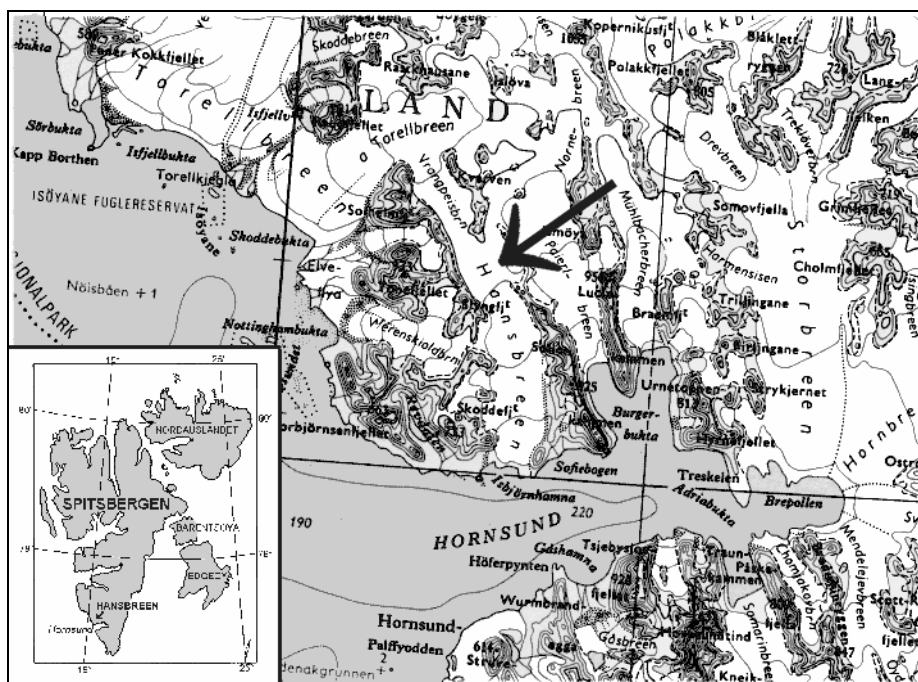


ZAGADNIENIE ODTWORZENIA WARTOŚCI BILANSU LODOWCA HANSA (SW SPITSBERGEN)

Andrzej A. Marsz, Anna Styszyńska

Akademia Morska w Gdyni, Katedra Meteorologii i Oceanografii Nautycznej
aamarsz@wsm.gdynia.pl, stysa@wsm.gdynia.pl

Zagadnienie odtworzenia bilansu Lodowca Hansa (rys. 1) z przeszłości jest problemem stosunkowo skomplikowanym. Główną przyczyną komplikacji zagadnienia jest skąpość danych, które mogłyby zostać wykorzystane do tego celu.



Rys. 1. Położenie obszaru badań

Fig. 1. Localisation of study area

Badania prowadzone przez J. Janię z zespołem dostarczyły 11 pomiarowych wartości bilansu zimowego i 9 wartości bilansu letniego oraz 9 wartości bilansu netto Lodowca Hansa z okresu lat 1988/89 - 1998/99. Wartości te zgrupowane są w tabeli 1. Dane te dalej traktuje się jako wyjściowe, nie dyskutując wielkości błędu jakim są obarczone.

Tabela 1 – Table 1

Bilans Lodowca Hansa (metry, ekwiwalent słupa wody)
Mass balance of the Hansbreen (m w.e.)

Rok bilansowy Balance year	Bilans zimowy Winter balance	Bilans letni Summer balance	Bilans netto Net balance
1988/89	0.91	-1.00	-0.09
1989/90	0.90	-1.45	-0.55
1990/91	1.16	-1.03	0.13
1991/92	0.89	-1.16	-0.27
1992/93	0.93	-1.60	-0.67
1993/94	0.76	-0.61	0.15
1994/95	0.76	-1.20	-0.44
1995/96	0.82	-	-
1996/97	0.99	-	-
1997/98	1.11	-1.71	-0.60
1998/99	1.01	-1.36	-0.35

Dane meteorologiczne z obserwacji na polskiej stacji w Hornsundzie obejmują okres od lipca 1978 do czerwca 1999 roku, z przerwą od lipca 1981 do lipca 1982 włącznie. Wykorzystanie danych ze Stacji Hornsund jest więc dla tego celu mało perspektywiczne, gdyż możnaby (jeśli okazałoby się to możliwe), opierając się na tych danych, oszacować bilans Lodowca Hansa wstecz zaledwie na 8 lat (lata 1982/83 - 1987/88), lub też na 9 lat (lata 1982/83-1987/88 plus rok 1979/80). Zmusza to do poszukiwania innych rozwiązań. Rozwiązania te oparte są na następujących przesłankach.

Można założyć, że bilans Lodowca Hansa regulowany jest przez dwa zespoły czynników: zespół czynników statycznych, niezmiennych w funkcji czasu oraz zespół czynników dynamicznych, zmieniających w funkcji czasu. Czynniki statycznymi są położenie lodowca (szerokość i długość geograficzna; te determinują ogólnie położenie w strefie klimatycznej, roczne zmiany dopływającej energii, etc.) oraz warunki lokalne otoczenia (hipsometria, ekspozycja w stosunku do promieni słonecznych, kierunków wiatrów opadonośnych, zacinienie partii lodowca ...). Czynniki statyczne nie wprowadzają zmienności międzyrocznej i międzysezonowej, ich działanie w funkcji czasu jest w określonych momentach takie samo. Ich sumaryczne oddziaływanie równe jest jakimś stałym w wartościach bilansów sezonowych i bilansie rocznym.

Czynnikiem dynamicznym jest głównie charakter cyrkulacji atmosferycznej, która determinuje międzysezonową i międzyroczną zmienność warunków pogodowych, co przekłada się, w miarach statystycznych, na zmienność elementów klimatycznych (meteorologicznych). Zmienność warunków pogodowych określa zarówno wielkość sumarycznych strat masy lodowca w roku bilansowym, jak i wielkość przychodu masy (akumulacji). W zależności od charakteru cyrkulacji atmosferycznej, która

determinuje zmienność warunków pogodowych sezonu zimnego i następującego po nim sezonu ciepłego kształtuje się bilans roczny. Na bilans roczny Lodowca Hansa, jako lodowca spływającego do morza wpływ wywiera dodatkowo długość sezonu lodowego (pokrycie fiordu lodem morskim) poprzez regulowanie długości okresu funkcjonowania abrazji termicznej. Cofanie się klifu lodowego regulują z kolei nachylenia (spadki) w dolnej części lodowca, co ma wpływ na prędkość ruchu lodu, a co z kolei wpływa wymiennie na wielkość strat przez oblamywanie się lodu. Można jednak przyjąć, że długość sezonu lodowego i charakter sezonu bezlodowego (temperatura wody, falowanie wiatrowe) jest w jakiejś mierze również pochodną cyrkulacji atmosferycznej. Tak więc, jako hipotezę roboczą można przyjąć, że zmienność bilansu Lodowca Hansa jest wnoszona przez zmienność cyrkulacji atmosferycznej nad rejonem Spitsbergenu.

