersen S., Svendsen H., Kwaśniewski S., Pavlov V., Pavlova O., Søreide J.E., (2006). *Physical and biological characteristics of the pelagic system across Fram Strait to Kongsfjorden*. *Progress in Oceanography*, 71, 2-4, 182-231.
- Hop H., Assmy P., Wold A., Sundfjord A., Daase M., Duarte P., Kwaśniewski S., Głuchowska M., Wiktor J.M., Tatarek A., Wiktor Jr.J., Kristiansen S., Fransson A., Chierici M., Vihtakari M., (2019). *Pelagic Ecosystem Characteristics Across the Atlantic Water Boundary Current From Rijpfjorden, Svalbard, to the Arctic Ocean During Summer (2010–2014)*. *Frontiers in Marine Science*, 6, 181.
- Hopkins T.S., (1991). *The GIN Sea—A synthesis of its physical oceanography and literature review 1972–1985*. *Earth-Science Reviews*, 30, 3-4, 175-318.
- Husum K., Hald M., Stein R., Weißschnur M., (2015). *Recent benthic foraminifera in the Arctic Ocean and Kara Sea continental margin*. *Arktos*, 1, 1, 5.
- Ivanov V., Alexeev V., Koldunov N.V., Repina I., Sandø A.B., Smedsrud L.H., Smirnov A., (2016). *Arctic Ocean heat impact on regional ice decay: A suggested positive feedback*. *Journal of Physical Oceanography*, 46, 5, 1437-1456.
- Ivanova E.V., Ovsepyan E.A., Risebrobakken B., Vetrov A.A., (2008). *Downcore distribution of living calcareous foraminifera and stable isotopes in the western Barents Sea*. *The Journal of Foraminiferal Research*, 38, 4, 337-356.
- Jackson R.H., Straneo F., Sutherland D.A., (2014). *Externally forced fluctuations in ocean temperature at Greenland glaciers in non-summer months*. *Nature Geoscience*, 7, 7, 503-508.

Jakobsson M., Backman J., Rudels B., Nycander J., Frank M., Mayer L., Jokat W., Sangiorgi F., O'Regan M., Brinkhuis H., King J., Moran K., (2007). *The early Miocene onset of a ventilated circulation regime in the Arctic Ocean*. *Nature*, 447, 7147, 986-990.

Jennings A.E., Weiner N.J., Helgadottir G., Andrews J.T., (2004). *Modern foraminiferal faunas of the southwestern to northern Iceland shelf: oceanographic and environmental controls*. *The Journal of Foraminiferal Research*, 34, 3, 180-207.

Jernas P., Klitgaard-Kristensen D., Husum K., Koç N., Tverberg V., Loubere P., Prins M., Dijkstra N., Gluchowska M., (2018). *Annual changes in Arctic fjord environment and modern benthic foraminiferal fauna: Evidence from Kongsfjorden, Svalbard*. *Global and planetary change*, 163, 119-140.

Johannessen O.M., Bengtsson L., Miles M.W., Kuzmina S.I., Semenov V.A., Alekseev G.V., Nagurnyi A.P., Zakharov V.F., Bobylev L.P., Pettersson L.H., Hasselmann K., Cattle H.P., (2004). *Arctic climate change: observed and modelled temperature and sea-ice variability*. *Tellus*, 56, 328-341.

Kamiński M.A., Gradstein F.M., (2005). *Atlas of Paleogene cosmopolitan deep-water agglutinated foraminifera*. Grzybowski Foundation, 10.

Keigwin L.D., Jones G.A., (1994). *Western North Atlantic evidence for millennial-scale changes in ocean circulation and climate*. *Journal of Geophysical Research, Oceans*, 99, C6, 12397-12410.

Kinnard C., Zdanowicz C.M., Fisher D.A., Isaksson E., de Vernal A., Thompson L.G., (2011). *Reconstructed changes in Arctic sea ice over the past 1,450 years*. *Nature*, 479, 7374, 509-512.

Kitazato H., (1981). *Observation of behavior and mode of life of benthic foraminifers in laboratory*. *Geoscience Report, Shizuoka University*, 6, 61-71.

- Kitazato H., (1994). *Foraminiferal microhabitats in four marine environments around Japan*. Marine Micropaleontology, 24, 1, 29-41.
- Kitazato H., Bernhard J.M., (2014). *Approaches to study living foraminifera: collection, maintenance and experimentation*. Springer Science and Business Media.
- Kjaer K.H., Sultan L., Krüger J., Schomacker A., (2004). *Architecture and sedimentation of outwash fans in front of the Mýrdalsjökull ice cap, Iceland*. Sedimentary Geology, 172, 1-2, 139-163.
- Klitgaard-Kristensen D., Sejrup H.F., Haflidason H., (2002). *Distribution of recent calcareous benthic foraminifera in the northern North Sea and relation to the environment*. Polar Research, 21, 2, 275-282.
- Klitgaard-Kristensen D.K., Rasmussen T.L., Koç N., (2013). *Palaeoceanographic changes in the northern Barents Sea during the last 16 000 years—new constraints on the last deglaciation of the Svalbard–Barents Sea Ice Sheet*. Boreas, 42, 3, 798-813.
- Knies J., Brookes S., Schubert C.J., (2006). *Re-assessing the nitrogen signal in continental margin sediments: New insights from the high northern latitudes*. Earth and Planetary Science Letters, 253, 471-484.
- Koho K.A., Piña-Ochoa E., Geslin E., Risgaard-Petersen N., (2011). *Vertical migration, nitrate uptake and denitrification: survival mechanisms of foraminifers (*Globobulimina turgida*) under low oxygen conditions*. FEMS microbiology ecology, 75, 2, 273-283.
- Korsun S.A., Polyak L.V., (1989). *Distribution of benthic foraminiferal morphogroups in the Barents Sea*. Okeanologiya, 29, 5, 838-844.
- Korsun S.A., Pogodina I.A., Forman S.L., Lubinski D.J., (1995). *Recent foraminifera in glaciomarine sediments from three arctic fjords of Novaja Zemlja and Svalbard*. Polar Research, 14, 1, 15-32.

