

## TEMPERATURA I ZASOLENIE PRZYDENNYCH WARSTW WODY W ZATOKACH FIORDU HORNSUND (S SPITSBERGEN)

### TEMPERATURE AND SALINITY OF BOTTOM WATERS IN BAYS OF THE HORNSUND FJORD (S SPITSBERGEN)

Barbara Wiśniewska-Wojtasik

Katedra Genetyki i Cytologii, Uniwersytet Gdański  
ul. Kładki 24, 80–822 Gdańsk  
basia@biotech.univ.gda.pl

**Zarys treści.** Obszary wewnętrznych zatok fiordu Hornsund stanowią zróżnicowane i podlegające dynamicznym zmianom środowisko. Badania nad temperaturą i zasoleniem zatok Hornsundu nie były dotychczas prowadzone systematycznie, ponadto koncentrowały się głównie na centralnej części fiordu. W pracy przedstawiono dane pomiarowe temperatury i zasolenia warstwy wody przydennej z dwóch sezonów letnich (2000 i 2002 r.) dla wybranych zatok przylodowcowych Hornsundu oraz przeprowadzono porównanie uzyskanych wyników. Stwierdzono zaznaczające się w tym okresie silne ocieplenie i wzrost zasolenia wód przydennych. Silne ocieplenie wód przydennych zaznaczyło się również w dłuższej skali czasowej (ostatnie 20–30 lat). Dane zebrano podczas prowadzenia prac związanych z badaniami zgrupowań meiobentosu zasiedlających zatoki fiordu.

**Słowa kluczowe:** Hornsund, wody przydenne, temperatura wody, zasolenie wody, gęstość wody

### 1. Wstęp

Położenie fiordu Hornsund w SW części Spitsbergenu i jego szerokie otwarcie na wody Morza Grenlandzkiego oraz występowanie we wnętrzu fiordu licznych odcinków brzegów lodowych<sup>1</sup> i ujść rzek lodowcowych sprawia, że warunki hydrologiczne w tym fiordzie wykazują dużą zmienność. Zmiany te mają zarówno składową krótkookresową – rzędu dni i tygodni, jak i sezonową oraz wieloletnią.

Zmienność wieloletnia, i w dużej części sezonowa, związana jest ze zmienną aktywnością prądów Zachodnio- i Wschodniospitsbergeńskiego. W ciągu roku do wnętrza Hornsundu wnikać mogą okresowo dwa rodzaje mas wodnych: 1 – ciepłe i słone wody Prądu Zachodniospitsbergeńskiego oraz 2 – zimne, wykazujące się sezonowymi zmianami zasolenia, wody Prądu Sorkapskiego. Temperatura powierzchniowej warstwy wód płynącego z południa Prądu Zachodniospitsbergeńskiego, w rejonie krawędzi szelfu,

---

<sup>1</sup> Brzeg lodowy – brzeg, którego linię brzegową tworzy klif lodowy, stanowiący krawędź lodowca rozpościerającego się na lądzie. Na brzegu lodowym zachodzi obłamywanie się lodu lodowcowego, który topniejąc w wodach morskich zużywa zasoby ciepła tych wód, zaś wody z topniejącego lodu wysładzają wody morskie. W brzegach lodowych, zarówno na wysokości poziomu wody, jak i (częściej) poniżej poziomu morza znajdują się również liczne wywierzyska (wyloty tuneli subglacialnych), wyprowadzające latem duże ilości wód słodkich.

bezpośrednio na zachód od Spitsbergenu, osiąga wartości 3.5–6.5°C, a zasolenie tej warstwy wykazuje stosunkowo małe zmiany, przekraczając 35 psu. Prąd Wschodniospitsbergeński, niosący silnie wychłodzone wody z basenu Morza Arktycznego płynie na południe – południowy zachód. Po opłynięciu Sorkappu, jego wody skręcają na północ, tworząc Prąd Sorkapski, płynący nad szelfem i „przyciśnięty” do brzegów Spitsbergenu. Temperatura i zasolenie wód tego prądu wykazuje znaczne zróżnicowanie sezonowe: zimą spada poniżej –1.5°C przy stosunkowo wysokim zasoleniu 34.3–34.8 psu, latem temperatura wzrasta do około 0.1–1.5°C, a zasolenie wód maleje, mieszcząc się w szerokim przedziale 31.0–34.2 psu. Oba prądy wykazują różną miąższość, aktywność i zasięg na powierzchni w ciągu roku, jak również w cyklu wieloletnim (m.in. Midttun 1990, Loeng 1991, Mitchell i in. 1991, Ferdynus 1997, Haugan 1999, Proshutinsky i in. 1999, Jones 2001, Løyning 2001, Lydersen i in. 2004). W pewnych okresach rozprzestrzeniające się ku wschodowi ciepłe i zasolone wody Prądu Zachodniospitsbergeńskiego „wlewają się” na szelf i blokują dostęp do fiordu wysłodzonym wodom Prądu Sorkapskiego, w innych okresach rozprzestrzeniające się chłodne, ale silnie wysłodzone latem wody Prądu Sorkapskiego zajmują w rejonie Hornsundu strefę szerokości do 40 Mm od brzegu<sup>2</sup>. Zmiany aktywności obu tych prądów stanowią jedną z głównych przyczyn dużej międzysezonowej i międzyrocznej zmienności zasięgu i charakteru pokrywy lodowej w rejonie podejścia do Hornsundu i w samym Hornsundzie (Styszyńska i Wiśniewska 2002).

Drugim czynnikiem silnie wpływającym na charakter sezonowej i międzyrocznej dynamiki warunków hydrologicznych jest zlodowacenie obszaru lądowego otaczającego fiord. Szereg lodowców kończy się bezpośrednio w wodach Hornsundu tworząc brzegi lodowe w jego zatokach pobocznych (Isbjornhamna, Austre- i Vestre Burgerbukta, Samarinvagen, Brepollen). Do zatok, w których zamknięciach nie występują klify lodowe uchodzą mające duże przepływy rzeki lodowcowe (np. Gashamna). Powoduje to dostawę do Hornsundu dużych i bardzo dużych ilości roztopowych wód słodkich i bezpośrednio lodu lodowcowego. Tylko część lodu lodowcowego jest wyprowadzana poza Hornsund – większość topnieje na powierzchni fiordu, wpływając bezpośrednio na temperaturę i zasolenie jego wód. Największe natężenie procesy ablacji osiągają w drugiej połowie lata – co sprawia, że zarówno cielenie lodowców jak i dopływ wód subglacialnych i ekstraglacialnych do fiordu są w tym okresie największe. Natężenie procesów ablacji nawiązuje bezpośrednio do zmian warunków pogodowych, stąd też, jak wykazują obserwacje, z dnia na dzień dochodzić może do bardzo dużych zmian ilości wprowadzanej do Hornsundu wody słodkiej. Międzyroczne zmiany temperatury powietrza i sum opadów ciekłych sezonu ciepłego powodują, że ilość wprowadzanych latem do fiordu wód słodkich również powinna wykazywać duże zmiany.