Nie wnikając w uzasadnienie dalej wyrażonych sądów, można stwierdzić, że najkorzystniejszą dla rozwoju zlodowacenia na Spitsbergenie jest sytuacja, gdy zimą dominuje dość silna cyrkulacja południkowa, której towarzyszą niezbyt niskie temperatury powietrza, duże zachmurzenie (w przewadze frontalne) i stosunkowo znaczne opady, latem zaś słaba cyrkulacja południkowa, której towarzyszy duże zachmurzenie, redukujące dopływ promieniowania bezpośredniego do powierzchni terenu. Najbardziej niekorzystną dla rozwoju zlodowacenia będzie sytuacja, gdy zimą i latem obszar Atlantyckiej Arktyki znajdować się będzie w zasięgu częstego występowania sytuacji antycyklonalnych - oraz - gdy zimą obszar ten znajdować się będzie w zasięgu częstego występowania sytuacji antycyklonalnych, latem zaś, gdy występować będzie bardzo silnie rozwinięta cyrkulacja południkowa, z głębokimi i częstymi adwekcjami powietrza pochodzącego ze środkowej i południowej części strefy umiarkowanej czy też subtropików. Inne kombinacje układów cyrkulacyjnych stwarzać będą sytuacje pośrednie. Tak więc występowanie zwiększonej ponad średnią statystyczną (średnią sezonową wieloletnią) określonych form cyrkulacji w odpowiednich sezonach limitować będzie zmienność natężenia procesów akumulacji i ablacji, a tym samym wielkość bilansu rocznego. Pewnego rodzaju uzasadnieniem wyrażonych sądów są wielkości bilansu zimowego Lodowca Hansa jako funkcji dwu zmiennych – temperatury średniej miesięcznej stycznia i miesięcznej sumy opadów w styczniu oraz wielkości bilansu letniego jako funkcji temperatury średniej miesięcznej i sum opadowych w lipcu. Trzeba tu zauważyć, że charakter sezonowej dominacji form cyrkulacji sprzyjający rozwojowi zlodowacenia nie jest tożsamy z charakterem cyrkulacji prowadzącej do minimalizacji średniej temperatury rocznej (zimą przewaga sytuacji antycyklonalnych, latem – cyrkulacja strefowa, zachodnia).

Zmiennością form cyrkulacji atmosferycznej nad obszarem Atlantyckiej Arktyki steruje, w dominującym stopniu, stan termiczny Północnego Atlantyku. W pierwszym przybliżeniu można zaniedbać wpływy innych czynników (np. oddziaływanie Pacyfiku i rozwoju sytuacji barycznej nad N Ameryką) na międzysezonową i międzyroczną zmienność cyrkulacji atmosferycznej nad tym obszarem. Stan termiczny Północnego Atlantyku wykazuje stosunkowo dużą zmienność z roku na rok, zmiany zasobów ciepła w wodach przypowierzchniowych opisuje pole anomalii temperatury powierzchni oceanu (TPO). Krótkie objaśnienie fizycznej strony oddziaływań rozkładu przestrzennego diabatycznych strumieni ciepła z oceanu do atmosfery na modyfikację cyrkulacji atmosferycznej zawiera praca Marsza (1999a).

Niewielka długość szeregu chronologicznego danych wyjściowych (11 wartości bilansu zimowego, 9 wartości bilansu letniego i bilansu netto) wymaga stosowania ostrożnych metod analizy statystycznej i wyklucza, wobec namnażania się błędów, dokonywania prób estymacji wartości pośrednich, np. temperatury czy też sum opadowych, z nich dalej wartości bilansu masy.

Podchodząc syntetycznie do kwestii oszacowania bilansu masy Lodowca Hansa, można założyć, że międzyroczna zmienność bilansu stanowi funkcję cyrkulacji atmosferycznej nad obszarem Południowego Spitsbergenu, modyfikowaną przez warunki lokalne. Te ostatnie można przyjąć za stałe i wykluczyć z dalszych rozważań, jako nie wnoszące elementów zmienności. Można w takim razie założyć model typu czarnej skrzynki, w której, znając efekty na wyjściu (sezonowy bilans masy), znaleźć wielkości sterujące systemem zależności czasowych i przestrzennych:

**anomalie TPO na Północnym Atlantyku w określonych rejonach (miejscach) i momentach →
strumienie ciepła do atmosfery → poziome gradienty termiczne w środkowej troposferze →
stabilizacja lub destabilizacja fal długich → modyfikacje cyrkulacji atmosferycznej →
sezonowe zmiany wartości elementów meteorologicznych (średnich miesięcznych)
nad Południowym Spitsbergenem → sezonowy bilans masy Lodowca Hansa,**

drogą dopasowania statystycznego, bez zajmowania się rzeczywistym mechanizmem związków i oddziaływań działających w systemie. System ma charakter czysto fizyczny, jest układem deterministycznym, w związku z czym zależności statystyczne winny być czytelne. Działanie takie dodatkowo uwiarygodniają inne fakty – stan termiczny Północnego Atlantyku pozwala, z wyprzedzeniem kilku-, kilkunastomiesięcznym prognozować zarówno temperatury średnie miesięczne powietrza na Spitsbergenie, jak i występujące tam temperatury średnie roczne. Prognoza taka jest stosunkowo dokładna i wysoce wiarygodna (patrz Marsz 1999b). Podobnych prób szacowania sum opadów do tej pory nie przeprowadzono.

Dla wyjaśnienia możliwości znalezienia związków przebadano korelacje liniowe, zachodzące między średnimi miesięcznymi anomaliami TPO z poprzedniego roku w gridach kontrolnych (gridy kontrolne - patrz Marsz 1999c) na Północnym Atlantyku a wartościami bilansu zimowego oraz między anomaliami TPO z poprzedniego i tego samego roku a wartościami bilansu letniego (po 120 korelacjach, razem 360). Znaleziono istotne i dające się zinterpretować fizycznie korelacje między stanem termicznym Północnego Atlantyku w poprzednim roku a wartościami bilansowymi pozwoliły dojść do wniosku, że poczynione założenia są realne, a założona hipoteza robocza może zostać przyjęta. Dodatkowo analiza korelacji liniowych wskazała, że właściwym modelem zależności może być model regresji wielokrotnej typu:

$$B_s = A + b \cdot AN[t_i, x, y] + c \cdot AN[t_i, x, y],$$

gdzie:

B_s – bilans sezonowy Lodowca Hansa,

A – stała odpowiadająca średniej z analizowanego okresu (lat) wielkości bilansu sezonowego, konsumująca w sobie wpływ warunków statycznych i warunków średniej (przeciętnej) w badanym okresie cyrkulacji atmosferycznej,

b, c – współczynniki kierunkowe (wagi) wektorów równania regresji,

$AN[t_i, x, y]$ – anomalie TPO z momentu t_i i obszaru o współrzędnych środka pola x, y , których zmienność generuje maksimum zmienności międzysezonowej bilansu sezonowego Lodowca Hansa.