Korsun S., Hald M., (1998). *Modern benthic foraminifera off Novaya Zemlya tidewater glaciers, Russian Arctic*. Arctic and Alpine Research, 30, 1, 61-77.

Korsun S., Hald M., (2000). *Seasonal dynamics of benthic foraminifera in a glacially fed fjord of Svalbard, European Arctic*. The Journal of Foraminiferal Research, 30, 4, 251-271.

Kowalewski W., Rudowski S., Zalewski S.M., (1990). *Seismoacoustic studies within Wijdefjorden, Spitsbergen*. Polish Polar Research, 11, 3-4, 287-300.

Kramer K.J., Botterweg J., (1991). *Aquatic biological early warning systems: an overview*. Bioindicators and environmental management, 95-126.

Kubischta F., Knudsen K.L., Ojala A.E., Salonen V.P., (2011). *Holocene benthic foraminiferal record from a high-Arctic fjord, Nordaustlandet, Svalbard*. Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography, 93, 4, 227-242.

Kucharska M., Kujawa A., Łacka M., Pawłowska J., Szymańska N., Zajączkowski M., (2018). *Seasonal variability of benthic foraminifera assemblages in Adventfjorden, Spitsbergen*. Polar Biology, 42, 3, 569-580.

Langer M., (1993). *Epiphytic foraminifera*. Marine Micropaleontology, 20, 235-265.

Lee J.J., McEnery M.E., Garrison J.R., (1980). *Experimental studies of larger foraminifera and their symbionts from the Gulf of Elat on the Red Sea*. The Journal of Foraminiferal Research, 10, 1, 31-47.

Lefauconnier B., Hagen J.O., Rudant J.P., (1994). *Flow speed and calving rate of Kongsbreen glacier, Svalbard, using SPOT images*. Polar Research, 59-65.

Leu E., Søreide J.E., Hessen D.O., Falk-Petersen S., Berge J., (2011). *Consequences of changing sea-ice cover for primary and secondary producers in the European Arctic shelf seas: timing, quantity and quality*. Progress in Oceanography, 90, 1-4, 18-32.

- Lloyd J.M., (2006). *Modern distribution of benthic foraminifera from Disko Bugt, West Greenland*. Journal of Foraminiferal Research, 36, 4, 315-331.
- Lloyd J.M., Kuijpers A., Long A., Moros M., Park L.A., (2007). *Foraminiferal reconstruction of mid-to late-Holocene ocean circulation and climate variability in Disko Bugt, West Greenland*. The Holocene, 17, 8, 1079-1091.
- Loeblich A.R., Tappan H., (1964). *Foraminiferal classification and evolution*. Journal of the Geological Society India, 5, 5-40.
- Loeng H., (1991). *Features of the physical oceanographic conditions of the Barents Sea*. Polar Research, 10, 1, 5-18.
- Luckman A., Benn D.I., Cottier F., Bevan S., Nilsen F., Inall M., (2015). *Calving rates at tidewater glaciers vary strongly with ocean temperature*. Nature communications, 6, 1, 1-7.
- Lydersen C., Nøst O.A., Lovell P., McConnell B.J., Gammelsrød T., Hunter C., Fedak M.A., Kovacs K.M., (2002). *Salinity and temperature structure of a freezing Arctic fjord—monitored by white whales (*Delphinapterus leucas*)*. Geophysical research letters, 29, 23, 34-1.
- Łącka M., Zajączkowski M., Forwick M., Szczuciński W., (2015). *Late Weichselian and Holocene palaeoceanography of Storfjordrenna, southern Svalbard*. Climate of the Past, 11(3), 587-603.
- Łącka M., Zajączkowski M., (2016). *Does the recent pool of benthic foraminiferal tests in fjordic surface sediments reflect interannual environmental changes? The resolution limit of the foraminiferal record*. Annales Societatis Geologorum Poloniae, 86, 59-71.
- Mackensen A., Sejrup H.P., Jansen E., (1985). *The distribution of living benthic foraminifera on the continental slope and rise off southwest Norway*. Marine Micropaleontology, 9, 4, 275-306.

Majewski W., Zajączkowski M., (2007). *Benthic foraminifera in Adventfjorden, Svalbard: last 50 years of local hydrographic changes*. The Journal of Foraminiferal Research, 37, 2, 107-124.

Majewski W., Szczuciński W., Zajączkowski M., (2009). *Interactions of Arctic and Atlantic water-masses and associated environmental changes during the last millennium, Hornsund (SW Svalbard)*. Boreas, 38, 3, 529-544.

Manley T., (1995). *Branching of Atlantic Water within the Greenland-Spitsbergen Passage: An estimate of recirculation*. Journal of Geophysical Research, 100, C10, 20627-20634.