Dostawa wód słodkich i lodu lodowcowego do fiordu wykazuje wyraźną cykliczność roczną. W okresie chłodnej pory roku, gdy procesy ablacji zanikają, ilość wprowadzonych wód słodkich w postaci ciekłej staje się pomijalnie mała, zaś procesy cielenia się lodowców, po utworzeniu pokrywy lodów morskich na fiordzie, ustają (Marsz 1987).

Bardzo istotnym czynnikiem wywierającym wpływ na ustrój hydrologiczny wód Hornsundu i jego zatok pobocznych są również procesy zamarzania i topnienia lodów morskich. W okresie zamarzania wypływająca z lodów w postaci "słonych palców" (Druet 1994) solanka o bardzo dużym zasoleniu, niskiej temperaturze (z reguły niższej niż –1.88°C) i bardzo dużej gęstości opada w dół toni i wypełnia wszelkiego rodzaju zamknięte zagłębienia w dnie. W ten sposób tworzy się tam bardzo stabilna warstwa wód przydennych o dużej gęstości. W okresie topnienia wysłodzonych lodów zimowych, na powierzchni wód fiordu pojawia się duża ilość mocno wysłodzonych wód roztopowych, oddzielona od niżej leżących warstw wody silnie

---

<sup>2</sup> Sytuacja taka w ostatnich latach wystąpiła w lecie (czerwiec – lipiec) 2004 roku, kiedy to pas zimowych i wieloletnich lodów o dużym zwarciu, niesionych przez Prąd Sorkapski, zablokował na prawie dwa miesiące dostęp do Hornsundu.

zarysowaną halokliną, a niekiedy i termokliną. Wody te, w zależności od kierunku i prędkości wiatru oraz fazy pływ migrują po powierzchni fiordu, jednak na ogół szybko zostają wyprowadzone poza fiord, na obszar szelfu. Ze względu na małą gęstość, wody te nie wywierają wpływu na charakter wód przydennych.

Rezultatem działania skrótno tu opisanych procesów staje się to, że do Hornsundu trafia zróżnicowana zarówno w krótko- jak i długookresowych przekrojach czasowych ilość wód, różnych pod względem genetycznym i właściwościami fizyko-chemicznymi. Procesy mieszania się wód, wymuszane przez działanie prądów pływowych i wiatrowych oraz falowanie, nie są w stanie doprowadzić wód w Hornsundzie do postaci jednolitej pod względem fizyko-chemicznym masy wodnej.

Od wielu lat obserwowana jest zmienność warunków fizyko-chemicznych wód fiordu związana z latami ciepłymi i zimnymi, jak również z porą roku. Pomimo obszernej literatury opisującej warunki fizyko-chemiczne mas wodnych wokół Spitsbergenu oraz dość licznych prac dotyczących wód otwartych części fiordu Hornsund (m.in. Swerpel 1985, Klekowski i Węśławski 1990, Węśławski i in. 1991, Węśławski i in. 1995) jest jednak stosunkowo mało prac poświęconych zagadnieniu warunków hydrologicznych, jakie panują w licznych drugorzędnych zatokach tego fiordu. Nieliczne z nich dotyczą przede wszystkim warunków panujących w Isbjørnhamie, rzadziej w Brepollen (Urbański i in. 1980, Swerpel 1987, Węśławski i in. 1988, Görlich i Stepko 1992, Swerpel 1992). Celem tej pracy jest przedstawienie zróżnicowanego charakteru warstwy wody przydennej występującej w poszczególnych zatokach pobocznych Hornsundu oraz wskazanie na główne czynniki wywierające wpływ na kształtowanie się charakterystyk fizyko-chemicznych wód przydennych w tych zatokach.

## 2. Obszar badań i metodyka

W czasie prowadzenia w lipcu 2000 i 2002 roku badań biologicznych w zatokach pobocznych Hornsundu dokonywano również pomiarów temperatury, zasolenia i przewodnictwa elektrycznego warstwy wody przydennej (tab. 1 i 2). Badaniami objęte były następujące drugorzędne zatoki fiordu Hornsund: Brepollen – przy czole lodowca Horn, Mendelejew i Hyrne (na wschód od zatoki Selbukta), Treskelbukta, Samarinvågen, Adriabukta, Austre Burgerbukta, Gåshamna i Isbjørnhamna (przybliżone położenie stanowisk przedstawiono na ryc. 1 i 2). Okres badań przypadał na czas intensywnych spływów wód lodowcowych oraz cielenia się lodowców. Materiał do badań pobierano z s/v „Eltanin”. Współrzędne geograficzne stanowisk wyznaczano przy wykorzystaniu systemu GPS, natomiast głębokość określano z dokładnością do 0.1 m za pomocą echosondy. Analizy temperatury, zasolenia i przewodnictwa elektrycznego przeprowadzono dla warstwy wody zalegającej 1 metr nad dnem niezależnie od głębokości danego stanowiska. Pomiaru dokonywano konduktometrem LF 330 firmy WTW z dokładnością odpowiednio: 0.1°C, 0.1 psu oraz 0.1 mS/cm. Pomiaru w 2002 r. powtórzono, w wielu przypadkach, dla tych samych stanowisk. Analizy danych dotyczących średnich tygodniowych temperatury warstwy powierzchniowej wody uzyskanych ze zbioru NOAA–CIRES Climate Diagnostics Center<sup>3</sup> pozwoliły na określenie temperatury wód docierających do fiordu Hornsund w okresie prowadzonych prac.

Na podstawie zmierzonych wartości temperatury i zasolenia dla poszczególnych stanowisk obliczono gęstość wody morskiej według wzoru (Mamaev 1970):

$$\rho = [28.152 - 0.0735 \cdot t - 0.00469 \cdot t^2 + (0.802 - 0.002 \cdot t) \cdot (S - 35.0)]/1000 + 1,$$

gdzie:  $\rho$  – gęstość wody morskiej,  $t$  – temperatura wody [°C] oraz  $S$  – zasolenie [psu].

