

**AKUMULACJA ŚNIEGU NA LODOWCU EKOLOGII
(KING GEORGE ISLAND, SZETLANDY PD., ANTARKTYKA)
W 1996 ROKU**

Zbigniew Caputa

Katedra Geomorfologii, Uniwersytet Śląski, Sosnowiec

Marek Kejna

Zakład Klimatologii, Uniwersytet Mikołaja Kopernika, Toruń

Kamil Láska

Department of Geography, Faculty of Sciences, Masaryk University, Brno, Czech Republic

Wstęp

Lodowiec (lądolód) stanowi otwarty system przyrodniczy silnie powiązany z otaczającym środowiskiem. Wszelkie zmiany warunków klimatycznych prowadzą do przyrostu lub ubytku masy lodowca, która jest wypadkową akumulacji i ablacji. Akumulacja jest procesem zwiększającym masę lodowca, obejmuje ona opady śniegu oraz dostawę śniegu przez lawiny i wiatr, wsiąkanie i zamarzanie opadów ciekłych i wód roztopowych, osadzanie sadzi. Ablacja prowadzi do ubytku masy lodowca poprzez topnienie śniegu i lodu oraz spływ tych wód poza obszar lodowca, parowanie i sublimację, cilenie się lodowców uchodzących do morza lub jeziora, wywiewanie śniegu z lodowca i inne.

Celem niniejszego opracowania jest określenie wielkości zimowej akumulacji śniegu na Lodowcu Ekologii (King George Island), który jest położony w strefie klimatu subantarktycznego, w rejonie o silnych wpływach

oceanicznych i dużej zmienności warunków pogodowych. W rejonie tym zachodzą znaczne, współczesne, zmiany warunków klimatycznych (Martianov i Rakusa-Suszczewski, 1990; Bintanja, 1995; Rodriguez *i in.*, 1996).

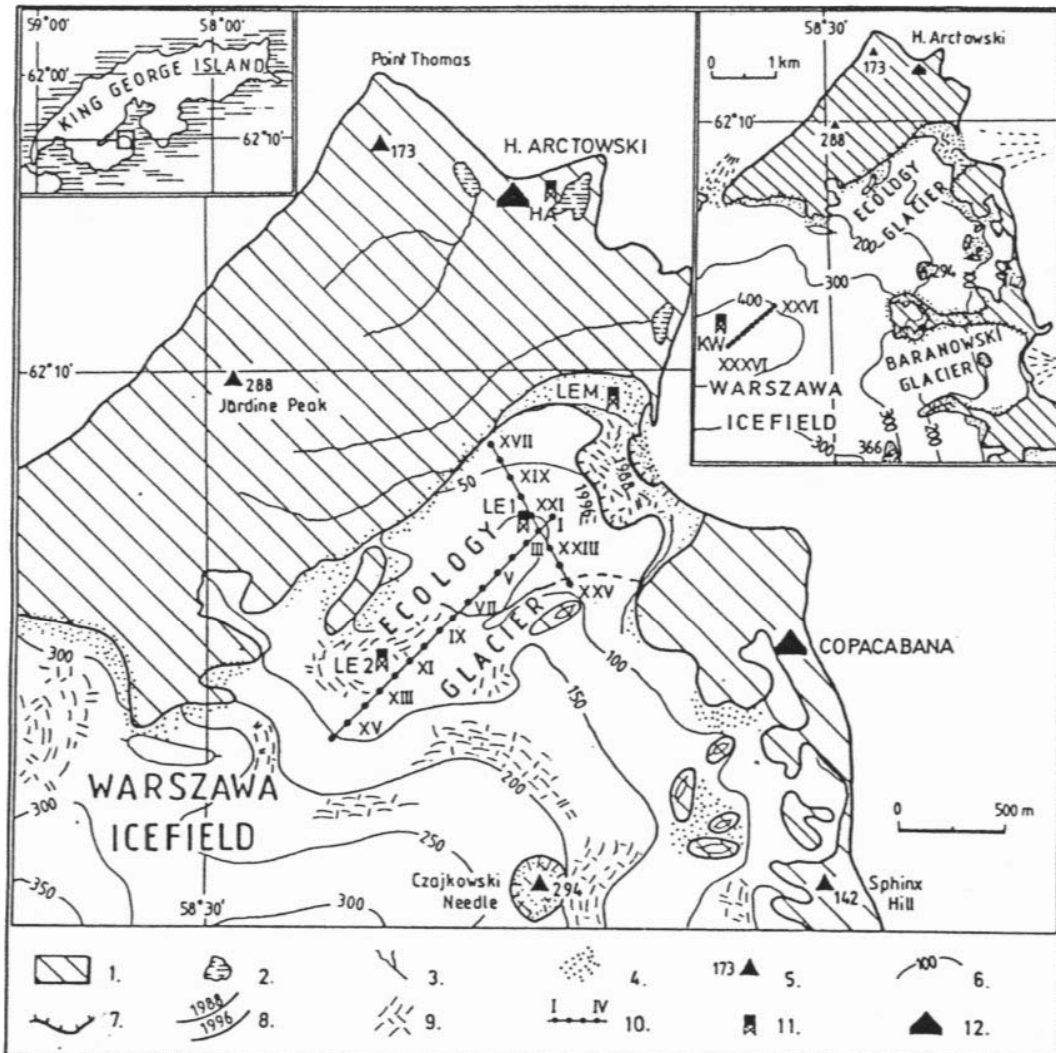
Badania nad akumulacją śniegu prowadzono w czasie XX Wyprawy Antarktycznej PAN. Pomiarów rozpoczęto pod koniec ablacji letniej 1996 r. (21 marca), a zakończono w początkowej fazie ablacji sezonu letniego 1996/1997 r. (10 grudnia), obejmując zimową akumulację śniegu.