Menze S., Ingvaldsen R.B., Haugan P., Fer I., Sundfjord A., Beszczyńska-Moeller A., Falk-Petersen S., (2019). *Atlantic water pathways along the north-western Svalbard shelf mapped using vessel-mounted current profilers*. Journal of Geophysical Research: Oceans, 124, 3, 1699-1716.

Mityaev M.V., Pogodina I.A., Gerasimova M.V., (2005). *Facies variability of recent sediments in the Hornsunn Fjord, western Spitsbergen*. Lithology and Mineral Resources, 40, 5, 401-407.

Mojtahid M., Jorissen F., Lansard B., Fontanier C., Bombled B., Rabouille C., (2009). *Spatial distribution of live benthic foraminifera in the Rhone prodelta: faunal response to a continental-marine organic matter gradient*. Marine Micropaleontology, 70, 177-200.

Moodley L., Hess C., (1992). *Tolerance of infaunal benthic foraminifera for low and high oxygen concentrations*. The Biological Bulletin, 183, 1, 94-98.

Moodley L., Boschker H.T.S., Middelburg J.J., Pel R., Herman P.M.J., de Deckere E.M.G.T., Heip C.H.R., (2000). *Ecological significance of benthic foraminifera: ¹³C labelling experiments*. Marine Ecology Progress Series, 202, 289-295.

Muilwijk M., Smedsrud L.H., Ilicak M., Drange H., (2018). *Atlantic Water heat transport variability in the 20th century Arctic Ocean from a global ocean model and observations*. Journal of Geophysical Research, Oceans, 123, 11, 8159-8179.

Muller W.A., (1975). *Competition for food and other niche-related studies of three species of salt-marsh foraminifera*. Marine Biology, 31, 4, 339-351.

Murray J.W., (1991). *Ecology and Palaeoecology of Benthic Foraminifera*. Longman Scientific and Technical (John Wiley), 365-366.

Murray J.W., (2006). *Ecology and applications of benthic foraminifera*. Cambridge University press.

Murray J.W., Alve E., (2016). *Benthic foraminiferal biogeography in NW European fjords: A baseline for assessing future change*. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 181, 218-230.

Nardelli M.P., Jorissen F.J., Pusceddu A., Morigi C., Dell'Anno A., Danovaro R., De Stigter H.C., Negri A., (2010). *Living benthic foraminiferal assemblages along a latitudinal transect at 1000m depth off the Portuguese margin*. Micropaleontology, 323-344.

Nilsen F., (2007). *Jakten pa det varme vannet*. Svalbardposten, 37, 20-21.

Nilsen F., Cottier F., Skogseth R., Mattsson S., (2008). *Fjord e shelf exchanges controlled by ice and brine production: the interannual variation of Atlantic water in Isfjorden, Svalbard*. Continental Shelf Research, 28, 1838-1853.

Nilsen F., Skogseth R., Vaardal-Lunde J., Inall M., (2016). *A simple shelf circulation model–intrusion of Atlantic water on the West Spitsbergen Shelf*. Journal of Physical Oceanography, 46, 1209-1230.

Normann G., Guyatt G., Walter S., (1987). *Measuring change over time: Assessing the usefulness of evaluative instruments*. Earth and Planetary Science Letters, 40, 171-178.

Ojala A.E., Salonen V.P., Moskalik M., Kubischta F., Oinonen M., (2014). *Holocene sedimentary environment of a High-Arctic fjord in Nordaustlandet, Svalbard*. Polish Polar Research.

Pawłowska J., Włodarska-Kowalczyk M., Zajączkowski M., Nygård H., Berge J., (2011). *Seasonal variability of meio-and macrobenthic standing stocks and diversity in an Arctic fjord (Adventfjorden, Spitsbergen)*. Polar Biology, 34, 6, 833-845.

Pawłowska J., Łącka M., Kucharska M., Szymańska N., Koziarowska K., Kuliński K., Zajączkowski M., (2017). *Benthic foraminifera contribution to fjord modern carbon pools: a seasonal study in Adventfjorden, Spitsbergen*. Geobiology, 15, 5, 704-714.

Pawłowska J., Łącka M., Kucharska M., Pawłowski J., Zajączkowski M. (2020). *Multiproxy evidence of the Neoglacial expansion of Atlantic Water to eastern Svalbard*. Climate of the Past, 16, 2, 487-501.

Pawłowski J., (2000). *Introduction to the molecular systematics of foraminifera*. Micropaleontology, 46, 1-12.

Pawłowski J., (2009). *Foraminifera [in] Scheachter M. (ed.). Encyclopedia of Microbiology*. Oxford, Elsevier, 646-662.

Pawłowski J., Holzmann M., (2014). *A plea for DNA barcoding of foraminifera*. Journal of Foraminiferal Research, 44, 1, 62-67.

Pavlov A.K., Tverberg V., Ivanov B.V., Nilsen F., Falk-Petersen S., Granskog M.A., (2013). *Warming of Atlantic Water in two west Spitsbergen fjords over the last century (1912–2009)*. Polar Research, 32, 1, 1-14.

Pogodina I.A., (2005). *Benthic foraminifera in Hornsund fjord (West Spitsbergen)*. OCEANOLOGY C/C OF OKEANOLOGIJA, 45, 4, 528.

Polyak L., Mikhailov V., (1996). *Post-glacial environments of the southeastern Barents Sea: foraminiferal evidence*. Geological Society, London, Special Publications, 111, 1, 323-337.

