

WARUNKI METEOROLOGICZNE W REGIONIE KAFFIÖYRY (NW SPITSBERGEN) A NATĘŻENIE PRZEPŁYWU W CIEKU WALDEMAR PÓŁNOCNY (ZLEWNIA RZEKI WALDEMARA)

Kazimierz Marciniak, Marek Kejna, Rajmund Przybylak

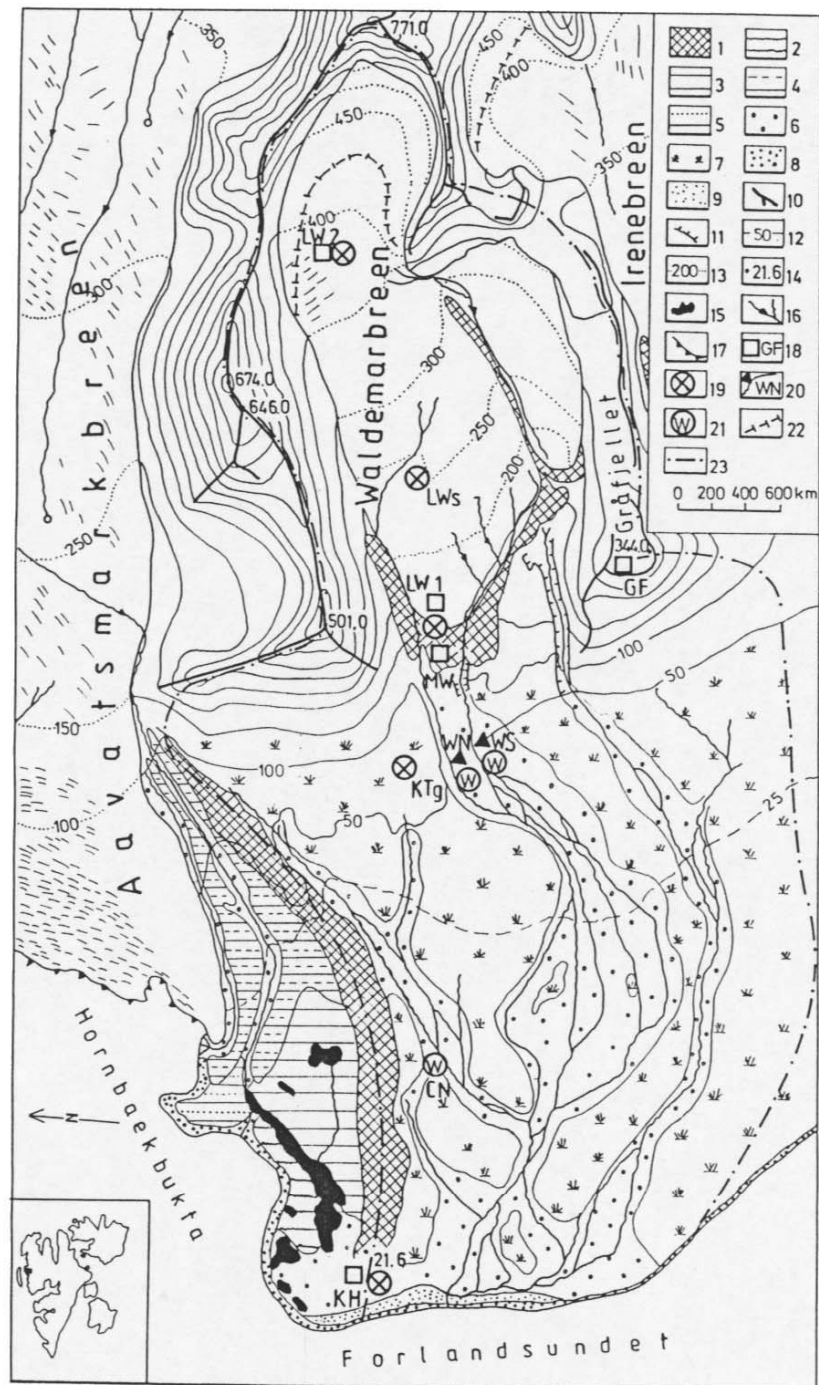
Zakład Klimatologii, Instytut Geografii UMK, Toruń

WSTĘP

W ramach VIII Toruńskiej Wyprawy Polarnej - Spitsbergen 89 prowadzono w sezonie letnim m. in. synchroniczne pomiary meteorologiczne, glaciologiczne i hydrologiczne w zlewni rzeki Waldemara. Celem badań jest poznanie zagadnienia obiegu wody. W niniejszym komunikacie przedstawiamy wstępne wyniki badań dotyczące stanów wody i przepływów w jednym z cieków odwadniających Lodowiec Waldemara, nazwanym Waldemar Północny (Pietrucień i Skowron, 1989). Zajmujemy się w nim przede wszystkim meteorologicznymi uwarunkowaniami natężenia przepływów.