Badania glaciologiczne w rejonie Zatoki Admiralicji na King George Island rozpoczęli Anglicy (Noble, 1965). W późniejszych latach mierzono jedynie wielkość ablacji w powiązaniu z warunkami pogodowymi, jednak badania te miały charakter krótkookresowy. Latem 1978/79 prowadzono badania ablacji na lodowcach: Sphinx i Flagstaff (Piasecki, 1984 i 1988). Na przełomie 1990/91 r. badania ablacji na Lodowcu Ekologii w powiązaniu z bilansem energetycznym powierzchni prowadził Bintanja (1995), a w okresie od lutego do maja 1991 r. Rachlewicz (1995) badał tempo ablacji na tle warunków pogodowych. W rejonie Półwyspu Fieldes (pd-zach. część wyspy), charakteryzującym się odmiennymi warunkami klimatycznymi, prowadzili badania glaciologiczne Zamoruev (1968) oraz Bryazgin i Govorucha (1986).

Obszar i metody badawcze

Pomiary akumulacji śniegu prowadzono na obszarze Kopuły Warszawy (Warszawa Icefield), która jest lodowcem pokrywowym spływającym radialnie we wszystkich kierunkach (ryc. 1). Zajmuje ona półwysep w południowej części Wyspy Króla Jerzego otoczony od N fiordem Ezcurra Inlet, od E Zatoką Admiralicji, od S i W wodami Cieśniny Bransfielda. Kopuła Warszawy od NW łączy się z rozległą kopułą Arctowski Icefield, w miejscu połączenia kopuł Warszawy i Arctowskiego powierzchnia lodu obniża się do ok. 300 m n.p.m. Kopuła Warszawy wznosi się maksymalnie do wysokości 476 m n.p.m. Można jednak wyróżnić dwa główne wzniesienia w jej centralnej części oraz trzecie, niższe, ale wyraźnie zaznaczające się w terenie, wzniesienie nad Zamkiem. Strefa krawędziowa Kopuły Warszawy składa się z wielu typów jeziorów wylotowych, w większości uchodzących do morza: Fourcade Glacier, Polar Club Glacier, Windy Glacier, Baranowski Glacier, Ecology Glacier i inne. Jezory lodowcowe od strony Ezcurra Inlet mają charakter lodopadów, np. nawisowy Gdańsk Icefall. Nieliczne lodowce po stronie wschodniej Kopuły nie schodzą do poziomu morza: Sphinx Glacier,

Tower Glacier. Tak duża różnorodność lodowców skłania do indywidualnego charakteru badań każdego jeziora wylotowego Kopuły Warszawy.



Ryc. 1. Lokalizacja stanowisk pomiarowych na Lodowcu Ekologii i Kopule Warszawy w 1996 r.

1 - obszary niezlodowacone, 2 - jeziora, 3 - ciekі, 4 - moreny, 5 - punkty wysokościowe, 6 - poziomicze na lodowcu (1988 r.), 7 - klif lodowcowy, 8 - czoło lodowca 1988 i 1996 r., 9 - szczeliny, 10 - tyczki, 11 - klatki meteorologiczne, 12 - stacje naukowe

Fig. 1. Location of measurements stands on Ecology Glacier and Warszawa Icefield in 1996

1 - unglaciated area, 2 - lakes, 3 - streams, 4 - moraine, 5 - altitude points, 6 - contours on glacier (in 1988) 7 - glacier cliff, 8 - ice front in 1988 and 1996, 9 - crevasses, 10 - stakes, 11 - meteorological screen, 12 - scientific stations