Polyak L., Korsun S., Febo L.A., Stanovoy V., Khusid T., Hald M., Paulsen E.B., Lubiński D.J., (2002). *Benthic foraminiferal assemblages from the southern Kara Sea, a river-influenced Arctic marine environment*. The Journal of Foraminiferal Research, 32, 3, 252-273.

Polyakov I.V., Pnyushkov A.V., Alkire M.B., Ashik I.M., Baumann T.M., Carmack E C., Goszczko I., Guthrie J., Ivanov V.V., Kanzow T., Krishfield R., Kwok R., Sundfjord A., Morison J., Rember R., Yulin A., (2017). *Greater role for Atlantic inflows on sea-ice loss in the Eurasian Basin of the Arctic Ocean*. Science, 356, 6335, 285-291.

Promińska A., Cisek M., Walczowski W., (2017). *Kongsfjorden and Hornsund hydrography—comparative study based on a multiyear survey in fjords of west Spitsbergen*. Oceanologia, 59, 4, 397-412.

Promińska A., Falck E., Walczowski W., (2018). *Interannual variability in hydrography and water mass distribution in Hornsund, an Arctic fjord in Svalbard*. Polar Research, 37, 1, 1495546.

Qvale G., van Weering T.C., (1985). *Relationship of surface sediments and benthic foraminiferal distribution patterns in the Norwegian Channel (northern North Sea)*. Marine Micropaleontology, 9, 6, 469-488.

Radwańska U., (1999). *Przewodnik do ćwiczeń z paleontologii*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 182.

Rasmussen T.L., Thomsen E., Ślubowska M.A., Jessen S., Solheim A., Koç N., (2007). *Paleoceanographic evolution of the SW Svalbard margin (76 N) since 20,000 14C yr BP*. Quaternary Research, 67, 1, 100-114.

Rasmussen T.L., Thomsen E., (2009). *Stable isotope signals from brines in the Barents Sea: Implications for brine formation during the last glaciation*. Geology, 37, 10, 903-906.

Rasmussen T.L., Forwick M., Mackensen A., (2012). *Reconstruction of inflow of Atlantic Water to Isfjorden, Svalbard during the Holocene: Correlation to climate and seasonality*. Marine Micropaleontology, 94, 80-90.

Rawle A., (1997). *The basic principles of particle size analysis*. Materiały firmy Malvern Instruments Ltd., Malvern, Wielka Brytania.

Reimers E., (2012). *Svalbard reindeer population size and trends in four sub-areas of Edgeøya*. Polar Research, 31, 1-6.

Renner A.H.H., Sundfjord A., Janout M.A., Ingvaldsen R.B., Beszczyńska-Möller A., Pickart R.S., Pérez-Hernández M.D., (2018). *Variability and redistribution of heat in the Atlantic Water boundary current north of Svalbard*. Journal of Geophysical Research, Oceans, 123, 9, 6373-6391.

Rohling E.J., Cooke S., (1999). *Stable oxygen and carbon isotopes in foraminiferal carbonate shells*. In Modern foraminifera, Springer, Dordrecht, 239-258.

Röttger R., Schmaljohann R., (1976). *Foraminifera: Gamogonie, Teil des Entwicklungsgangs der rezenten Nummulitidae Heterostegina depressa*. Die Naturwissenschaften, 10, 486.

Rudels B., Anderson L.G., Jones E.P., (1996). *Formation and evolution of the surface mixed layer and halocline of the Arctic Ocean*. Journal of Geophysical Research, Oceans, 101, C4, 8807-8821.

Rudels B., (2009). *Arctic ocean circulation*.

Sakshaug E., Slagstad D., (1992). *Sea ice and wind: effects on primary productivity in the Barents Sea*. Atmosphere-Ocean, 30, 4, 579-591.

Saloranta T.M., Haugan P.M., (2001). *Interannual variability in the hydrography of Atlantic water northwest of Svalbard*. Journal of Geophysical Research, Oceans, 106, C7, 13931-13943.

Saloranta T.M., Svendsen H., (2001). *Across the Arctic front west of Spitsbergen: high-resolution CTD sections from 1998-2000*. Polar Research, 20, 177-184.

Schafer C.T., Cole F.E., (1982). *Living benthic foraminifera distributions on the continental slope and rise east of Newfoundland, Canada*. Geological Society of America Bulletin, 93, 3, 207-217.

Schafer C.T., Collins E.S., Smith J.N., (1991). *Relationship of foraminifera and thecamoebian distributions to sediments contaminated by pulp mill effluent: Saguenay Fiord, Quebec, Canada*. Marine Micropaleontology, 17, 3-4, 255-283.

Schiermeier Q., (2007). *Polar research: The new face of the Arctic*. Nature, 446, 133-135.

Schönfeld J., Alve E., Spezzaferri S., (2012). *The FOBIMO (FOrami-niferal Bio-MOnitoring) initiative-Towards a standardised proto-col for soft-bottom benthic foraminiferal monitoring studies*. Marine Micropaleontology, 9495, 1-13.

Schröder-Adams C.J., Cole F.E., Medioli F.S., Mudie P.J., Scott D.B., Dobbin L., (1990). *Recent Arctic shelf foraminifera; seasonally ice covered vs. perennially ice covered areas*. The Journal of Foraminiferal Research, 20, 1, 8-36.