Ze względu na konieczność zapewnienia największego stopnia stabilności oszacowań współczynników regresji, przy estymowaniu zmiennej zależnej ograniczyć się tu trzeba do maksimum dwu zmiennych niezależnych (Draper i Smith 1973).

Problem sprowadza się więc w takim ujęciu do znalezienia akwenów i momentów (tu miesięcy), które w największym stopniu objaśnią zmienność (wariancję) wartości sezonowych bilansu. Jest sprawą oczywistą, że dla bilansu zimowego i bilansu letniego będą to odmienne akweny, a anomalie TPO dla estymacji bilansu letniego i zimowego muszą pochodzić z odmiennych momentów (być metachroniczne). Poszukiwanie wymienionych wartości przeprowadzono klasycznymi metodami analizy wariancji (ANCOVA).

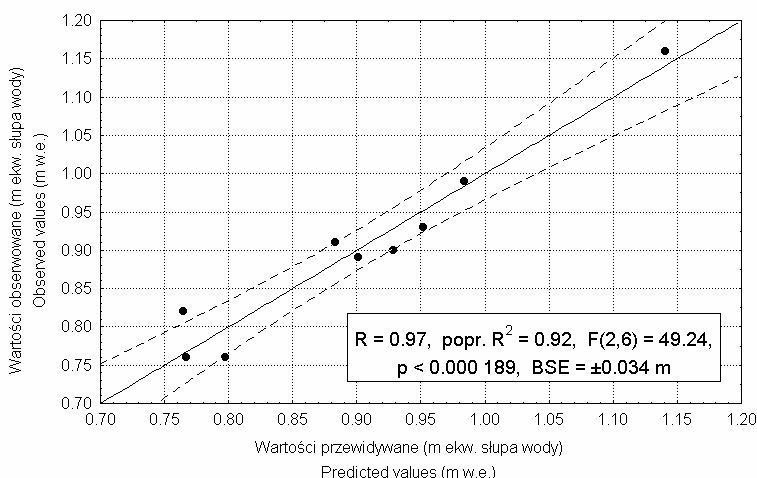
Analiza wariancji i analiza regresji wykazały, że wielkość zimowego bilansu Lodowca Hansa można aproksymować za pomocą formuły:

$$\mathbf{BZ(Or) = 0.850 + 0.234 \cdot AN01[10,60] + 0.128 \cdot AN12[40,40];} \quad [1]$$

gdzie:

- BZ (Or) – bilans zimowy Lodowca Hansa, w metrach ekwiwalentu słupa wody, obliczony, w roku r,
- AN01[10,60] – średnia miesięczna anomalia TPO ze stycznia (01) w gridzie 2x2°, którego punkt środkowy ma współrzędne 010°W, 60°N (podejście wód Prądu Północnoatlantyckiego do Bramy Farero-Szetlandzkiej) z roku r-1,
- AN12[40,40] – średnia miesięczna anomalia TPO z grudnia (12) w gridzie 2x2°, którego punkt środkowy ma współrzędne 040°W, 40°N (akwen na E od delty Golfstromu), z roku r-1.

Charakterystyka statystyczna równania [1] jest następująca: $R = 0.9708$, popr. $R^2 = 0.9234$ (współczynnik determinacji, poprawiony ze względu na liczbę stopni swobody), $F(2,6) = 49.24$, $p < 0.000189$, BSE (błąd standardowy estymacji) = ± 0.034 m. Wykres rozrzutu wartości oszacowanych za pomocą równania [1] i obserwowanych przedstawia rysunek 2.



Rys. 2. Wartości zimowego bilansu Lodowca Hansa estymowane za pomocą równania [1] względem wartości obserwowanych

Fig. 2. The values of winter balance of the Hansbreen estimated with [1] formula in relation to observed values

Zmienność anomalii TPO w wyekstrahowanych gridach objaśnia w 92% obserwowaną zmienność bilansu zimowego Lodowca Hansa, zaś sama zależność [1] jest wysoce istotna statystycznie, a błąd standardowy estymacji jest stosunkowo mały, znacznie zapewne podobny do nieznanego błędu, jakim obarczone są dane wyjściowe.

Zwraca uwagę, że wyraz wolny równania [1] jest większy od zera, co oznacza, że zespół czynników statycznych powoduje, że bilans zimowy jest tu przeciętnie trwale dodatni i wynosi 0.850 m. Wartość ta jest znacznie większa od rocznych sum opadów w Hornsundzie, może być jednak tłumaczona powszechnie występującym wzrostem sum opadów wraz z wysokością oraz ewentualnym dodatkowym zasilaniem lodowca (nawiewanie śniegu, lawiny).

Uproszczona interpretacja zależności [1] jest następująca. O charakterze cyrkulacji atmosferycznej jaka nastąpi w okresie nadchodzącej zimy decydują anomalie TPO z grudnia w środkowej części Północnego Atlantyku, na E od delty Golfstromu i ze stycznia na podejściu wód Prądu Północnoatlantyckiego do Bramy Farero-Szetlandzkiej. Występowanie dodatniej anomalii w grudniu, na akwenie położonym w szerokościach czterdziestych wskazuje, że zasoby ciepła w tej części Atlantyku są duże, i w okresie nadchodzącej zimy będą powoli przemieszczać się na wschód, anomalia dodatnia utrzyma się przez okres co najmniej 2-3 miesiące. Dodatnia anomalia w styczniu na wodach końcowego odcinka Prądu Północnoatlantyckiego, na ich podejściu do Bramy Farero-Szetlandzkiej działać będzie z dużym opóźnieniem. Wody te, po przejściu drogi w Prądzie Norweskim dostaną się (z opóźnieniem 8-13.miesięcznym) do Arktyki (na Morze Barentsa i do Prądu Zachodniospitsbergeńskiego), warunkując istnienie tam w okresie zimowym dodatnich anomalii TPO. Jeśli w tym samym czasie na środkowej części Północnego Atlantyku w szerokościach umiarkowanych wystąpią również dodatnie anomalie TPO (patrz wyżej), sprzyjać to będzie tworzeniu się fal górnej planetarnej strefy frontalnej (fal Rossby'ego) o dużej amplitudzie, z wierzchołkami lokującymi się ze zwiększoną częstością występowania nad obszarem ciepła w Arktyce (Prądem Zachodniospitsbergeńskim lub/i Morzem Barentsa). W takich sytuacjach w głąb Atlantyckiej Arktyki wnikają z SW-WSW częściej niż przeciętnie głębokie i silnie rozwinięte cyklony powstałe nad Atlantykiem (zachodni skraj górnego klina), często również dochodzi nad tym obszarem do regeneracji układów niżowych powstałych na froncie arktycznym. Jedno i drugie sprzyja występowaniu w okresie zimowym nad Atlantyką Arktyką częstych adwekcji powietrza morskiego oraz dużego zachmurzenia, częstych opadów i silnych wiatrów.