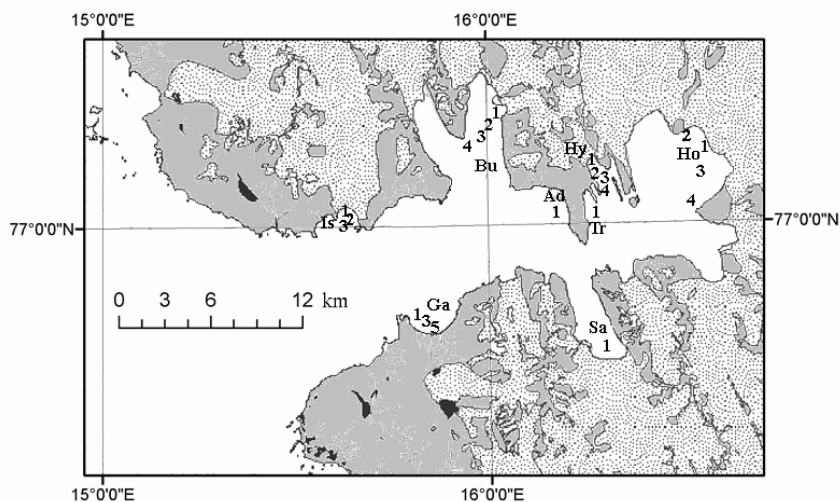
<sup>3</sup> <http://www.cdc.noaa.gov/cdc/data.reynolds-sst>

Tabela 1 – Table 1

Stanowiska, dla których przeprowadzono pomiary temperatury, zasolenia i przewodnictwa elektrycznego warstw przydennych wody (15–17.07.2000); dla wybranych stanowisk w nawiasach podano wartości zasolenia, temperatury i przewodnictwa elektrycznego powierzchniowej warstwy wody

Temperature, salinity and conductivity measurement of bottom waters for stations (15–17.07.2000); inside brackets measurement value for surface water

Stanowisko Station	$\varphi$ [N]	$\lambda$ [E]	Głębokość Depth [m]	Zasolenie Salinity [psu]	Temperatura Temperature [°C]	Przewodnictwo Conductivity [mS/cm]
Horn 1 (Ho1)	77°02'53"	16°37'00"	49	33.8 (31.1–31.5)	1.4–1.5 (1.0–1.1)	53.9 (50.3)
Horn 2 (Ho2)	77 03 60	16 34 15	12.5	32.8	1.8	52.5
Horn 3 (Ho3)	77 01 47	16 36 75	17	32.8	3.2–3.3	52.4
Horn 4 (Ho4)	77 00 75	16 33 91	16	32.8 (29.9)	3.4 (5.3–5.5)	52.4 (48.0)
Hyrne 1 (Hy1)	77 02 40	16 16 62	23	33.3–33.6 (28.8)	0.5–0.7 (1.5)	53.3
Hyrne 2 (Hy2)	77 02 23	16 16 09	22	31.5	3.6–3.7	50.5
Hyrne 3 (Hy3)	77 02 13	16 16 40	30	33.1	2.5–2.7	53.3
Hyrne 4 (Hy4)	77 01 90	16 16 29	10	32.4	2.6–2.7	51.9
Treskelbukta 1 (Tr1)	77 00 29	16 15 31	13.5	30.5	3.6	48.9
Adriabukta 1 (Ad1)	77 00 54	16 10 27	39	33.4	2.7–2.8	54.0
Samarinvägen 1 (Sa1)	76 55 26	16 17 21	65	34.0 (32.1)	0.3–0.4 (3.9)	54.6 (51.4)
Burgerbukta 1 (Bu1)	77 03 93	16 02 15	15	33.4 (29.5)	2.8–2.9 (4.1)	53.2 (47.5)
Burgerbukta 2 (Bu2)			5	33.3	2.9	53.2
Burgerbukta 3 (Bu3)			15	33.6	1.9	53.9
Burgerbukta 4 (Bu4)	77 02 78	15 58 80	25	33.5 (29.3)	2.7–2.8 (5.6)	53.5 (47.3)
Isbjörnhamna 1 (Is1)	77 00 52	15 38 14	25.5	33.1	3.2	52.9
Isbjörnhamna 2 (Is2)	77 00 46	15 37 00	24.5	33.1 (30.9)	3.1 (2.6–2.9)	52.8 (23.6)
Isbjörnhamna 3 (Is3)	76 59 96	15 35 06	12	33.1	3.5	52.8
Gåshamna 1 (Ga1)	76 56 95	15 48 87	50	33.7	2.9	53.7
Gåshamna 3 (Ga3)	76 56 77	15 49 43	30	33.4	3.4	53.2
Gåshamna 5 (Ga5)	76 56 54	15 48 57	10	33.2 (31.5)	3.3 (3.1)	52.7 (50.4)



Ryc. 1. Położenie stanowisk pomiarowych w lipcu 2000 r.  
(wg mapy Hornsund 6, [http://www.iopan.gda.pl/projects/biosphere/pnpp\\_hornsund\\_map.htm](http://www.iopan.gda.pl/projects/biosphere/pnpp_hornsund_map.htm))

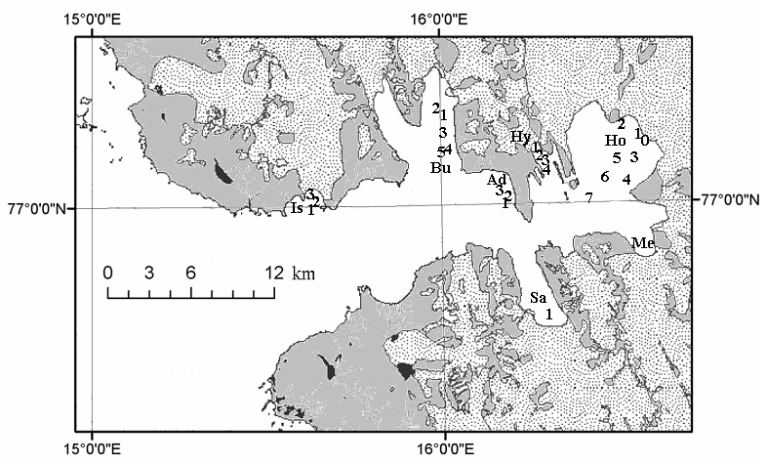
Fig. 1. Location of the sampling stations, July 2000.  
(according to the map Hornsund 6, [http://www.iopan.gda.pl/projects/biosphere/pnpp\\_hornsund\\_map.htm](http://www.iopan.gda.pl/projects/biosphere/pnpp_hornsund_map.htm))

Tabela 2 – Table 2

Stanowiska, dla których przeprowadzono pomiary temperatury, zasolenia i przewodnictwa elektrycznego warstw przydennych wody (17–19.07.2002)

Temperature, salinity and conductivity measurement of bottom waters for stations (17–19.07.2002)