Serandrei-Barbero R., Donnici S., Madricardo F., (2011). *Supratidal foraminifera as ecological indicators in anthropically modified wetlands (Lagoon of Venice, Italy)*. Ecological Engineering, 37, 8, 1140-1148.

Serreze M.C., Francis J.A., (2006). *The Arctic amplification debate*. Climatic change, 76, 3, 241-264.

Shackleton N.J., Opdyke N.D., (1973). *Oxygen isotope and paleomagnetic stratigraphy of equatorial Pacific Core V28-238: oxygen isotope temperatures and ice volume on a 105 year and 106 year scale*. Quaternary Research, 3, 39-55.

Shackleton N.J., Imbrie J., Hall M.A., (1983). *Oxygen and carbon isotope record of East Pacific core VI9-30: implications for the formation of deep water in the late Pleistocene North Atlantic*. Earth and Planetary Science Letters, 65, 2, 233-244.

Siwecki R., Swerpel S., (1979). *Oceanographical investigations in Hornsund, 1974–1975*. Oceanografia, 6, 45-58.

Skogseth R., Haugan P.M., Haarpaintner J., (2004). *Ice and brine production in Storfjorden from four winters of satellite and in situ observations and modeling*. Journal of Geophysical Research, Oceans, 109, C10)

Skogseth R., Haugan P.M., Jakobsson M., (2005). *Watermass transformations in Storfjorden*. Continental Shelf Research, 25, 5-6, 667-695.

Slagstad D., Wassmann P.F., Ellingsen I., (2015). *Physical constrains and productivity in the future Arctic Ocean*. Frontiers in Marine Science, 2, 85.

Spellerberg I., Fedor P., (2003). *A tribute to Claude Shannon (1916-2001) and a plea for more rigorous use of species richness, species diversity and the 'Shannon-Wiener' Index*. Global Ecology, Biogeography, 12, 3, 177-179.

Spielhagen R.F., Werner K., Sørensen S.A., Zamelczyk K., Kandiano E., Budeus G., Husum K., Marchitto T.M., Hald M., (2011). *Enhanced modern heat transfer to the Arctic by warm Atlantic water*. Science, 331, 6016, 450-453.

Steinsund P.I., (1994). *Benthic foraminifera in surface sediments of the Barents and Kara seas: modern and late Quaternary applications*. University of Tromsø, Tromsø, 111.

Straneo F., Hamilton G.S., Sutherland D.A., Stearns L.A., Davidson F., Hammill M.O., Stenson G.B., Rosing-Asvid A., (2010). *Rapid circulation of warm subtropical waters in a major glacial fjord in East Greenland*. Nature Geoscience, 3, 3, 182-186.

Sturrock S., Murray J.W., (1981). *Comparison of low energy middle shelf foraminiferal faunas: Celtic Sea and western English Channel*. Chichester, Ellis Horwood, 250-260.

Svendsen H., Beszczynska-Møller A., Hagen J.O., Lefauconnier B., Tverberg V., Gerland S., Ørbæk B.J., Bischof K., Papucci C., Zajaczkowski M., Azzolini R., Bruland O., Wiencke C., Winther J.G., Dallmann W., (2002). *The physical environment of Kongsfjorden–Krossfjorden, an Arctic fjord system in Svalbard*. Polar research, 21, 1, 133-166.

Syvitski J.P.M., Burrell D.C., Skei J.M., (2012). *Fjords: processes and products*. Springer Science & Business Media.

Syvitski J.P.M., Shaw J., (1995). *Geomorphology and sedimentology of Estuaries*. Developments in Sedimentology, Elsevier, 113-178.

Szczuciński W., Zajączkowski M., Scholten J., (2009). *Sediment accumulation rates in subpolar fjords—Impact of post-Little Ice Age glaciers retreat, Billefjorden, Svalbard*. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 85, 3, 345-356.

Szymańska N., Pawłowska J., Kucharska M., Kujawa A., Łącka M., Zajączkowski M., (2017). *Impact of shelf-transformed waters (STW) on foraminiferal assemblages in the outwash and glacial fjords of Adventfjorden and Hornsund, Svalbard*. Oceanologia, 59, 4, 525-540.

Ślubowska M.A., Koç N., Rasmussen T.L., Klitgaard-Kristensen D., (2005). *Changes in the flow of Atlantic water into the Arctic Ocean since the last deglaciation: Evidence from the northern Svalbard continental margin, 80°N*. Paleoceanography, 40, 2-5.

Ślubowska-Woldengen M., Rasmussen T.L., Koç N., Klitgaard-Kristensen D., Nilsen F., Solheim A., (2007). *Advection of Atlantic Water to the western and northern Svalbard shelf since 17,500 cal yr BP*. Quaternary Science Reviews, 26, 3-4, 463-478.

Ślubowska-Woldengen M., Koç N., Rasmussen T.L., Klitgaard-Kristensen D., Hald M., Jennings A.E., (2008). *Time-slice reconstructions of ocean circulation changes on the continental shelf in the Nordic and Barents Seas during the last 16,000 cal yr B.P.* Quaternary Science Reviews, 27, 1476-1492.

Thomas E., Gapotchenko T., Varekamp J.C., Mecray E.L., Ten Brink M.B., (2000). *Benthic foraminifera and environmental changes in Long Island Sound*. Journal of Coastal Research, 641-655.

Thurman H.V., (1982). *Zarys oceanologii*. Wydawnictwo Morskie Gdańsk, 553.