Badania akumulacji śniegu prowadzono głównie na Lodowcu Ekologii oraz w wierzchołkowej części Kopyły Warszawy (ryc. 1). Lodowiec Ekologii spływa z Kopyły Warszawy w kierunku NE, od N otoczony jest niezlodowaconym obszarem Pt Thomas, na którym lodowiec utworzył moreny boczne. Od S granica Lodowca Ekologii jest mniej wyraźna, szeroki jęzor lodowcowy jest ograniczony przez wzniesienia Zamek i Czajkowski Needle. Jęzor ten dzieli się na dwie części: właściwy Lodowiec Ekologii oraz lodowiec tworzący moreny na zachód od Rescuers Hills (rejon Copacabany). Lodowce te są oddzielone wyraźnym, wytapiającym się wspólnie garbem skalnym, przykrytym cienką warstwą materiału morenowego. Długość tego garbu sięgała w 1996 r. ok. 300 m. W dolnym odcinku Lodowca Ekologii, zarówno po stronie N jak i S powstały wysokie łuki moren czołowo-bocznych. Lodowiec Ekologii uchodzi do Zatoki Admiralicji. Przed samym lodowcem utworzyła się niewielka zatoka oddzielona wałem burzowym, połączona wąskim ujściem z Zatoką Admiralicji. Zatoka u czoła lodowca powiększa się z roku na rok w wyniku jego cofania się. Na kontakcie lodowca oraz morza wytworzył się klif lodowcowy o wysokości ok. 30 m. N i S część czoła lodowca kończy się na lądzie, granicę jego wyznaczają rzeki marginalne.

Powierzchnia Lodowca Ekologii jest silnie uszczelniona, zwłaszcza w strefie klifu. Duża ilość szczelin występuje także na licznych wzniesieniach oraz w strefie brzeżnej (po stronie północnej). Lodowiec jest odwadniany dwoma systemami cieków. Północną stronę lodowca odwadnia ciek wypływający z pod Jardine Peak, który przepływa pod łukiem moren Lodowca Ekologii i wypływa z tunelu około 500 m od czoła. Ciek ten zasilają strumyki powierzchniowe i inglacjalne spływające po północnym skłonie lodowca. Stronę południową i górne partie lodowca odwadnia ciek biorący swój początek w centralnej części Lodowca Ekologii, płynie on wyraźnie zaznaczoną doliną na południowy-wschód by zniknąć w licznych szczelinach u czoła lodowca. Wody z tego cieku łączą się ze strumieniem płynącym wzdłuż moren bocznych od strony południowej.

Akumulację śniegu mierzono przy pomocy tyczek. Zainstalowano 25 tyczek na Lodowcu Ekologii oraz 11 tyczek w wierzchołkowej partii Kopyły Warszawy. Między tyczkami zachowano odległość 100 m (ryc. 1). Na Lodowcu Ekologii poprowadzono dwa profile: podłużny i poprzeczny. Profil podłużny (16 tyczek) wyznaczono od wysokości 64 m n.p.m. (ok. 200 m od klifu) do wysokości 217 m n.p.m. (ryc. 4). Powierzchnia lodowca wzdłuż profilu podłużnego jest bardzo urozmaicona, występują na nim wzniesienia

oraz powierzchnie o małym nachyleniu. Tyczka VI została zainstalowana na garbie, z którego przez długi okres śnieg był zwiewany przez wiatr. Pomiedzy tyczkami VII i VIII przebiegała wyraźna dolina, wykorzystywana latem przez strumień supraglacialny. Powyżej strumienia powierzchnia lodowca podnosi się, a ostatnią XVI tyczkę zainstalowano na kolejnym wzniesieniu na lodowcu, za którym rozpościerała się powierzchnia o mniejszym nachyleniu. Profil poprzeczny na Lodowcu Ekologii (9 tyczek) został wyznaczony wzdłuż linii NNW-SSE, równoległe do czoła lodowca. Profil ten rozpoczynał się u podnóża moreny bocznej (XVII), następnie powierzchnia lodowca silnie się wznosiła. Począwszy od tyczki XX aż po ostatnią tyczkę (XXV) powierzchnia lodowca jest płaska. Na Kopule Warszawy poprowadzono profil 11 tyczek po NE (zawietrzny) skłonie kopuły aż do jej wierzchołka (400 do 450 m n.p.m.).