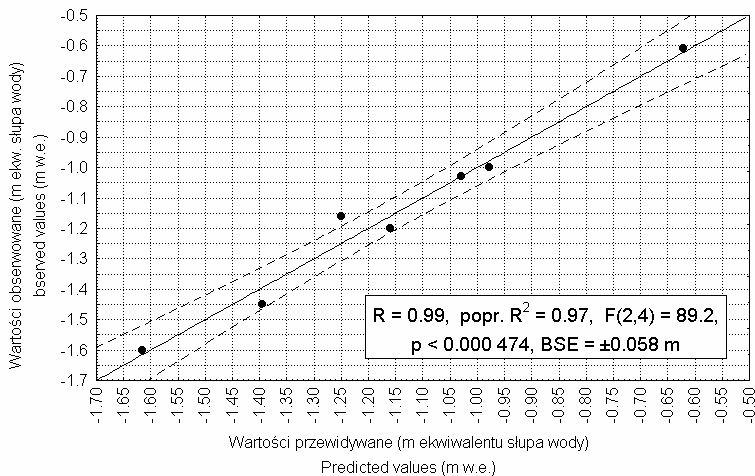
Wielkość bilansu letniego Lodowca Hansa można aproksymować przy pomocy formuły:

$$BL(Or) = -0.464 + 0.738 \cdot AN10[30,54] + 0.289 \cdot AN09[30,54]; \quad [2]$$

gdzie:

- BL(Or) – bilans letni Lodowca Hansa w metrach ekwiwalentu słupa wody, obliczony w roku r
- AN09[30,54] – wartość średniej miesięcznej anomalii TPO we wrześniu roku r-1, w gridzie 2x2°, którego punkt środkowy ma współrzędne 030°W, 54°N (wnętrze kręgu cyrkulacji cyklonalnej Północnego Atlantyku),
- AN10[30,54] – wartość średniej miesięcznej anomalii TPO z października roku r-1, w gridzie 2x2°, którego punkt środkowy ma współrzędne 030°W, 54°N.

Charakterystyka równania [2] jest następująca: R = 0.9890, popr. R² = 0.9672, F(2,4) = 89.22, p < 0.000 474, BSE = ± 0.058 m. Wykres wartości estymowanych za pomocą równania [2] i obserwowanych wartości bilansu letniego przedstawia rysunek 3.



Rys. 3. Wartości letniego bilansu Lodowca Hansa, estymowane za pomocą równania [2] względem wartości obserwowanych

Fig. 2. The values of summer balance of the Hansbreen estimated with [2] formula in relation to observed values

Tak więc i równanie [2], mimo, że dopasowanie jest oszacowane jedynie za pomocą 7 par zmiennych, jest wysoce istotne statystycznie; zmienność anomalii TPO w wybranych momentach z gridu leżącego wewnątrz kręgu cyrkulacji cyklonalnej Północnego Atlantyku, objaśnia około 97% zmienności letniego bilansu masy Lodowca Hansa.

Fizyczna interpretacja zależności [2] jest następująca. Zwraca uwagę, że wyraz wolny równania [2] jest ujemny, co oznacza, że zespół czynników statycznych działa w ten sposób, że przeciętny bilans letni Lodowca Hansa jest mniejszy od zera (ujemny). Znaki stojące przed obu składowymi są dodatnie, co jednoznacznie wskazuje, że spadek temperatury wody wewnątrz kręgu cyrkulacji cyklonalnej N Atlantyku poniżej średniej wieloletniej we wrześniu i w październiku roku poprzedzającego pociąga za sobą pogłębienie bilansu ujemnego, zaś wystąpienie w tym samym czasie anomalii dodatnich powoduje zmniejszenie się bilansu ujemnego Lodowca Hansa. W tym rejonie oceanu zasoby ciepła z końcem lata wykazują duże zmiany, których skutki są długotrwałe i obejmują duże obszary. Występowanie silnych ujemnych anomalii TPO wewnątrz kręgu cyrkulacji cyklonalnej Północnego Atlantyku z końcem okresu nagrzewania letniego oceanu powoduje, że w czasie nadchodzącej zimy anomalie te będą się stopniowo pogłębiać, i z początkiem nadchodzącego lata występować będą tam również anomalie ujemne. Taka sytuacja sprzyja dwu wariantom rozwoju letniej cyrkulacji atmosferycznej:

- jeśli w tym samym czasie po wschodniej stronie Północnego Atlantyku, w strefie szerokości umiarkowanych (około 40°N) występować będzie anomalia ujemna a w Atlantyckiej Arktyce wystąpią również anomalie ujemne lub zasoby ciepła w wodach będą zbliżone do przeciętnych (wieloletnich), nad wschodnią częścią Północnego Atlantyku ukształtuje się cyrkulacja strefowa (podobna do makrotypu W_Z i W_{M1} Wangengajma-Girsa nad sektorem atlantycko-europejskim). W tym samym czasie w rejonie Spitsbergenu częściej niż zazwyczaj będą występowały sytuacje antycyklonalne,

którym będzie towarzyszyć spadek zachmurzenia, wzrost dopływu radiacji do podłoża, wzrost temperatury powietrza i redukcja opadów. Lato będzie ciepłe i suche, niekorzystne dla rozwoju zlodowacenia, bilans letni będzie silnie ujemny,

- jeśli w tym samym czasie w Atlantyckiej Arktyce wystąpi anomalia dodatnia, wierzchołek górnej zatoki niżowej lokować się będzie w czasie lata częściej niż zazwyczaj nad rejonem 50°N, 030°W, a wierzchołek górnego klina położonego na wschód od niej występować będzie gdzieś w rejonie wschodniej części Morza Barentsa. W rejonie Spitsbergenu wystąpią wtedy w lecie częściej niż przeciętnie adwekcje powietrza morskiego z południa – południowego wschodu, przynoszące ciepłe powietrze ze środkowej części strefy umiarkowanej. Letnie temperatury powietrza będą wtedy zdecydowanie wyższe od normy klimatycznej, zaś zachmurzenie i opady wzrosną w stosunku do poprzednio omówionej sytuacji. Bilans letni lodowca będzie ujemny (pogłębiony w stosunku do działania czynników statycznych).