Travis J.L., Bowser S.S., (1991). *The motility of foraminifera*. Biology of Foraminifera. Academic Press, London, 91-155.

Travis J.L., Welnhofer E.A., Orokos D.D., (2002). *Autonomous reorganization of foraminiferan reticulopodia*. The Journal of Foraminiferal Research, 32, 4, 425-433.

Tsujimoto A., Nomura R., Yasuhara M., Yamazaki H., Yoshikawa S., (2006). *Impact of eutrophication on shallow marine benthic foraminifers over the last 150 years in Osaka Bay, Japan*. Marine Micropaleontology, 60, 4, 258-268.

Uchio T., (1960). *Ecology of living benthonic foraminifera from the San Diego, California, area*. Cushman Foundation for Foraminiferal Research, 5.

Udden J.A., (1914). *Mechanical composition of clastic sediments*. Bulletin of the Geological Society of America, 25, 655-744.

Vachard D., Pille L., Gaillot J., (2010). *Palaeozoic Foraminifera: systematics, palaeoecology and responses to global changes*. Revue de micropaléontologie, 53, 4, 209-254.

de Vargas C., Zaninetti L., Hilbrecht H., Pawłowski J., (1997). *Phylogeny and rates of molecular evolution of planktonic foraminifera: SSU rDNA sequences compared to the fossil record*. Molecular Evolution, 45, 285-294.

Vihtakari M., Welcker J., Moe B., Chastel O., Tartu S., Hop H., Bech C., Descamps S., Gabrielsen G.W., (2018). *Black-legged kittiwakes as messengers of Atlantification in the Arctic*. Scientific Reports, 8, 1, 1-11.

Vilks G., Deonarine B., (1988). *Labrador shelf benthic Foraminifera and stable oxygen isotopes of Cibicides lobatulus related to the Labrador Current*. Canadian Journal of Earth Sciences, 25, 8, 1240-1255.

Walczowski W., Piechura J., (2006). *New evidence of warming propagating toward the Arctic Ocean*. Geophysical Research Letters, 33, 12.

- Walczowski W., Piechura J., (2011). *Influence of the West Spitsbergen Current on the local climate*. International journal of climatology, 31, 7, 1088-1093.
- Walczowski W., Piechura J., Goszczko I., Wieczorek P., (2012). *Changes in Atlantic water properties: an important factor in the European Arctic marine climate*. ICES Journal of Marine Science, 69, 5, 864-869.
- Wang C., Shi L., Gerland S., Granskog M.A., Renner A.H.H., Li Z., Hansen E., Martma T., (2013). *Spring sea-ice evolution in Rijpfjorden (808 N), Svalbard, from in situ measurements and ice mass-balance buoy (IMB) data*. Annals of Glaciology, 54, 62, 253-260.
- Wassmann P., Reigstad M., Haug T., Rudels B., Carroll M.L., Hop H., Gabrielsen G.W., Falk-Petersen S., Denisenko S.G., Arashkevich E., Slagstad D., Pavlova O., (2006). *Food webs and carbon flux in the Barents Sea*. Progress in Oceanography, 71, 2-4, 232-287.
- Weinkauff M., Milker Y., (2018). *The effect of size fraction in analyses of benthic foraminiferal assemblages: A case study comparing assemblages from the > 125 and > 150 μm size fractions*. Frontiers in Earth Science, 6, 37.
- Wentworth C.K., (1922). *A scale of grade and class terms for clastic sediments*. Journal of Geology, 30, 377-392.
- Weydmann A., Søreide J.E., Kwaśniewski S., Leu E., Falk-Petersen S., Berge J., (2013). *Ice-related seasonality in zooplankton community composition in a high Arctic fjord*. Journal of Plankton Research, 35, 831-842.
- Weydmann-Zwolicka A., Prątnicka P., Łącka M., Majaneva S., Cottier F., Berge J., (2021). *Zooplankton and sediment fluxes in two contrasting fjords reveal Atlantification of the Arctic*. Science of the Total Environment, 773, 145599.
- Wheeler T.R., Hong T.D., Ellis R.H., Batts G.R., Morison J.I.L., Hadley P., (1996). *The duration and rate of grain growth, and harvest index, of wheat (*Triticum aestivum* L.) in response to temperature and CO₂*. Journal of experimental botany, 47, 5, 623-630.

Włodarska-Kowalczyk M., Pearson T.H., Kendall M.A., (2005). *Benthic response to chronic natural physical disturbance by glacial sedimentation in an Arctic fjord*. Marine Ecology Progress Series, 303, 31-41.

Włodarska-Kowalczyk M., Szymelfenig M., Zajączkowski M., (2007). *Dynamic sedimentary environments of an Arctic glacier-fed river estuary (Adventfjorden, Svalbard). II: Meio- and macrobenthic fauna*. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 74, 274-284.

Włodarska-Kowalczyk M., Pawłowska J., Zajączkowski M., (2013). *Do foraminifera mirror diversity and distribution patterns of macrobenthic fauna in an Arctic glacial fjord?*. Marine Micropaleontology, 103, 30-39.

Wollenburg J.E., Kuhnt W., Mackensen A., (2001). *Changes in Arctic Ocean paleoproductivity and hydrography during the last 145 kyr: the benthic foraminiferal record*. Paleoceanography, 16, 1, 65-77.

Wollenburg J.E., Knies J., Mackensen A., (2004). *High-resolution paleoproductivity fluctuations during the past 24 kyr as indicated by benthic foraminifera in the marginal Arctic Ocean*. Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology, 204, 3-4, 209-238.