Przy pomiarach zastosowano metodę stałych dat, co 10 dni odczytywano grubość pokrywy śnieżnej. Prezentowane wyniki wskazują miąższość pokrywy śnieżnej w ostatnim dniu dekady. Pomiarów wykonywano na Lodowcu Ekologii od 21 marca do 10 grudnia 1996 r., a na Kopule Warszawy od 30 lipca do 30 listopada (na kopule nie udało się utrzymać stałych terminów wykonywania pomiarów).

W dniu 28 października, przy maksymalnej miąższości pokrywy śnieżnej, wykonano wkopy w 6 punktach sięgające powierzchni letniej. Dzięki temu można było rozpoznać stadia metamorfozy śniegu, określić fazy sypania śniegu (Leszkiewicz i Pulina, 1996) oraz liczbę okresów z ablacją. Ponadto pobrano próby śniegu z całej warstwy zakumulowanego śniegu na ekwiwalent wodny.

Pomiarom akumulacji śniegu towarzyszyły równoległe prowadzone pomiary i obserwacje warunków pogodowych. Przez cały rok wykonywano standardowe pomiary i obserwacje meteorologiczne na Stacji H. Arctowskiego (odległej od lodowca o ok. 700 m). Ponadto rejestrowano temperaturę i wilgotność powietrza na Lodowcu Ekologii i Kopule Warszawy (ryc. 1). W okresie od 1 stycznia do 10 grudnia 1996 roku czynne były stanowiska: LEM (60 m od czoła Lodowca Ekologii, 2 m n.p.m.) oraz dwa stanowiska na lodowcu: LE1 (71 m n.p.m.) i LE2 (170 m n.p.m.). W okresie od 30 lipca do 14 października czynne było stanowisko na Kopule Warszawy: KW (ok. 450 m n.p.m.). Wykonywano także pomiary opadów atmosferycznych na Stacji H. Arctowskiego oraz na LE1 (w okresie od 21.03 do 10.12) i LE2 (od 1.02 do 10.12).

Warunki pogodowe

Analizując warunki pogodowe na Wyspie Króla Jerzego trzeba uwzględnić znaczne zróżnicowanie topoklimatyczne tego obszaru wynikające z różnej wysokości nad poziom morza, rodzaju powierzchni (lodowcowej, śnieżnej lub lądowej), ekspozycji względem Słońca i dominujących kierunków wiatrów oraz odległości od morza. Mając to na uwadze pomiarom akumulacji śniegu towarzyszyły pomiary temperatury powietrza i opadów atmosferycznych bezpośrednio na lodowcu, inne czynniki pogodowe (zachmurzenie, usłonecznienie, kierunek i prędkość wiatru) obserwowano i mierzono na Stacji H. Arctowskiego.