Jeśli w centrum cyrkulacji cyklonalnej Północnego Atlantyku wystąpią w końcu nagrzewania letniego anomalie dodatnie, w następnym roku, niezależnie od rozkładu anomalii TPO na pozostałych akwenach, w tym i w Arktyce, wystąpią nad rejonem Spitsbergenu formy cyrkulacji sprzyjające rozwojowi zlodowacenia. Wiązać się to będzie z faktem wzrostu częstości lokalizacji górnego klina o południkowej orientacji osi nad rejonem centralnej części N Atlantyku. W takiej sytuacji Spitsbergen znajdować się będzie w okresie letnim częściej niż zazwyczaj albo w strefie przenosu z N do NW – jeśli górny klin będzie miał dużą amplitudę, albo też w strefie przenosu z W – jeśli amplituda górnego klina będzie niewielka. W obu przypadkach dojdzie do wystąpienia latem temperatury powietrza niższej od normy klimatycznej, w przypadku mniejszej amplitudy fali dodatkowo nastąpi wydatny wzrost zachmurzenia i pewien wzrost opadów.

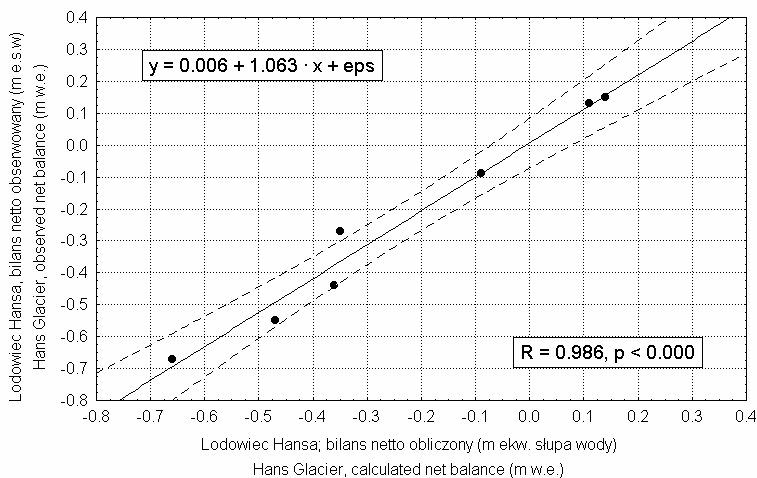
Zakładając sytuację, że termika Północnego Atlantyku idealnie w ciągu roku odpowiada stanowi średniemu wieloletniemu, anomalie TPO musiałyby wszędzie posiadać wartość równą zero. Wtedy wartości wektorów równań bilansu zimowego i bilansu letniego miałyby również wartość zero i jako wartości niezerowe w równaniach [1] i [2] pozostałyby jedynie wyrazy wolne, reprezentujące czynniki statyczne. W takich warunkach rozkładu zasobów ciepła w wodach Północnego Atlantyku bilans netto Lodowca Hansa byłby dodatni i osiągałby wartość roczną równą 0.386 m (0.850 - 0.464). Negatywne odchylenia od tej wielkości stanowią wkład czynnika dynamicznego, jakim są efekty działania cyrkulacji atmosferycznej.

Traktując bilans netto BN (roczny, obliczony) jako algebraiczną sumę bilansu zimowego (BZ(Or)) i bilansu letniego (BL(Or)) w roku bilansowym r:

$$BN(Or) = BZ(Or) + BL(Or),$$

można porównać wartości obliczone bilansu netto (BN(Or)) z rzeczywistymi, czyli obserwowanymi wartościami bilansu netto (BN(rz)). Porównanie takie przedstawia rysunek 4. Z rysunku tego wynika nadspodziewanie duża zgodność wartości obserwowanych z szacowanymi z TPO ($R = 0.9864$, $F(1,5) = 179.6$, $p < 0.000\ 041$, $BSE = \pm 0.058$ m). Przypuszczalnie błędy estymacji wielkości bilansów sezonowych są różnoimienne (mają odmienne znaki) i redukują się wzajemnie. Wartości oszacowane objaśniają około 97% zmienności wartości obserwowanych (poprawiony $R^2 = 0.9675$). Zarówno bardzo mały wyraz wolny (0.006), jak i bliski jedności współczynnik kierunkowy regresji (1.063), wraz

z podobnymi co do wielkości standardowymi błędami estymacji wielkości bilansów sezonowych, przy nieznannej wielkości błędu mierzonej (obserwowanej) wartości bilansu, sugerują, że można traktować wartości oszacowane za pomocą równań [1] i [2], jak i obliczony z nich bilans netto, równoważnie w stosunku do wartości obserwowanych.



Rys. 4. Bilans netto Lodowca Hansa obliczony jako suma algebraiczna estymowanych za pomocą równań [1] i [2] wartości bilansu zimowego i letniego a obserwowane wartości bilansu netto tego lodowca

Fig. 4. The net balance of Hansbreen estimated as the algebraic sum of winter and summer balance calculated with [1] and [2] formulae with reference to the observed net balance of this glacier

Tabela 2 – Table 2

Oszacowane wartości (m e.w.) bilansu zimowego, letniego i netto Lodowca Hansa (1970-1997)

Calculated (m. w.e.) winter, summer and net balance of the Hansbreen (1970-1997)

Rok bilansowy Balance year	Bilans zimowy Winter balance	Bilans letni Summer balance	Bilans netto Net balance	Rok bilansowy Balance year	Bilans zimowy Winter balance	Bilans letni Summer balance	Bilans netto Net balance
1970/71	0.76	-1.15	-0.39	1984/85	0.79	-0.77	0.02
1971/72	0.90	-0.64	0.26	1985/86	0.70	-1.53	-0.83
1972/73	0.87	-0.70	0.17	1986/87	0.91	-0.39	0.52
1973/74	0.79	-1.13	-0.34	1987/88	0.89	-1.26	-0.38
1974/75	0.78	-1.46	-0.68	1988/89	0.88	-0.98	-0.09
1975/76	0.83	-1.20	-0.37	1989/90	0.93	-1.40	-0.47
1976/77	0.77	-1.41	-0.64	1990/91	1.14	-1.03	0.11
1977/78	0.60	-0.62	-0.02	1991/92	0.90	-1.25	-0.35
1978/79	0.47	-0.74	-0.26	1992/93	0.95	-1.62	-0.66
1979/80	0.71	-0.68	0.03	1993/94	0.77	-0.62	0.14
1980/81	0.87	-1.18	-0.30	1994/95	0.80	-1.16	-0.36
1981/82	0.89	-0.34	0.55	1995/96	0.76	-0.45	0.31
1982/83	0.81	-1.32	-0.51	1996/97	0.98	-0.14	0.84
1983/84	0.62	-1.14	-0.52				

Tego rodzaju wnioski upoważniają do oszacowania wartości bilansu Lodowca Hansa ze znajdującego się w dyspozycji autorów pewnego i jednorodnego ciągu chronologicznego anomalii TPO. Ciąg ten obejmuje okres lat 1970-1997. Obliczone wartości bilansu zimowego, letniego i netto zestawione są w tabeli 2. Wartości obliczone bilansu netto, jak się wydaje, można traktować jako pewne, a ich błąd przypuszczalnie mieści się w granicach nie przekraczających podwojonych błędów standardowych estymacji bilansu letniego (to jest: ± 0.106 m).