Stanowisko Station	$\varphi$ [N]	$\lambda$ [E]	Głębokość Depth [m]	Zasolenie Salinity [psu]	Temperatura Temperature [°C]	Przewodnictwo Conductivity [mS/cm]
Horn 0 (Ho0)	77°02'47"	16°37'39"	32.3	33.9	2.5	54.2
Horn 1 (Ho1)	77 02 53	16 37 00	48	33.9	1.7	54.2
Horn 2 (Ho2)	77 03 60	16 34 15	18	33.6	2.6	53.6
Horn 3 (Ho3)	77 01 50	16 36 74	17	33.5	3.5	53.3
Horn 4 (Ho4)	77 00 75	16 33 91	20	33.7	3.1	53.7
Horn 5 (Ho5)	77 01 90	16 29 50	90	34.4	-0.1	55.2
Horn 6 (Ho6)	77 00 40	16 27 60	100	33.9	1.0	54.4
Horn7 (Ho7)	77 00 00	16 21 31	31	34.0	3.0	54.0
Mendelejew (Me)	76 58 64	16 33 68	35	33.7	3.2	53.6
Samarinvägen 1 (Sa1)	76 55 26	16 17 21	72.9	34.4	-0.5	55.3
Hyme 1 (Hy1)	77 02 40	16 16 62	10	32.6	3.1	52.1
Hyme 2 (Hy2)	77 02 23	16 16 09	30	30.6	3.2	49.4
Hyme 3 (Hy3)	77 02 13	16 16 40	33	34.0	0.4	54.6
Hyme 4 (Hy4)	77 01 90	16 16 29	22	33.8	2.8	53.9
Adriabukta 1 (Ad1)	77 00 51	16 10 35	43.3	33.9	3.9	53.8
Adriabukta 2 (Ad2)	77 00 75	16 10 16	54	34.1	3.6	54.1
Adriabukta 3 (Ad3)	77 01 19	16 06 89	21	33.8	3.6	53.7
Burgerbukta 1 (Bu1)	77 04 10	16 01 29	12	29.1	4.0	47.0
Burgerbukta 2 (Bu2)	77 05 23	15 57 86	70	33.6	2.5	53.6
Burgerbukta 3 (Bu3)	77 03 30	16 00 00	37	33.7	3.0	53.7
Burgerbukta 4 (Bu4)	77 02 60	16 00 00	42	33.8	3.3	53.8
Burgerbukta 5 (Bu5)	77 02 60	16 00 40	28	33.4	2.3	53.4
Isbjörnhamna 1 (Is1)	76 59 73	15 38 07	39	33.8	4.0	52.3
Isbjörnhamna 2 (Is2)	76 59 99	15 37 41	25.7	33.7	4.0	52.2
Isbjörnhamna 3 (Is3)	77 00 50	15 37 50	40	33.4	4.0	51.8



Ryc. 2. Położenie stanowisk pomiarowych w lipcu 2002 r.  
(wg mapy Hornsund 6, [http://www.iopan.gda.pl/projects/biosphere/pnpp\\_hornsund\\_map.htm](http://www.iopan.gda.pl/projects/biosphere/pnpp_hornsund_map.htm))

Fig. 2. Location of the sampling stations, July 2002.  
(according to the map Hornsund 6, [http://www.iopan.gda.pl/projects/biosphere/pnpp\\_hornsund\\_map.htm](http://www.iopan.gda.pl/projects/biosphere/pnpp_hornsund_map.htm))

Dla poszczególnych stanowisk określono udział wód słodkich (FWF, %) w badanych frakcjach wg wzoru (Zajączkowski i Legeżyńska 2001 za Beszczyńska-Möller i in. 1997),

$$FWF = [(S_0 - S) / S_0] \cdot 100\%,$$

gdzie:  $S_0$  – najwyższa zaobserwowana wartość zasolenia w danym sezonie,  $S$  – wartość zasolenia na danym stanowisku.

W celu porównania warunków środowiskowych oraz określenia stopnia zróżnicowania poszczególnych stanowisk wykorzystano program statystyczny STATISICA 6,0 i przeprowadzono analizy regresji dla serii prób z 2000 i 2002 roku. Pod uwagę wzięto parametry takie jak: temperatura, zasolenie warstwy wody przydennej oraz głębokość z jakiej pobrano próbę.

### 3. Wyniki analizy

Dane pomiarowe, przedstawione w tabelach 1 i 2, poddano analizie, a jej wyniki dla porządku pogrupowano w odpowiednich punktach. Wyniki tych analiz wskazują, że mimo daleko posuniętych podobieństw pomiędzy wykształceniem cech fizyko-chemicznych wód przydennych i związkach między ich parametrami, pomiędzy rokiem 2000 a 2002 zaznaczają się dość poważne różnice. Odzwierciedla to zaznaczającą się zmienność międzyroczną, w rezultacie której parametry wód przydennych w drugorzędnych zatokach Hornsundu nie są stabilne, lecz wykazują postępujące zmiany.

1. Duże zróżnicowanie parametrów fizyko-chemicznych wód przydennych w drugorzędnych zatokach fiordu Hornsund wynika głównie ze zróżnicowania ich batymetrii. Wraz ze wzrostem głębokości, na której zalega dno, rośnie zasolenie i maleje temperatura wód przydennych. Stanowi to prostą konsekwencję tworzenia się układu stabilnego hydrodynamicznie, wynikającą z działania gęstości wody, będącej funkcją jej zasolenia i temperatury. Wraz ze wzrostem głębokości zmniejsza się również stopień wysłodzenia wód, charakteryzowany przez wartość FWF (udział frakcji wód słodkich).

Jeśli wyeliminować z danych z 2000 r. dwa przypadki wyraźnie odstające od reszty pomiarów (Hy2 i Tr1), gęstość wód przydennych w zatokach pobocznych Hornsundu stanowi funkcję głębokości (ryc. 3). Zmienność głębokości ( $d$ ) objaśnia nieco ponad 50% zmienności gęstości wód ( $\rho$ ) w warstwie przydennej. Zależność tą opisać można związkiem:

$$\rho = 1.0261 + 1.6405 \cdot 10^5 \cdot d,$$

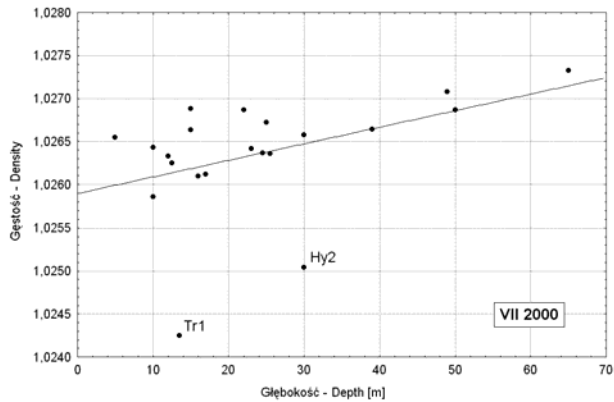
gdzie:  $d$  – głębokość akwenu w metrach, a charakterystyka statystyczna tej zależności jest:  $R = 0.72$ ,  $R^2 = 0.52$ ,  $F(1,17) = 18.4$ ,  $p < 0.00049$  przy błędzie standardowym estymacji (BSE) gęstości równym  $\pm 0.00026$ .