Cieki odwadniające Lodowiec Waldemara, podobnie jak cieki innych lodowców z regionu Kaffiöyry, były już przedmiotem wielu publikacji, gdyż jest to tradycyjny obszar badań Toruńskich Wypraw Polarnych. Ostatnio ukazała się praca W. Szczepanika (1993) o reżimie hydrologicznym wybranych rzek Kaffiöyry (rzeki Waldemara, rzeki Elizy i cieku niwalnego) w okresie lata polarnego, zawierająca omówienie i obszerny wykaz literatury polskiej i obcej związanej z tym zagadnieniem. Obejmuje on pozycje, które ukazały się do 1987 r. włącznie.

Z nowszych prac polskich dotyczących rzek o zasilaniu lodowcowym na Spitsbergenie wymienić należy publikacje autorów: Bartoszewski (1988, 1989, 1991), Choiński (1989), Leszkiewicz i Rehak (1989), Paszczyk, Michalski i Bartoszewski (1991), Pietrucień, Skowron i Szczepanik (1989). Najczęściej autorzy tych prac zajmują się dynamiką odpływu powierzchniowego oraz transportem rumowiska. Rzadziej natomiast podejmowane są zagadnienia obiegu wody w zlewniach w ujęciu bilansowym.



Ryc.1. Rozmieszczenie stanowisk pomiarowych w regionie Kaffiory w lecie 1989 r.

1 - moreny czołowe, boczne i środkowe, 2 - falista równina morenowa, 3 - płaska równina morenowa, 4 - morena ablacyjna, 5 - równina abrazyjna wycięta przez wody morskie, 6 - sandry, 7 - terasy morskie porośnięte tundrą, 8 - plaża, 9 - akumulacyjna równina brzegowa, 10 - grzbiety górskie, 11 - załomy i krawędzie, 12 - poziomice na obszarze niezłozonym, 13 - poziomice na lodowcach, 14 - punkty wysokościowe, 15 - jeziora, 16 - ciek, 17 - klif lodowcowy, 18 - klatki meteorologiczne 200 cm (KH - Kaffioryra Heggodden, LW1 - Lodowiec Waldemara - czoło, LW2 - Lodowiec Waldemara - firn, GF - Grafjellet), 19 - deszczomierze, 20 - limnigrafy, 21 - punkty pomiaru temperatury wody, 22 - granica wieloletniego śniegu, 23 - dział wodny I rzędu.