Sprawdzenie korelacji między temperaturą średnią miesięczną notowaną w Hornsundzie (17 lat) i miesięcznymi sumami opadów w Hornsundzie (16 lat) wykazuje istnienie tylko kilku istotnych statystycznie korelacji między estymowanymi wartościami bilansu sezonowego i netto. I tak - bilans zimowy wykazuje dodatnie skorelowanie ze średnimi miesięcznymi sumami opadów w styczniu ($r = 0.60$) i kwietniu ($r = 0.53$), a bilanse letni i roczny z temperaturą średnią miesięczną sierpnia ($r = 0.53$ i 0.56 odpowiednio).

Regresja krokowa w przód, przy wprowadzonych 12 zmiennych niezależnych – średnich miesięcznych wartości temperatury powietrza z Hornsundu od stycznia do czerwca włącznie i miesięcznych sum opadów z tego samego okresu, wiąże wartości obliczonego bilansu zimowego Lodowca Hansa z trzema zmiennymi:

$$BZ(Or) = 0.578 + 0.003 R01 + 0.006 R04 + 0.002 R06,$$

czyli wyłącznie z opadami stycznia (R01), kwietnia (R04) i czerwca (R04), eliminując pozostałe zmienne, w tym i wszystkie temperatury zimowe. Podane równanie objaśnia 55% wariancji BZ(Or). Podobna procedura obliczeniowa, której celem było wykrycie elementów wywierających najsilniejszy wpływ na wartość bilansu letniego tego lodowca nie dała rezultatów, które mogłyby zostać przyjęte (brak istotności statystycznej oszacowania wyrazu wolnego i współczynników regresji). Podobnie nie daje się oszacować wiarygodnych związków bilansu netto Lodowca Hansa ze średnimi miesięcznymi wartościami temperatury i sum opadowych mierzonymi w Hornsundzie (17 lat, w przypadku uwzględnienia sum opadów grudnia z poprzedniego roku - 16 lat). Istotnie statystycznie związki w obu ostatnich przypadkach uzyskuje się dopiero po wprowadzeniu 8-9 zmiennych niezależnych, co czyni oczywistym, że równania takie nie będą miały stabilnych współczynników regresji.

Dane pomiarów meteorologicznych dla Hornsundu obejmują okres krótszy niż oszacowane z wartości TPO wielkości bilansowe. Cofnięcie się wstecz, poza rok 1970/71, wymaga wykorzystania danych meteorologicznych (miesięcznych sum opadów i temperatury średniej miesięcznej) z innych stacji. Niestety, sieć stacji jest tu rzadka, ciągłość pomiarów przerywana (dane niejednorodne, przenoszenie stacji), a na mierzonych wielkościach odbijają się silnie warunki lokalne. Stwarza to szereg dalszych problemów. Z tego względu dalsze próby cofnięcia się wstecz traktować trzeba, w sensie metodycznym, jako igraszki statystyczne.

Ze względu na przeniesienie w roku 1975-1976 pomiarów ze stacji Isfjord na stację Svalbard-Lufthavn (Longyearbyen), wykorzystać można zaledwie 6 par pomiarów bilansu netto oszacowanych z TPO dla Lodowca Hansa i danych ze stacji Isfjord (pomiarów sum opadów na Stacji Svalbard-Lufthavn nie mogą być przyjęte jako charakterystyczne dla Hornsundu, ze względu na wewnątrzłądowe położenie tego punktu, ujednocianie ciągów metodą różnic w przypadku miesięcznych sum opadów jest zdaniem autorów wątpliwe). Nikła liczba możliwych do wykorzystania w analizie statystycznej oszacowanych wartości bilansowych zmusza do ograniczenia się do estymacji wyłącznie wartości bilansu netto, bez podejmowania prób szacowania bilansów sezonowych.

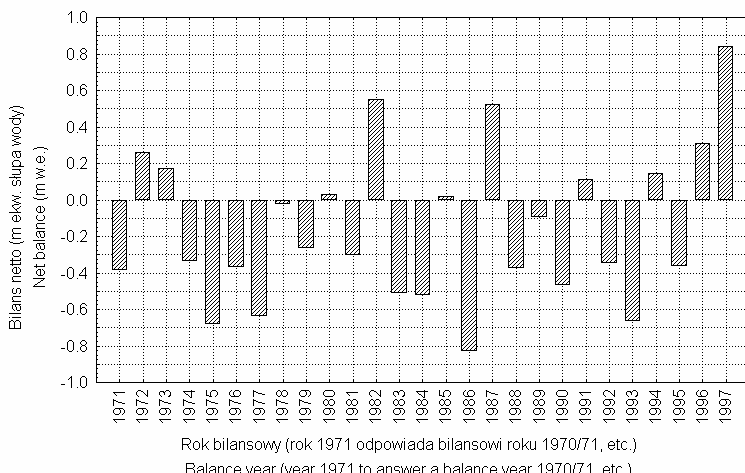
Analizę wariacji przeprowadzono dla temperatury średniej miesięcznej i miesięcznych sum opadów ze stacji Isfjord, wskaźnika NAO (DJFM Hurrella) z roku bieżącego, roku poprzedzającego i sprzed dwóch lat. Związków bilansu netto z zimowymi wskaźnikami Oscylacji Północnego Atlantyku nie stwierdzono. Analiza wariacji wykazała, że dwie wielkości elementów meteorologicznych ze stacji Isfjord objaśniają 99% wariacji oszacowanych z TPO wartości bilansu netto Lodowca Hansa. Są to temperatura średnia miesięczna maja oraz miesięczna suma opadów z czerwca. Związek między bilansem netto obliczonym z TPO a wymienionymi wartościami średnimi miesięcznymi mierzonymi w Isfjordzie jest następujący:

$$BN(Ho) = 1.455 + 0.313 \cdot T05 - 0.009 \cdot R06, \quad [3]$$

gdzie:

- BL(Ho) – bilans netto Lodowca Hansa obliczony z TPO (m e.w.),
- T05 – średnia miesięczna temperatura maja mierzona na stacji Isfjord (°C),
- R06 – miesięczna suma opadów w czerwcu mierzona na stacji Isfjord (mm).

Charakterystyka statystyczna równania [3] jest następująca: $R = 0.9916$, popr. $R^2 = 0.9832$, $F(2,3) = 87.65$, $p < 0.002$ 183, $BSE = \pm 0.061m$. Wykres rozrzutu wartości obserwowanych i szacowanych z danych ze stacji Isfjord przedstawia rysunek 5.



Rys. 5. Obliczone z wartości anomalii TPO na Północnym Atlantyku wartości bilansu netto Lodowca Hansa (1970/71 - 1996/97). Błąd standardowy oceny $\leq \pm 0.106$ m e.w.

Fig. 5. The net balance of Hansbreen calculated from the values of SST anomalies observed in the North Atlantic (1970/71 - 1996/97). Standard estimating error $\leq \pm 0.106$ m e.w.