Podobną analizę przeprowadzono dla roku 2002. Również i w tym przypadku zaszła konieczność pominięcia pomiarów z dwóch stanowisk odbiegających zasadniczo od pozostałych – Bu1, Hy2. Okazało się, że w 2002 roku zmienność głębokości ( $d$ ) objaśnia już mniej niż 50% zmienności gęstości wód ( $\rho$ ) w warstwie przydennej (ryc. 4). Zależność tę można opisać związkiem:

$$\rho = 1.0265 + 1.0000 \cdot 10^5 \cdot d,$$

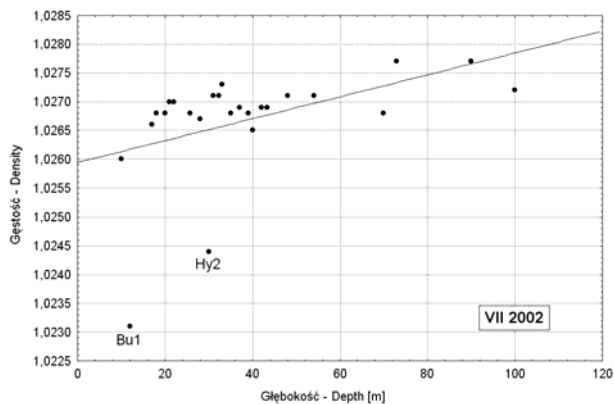
którego charakterystyka statystyczna jest następująca:  $R = 0.64$ ,  $R^2 = 0.41$ ,  $F(1,21) = 14.73$ ,  $p < 0.00096$ ,  $BSE = 0.00028$ .

Porównanie obu zależności wskazuje, że w roku 2002 gęstość wód przydennych była znacznie bardziej wyrównana na poszczególnych stanowiskach i w mniejszym stopniu powiązana ze zróżnicowaniem głębokości niż miało to miejsce w 2000 roku.



Ryc. 3. Zmiany gęstości wód przydennych w drugorzędnych zatokach Hornsundu (VII 2000) w funkcji głębokości. Oznaczono punkty odstające (wody bardzo silnie wysłodzone)

Fig. 3. The change of density of bottom waters in secondary bays of Hornsund fjord ( VII 2000) in the function of the depth. The points of divergence have been marked (the very fresh waters)



Ryc. 4. Zmiany gęstości wód przydennych w drugorzędnych zatokach Hornsundu (VII 2002) w funkcji głębokości. Oznaczono punkty odstające (wody bardzo silnie wysłodzone)

Fig. 4. The change of density of bottom waters in secondary bays of Hornsund fjord ( VII 2002) in the function of the depth. The points of divergence have been marked (the very fresh waters)

W zbliżonym stopniu zmienność głębokości akwenów w drugorzędnych zatokach fiordu objaśnia obserwowane zmiany zasolenia (S, psu) warstwy wód przydennych. Zależność tą, dla lipca roku 2000 opisuje równanie:

$$S = 32.8308 + 0.0175 \cdot d,$$

którego charakterystyka statystyczna jest następująca:  $R = 0.71$ ,  $R^2 = 0.50$ ,  $F(1,17) = 17.2$ ,  $p < 0.0007$ ,  $BSE = 0.2852$ . Podobnie, jak w przypadku gęstości, związek zasolenia z głębokością akwenu dla danych z lipca 2002 r., nie jest tak silny jak w przypadku danych z lipca 2000 roku. Zależność tą dla lipca 2002 r. opisuje równanie:

$$S = 33.4002 + 0.0090 \cdot d,$$

którego charakterystyka statystyczna jest następująca:  $R = 0.58$ ,  $R^2 = 0.34$ ,  $F(1,21) = 10.77$ ,  $p < 0.00356$ ,  $BSE = 1.30068$ . Zmiany głębokości objaśniają tu zaledwie 34% zmienności zasolenia.

Średnie zasolenie wód przydennych (bez uwzględnienia wymienionych stanowisk odstających) wynosiło w 2000 roku 33.261 psu ( $\sigma_n = 0.393$ ), a w 2002 roku – 33.765 psu ( $\sigma_n = 0.361$ ). Oznacza to średni wzrost zasolenia wód przydennych w badanych punktach w ciągu dwóch lat o 0.504 psu.

Temperatura warstwy wód przydennych w mniejszym stopniu jest związana z głębokością akwenu. Zmiany głębokości objaśniają w lipcu roku 2000 zaledwie 35% zmienności temperatury tej warstwy wód, w lipcu 2002 roku niemal tyle samo, bo 36%. Związek temperatury ( $T$ , °C) z głębokością w roku 2000 opisuje równanie:

$$T = 3.4416 - 0.0301 \cdot d,$$

którego charakterystyka statystyczna jest następująca:  $R = 0.59$ ,  $R^2 = 0.35$ ,  $F(1,17) = 9.0$ ,  $p < 0.008$ ,  $BSE = 0.68^\circ\text{C}$ . W lipcu 2002 ten sam związek przybiera postać:

$$T = 3.9908 - 0.0337 \cdot d,$$

a jego charakterystyka statystyczna jest:  $R = 0.60$ ,  $R^2 = 0.36$ ,  $F(1,21) = 11.95$ ,  $p < 0.003$ ,  $BSE = 1.06^\circ\text{C}$ . W roku 2002 temperatura wód przydennych była średnio wyraźnie wyższa od temperatury takich samych wód w roku 2000 (około  $0.55^\circ\text{C}$ !) i zaznaczał się wyraźniejszy spadek temperatury wraz ze zwiększaniem się głębokości.

Udział wód słodkich w wodach słonych (FWF), obliczony względem wartości zasolenia podawanej przez Węśławskiego (1991) z obszaru przedpola Hornsundu<sup>4</sup> (35.23 psu) w wodach przydennych w lipcu 2000 roku wynosi dla 19 prób średnio 6.21%. Jednak spośród całej populacji pomiarów z roku 2000 wyniki znacznie odbiegające od reszty populacji wykazują dwa stanowiska z zachodniej części Brepollen – Hy2 i Tr1, w których odsetek frakcji wód słodkich był znacząco większy (FWF odpowiednio 10.59 i 13.43%). Eliminacja tych prób z populacji pozwala określić średni udział wód słodkich w przydennych warstwach wód w lipcu 2000 roku na 5.59% ( $\sigma_n = 1.11$ ).