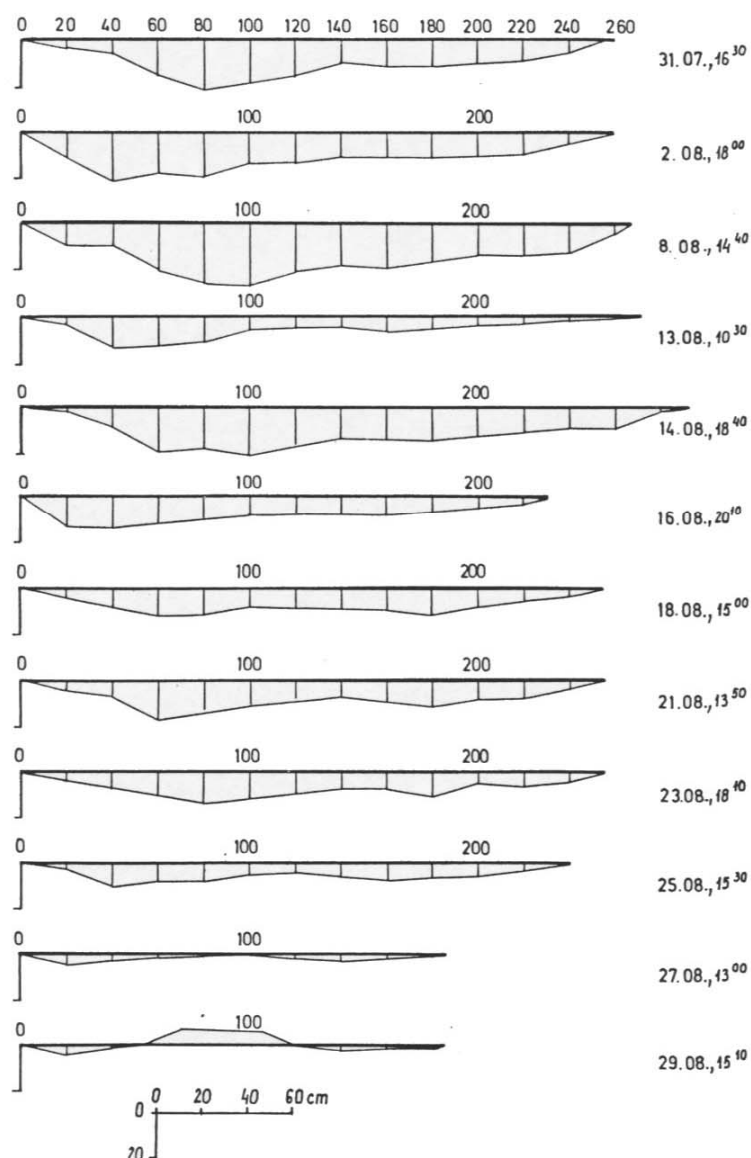
OBSZAR I METODY BADAŃ

Całkowita powierzchnia zlewni rzeki Waldemara wynosi 15,8 km², w tym powierzchni zlodowaczonej 3,12 km², tj. 19,7% (Szczepanik, 1993). Wody z Lodowca Waldemara odprowadzane są z wyżej położonej (na progu skalnym) strefy morenowej na obszar stożka sandrowego za pośrednictwem dwóch cieków: Waldemar Północny i Waldemar Południowy (ryc. 1), które następnie łączą się. Poniżej połączenia tych cieków rzeka Waldemara rozgałęzia się na szereg koryt (rzeki warkoczowe), które podlegają ciągłym zmianom, nawet podczas jednego sezonu letniego, szczególnie w czasie wezbrań. Ponadto rzeka Waldemara przyjmuje dopływy zasilane głównie wodą pochodzącą z letniego wytapiania się wieloletniej zmarzliny, lodu gruntowego i płatów śniegu.

Na obu wspomnianych ciekach, w odległości ok. 600 m poniżej moren czołowych, zainstalowano limnigrafy tygodniowe typu B-2 oraz łąty wodowskazowe. W ten sposób uzyskano informację o całej masie wody odpływającej z lodowca. Taka lokalizacja punktów pomiarów stanów wody i przepływów, tj. możliwie blisko strefy czołowomorenowej, miała na celu maksymalne wyeliminowanie strat wody spowodowanych infiltracją w stożek sandrowy. Odczytów stanów wody w ciekach i pomiaru temperatury dokonywano w zasadzie codziennie, a ponadto co 2-3 dni mierzono przepływy metodą pływakową. Wykonano 12 pomiarów przepływów (ryc. 2), które posłużyły do wyznaczenia krzywej konsumpcyjnej (ryc. 3), a następnie zamiany codziennych stanów wody z limnigramu (cm) na przepływy (l/s). Podczas pomiarów przepływów największa szerokość cieku osiągnęła 290 cm (14.08), a głębokość 27 cm (8.08.)

Cieki Waldemar Północny i Waldemar Południowy różniły się między sobą przede wszystkim wielkością przepływu. Główną masę wody z lodowca odprowadza Waldemar Południowy, który na odcinku pomiarów hydrologicznych (ryc. 1) odznaczał się też znacznym spadkiem. Powodowało to intensywny transport rumowiska i częste zmiany profilu poprzecznego koryta cieku, szczególnie po wezbraniach (próby utrzymania w tym miejscu limnigrafu podczas poprzednich Wypraw Toruńskich skończyły się jego zniszczeniem podczas większych wezbrań). W efekcie napotkano na trudności w uzyskaniu w pełni porównywalnych wyników poszczególnych pomiarów stanów wody i przepływów w tym cieku.

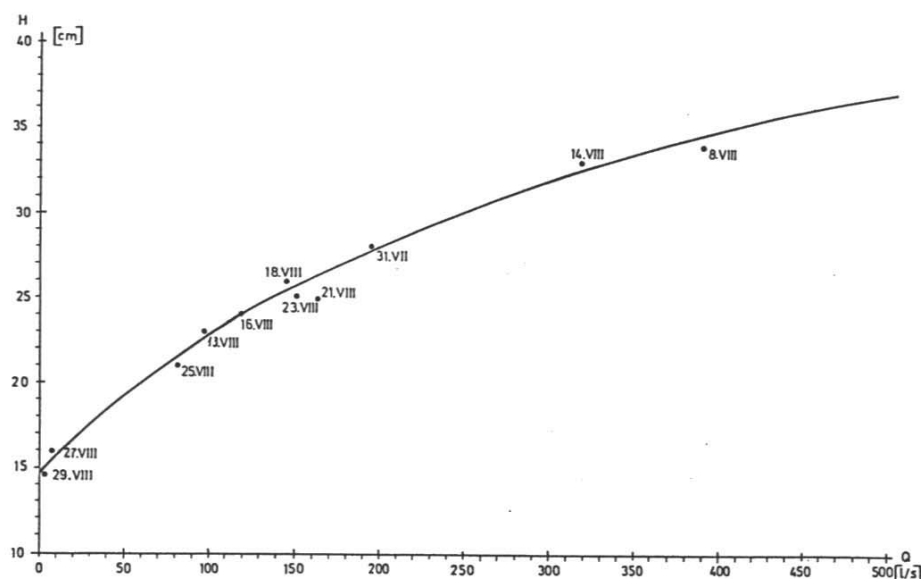
Ciek Waldemar Północny natomiast przy znacznie mniejszym przepływie i spadku (na odcinku pomiarów) odznaczał się dość stabilnym profilem poprzecznym koryta



Ryc. 2. Przekroje poprzeczne koryta cieku Waldemar Północny w czasie pomiarów przepływów.