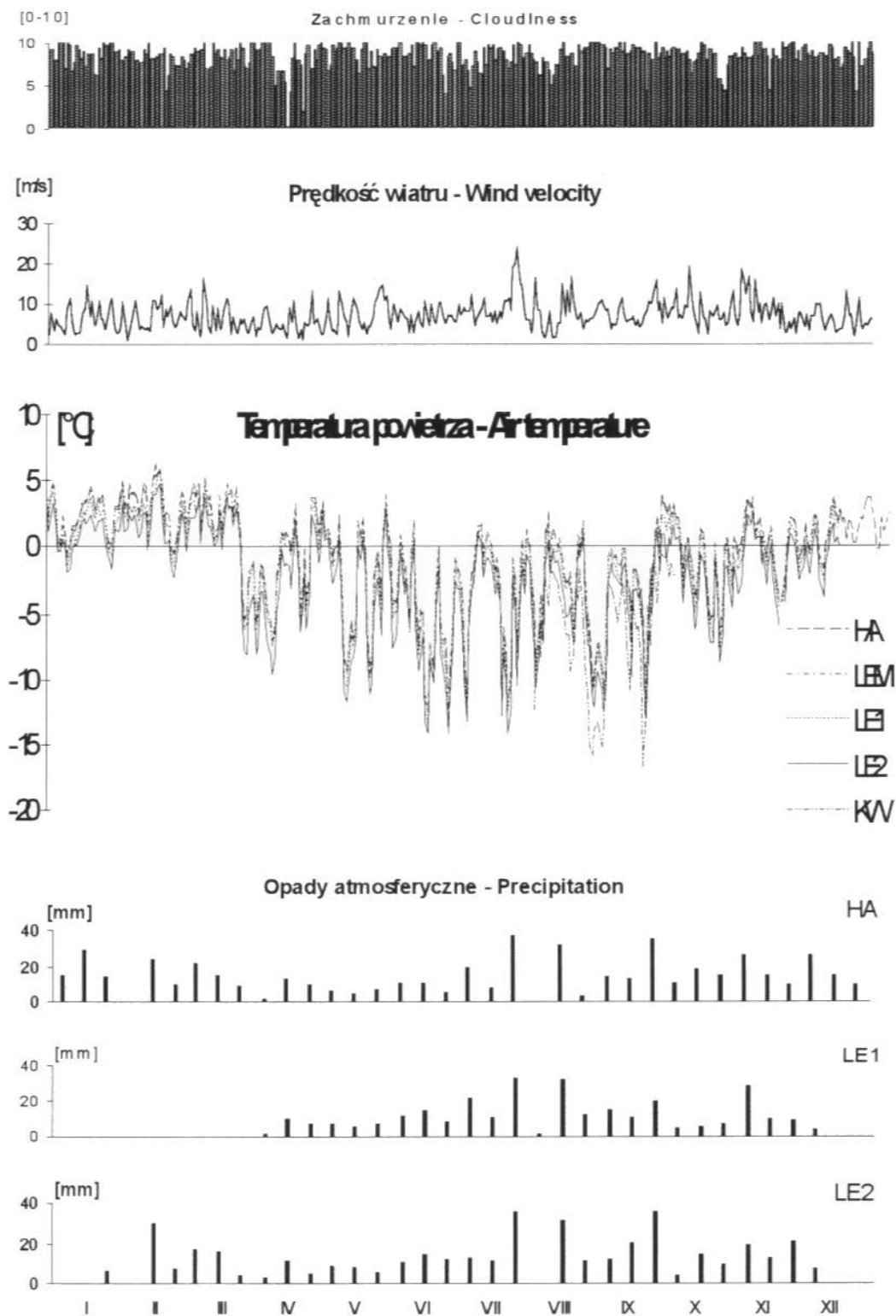
Tabela 1 - Table 1

Warunki pogodowe na Stacji H. Arctowskiego i na Lodowcu Ekologii w 1996 r.

Weather conditions at the Arctowski Station and Ecology Glacier in 1996

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I-XII
Zachmurzenie - Cloudiness [0-10]													
HA	8.7	8.1	8.4	7.5	8.7	8.7	8.2	8.1	8.9	7.8	8.3	8.3	8.3
Usłonecznienie - Sunshine duration [godz.]													
HA	126.6	122	78.2	51.7	6.8	7.9	13.8	26.2	21.5	95	95.3	115.3	760.3
Prędkość wiatru - Wind velocity (m/s)													
HA	6.8	6.5	6.4	5.3	8.2	6.7	9.8	6.9	7.9	8	8.4	6.1	7.1
Temperatura powietrza - Air temperature [°C]													
HA	2.4	3.4	2	-1.1	-2.3	-4.9	-3.1	-3.4	-1	-0.9	0.3	1.7	-0.6
LEM	2.3	3.2	1.8	-1.1	-2.4	-5	-3.2	-3.5	-1.1	-1	0.2	-	-
LE1	1.6	2.4	1.2	-1.7	-3.1	-5.7	-3.8	-4.1	-1.8	-1.9	-0.5	-	-
LE2	0.9	1.6	0.4	-3.1	-4.2	-6.6	-4.8	-5.3	-2.7	-2.8	-1.4	-	-
KW	-	-	-	-	-	-	-	-7.3	-4.6	-	-	-	-
Opady atmosferyczne - Precipitation [mm]													
HA	48.7	32.6	44.9	22.1	15.3	23.8	62.6	33.9	59.9	41.9	49.3	44.2	479.2
LE1	-	-	-	16.3	17.2	31.7	63.5	43.4	43.3	14.6	44.8	-	-
LE2	-	35.6	35.8	17.6	21.2	34.3	58.4	41.9	66.8	26.5	50.8	-	-

HA - Stacja H. Arctowskiego - Arctowski Station, LEM - Lodowiec Ekologii-morena - Ecology Glacier-moraine, LE - Lodowiec Ekologii - Ecology Glacier, KW - Kopała Warszawy - Warszawa Icefield



Ryc. 2. Warunki pogodowe na Stacji H. Arctowskiego, Lodowcu Ekologii i Kopule Warszawy w 1996 r.

Fig 2. Weather conditions at the Arctowski Station and on Ecology Glacier and on Warszawa Icefield in 1996

W 1996 r, w okresie pomiarów akumulacji śniegu (21.03-10.12.96), zachmurzenie obserwowane na Stacji H. Arctowskiego było bardzo duże (tab. 1, ryc. 2). W miesiącach zimowych, od maja po wrzesień, przekraczało 8/10, jedynie w kwietniu oraz w październiku zanotowano dużo rozpogodzeń. Dominowały chmury piętra niskiego stratus i stratocumulus, ich wysokość podstawy często nie przekraczała 100-200 m n.p.m., w efekcie w górnych partiach lodowca (LE2) i na kopule (KW) występowały chmury (mgła) z opadami śniegu i intensywnym osadzaniem sadzi.