Również i udział wód słodkich (FWF, %) w 2000 r. wykazuje dość ścisły, istotny statystycznie związek z głębokością akwenu (ryc. 5), który można opisać jako:

$$FWF = 6.810 - 0.050 \cdot d,$$

a którego charakterystyka statystyczna jest następująca:  $R = 0.71$ ,  $R^2 = 0.50$ ,  $F(1,17) = 17.2$ ,  $p < 0.00067$ ,  $BSE = 0.81\%$ . W roku 2002 ten sam związek (po wyeliminowaniu stanowisk Bu1 (FWF = 17.4%) i Hy2 (FWF = 13.1%), na których wody przydenne wykazywały znaczne wysłodzenie, rażąco odbiegające od reszty populacji) wyraźnie słabnie (ryc. 6) i kształtuje się następująco:

$$FWF = 5.194 - 0.026 \cdot d,$$

a jego charakterystyka statystyczna jest:  $R = 0.58$ ,  $R^2 = 0.31$ ,  $F(1,21) = 10.8$ ,  $p < 0.004$ ,  $BSE = 0.85\%$ . Średni udział frakcji wód słodkich w wodach przydennych w 2002 roku zmniejszył się i wynosi 4.16 ( $\sigma_n = 1.03$ )%.

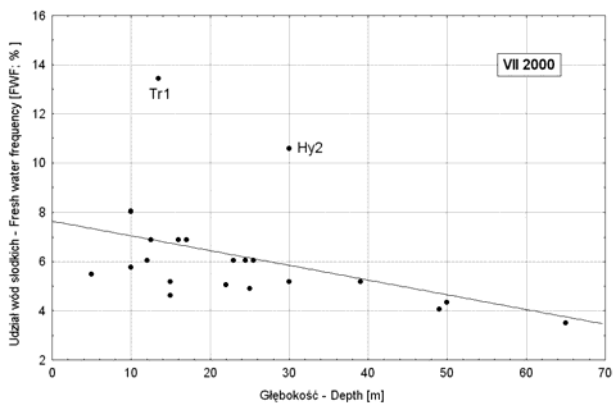
Obraz przedstawionych zależności wykazuje z jednej strony zróżnicowanie właściwości fizykochemicznych wód przydennych, jakie zachodzą w funkcji głębokości, z drugiej – ujawnia skalę możliwej zmienności międzyrocznej i dokumentuje bardzo szybkie zmiany właściwości wód przydennych, jakie zaszły w ciągu dwu lat, między pomiarami. Zmiany te to wzrost temperatury i zasolenia wód przydennych

---

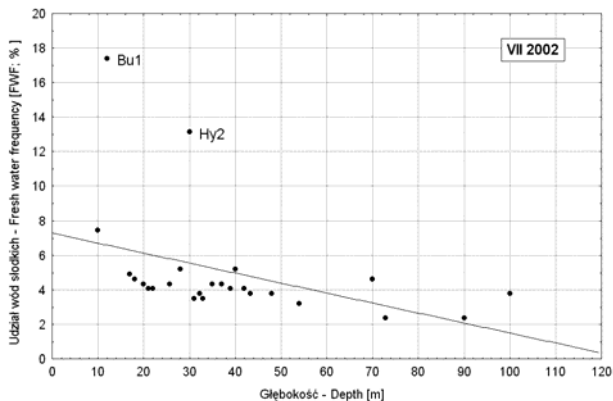
<sup>4</sup> Taką wartość zasolenia przyjęto, aby można było łatwo porównać wyniki tej pracy z wynikami wcześniejszych badań Węśławskiego i innych (1991).



(przeciwstawne w kształtowaniu gęstości). Wzrost temperatury wód przydennych, izolowanych od atmosfery warstwą cieplejszych i wysłodzonych, lżejszych wód powierzchniowych nie może zachodzić pod wpływem wzrostu temperatury powietrza, jaki zaznacza się na tym obszarze.

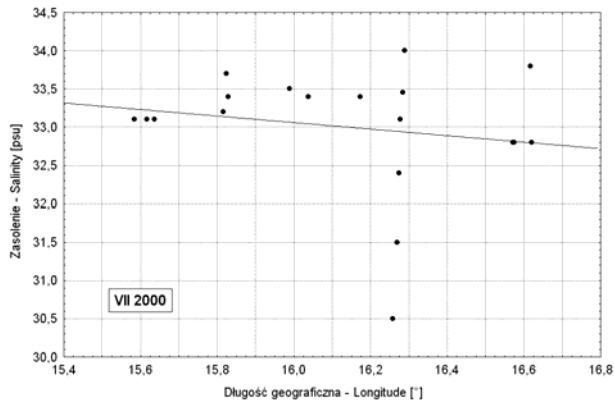


Ryc. 5. Zmiany FWF (frakcji wód słodkich) w wodach przydennych drugorzędnych zatok Hornsundu w funkcji głębokości (VII 2000). Oznaczono punkty odstające (wody bardzo silnie wysłodzone)  
 Fig. 5. The changes of FWF (fresh water fractions) in bottom waters in secondary bays of Hornsund fjord in the function of the depth (July 2000). The points of divergence have been marked (the very fresh waters)



Ryc. 6. Zmiany FWF (frakcji wód słodkich) w wodach przydennych drugorzędnych zatok Hornsundu w funkcji głębokości (VII 2002). Oznaczono punkty odstające (wody bardzo silnie wysłodzone)  
 Fig. 6. The changes of FWF (fresh water fractions) in bottom waters in secondary bays of Hornsund fjord in the function of the depth (July 2002). The points of divergence have been marked (the very fresh waters)

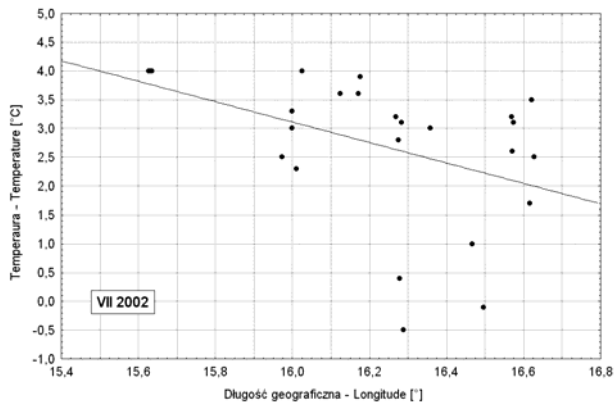
2. Równoleżnikowy przebieg głównej osi morfologicznej Hornsundu pozwala na zbadanie, jak zmieniają się właściwości fizyko-chemiczne wód przydennych wraz z oddalaniem się od wejścia do fiordu, poprzez analizę ich zmienności w funkcji zmieniającej się długości geograficznej. Przykładowo zmiany właściwości fizyko-chemicznych wód przydennych zachodzące w funkcji długości geograficznej w lipcu 2000 i 2002 roku pokazano na rycinach 7 i 8. Analiza regresji wykazała jednak, że brak jest związków wykazujących



Ryc. 7. Zmiany zasolenia wód przydennych w Hornsundzie w funkcji długości geograficznej.