(ryc. 2). Uzyskano stąd w pełni wiarygodny i prosty w opracowaniu zapis limnigraficzny. Z tego względu prezentujemy najpierw wyniki badań wykonanych na cieku Waldemar Północny, które, jak sądzimy, ułatwią opracowanie limnigramów i przepływów z cieku głównego (Waldemar Południowy).

Pomiary i obserwacje hydrologiczne prowadzono od 29 lipca do 3 września 1989 roku (tj. 37 dni) przy czym w niniejszym opracowaniu wykorzystano materiał z 33 dni, tj. od 30 lipca do 31 sierpnia.



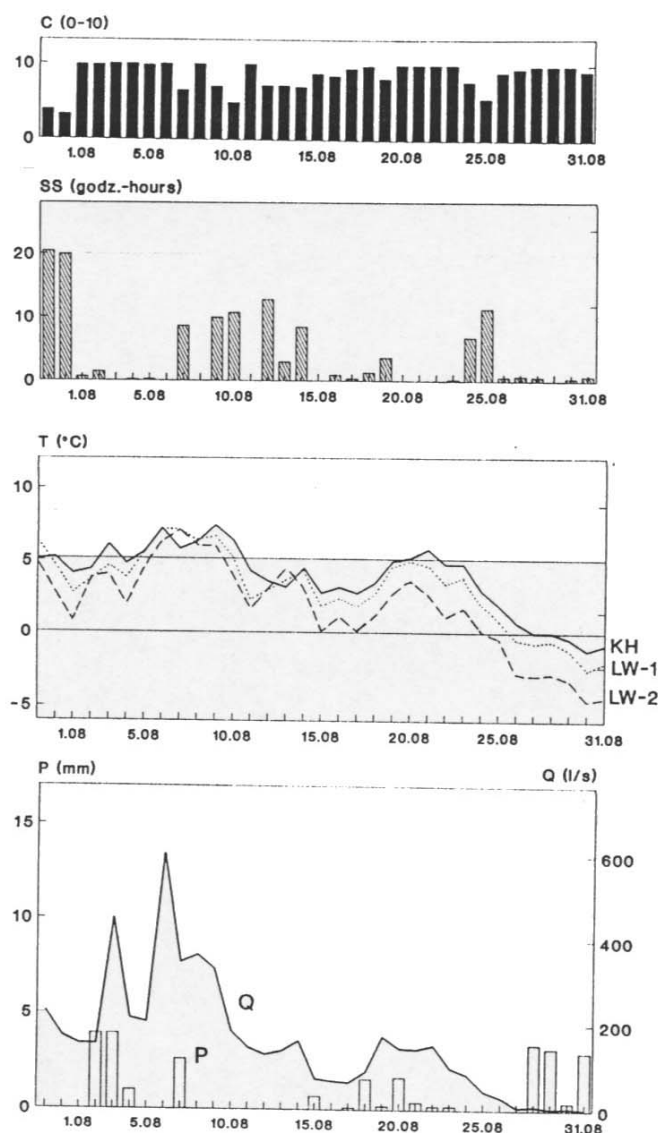
Ryc. 3. Krzywa konsumpcyjna cieku Waldemar Północny.

Synchronicznie z pomiarami hydrologicznymi dokonywano co kilka dni pomiarów ablacji śniegu i lodu na Lodowcu Waldemara (wzdłuż 1 profilu podłużnego i 2 profili poprzecznych). Wyniki tych pomiarów zostaną wykorzystane przy opracowaniu zagadnienia poszczególnych ogniw obiegu wody w zlewni rzeki Waldemara.

Obserwacje i pomiary wszystkich elementów meteorologicznych prowadzono na stacji przy Bazie Wypraw Toruńskich na Kaffiöyra ($\varphi = 78^{\circ}41'N$, $\lambda = 011^{\circ}51'E$, $H = 11.5$ m n.p.m.). Ponadto rejestrację termohigrograficzną i pomiary wysokości opadów wykonywano na czole (LW1, 130.0 m n.p.m.) i polu firnowym (LW2, 376.5 m n.p.m.) Lodowca Waldemara oraz dodatkowo opadów między tymi punktami (LWs, 245 m n.p.m.). Dysponujemy więc materiałem meteorologicznym z obszaru zasilania cieku, co jest bardzo istotne przy poszukiwaniu związków ilościowych między warunkami meteorologicznymi a stanami wody i natężeniem przepływów.