Wpływ promieniowania słonecznego na topnienie śniegu w warunkach zimowych na Lodowcu Ekologii jest mały ze względu na krótki dzień, mały kąt padania promieni słonecznych, duże zachmurzenie oraz wysokie albedo powierzchni śnieżno-lodowcowej. Zimą wystąpiło bardzo nieznaczne usłonecznienie, w maju suma godzin ze Słońcem wyniosła 6.8, a w czerwcu 7.9 godz. Oddziaływanie promieniowania słonecznego zwiększyło się na wiosnę kiedy to Słońce świeciło po około 100 godz. na miesiąc (październik-grudzień).

Ważnym czynnikiem pogodowym wpływającym na pokrywę śnieżną jest wiatr. Wiatr przenosi śnieg, wywiewa go z miejsc odsłoniętych i akumuluje w szczelinach, obniżeniach terenu oraz po zawietrznej stronie wzniesień i przeszkód terenowych. Wiatr tworzy na lodowcu zaspę i zastrugi. W zależności od kierunku i prędkości wiatru są przenoszone ogromne masy śniegu. Część śniegu zostaje zwiewana z lodowca, głównie z klifu lodowcowego przez częste wiatry spadowe wiejące z kopuły wzdłuż lodowca. Kierunek i prędkość wiatru na lodowcu różnią się w stosunku do tych mierzonych na stacji H. Arctowskiego, gdzie ruch mas powietrza jest silnie deformowany orograficznie. W analizowanym okresie wystąpiły bardzo silne wiatry osiągnące na Stacji H. Arctowskiego w niektórych miesiącach do 10 m/s (lipiec 9.8 m/s), jedynie w kwietniu i sierpniu prędkość wiatru była mniejsza (kwiecień 5.3 m/s). Maksymalne prędkości wiatru przekraczały 40 m/s.

Średnie temperatury powietrza były wyższe od norm wieloletnich (1978-89) i wyniosły w 1996 r. na Stacji H. Arctowskiego -0.6°C , szczególnie duże dodatnie anomalie wystąpiły zimą. Temperatura powietrza na Lodowcu Ekologii jest niższa niż na Stacji H. Arctowskiego, na wysokości ok. 70 m n.p.m. (LE1) różnica wynosi 0.7 deg, a na wysokości 170 m n.p.m. (LE2) temperatura jest niższa o ok. 1.7 deg. Na Kopule Warszawy (KW, 450 m n.p.m.) pomiary prowadzono tylko zimą, gdzie temperatura była niższa niż w HA o 3.9 deg w sierpniu i o 3.6 deg we wrześniu. Ujemne temperatury powietrza konserwują pokrywę śnieżną, natomiast adwekcja

ciepłego powietrza prowadzi do jej szybkiego topnienia. Stąd też duże znaczenie dla analizy wpływu temperatury powietrza na akumulację i ablację śniegu ma liczba dni z dodatnią temperaturą powietrza (tab. 2).

Tabela 2 - Table 2

Liczba dni z dodatnią temperaturą powietrza ($t_{max} \geq 0^{\circ}C$)*
na Stacji H. Arctowskiego i Lodowcu Ekologii w 1996 r.

Number of days with air temperature above $0^{\circ}C$ at the Arctowski Station and Ecology Glacier in 1996

	h m n.p.m.	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
HA	2	30	29	28	20	18	11	11	14	20	22	25	29
LEM	2	30	29	28	20	18	10	13	14	19	22	24	-
LE1	71	29	29	27	20	17	7	12	13	18	20	23	-
LE2	170	28	27	25	16	13	5	12	11	16	12	19	-
KW	~ 450	-	-	-	-	-	-	-	0	3	-	-	-

* - dni te obejmują: dni ciepłe ($t_{min} \geq 0^{\circ}C$) i dni przymrozkowe ($t_{max} \geq 0^{\circ}C$ i $t_{min} < 0^{\circ}C$)

Liczba dni z dodatnimi temperaturami powietrza maleje z wysokością. W czerwcu na wysokości 170 m n.p.m. (LE2) było ich 5 podczas gdy na poziomie morza - 11. Dane dla sierpnia pokazują, że na wierzchołku kopuły nie wystąpiły dodatnie temperatury podczas gdy na stacji H. Arctowskiego w ciągu 14 dni temperatura przekroczyła $0^{\circ}C$. Największe ubytki masy śniegu występowały przy znacznych odwilżach, których zanotowano kilka w ciągu zimy. Na przykład, w dniu 5 sierpnia temperatura osiągnęła $5.8^{\circ}C$ na Stacji H. Arctowskiego, $3.3^{\circ}C$ na LE2, natomiast na kopule była ujemna ($-0.6^{\circ}C$). Tak wysokie temperatury doprowadziły do intensywnego topnienia śniegu, zwłaszcza w dolnej partii lodowca, podczas gdy na kopule nie stwierdzono śladów ablacji.