Interpretacja fizyczna równania [3] jest trudna. Niepokoi stosunkowo duża, dodatnia wartość wyrazu wolnego. Ogólnie można stwierdzić, że wystąpienie ujemnej temperatury w maju zmniejsza bilans netto (?), podobnie jak wzrost miesięcznych sum opadów w czerwcu (?). Być może suma opadów w czerwcu wiąże się z innymi elementami meteorologicznymi lub procesami o znacznie większym znaczeniu dla bilansu lodowca niż ona sama (np. ze zmianą albedo powierzchni lodowca

w miesiącu największego dopływu energii promienistej Słońca lub też odtwarza zwiększone zachmurzenie, redukujące dopływ radiacji; znak ujemny przed składową). Nie można jednak wykluczyć, że zależność ta stanowi dzieło przypadku.

Nie zmienia to faktu, że obliczone z danych z Isfjordu za pomocą równania [3] wartości bilansu netto Lodowca Hansa dla okresu 1927-1970 kształtują się, jak się wydaje patrząc na ich wartości, zupełnie rozsądnie. W żadnym roku, dla którego istnieją dane (przerwa wojenna w latach 1941-1946) nie uzyskano wartości wykraczających poza zakres zmienności mieszczący się w granicach prawdopodobieństwa. Niepokoić może tylko jedna wartość – szczególnie duży ujemny bilans roczny w roku 1966/67 (-1.56 m. e.w.). Stabelaryzowane wartości bilansu netto Lodowca Hansa, estymowane z danych z Isfjordu, sięgające wstecz do roku 1927 zestawione są w tabeli 3. Lata oznaczone w niej jako pełne są w rzeczywistości latami "łamanymi", pierwszy rok z danymi oznaczony jako 1927 stanowi rok 1927/28.

Tabela 3 – Table 3

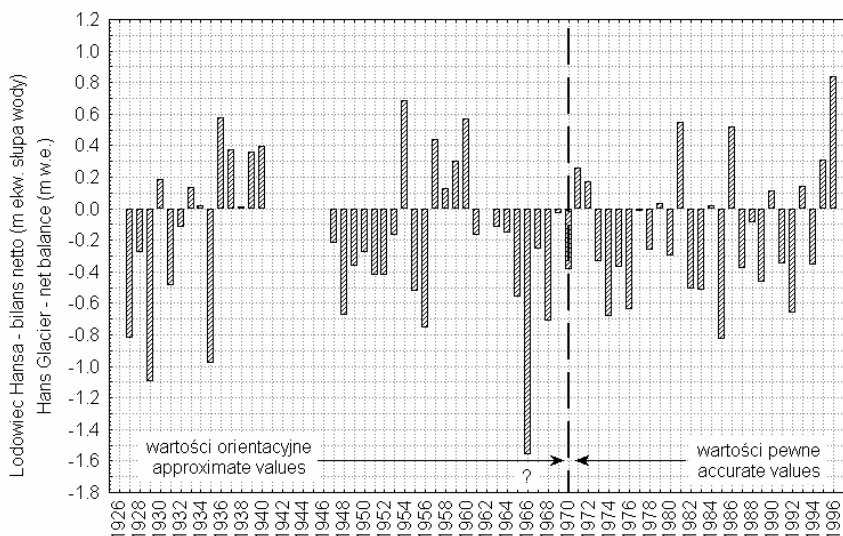
Wartości bilansu netto Lodowca Hansa, obliczone z danych ze stacji Isfjord.
(Lata 1927/28 - 1940/41, 1947/48 - 1961/62 i 1963/64 - 1969/70. Dane te należy traktować jedynie jako orientacyjne a błąd, jakim są obarczone jest nieznanym)

The net balance of Hansbreen calculated on the basis of the data noted at Isfjord.
(Years 1927/28 - 1940/41, 1947/48 - 1961/62 i 1963/64 - 1969/70. These values are to be treated as approximated ones and their error is unknown)

Rok Year	+ 0	+ 1	+ 2	+ 3	+ 4	+ 5	+ 6	+ 7	+ 8	+ 9
1920								-0.82	-0.28	-1.09
1930	0.19	-0.49	-0.12	0.14	0.02	-0.98	0.57	0.37	0.01	0.36
1940	0.39							-0.22	-0.67	-0.37
1950	-0.28	-0.42	-0.42	-0.17	0.68	-0.53	-0.75	0.44	0.13	0.30
1960	0.57	-0.17		-0.12	-0.15	-0.56	-1.56	-0.26	-0.71	-0.03

Wykres rozrzutu oszacowanych wartości bilansu netto Lodowca Hansa dla ciągu połączonych (1927/28-1969/70 z danych ze stacji Isfjord oraz 1970/71-1996/97 z TPO na Północnym Atlantyku) przedstawia rysunek 6. Uzyskane wyniki nie będą dalej komentowane, poza stwierdzeniem faktu, że jeśli odpowiadają one rzeczywistości (?), bilans Lodowca Hansa od 70 lat jest bilansem ujemnym. To stwierdzenie jest niesprzeczne z obserwacjami terenowymi oraz danymi kartograficznymi przedstawiającymi zarys linii brzegowej tego lodowca (Jania 1988).

Warto, jak się wydaje, poczynić na koniec pewną dygresję. J. Bjerknes (1965) wysunął, mającą mocne podstawy fizyczne, koncepcję genezy Małej Epoki Lodowej. Wiąże ona występujące ochłodzenie i zwilgotnienie klimatu w XVII–XIX wieku w wyższych szerokościach półkuli północnej ze zmianami cyrkulacji atmosferycznej, wymuszonymi przez zmianę rozkładu zasobów ciepła w Północnym Atlantyku. Ochłodzenie Północnego Atlantyku w wyższych szerokościach geograficznych osłabiło przenos zachodni w środkowej troposferze, co spowodowało przesunięcie górnej zatoki niżowej znad Niziny Rosyjskiej gdzieś w rejon 5-10°E, nad Morze Norweskie. Wzrost częstości takiej lokalizacji fali długiej powinien nad Spitsbergenem spowodować wzrost częstości występowania sytuacji antycyklonalnych zimą i silne ograniczenie możliwości adwekcji ciepłego powietrza z niskich szerokości latem.