WARUNKI POGODOWE W SEZONIE LETNIM 1989 R.

Dynamikę warunków pogodowych w regionie Kaffiöry w sezonie letnim 1989 r. przedstawiono w publikacji K. Marciniaka i in. (1993). Na tle danych wieloletnich z poprzednich Wypraw Toruńskich sezon ten odznaczał się przeciętnymi warunkami solarnymi i termicznymi oraz stosunkowo niewielkimi sumami opadów, ale licznymi dniami z opadem śladowym. Wcześniej natomiast niż w innych sezonach wystąpiły opady śniegu i pokrywa śnieżna. W sezonie letnim 1989 r. nie wystąpiły ekstremalnie



Ryc. 4. Przebieg dobowych wartości elementów meteorologicznych i przepływu w cieku Waldemar Północny w okresie 30.07 - 31.08.1989 r.

C - zachmurzenie (KH), SS - usłonecznienie (KH), T - temperatura powietrza, P - opad atmosferyczny (KH), Q - przepływ.

wysokie temperatury powietrza i opady atmosferyczne obserwowane np. w sezonach 1979 i 1980, które spowodowały wówczas nagłe i o dużym natężeniu wezbrania w ciekach odwadniających Łodowiec Waldemara (Szczepanik, Marciniak, 1989).

Pomiary hydrologiczne objęły drugą część lata polarnego, już z ogólną spadkową tendencją temperatury powietrza, aż do ujemnych wartości średnich dobowych na przełomie sierpnia i września (tab. 1, ryc. 4). Suma opadów w stacji bazowej w okresie pomiarów hydrologicznych wyniosła 26.5 mm, z czego aż 10.0 mm w postaci śniegu, przy ujemnej temperaturze powietrza. Nie miały więc one wpływu na przebieg

Tabela 1. Średnie dobowe wartości elementów meteorologicznych w regionie Kaffioyry i przepływu w cieku Waldemar Północny w okresie 30.07-31.08.1989 r.

KH - Kaffioyra, LW1 - Lodowiec Waldemara - czoło, LW2 - Lodowiec Waldemara - firm, C - zachmurzenie, SS - usłonecznienie, T - temperatura powietrza, P - opady atmosferyczne, Q - przepływ.

Data Date	C (0-10)	SS (godz.) (hours)	T (°C)			P (mm)	Q (l/s)
			KH	LW1	LW2		
30.07	3.8	20.4	5.1	6.3	4.9	.	229.0
31	3.2	19.9	5.2	4.7	2.8	.	169.6
1.08	9.8	0.6	4.1	2.8	0.7	.	151.4
2	9.8	1.4	4.4	3.6	3.8	3.9	151.4
3	10.0	.	6.1	4.7	4.1	3.9	450.2
4	10.0	.	4.8	3.8	2.0	1.0	213.4
5	9.8	0.2	5.6	5.5	4.5	0.0	203.6
6	10.0	.	7.2	7.1	6.3	0.0	602.7
7	6.5	8.6	5.8	7.1	7.1	2.6	346.3
8	10.0	.	6.3	6.4	6.0	0.0	362.9
9	7.0	9.9	7.4	6.7	6.0	.	329.5
10	4.8	10.7	6.4	5.2	4.0	.	182.8
11.08	10.0	.	4.3	2.3	1.7	0.0	143.9
12	7.2	12.8	3.6	3.1	3.1	.	128.3
13	7.2	3.0	3.2	3.7	4.5	.	136.4
14	7.0	8.5	4.5	4.3	3.1	.	158.9
15	8.8	8.8	2.8	1.8	0.1	0.7	71.8
16	8.5	0.9	3.2	2.4	1.1	0.0	66.7
17	9.5	0.3	2.8	1.8	0.1	0.1	64.3
18	9.8	1.3	3.5	2.7	1.1	1.6	90.5
19	8.2	3.7	5	4.6	2.8	0.2	170.9
20	10.0	.	5.2	5.0	3.7	1.7	142.9
21.08	10.0	.	5.8	4.7	2.7	0.4	140.8
22	10.0	.	4.8	3.4	1.1	0.2	150.2
23	10.0	0.2	4.8	3.9	1.7	0.2	99.2
24	7.8	6.9	3	2.0	0.1	0.0	83.7
25	5.5	11.4	1.9	0.9	-0.4	0.0	44.7
26	9.0	0.6	0.7	-0.5	-2.8	0.0	29.7
27	9.5	0.7	0	-0.7	-2.9	0.0	7.4
28	9.8	0.6	0	-0.6	-2.8	3.4	8.9
29	9.8	.	-0.4	-1.2	-3.2	3.2	4.5
30	9.8	0.4	-1.2	-2.5	-4.6	0.4	4.8
31	9.2	0.7	-0.8	-2.0	-4.4	3.0	2.7
średnia mean	8.5	4.0	3.8	3.1	1.8	0.8	155.9