Sumy opadów atmosferycznych na Lodowcu Ekologii w okresie od 21 marca do 10 grudnia 1996 r. wyniosły na stanowisku LE1 278.3 mm, a na stanowisku LE2 - 327.3 mm. W tym samym okresie na Stacji H. Arctowskiego zmierzono 343,1 mm opadu, czyli więcej niż na lodowcu. Na Stacji H. Arctowskiego część wód opadowych pochodzi z Zatoki Admiralicji, skąd silne wiatry wywiewają znaczne ilości wody morskiej na nizinę, na której założono stację. Opady atmosferyczne w analizowanym okresie były bardzo

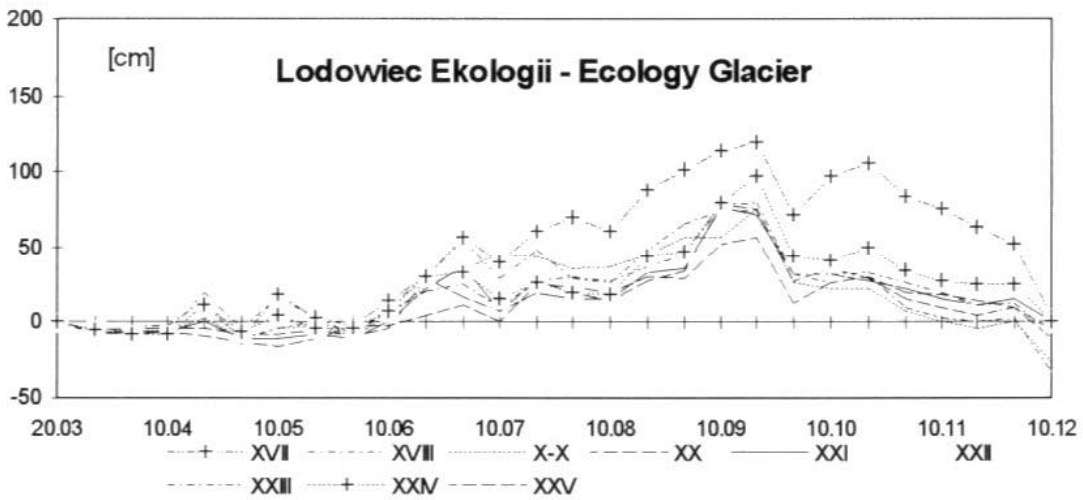
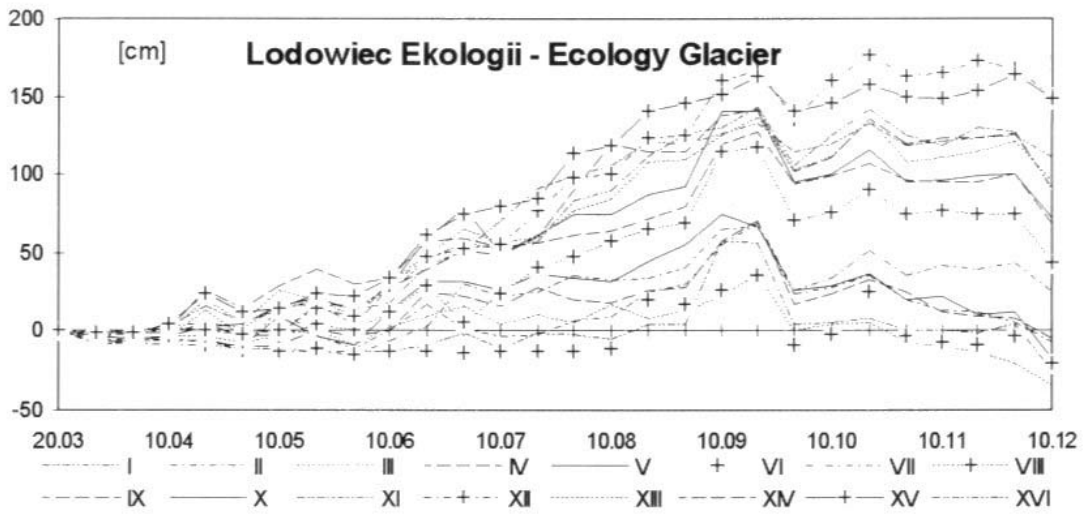
nierównomiernie rozłożone w czasie (ryc. 2). W kwietniu i maju miesięczne sumy opadów sięgały zaledwie 20 mm, dopiero w lipcu i we wrześniu opady były wydajniejsze (50-60 mm). Znalazło to swoje potwierdzenie w przyroście pokrywy śnieżnej. Jednak ze względu na działalność wiatru (wywiewanie i akumulację śniegu) oraz liczne odwilże zależność ta jest silnie zaburzana.