Zaznacza się słaba tendencja spadku zasolenia wraz z oddalaniem się od ujścia fiordu wskazująca na postępujący ku wschodowi wzrost wysłodzenia

Fig. 7. The changes of salinity of bottom waters in Hornsund fjord in the function of the longitude. There is a slight tendency of decrease of salinity gradient along with moving away from the mouth of the fjord. This indicates an increase of desalting towards the east of the fjord



Ryc. 8. Zmiany temperatury wód przydennych w Hornsundzie w funkcji długości geograficznej.

Zaznacza się spadek temperatury zachodzący wraz z oddalaniem się od ujścia fiordu

Fig. 8. The changes of temperature of bottom waters in Hornsund fjord in the function of the longitude. There is a decrease in temperature when moving away from the mouth of the fjord

istotność statystyczną między właściwościami fizyko-chemicznymi wód w warstwie przydennej poszczególnych zatok, a oddaleniem tych zatok od wejścia do fiordu. Związki wszystkich badanych parametrów fizyko-chemicznych ( $\rho$ , S, T, FWF) są objaśniane przez zmienność długości geograficznej ( $\lambda$ ) w takim samym – zerowym – procencie. Taki wynik wydaje się wskazywać na to, że mimo dużego oddalenia niektórych zatok od wejścia do fiordu i oddzielenia ich podwodnymi progami od osiowej części Hornsundu, napływ wód z otwartego Morza Grenlandzkiego do wnętrza zatok pobocznych Hornsundu jest intensywny, a wymiana wód, również przydennych, jest stosunkowo szybka. Rozkład w przestrzeni parametrów fizyko-chemicznych wód warstwy przydennej w drugorzędnych zatokach Hornsundu oraz opisane w punkcie 1

zależności wskazują, że nie tylko w osi fiordu, ale i w zatokach pobocznych funkcjonuje typowa dla fiordów, w których zamknięciu znajdują się uchodzące do morza lodowce, powolna cyrkulacja wód (opisuje ją model Syvitskiego; 1989), polegająca na napływie wód silnie zasolonych z osiowej części fiordu w dolnej części profilu poprzecznego zatok, unoszenia się tych wód w zatokach w pobliżu klifów lodowych, wysłania się wód i wyprowadzania wód wysłodzonych w warstwie przypowierzchniowej z zatok do osiowej części fiordu.

3. W stosunku do podawanych w literaturze wartości temperatury wody w warstwie przydennej (Swerpel 1985, Swerpel 1987, Węslawski i in. 1988, Klekowski i Węslawski 1990, Węslawski i in. 1991, Görlich i Stepko 1992, Swerpel 1992, Węslawski i in. 1995), obserwowane w 2000 i 2002 roku temperatury są znacząco wyższe. Przykładowo temperatura wyznaczona dla profilu pionowego w Isbjörnhamnie w sierpniu 1982 (Görlich i Stepko 1992) wynosiła poniżej 0°C w warstwie powierzchniowej i około 0°C w warstwie przydennej. Jest to najniższa z podawanych przez literaturę wartości w tym rejonie. Temperatura określona dla przydennej warstwy wody w Isbjörnhamnie i Siedleckivika w latach 1974–1981 (Swerpel 1985) dla wszystkich stanowisk nie przekracza 2°C. W czasie obu sezonów prac prowadzonych przez autorkę mierzono wyższą wartość temperatury w tym rejonie: od 3.1 do 3.5°C w lipcu 2000 oraz 4°C w lipcu 2002 r. Podobną rozbieżność wykazują wyniki obserwacji dla stanowisk w Brepollen. Według Swerpla (1985) temperatura wody mierzona na trzech stanowiskach w tym rejonie, w całym pionowym profilu nie przekraczała 1°C, natomiast jak wynika z pomiarów autorki – wartości temperatury są w tym rejonie mocno zróżnicowane (patrz tab. 1 i 2), przy czym maksymalna wartość temperatury wynosiła 3.5°C.

Zaznaczający się w czasie ostatnich 20–30 lat wzrost temperatury warstwy wód przydennych zarówno w Isbjörnhamnie, jak i w Brepollen wskazuje na postępujące ocieplenie. Może być ono oszacowane na podstawie powyższej cytowanych danych literaturowych. Średnia temperatura wód przydennych odnotowana w tych zatokach w latach 1974–1981 wynosiła około 1°C, natomiast dla serii pomiarowych, na analogicznych stanowiskach, w lipcu 2000 roku określono 3.27°C, a w lipcu 2002 roku na trzech stanowiskach mierzono 4.0°C.

W okresie 1982–2003 obserwuje się również systematyczny wzrost temperatury powierzchni Morza Grenlandzkiego na zachód od Spitsbergenu (Kruszewski 2004a i b), stanowiący skutek wzrostu przepływów Prądu Zachodniospitsbergeńskiego i wzrostu temperatury prowadzonych przez ten prąd wód. Ocieplenie izolowanych od kontaktem z atmosferą wód przydennych, znajdujących się na dodatek w zatokach pobocznych, izolowanych progami od głębokowodnych osiowych części fiordu, jest możliwe tylko na drodze adwekcji mas cieplejszej, ale o większym zasoleniu, wody. Pozwala to sądzić, że i w wodach przydennych drugorzędnych zatok Hornsundu zapisał się wzrost temperatury Prądu Zachodniospitsbergeńskiego. Ocieplenie, obserwowane w rejonie Spitsbergenu, przejawia się nie tylko we wzroście temperatury powietrza i powierzchni oceanu, ale również we wzroście temperatury wód przydennych, co oznacza, że sumaryczne zasoby ciepła w wodach Hornsundu zwiększają się.

Wobec krótkiej serii obserwacyjnej przeprowadzonej przez autorkę, trudno jednoznacznie wypowiadać się, czy obserwowany w zaledwie dwuletnim okresie wzrost zasolenia wód przydennych ma cechy trwałości, czy też stanowi przejaw krótkookresowych fluktuacji. Trzeba jednak podkreślić, że wzrostowi zasolenia wód przydennych w ciągu tych dwóch lat towarzyszy jednocześnie wzrost temperatury. Wraz z wnioskami o długookresowym ociepleniu wód przydennych wynikającymi z porównań danych podawanych w cytowanej literaturze, może to świadczyć, że w ciągu ostatnich 20–30 lat zachodzi, pod wpływem zmian intensywności Prądu Zachodniospitsbergeńskiego, zasadnicza przebudowa charakteru mas wodnych wypełniających Hornsund.