stanów wody w badanym cieku w okresie pomiarów. Maksymalny opad dobowy osiągnął zaledwie 3.9 mm. Wyższe natomiast były sumy opadów na obszarze Lodowca Waldemara, stosownie do wzrastającej wysokości nad poziom morza poszczególnych stanowisk pomiarowych, tj. LW1 - 39.4 mm, LWs - 46.9 mm, LW2 - 60.3 mm.

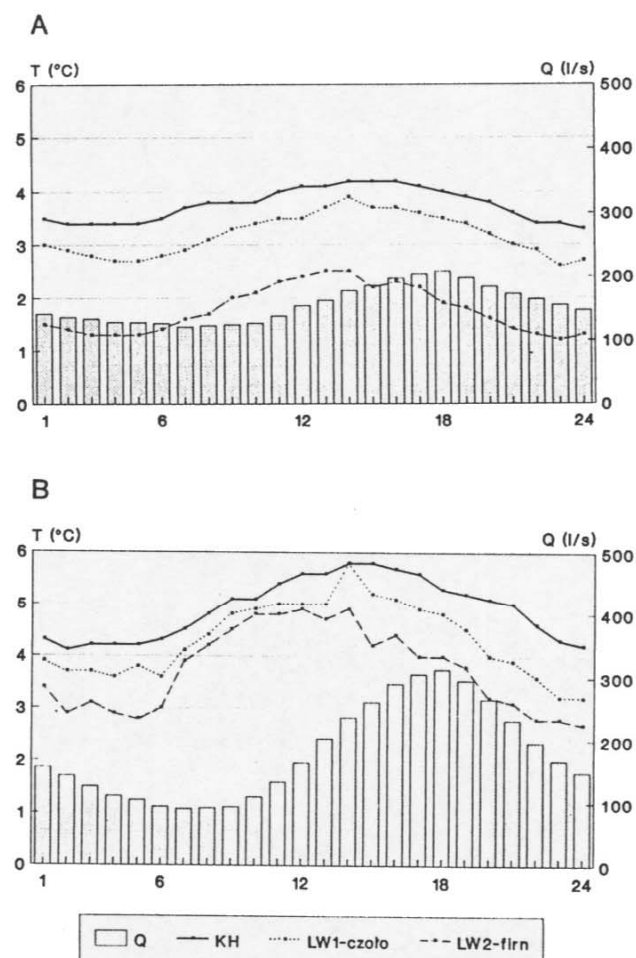
WYNIKI BADAŃ

Średnie dobowe przepływy

Średni przepływ dobowy w cieku Waldemar Północny za okres badań wyniósł 155.9 l/s i wahał się od 602.7 l/s (06.08) do 2.7 l/s (31.08). Ogólny przebieg wartości średnich dobowych przepływów (tab. 1, ryc. 4) wykazuje wzrost od początku pomiarów (30.07) do 6.08, a następnie systematyczny ich spadek do końca okresu pomiarowego. Spośród elementów meteorologicznych przedstawionych na ryc. 4, największą korelację z przepływami wykazuje temperatura powietrza. Współczynniki korelacji (r) między średnim dobowym natężeniem przepływu a średnimi dobowymi temperaturami na 3 stanowiskach pomiarowych wyniosły: 0.799 (KH), 0.811 (LW1) i 0.809 (LW2). Wyższe współczynniki korelacji uzyskano więc ze stanowiskami lodowcowymi reprezentującymi obszar zasilania badanego cieku. Obliczone średnie dobowe temperatury z LW1 i LW2 wykazały jeszcze ściślejszy związek z przepływami ($r = 0.815$).

Najintensywniejsze topnienie śniegu i lodu występuje w porze doby z najwyższymi temperaturami, dlatego też obliczono współczynniki korelacji między temperaturą maksymalną a natężeniem przepływu oddzielnie dla LW1 i LW2, a następnie dla średnich maksimów z tych stanowisk, dla których $r = 0.831$.