Wollenburg J.E., Mackensen A., Kuhnt W., (2007). *Benthic foraminiferal biodiversity response to a changing Arctic palaeoclimate in the last 24.000 years*. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 255, 3-4, 195-222.

Zajączkowski M., (2002). *On the use of sediment traps in sedimentation measurements in glaciated fjords*. Polish Polar Research, 161-174.

Zajączkowski M., Szczuciński W., Bojanowski R., (2004). *Recent changes in sediment accumulation rates in Adventfjorden, Svalbard*. Oceanologia, 46, 217-231.

Zajączkowski M., Włodarska-Kowalczyk M., (2007). *Dynamic sedimentary environments of an Arctic glacier-fed river estuary (Adventfjorden, Svalbard). I. Flux, deposition and dynamics of the sediment*. Estuarine, Coastal and Shelf Science 74, 285-296.

Zajączkowski M., Szczuciński W., Plessen B., Jernas P., (2010a). *Benthic foraminifera in Hornsund, Svalbard: Implications for paleoenvironmental reconstructions*. Polish Polar Research, 31, 4, 349-375.

Zajączkowski M., Nygård H., Hegseth E., Berge J., (2010b). *Vertical flux of particulate matter in an arctic fjord: the case of lack of the sea – ice cover in Adventfjorden 2006–2007*. Polar Biology, 33, 223-239.

INTERNET:

https://www.cestynasever.cz/spicberky/images/spitsbergen_map.jpg dostęp: 07.09.2020

Spis ilustracji:

Ryc. 2.1.	Archipelag Svalbard	(źródło: https://www.cestynasever.cz/spicberky/images/spitsbergen_map.jpg z dnia 07.09.2020)....	26
Ryc. 2.2.	Mapa przedstawiająca rozmieszczenie prądów w Arktyce. Norweski Prąd Atlantycki - NwAC, Prąd Zachodniospitsbergeński - WSC, Prąd Wschodniospitsbergeński - ESC, Prąd Norweski - NCaC, Prąd Wyspy Niedźwiedziej - BIC (Pawłowska i in., 2020; zmodyfikowany).....		28
Ryc. 2.3.	Mapa rejonu badań z zaznaczonymi stacjami pomiarowymi; Isfjorden, Wijdefjorden, Rijpfjorden, północna stacja N, Południowo-wschodnie Nordaustlandet oraz Wschodnia Edgeøya.....		32
Ryc. 3.1.	Różnorodność kształtów i ułożenia komór w skorupkach wybranych gatunków otwornic (źródło: Kujawa i in., w przygotowaniu; zmodyfikowany).....		36
Ryc. 3.2.	Schemat przedstawiający cykl życiowy otwornic (Pawłowski, 2009; zmodyfikowany).....		39
Ryc. 5.1.	Klasyfikacja mas wodnych na podstawie Cottiera i in., (2005) w: A) Isfjorden (IS), B) Wijdefjorden (WIJ), C) Rijpfjorden (RIJ), D) północnej stacji N (stacja N), E) Południowo-wschodnim Nordaustlandet (NAL) oraz F) Wschodniej Edgeøya (EDG) na poszczególnych stacjach pomiarowych.....		51
Ryc. 5.2.	Zmiany koncentracji zawiesiny w: A) Isfjorden (IS), B) Wijdefjorden (WIJ), C) Rijpfjorden (RIJ), D) północnej stacji N (stacja N), E) Południowo-wschodnim Nordaustlandet (NAL) oraz F) Wschodniej Edgeøya (EDG) na poszczególnych stacjach pomiarowych.....		53
Ryc. 5.3.	Udziały procentowe [%] wybranych frakcji osadu w: A) Isfjorden (IS), B) Wijdefjorden (WIJ), C) Rijpfjorden (RIJ), D) północnej stacji N (stacja N), E) Południowo-wschodnim Nordaustlandet (NAL) oraz F) Wschodniej Edgeøya (EDG) na poszczególnych stacjach pomiarowych.....		57
Ryc. 5.4.	Zmiany liczebności otwornic bentosowych (wapiennych oraz aglutynujących) oraz bioróżnorodność Shannona-Wienera (H') w: Isfjorden (IS), Wijdefjorden (WIJ), Rijpfjorden (RIJ), północnej stacji N (N), Południowo-wschodnim Nordaustlandet (NAL) oraz Wschodniej Edgeøya (EDG) na poszczególnych stacjach pomiarowych. Frakcje wielkościowe osadu (>500 μm , 500-100 μm , 100-63 μm) są oznaczone cyframi w nawiasach kwadratowych.....		60
Ryc. 5.5.	Zmiany liczebności wapiennych otwornic bentosowych (żywych oraz martwych) w: Isfjorden (IS), Wijdefjorden (WIJ), Rijpfjorden (RIJ), północnej stacji N (N), Południowo-		