## Literatura

- Druet Cz., 1994, Dynamika stratyfikowanego oceanu. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa: 226 s.
- Ferdynus J., 1997, Główne cechy klimatu morskiego strefy subpolarniej północnego Atlantyku w świetle struktury stanów pogody. Prace Wydziału Nawigacyjnego WSM, Gdynia: 138 s.
- Görlich K., Stepko W., 1992, Hydrological phenomena related to sea-ice formation and presence in Hornsund, Spitsbergen. [w:] Landscape, life world and man in High Arctic. Institut of Ecology, PAS, Warszawa: 83–92.
- Haugan P.M., 1999, Structure and heat content of the West Spitsbergenian Current. Polar Research, 18: 183–188.
- Jones E.P., 2001, Circulation in the Arctic Ocean. Polar Research, 20: 139–146.
- Klekowski R.Z., Węśławski J.M. (red.). 1990. Atlas of the marine fauna of Southern Spitsbergen. Tom 1, Ossolineum, Wrocław: 308 s.
- Kruszewski G., 2004a, Wzrost temperatury wód wokółspitsbergeńskich w ostatnim 20-leciu (1982–2002). Polish Polar Studies, 30: 203–211.
- Kruszewski G., 2004b, Zmienność temperatury powierzchni morza w rejonie Spitsbergenu (1982–2002) jako przejaw współcześnie zachodzących zmian klimatycznych. Problemy Klimatologii Polarnej, 14: 79–86.
- Loeng H., 1991, Features of the physical oceanographic conditions of the Barents Sea. Polar Research, 10: 5–18.
- Løyning T.B., 2001, Hydrography in the north-western Barents Sea, July–August 1996. Polar Research, 20: 1–11.
- Lydersen C., Nøst O.A., Kovacs K.M., Fedak M.A., 2004, Temperature data from Norwegian and Russian waters of the northern Barents Sea collected by free-living ringed seals. Journal of Marine Systems 46: 99–108.
- Mamaev O.I., 1970, TS-analiz vod Mirovogo okeana. Gidrometeoizdat, Leningrad: 364 s.
- Marsz A., 1987, Brzegi lodowe. Ossolineum, Gdańskie Towarzystwo Naukowe, Gdańsk: 119 s.
- Middtun L., 1990, Surface temperatures of the Barents Sea. Polar Research 8: 11–16.
- Mitchell B.G., Brody E.A., Yeh E.N., McClain C., Comisi J., Maynard N.G., 1991, Meridional zonation of the Barents Sea ecosystem inferred satellite remote sensing and in situ bio-optical observations. Polar Research, 10, 1: 147–162.
- Proshutinsky A.Y., Polyakov I.V., Johnson M.A., 1999, Climate states and variability of Arctic ice and water dynamics during 1946–1997. Polar Research, 18: 135–142.
- Styszyńska A., Wiśniewska B., 2002, Zlodzenie zatoki Nottingham (SW Spitsbergen) w latach 1993–2001 – przebieg i uwarunkowania. Polish Polar Studies 28, Poznań: 279–303.
- Swerpel S., 1985, The Hornsund Fjord: water masses. Polish Polar Research, 6, 4: 475–496.
- Swerpel S., 1987, Temperature and salinity of surface water at a coastal measuring point, Isbjørnhamna, Spitsbergen. Polish Polar Research, 8, 1: 57–64.
- Swerpel S., 1992, Water transport in the coastal bays of the Hornsund. [w:] Landscape, life world and man in High Arctic. Institut of Ecology PAS, Warszawa: 75–81.
- Syvitski J.P.M., 1989, On the deposition of sediment within glacier-influenced fjords: Oceanographic controls. Marine Geology, 85: 301–329.
- Urbański J., Neugebauer E., Spacjer R., Falkowska L., 1980, Physico-chemical characteristic of the waters of Hornsund Fjord on south-west Spitsbergen (Svalbard Archipelago) in the summer season 1979. Polish Polar Research, 1, 4: 43–52.
- Węśławski J. M., Zajączkowski M., Kwaśniewski S., Jezierski J., Moskal W., 1988, Seasonality in Arctic fjord ecosystem: Hornsund, Spitsbergen. Polar Research, 6: 185–189.
- Węśławski J. M., Jankowski A., Kwaśniewski S., Swerpel S., Ryg M., 1991, Summer hydrology and zooplankton in two Svalbard fjords. Polish Polar Research, 12, 3: 445–460.
- Węśławski J. M., Kosztajn J., Zajączkowski M., Wiktor J., Kwaśniewski S., 1995, Fresh water in Svalbard fjord ecosystems. Elsevier. Ecology of Fjords and Coastal Waters: 229–241.
- Zajączkowski M. J., Legeżyńska J., 2001, Estimation of zooplankton mortality caused by an Arctic glacier outflow. Oceanologia, 43 (3): 341–351.

## Summary

The Hornsund fjord is located in the southwest part of Spitsbergen. This part is situated in the area of dynamic changes because of two periodically upcoming flows of water, warm West Spitsbergen current and cold East Spitsbergen current. These currents are changeable by means of their specific activities due to variable flow of some waters to the fjord that occur seasonally as well as in many years time.

The changeability of physico-chemical conditions of the fjord waters have been monitored for many years by terms of warm years as well as seasonally. Despite of thorough literature conveying the issue of physico-chemical conditions of Isbjørnhamna's waters there is not sufficient pieces of information tackling with some conditions that are in numerous bays in the depth of Hornsund fjord.

During the biological research in Hornsund concerning inner bays in July of 2000 and 2002 year the measurement of temperature, salinity and conductivity of bottom layers of water were made. The research included the following bays: Brepollen by the forehead of Horn glacier, Hyrne glacier, Mendelejew glacier, by the eastern side of Treskelen peninsula, Samarinvågen, Adriabukta, Austre Burgerbukta, Gåshamna and Isbjørnhamna. The conducted analysis were done for the water layers that lie 1 meter over the bottom.

The research was being done was that moment of intensive flows of glacier waters. The measurement were repeated in 2002, moreover almost for the same positions. When the research was being conducted the Hornsund fjord was under the influence of warm waters on the surface by West Spitsbergen current, according the analysis of the data of surface waters taken by NOAA-CIRES Climate Diagnostics Centre.

As a result of the analysis conducted some great variability of water temperature and salinity for some bays and profiles has been found. For the given positions almost similar values were found by means of two research series (2000 and 2002). The results show indicate to the variability of water layers lied in the given glacier bays.

The rise of temperature of bottom waters both in Isbjørnhamna and Brepollen that has been noticed during the period of 20-30 years indicates constant warming. The results of various research as well as the conclusions about the long-term lasting warming of the bottom waters available from literature can provide evidence that during the period of 20-30 years there is a change of intensity of West Spitsbergen current. Thus there is a significant change and conversion of water mass filled Hornsund