Dokładniej przeanalizowano dni z najwyższymi przepływami dobowymi (ryc. 5). Szczególną uwagę zwraca fakt, że w dwóch sąsiadujących ze sobą dniach o zbliżonej średniej dobowej temperaturze powietrza (06 i 07.08) natężenie przepływu jest tak różne. Były to dni z najwyższymi temperaturami powietrza w całym okresie pomiarowym, wywołanymi napływem sfenizowanego powietrza. Gwałtowny wzrost temperatury na stanowisku LW2 wystąpił już 05.08. między godz. 21 a 22, by o godz. 24 osiągnąć 11,1°C, zaś na czole lodowca (LW1) najwyższa temperatura (12,3°C) wystąpiła o godz. 01 w dniu 06.08. Tak wysokie temperatury spowodowały szybkie topnienie śniegu zalegającego jeszcze na wysokości LW2 oraz lodu w części ablacyjnej lodowca, co w efekcie dało intensywny spływ wód, którego maksimum wystąpiło w badanym cieku o godz. 06 (06.08.) z rekordowym natężeniem przepływu 866 l/s. W dniu następnym (07.08.), pomimo występowania równie wysokiej temperatury powietrza na stanowiskach lodowcowych, średnie natężenie przepływu było już znacznie mniejsze (346.3 l/s), gdyż wcześniej spłynęła główna część wody zretencjonowana w papce śnieżno-wodnej (slush). Ten wyjątkowo obfity spływ wód lodowcowych w dniu



Ryc. 6. Średnie dobowe przebiegi temperatury powietrza i natężenia przepływu za okresy: 30.07-31.08.1989 r. (A) i 09-14.08.1989 r. (B).

06.08. obniża stopień korelacji temperatury powietrza z przepływami za cały okres pomiarów. Współczynnik korelacji między tymi elementami z wyłączeniem wartości z 06.08. wynosi 0.846 (dla średnich dobowych ze stanowisk LW1+LW2).

Drugie co do wielkości natężenie przepływu w cieku Waldemar Północny w dniu 03.08. (450.2 l/s) było spowodowane, obok stosunkowo wysokiej temperatury powietrza również wystąpieniem opadów atmosferycznych.

Okres 09-14.08. (ryc. 5), bez opadów atmosferycznych, wykazuje regularny choć o różnej amplitudzie, rytm dobowy przepływów nawiązujący do przebiegu temperatury powietrza, szczególnie na obu stanowiskach lodowcowych. Dobowe amplitudy stanów wody wyniosły wówczas od 8 do 16 cm. Zwraca uwagę dzień 13.08. z inwersyjnym rozkładem temperatury powietrza na lodowcu w stosunku do KH. Taki układ warunków termicznych dostatecznie wyjaśnia stosunkowo dobrze wyrażony bieg dobowy natężenia przepływu w tym dniu, który nie znajduje odzwierciedlenia w przebiegu temperatury na Kaffiöyrze.

Średni dobowy przebieg przepływów

Średnie natężenie przepływu za cały okres pomiarów wykazuje regularny przebieg dobowy (ryc. 6A) z minimum o godz. 07 (121 l/s) i maksimum o godz. 18 (207.7 l/s). Tak więc jego faza wzrostowa trwa średnio 11 godzin, a spadkowa 13 godzin przy amplitudzie średniej dobowej 86.7 l/s. Czas trwania tych faz jest prawie równy średnim fazom wzrostu i spadku temperatury powietrza. Między przebiegiem temperatury a natężeniem przepływu zaznacza się jednak przesunięcie w momentach występowania wartości ekstremalnych tych elementów. Opóźnienie reakcji przepływu w punkcie limnigraficznym w stosunku do warunków termicznych obszaru zasilania wyniosło ok. 5-6 godzin (LW2), 4 godz. (LW1) i tylko 3 godz. (KH). Wielkość tego opóźnienia jest zbliżona do wartości podawanych w literaturze dla obszarów Spitsbergenu (Bartoszewski, 1989; Szczepanik, 1993). Jest ono nie tylko prostą funkcją odległości między obszarem zasilania cieką a punktem pomiarów hydrologicznych, ale także całego zespołu warunków fizyczno-geograficznych zlewni (np. wielkość powierzchni zlodowaczonej, nachylenie lodowca i jego otoczenie). Wartości tego opóźnienia odczytane z uśrednionego przebiegu temperatury powietrza i przepływów (ryc. 6A) zostały potwierdzone obliczonymi współczynnikami interkorelacji, co przedstawia poniższe zestawienie:

Stano- wisko	opóźnienie (godzin)							
	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7
KH	0.720	0.734	0.743	0.747	0.746	0.741	0.731	0.718
LW1	0.735	0.760	0.778	0.791	0.793	0.789	0.777	0.761
LW2	0.713	0.737	0.760	0.776	0.788	0.795	0.796	0.791

Otrzymane współczynniki korelacji między wartościami godzinnymi temperatury powietrza i przepływów (przy $n = 792$) należy uznać jako wysokie, gdyż zostały obliczone dla całego okresu pomiarów a więc także dla dni z opadami atmosferycznymi, które choć niewielkie, jednak wpływały na zaburzenie rytmu dobowego ablacji i przepływu. Ponadto zbiór ten obejmuje okres końca lata i początku jesieni hydrologicznej z zanikającym już rytmem dobowym przepływów.