wschodnim Nordaustlandet (NAL) oraz Wschodniej Edgeøya (EDG) na poszczególnych stacjach pomiarowych. Frakcje wielkościowe osadu (>500 µm, 500-100 µm, 100-63 µm) są oznaczone cyframi w nawiasach kwadratowych.....	62
Ryc. 5.6. Zmiany liczby gatunków otwornic bentosowych (wapiennych oraz aglutynujących) w: Isfjorden (IS), Wijdefjorden (WIJ), Rjipfjorden (RIJ), północnej stacji N (N), Południowo-wschodnim Nordaustlandet (NAL) oraz Wschodniej Edgeøya (EDG) na poszczególnych stacjach pomiarowych. Frakcje wielkościowe osadu (>500 µm, 500-100 µm, 100-63 µm) są oznaczone cyframi w nawiasach kwadratowych.....	64
Ryc. 5.7. Dominujące gatunki otwornic bentosowych w: Isfjorden (IS), Wijdefjorden (WIJ), Rjipfjorden (RIJ), północnej stacji N (N), Południowo-wschodnim Nordaustlandet (NAL) oraz Wschodniej Edgeøya (EDG) na poszczególnych stacjach pomiarowych.....	67
Ryc. 5.8. Grupy wskaźnikowe gatunków otwornic bentosowych w: Isfjorden (IS), Wijdefjorden (WIJ), Rjipfjorden (RIJ), północnej stacji N (N), Południowo-wschodnim Nordaustlandet (NAL) oraz Wschodniej Edgeøya (EDG) na poszczególnych stacjach pomiarowych.....	69
Ryc. 5.9. Podobieństwo składu gatunkowego i liczebności wszystkich otwornic (żywych oraz martwych) w: Isfjorden (IS), Wijdefjorden (WIJ), Rjipfjorden (RIJ), północnej stacji N (N), Południowo-wschodnim Nordaustlandet (NAL) oraz Wschodniej Edgeøya (EDG) na poszczególnych stacjach pomiarowych. Frakcje wielkościowe osadu (>500 µm, 500-100 µm, 100-63 µm) są oznaczone cyframi w nawiasach kwadratowych. Obrazowania w różnych kolorach grupują stacje pomiarowe należące do konkretnego obszaru badań.....	72
Ryc. 5.10. Podobieństwo składu gatunkowego i liczebności żywych otwornic w: Isfjorden (IS), Wijdefjorden (WIJ), Rjipfjorden (RIJ), północnej stacji N (N), Południowo-wschodnim Nordaustlandet (NAL) oraz Wschodniej Edgeøya (EDG) na poszczególnych stacjach pomiarowych. Frakcje wielkościowe osadu (>500 µm, 500-100 µm, 100-63 µm) są oznaczone cyframi w nawiasach kwadratowych. Obrazowania w różnych kolorach grupują stacje pomiarowe z jednej lokalizacji.....	73
Ryc. 5.11. Analiza głównych składowych dla otwornic bentosowych (żywych oraz martwych) w: Isfjorden (IS), Wijdefjorden (WIJ), Rjipfjorden (RIJ), północnej stacji N (N), Południowo-wschodnim Nordaustlandet (NAL) oraz Wschodniej Edgeøya (EDG) na poszczególnych stacjach pomiarowych.....	78
Ryc. 5.12. Analiza wieloczynnikowa żywych otwornic wapiennych w: Isfjorden (IS), Wijdefjorden (WIJ), Rjipfjorden (RIJ), północnej stacji N (N), Południowo-wschodnim	

Nordautlandet (NAL) oraz Wschodniej Edgeøya (EDG) na poszczególnych stacjach pomiarowych..... 81

Ryc. 5.13. Kompozycja stabilnych izotopów $\delta^{13}\text{C}$ oraz $\delta^{18}\text{O}$ w skorupkach otwornic bentosowych (żywych oraz martwych) w: Isfjorden (IS), Wijdefjorden (WIJ), Rijpfjorden (RIJ), północnej stacji N (N), Południowo-wschodnim Nordautlandet (NAL) oraz Wschodniej Edgeøya (EDG) na poszczególnych stacjach pomiarowych..... 84

Spis tabel:

Tab. 2.1. Parametry mas wodnych występujących w rejonie archipelagu Svalbardu (Cottier i in., 2005).....	28
Tab. 2.2. Lokalizacja stacji pomiarowych.....	33
Tab. 4.1. Grupy wskaźnikowe gatunków otwornic bentosowych.....	46
Tab. 5.1. Analiza wieloczynnikowa zbiorowisk otwornic bentosowych. Najistotniejsze gatunki dla danego FA są oznaczone poprzez podkreślenie oraz pogrubienie czcionki. Analiza PC została przeprowadzona na wszystkich (żywych oraz martwych) otwornicach bentosowych.....	75
Tab. 5.2. Analiza wieloczynnikowa zbiorowisk otwornic bentosowych. Najistotniejsze gatunki dla danego FA są oznaczone poprzez podkreślenie oraz pogrubienie czcionki. Analiza PC została przeprowadzona na żywych otwornicach wapiennych.....	79
Tab. 5.3. Wyniki analiz izotopów stabilnych węgla i tlenu ($\delta^{13}\text{C}$ i $\delta^{18}\text{O}$) w skorupkach otwornic bentosowych (żywych oraz martwych) w: Rippfjorden (RIJ), Wijdefjorden (WIJ), Isfjorden (IS), północnej stacji N (N), Południowo-wschodnim Nordaustlandet (NAL) oraz Wschodniej Edgeøya (EDG) na poszczególnych stacjach pomiarowych.....	83

**MATERIAŁY UZUPEŁNIAJĄCE ZAŁĄCZONE W FORMIE ELEKTRONICZNEJ
[CD]**

Załącznik 1. Zagęszczenie otwornic bentosowych (żywych oraz martwych) na gram suchego osadu [os./g].