Rys. 6. Połączony ciąg oszacowanych wartości bilansu netto Lodowca Hansa. Dokładność oszacowań dla okresu lat 1927/28 - 1969/70 nieznana, dane niepewne

Fig. 6. 'Syntetic' series of estimated net balance of Hansbreen. The accuracy of estimations for the period 1927/28 - 1969/70 is not known; the data not reliable

Dzięki zachowaniu się licznych pomiarów temperatury powierzchni oceanu, zwłaszcza Północnego Atlantyku, w dziennikach okrętowych flot: brytyjskiej, amerykańskiej, francuskiej, niderlandzkiej, pruskiej i innych, wielokrotnie podejmowano próby rekonstrukcji ogólnych cech pola temperatury wody na tym akwenie (patrz: Lamb 1978, Perry i Walker 1982). Przyjmując rozkład anomalii temperatury powierzchni Północnego Atlantyku zrekonstruowany przez Lamba i Jonsona (średnia stycznia, lata 1780-1820, mapka w pracy Bjerknesa) jaki panował na przełomie XVIII i XIX wieku jako średni roczny i podstawiając do formuł [1] i [2] orientacyjne wartości TPO (odczytane z cytowanej mapki) uzyskuje się, niekoniecznie prawdziwe, ale zastanawiające, rezultaty. Obliczona na podstawie wspomnianych danych wielkość bilansu zimowego dla Lodowca Hansa jest nieco niższa od obecnego bilansu warunkowanego przez działanie czynników statycznych (+0.638 m), ale za to uzyskuje się znacznie wyższe wartości bilansu letniego (-0.095 m), co daje bilans netto trwale dodatni i równy około 0.543 m, a więc o około 40% większy od obecnego w tej części, którą warunkują wyłącznie czynniki statyczne.

W trakcie analiz danych wykryto również występowanie dość wyraźnych zależności statystycznych między bilansem Lodowca Hansa a innymi, charakterystycznymi wskaźnikami klimatycznymi, związanymi z cyrkulacją atmosferyczną; na przykład między wskaźnikiem oceanizmu w Lizbonie a bilansem letnim i bilansem netto ($r = 0.74$ i 0.73 odpowiednio). Sugeruje to, że być może udałoby się uzyskać pogląd na kształtowanie się bilansu tego lodowca w jeszcze dłuższym przekroju czasowym. Badania takie wymagają jednak bardzo dużych nakładów pracy, głównie na objaśnienie ich sensu fizycznego, poprzez określenie mechanizmów i charakteru występujących telekoneksji, a ich wyniki, ze względu na brak możliwości weryfikacji będą niepewne.

Za kilka lat, jeśli przyniosą one nowe wartości pomiarowe, podobną estymację bilansu Lodowca Hansa można będzie powtórzyć, uzyska się wtedy znacznie pewniejsze, w sensie statystycznym, wyniki. Zaistnieje wtedy również szansa bardziej szczegółowego powiązania bilansu rocznego Lodowca Hansa i jego składowych sezonowych z wartościami elementów meteorologicznych mierzonych na stacji w Hornsundzie (głównie z zachmurzeniem, usłonecznieniem, sumami opadowymi, temperaturą powietrza, ...). Obecnie, skąpość materiału obserwacyjnego nie pozwala na dokonanie analizy wielowymiarowej w tym względzie mającej uzasadnienie statystyczne.

Literatura

- Bjerknes J., 1965, Atmosphere - ocean interaction during the "Little Ice Age" (sventeenth to nineteenth centuries A.D.). WMO Technical Note, No 66, Geneva: 77-88.
- Draper N.R., Smith H., 1973, Analiza regresji stosowana. PWN, Warszawa: 459 s.
- Hurrell J., 1995, Decadal trends in the North Atlantic Oscillation; regional temperatures and precipitation. *Science*, 269: 676-679.
- Jania J., 1988, Dynamiczne procesy glacialne na południowym Spitsbergenie (w świetle badań fotointerpretacyjnych i fotogrametrycznych). *Prace Naukowe Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach* Nr 955. Katowice: 257 s.
- Lamb H.H., 1978, *Climate: Present, Past and Future*, Vol. 1., Fundamentals and climate now. Methuen & Co LTD. London: 613 s.
- Marsz A.A., 1999a, Zagadnienie długoterminowej prognozy termicznego charakteru sezonu zimowego na obszarze Bałtyku Południowego i Polski północno-zachodniej. [w:] III Sympozjum Nawigacyjne, t. 2. WSM Gdynia: 223-237.
- Marsz A.A., 1999b, Temperatura powierzchni wody na Północnym Atlantyku a temperatura powietrza na Spitsbergenie i Jan Mayen. *Problemy Klimatologii Polarnej*, 9: 37-80.
- Marsz A.A., 1999c, Stan termiczny Północnego Atlantyku a reżim termiczny zim na polskim wybrzeżu Bałtyku i w Polsce Północno-Zachodniej. [w:] Wpływ stanu termicznego powierzchni oceanu na modyfikację cyrkulacji atmosferycznej w wymiarze klimatycznym. Materiały na spotkanie dyskusyjne, 6 maja 1999 roku, Gdynia. WSM Gdynia: 63-97.
- Perry A.H., Walker J.M., 1982, *System ocean - atmosfera*. Wydawnictwo Morskie, Gdańsk: 267 s.

THE RECONSTRUCTION OF THE MASS BALANCE OF THE HANSBREEN

Summary

This article deals with an attempt to estimate the value of the net balance of Hansbreen (SW Spitsbergen). In order to estimate the value an assumption has been made that the value of the net balance of Hansbreen is a function of two groups of factors, i.e. static and dynamic ones. The static elements (geographical location of Hansbreen, topography of the glacier and its surroundings, etc.) have no influence on the elements of the interannual changeability of the balance; a constant value will represent these elements in formulae. A group of dynamic factors that introduces an interannual changeability to the net balance is made up of a set of meteorological factors (mainly the course of air

temperature, precipitation and cloudiness). The said meteorological factors are influenced by the character of atmospheric circulation.

Because the main features of the character of the interannual changeability of the air circulation over that area are influenced by the spatial distribution of the anomalies sea surface temperature (SST), the analysis of variances has been chosen as the method used to define the direct statistical estimation of winter and summer balances as the function of monthly anomalies in SST occurring in the North Atlantic in a preceding period.

As a result of statistical analysis, two linear functions of great statistical significance have been obtained, i.e. formula [1] and [2] enabling the estimation of winter and summer balances respectively. These functions use the values of anomalies in SST as independent variables. The influence of these values on the course of changeability in atmospheric circulation over the Nordic seas is obvious. The calculated values of the net balance of Hansbreen, estimated by means of the above mentioned functions and the values observed (Fig. 4) proved to be almost the same. Having the values of anomalies in SST (Reynolds data set) a sequence of values of net balance of Hansbreen has been estimated for the period 1970/71÷1996/97 (Table 2, Fig. 5) with the help of this method. An error of values calculated in this way can be found within limits ± 0.106 m. water equivalent. The values of the calculated net balance taken from the above mentioned period were used to find by means of best estimating correlation between Hansbreen net balance and temperature and precipitation sums at Isfjord Radio station. Thanks to these results, the next sequence of values of Hansbreen balance for period 1926/27÷1969/70 (Table 3, Fig. 6) has been calculated. The final values are of no statistical significance and contain unknown errors. If they are close to reality it might mean that the balance of Hansbreen has been permanently negative since the end of the 20-ties.