Splaszczony średni przebieg dobowy temperatury powietrza i przepływów (ryc.6A) wynika z różnych momentów występowania ekstremów temperatury powietrza w

poszczególnych dobach. Regularność biegu dobowego temperatury, szczególnie w warunkach klimatu polarnego, jest często zaburzona przez zachmurzenie, adwekcję mas powietrza i lokalne procesy dynamiczne na lodowcu otoczonym przez góry.

Większą stabilność w tym względzie wykazuje bieg dobowy natężenia przepływu (ryc. 5), szczególnie w okresie bez opadów atmosferycznych, np. w dniach 09-14.08. Uśredniony dla tych 6 dni przebieg dobowy temperatury powietrza i przepływów (ryc. 6B) odznacza się większą amplitudą dobową tych elementów (w przypadku przepływów aż 223 l/s). Średnie momenty wystąpienia ekstremów pozostały jednak takie same jak przy uśrednionym przebiegu za cały okres pomiarów. Na ryc. 6B widoczna jest jakby nadwyżka temperatury powietrza na polu firnowym (LW2) w godz. 7-13 (średnio o 1°C) w stosunku do LW1 i KH co ma istotny wpływ na proces topnienia śniegu i lodu na Lodowcu Waldemara, a więc i na natężenie przepływu w odwadniających go ciekach. Nadwyżka ta jest wywołana przez warunki solarne, w tym oświetleniowe, w środowisku o ograniczonej wymianie poziomej powietrza na polu firnowym lodowca.

Literatura cytowana:

- Bartoszewski S., 1988, Warunki kształtowania się odpływu w zlewni rzeki Scotta (Zachodni Spitsbergen), [w:] Wyprawy Geograficzne na Spitsbergen 1986-1988, UMCS Lublin, s. 115-122.
- Bartoszewski S., 1989, Charakterystyka odpływu ze zlewni lodowca Scotta (Zachodni Spitsbergen) w 1988 r., [w:] Wyprawy Geograficzne na Spitsbergen, UMCS Lublin, s. 61-67.
- Bartoszewski S., Rodzik J., 1988, Dynamika odpływu w zlewniach peryglacialnych na przedpolu lodowców Renarda i Scotta (Zachodni Spitsbergen), [w:] Wyprawy Geograficzne na Spitsbergen, UMCS Lublin, s. 123-131.
- Choiński A., 1989, Zagadnienia hydrologiczne zlewni Ebby i Zatoki Petunia (Środkowy Spitsbergen), [w:] Dorobek i perspektywy polskich badań polarnych, XVI Sympozjum Polarne, Toruń, s. 203-204.
- Leszkiewicz J., Rehak J., 1989, Odpływ ze zlewni zlodowaczonej rzeki lodowcowej Werenskiolda i niezlodowaczonej potoku Fuglebekken (Spitsbergen) w okresie lata i jesieni 1988 r., [w:] Dorobek i perspektywy polskich badań polarnych, XVI Sympozjum Polarne, Toruń, s. 209-211.

- Marciniak K., Przybylak R., Kejna M., 1993, Dynamika warunków meteorologicznych na Równinie Kaffiöyra (NW Spitsbergen) w okresie 8.07 - 7.09.1989 r., [w:] Wyniki badań VIII Toruńskiej Wyprawy Polarnej Spitsbergen '89, UMK Toruń, s. 31-46.
- Paszczyk J., Michalczyk Z., Bartoszewski S., 1991, Analysis of the Scott river flow in 1989 (West Spitsbergen), [w:] Wyprawy Geograficzne na Spitsbergen, UMCS Lublin, s. 97-106.
- Pietrucień Cz., Skowron R., 1989, Dynamika transportu materiału unoszonego w rzece Waldemara na Spitsbergenie w sezonie letnim 1985, [w:] Dorobek i perspektywy polskich badań polarnych, XVI Sympozjum Polarne, Toruń, s.191- 195.
- Pietrucień Cz., Skowron R., Szczepanik W., 1989, Badania koncentracji zawiesiny w rzekach Kaffiöyry (NW Spitsbergen), [w:] Dorobek i perspektywy polskich badań polarnych, XVI Sympozjum Polarne, Toruń, s. 196-200.
- Szczepanik W., 1993, Reżim wybranych rzek Kaffiöyry (Ziemia Oskara II, NW Spitsbergen) w okresie lata polarnego, AUNC, Geografia XXIV, Toruń, s. 55-146.
- Szczepanik W. Marciniak K., 1989, Wpływ ekstremalnych warunków pogodowych na zjawiska hydrologiczne na przykładzie wybranych rzek z regionu Kaffiöyry, [w:] Dorobek i perspektywy polskich badań polarnych, XVI Sympozjum Polarne, Toruń, s. 185-188.