Obliczając pionowy gradient opadów na Lodowcu Ekologii, pomiędzy LE1 i LE2, otrzymujemy 49.0 mm na 100 m różnicy wysokości w okresie 8 miesięcy. Wobec tego można założyć, że sumy roczne opadów pomiędzy tymi stanowiskami będą się różniły o ok. 65 mm, co daje gradient 65 mm/100 m wysokości. Bryazgin i Govorucha (1986) oraz Zamoruev (1972) szacują ten gradient na około 150-170 mm/100 m, czyli ponad 2-krotnie wyższy. Wydaje się, że mniejszy pionowy gradient opadów atmosferycznych zmierzony na Lodowcu Ekologii wynika z uwarunkowań lokalnych - z położenia lodowca po zawietrznej stronie Wyspy Króla Jerzego względem dominującej w tym rejonie cyrkulacji zachodniej. Przyjmując 65 mm/100 m jako roczny pionowy gradient opadów atmosferycznych na Kopule Warszawy (476 m n.p.m.) opady powinny być wyższe o ponad 300 mm niż na poziomie morza i w 1996 r. można je oszacować na około 800-900 mm.

Akumulacja śniegu

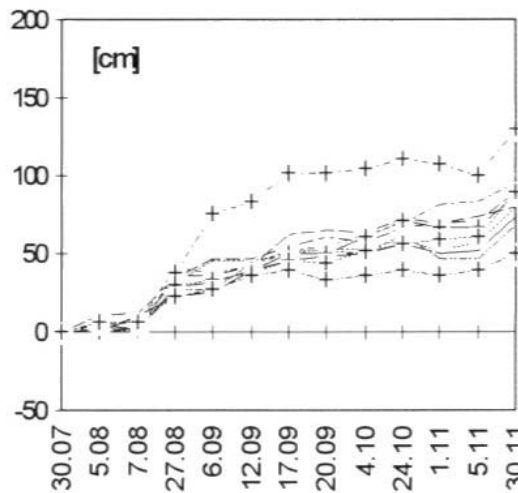
Pomiary akumulacji śniegu na Lodowcu Ekologii rozpoczęto pod koniec lata (21 marca), w końcowej fazie ablacji, która doprowadziła do całkowitego stopnienia śniegu do wysokości ok. 350-400 m n.p.m. Według Piaseckiego (1988) strefa ablacji w rejonie Zatoki Admiralicji sięga ok. 140 m n.p.m., a w rejonie Półwyspu Fieldes ok. 170 m n.p.m. (Bryazgin i Govorucha, 1986). Tak duże różnice wynikają z faktu, że na przełomie 1995/96 r. wystąpiło wyjątkowo długie i ciepłe lato. Dodatkowo temperatury powietrza na Stacji H. Arctowskiego notowano już od listopada 1995 r. (Kruszewski, 1996).

Koniec ablacji w niektórych punktach pomiarowych nastąpił dopiero na początku czerwca. Największa ablacja, od momentu rozpoczęcia pomiarów, wystąpiła na czole lodowca (tyczka II - 15 cm) i na wzniesieniach (VI - 15 cm) - tab. 3, ryc. 3. W miarę wzrostu wysokości, ablacja była coraz mniejsza i szybciej zaczęła dominować akumulacja. W pierwszym okresie akumulowania śniegu na lodowcu jest on zwiewany przez wiatr i osadzany w szczelinach oraz w obniżeniach jakie powstały w czasie ablacji letniej.



**Kopuła Warszawy
Warszawa Icefield**

- +--- XXVI
- +--- XXVII
- +--- XXVIII
- +--- XXIX
- +--- XXX
- +--- XXXI
- +--- XXXII
- +--- XXXIII
- +--- XXXIV
- +--- XXXV
- +--- XXXVI



Ryc. 3. Akumulacja śniegu na Lodowcu Ekologii i Kopule Warszawy

Fig. 3. Accumulation of snow (cm) on Ecology Glacier and Warszawa Icefield

Maksymalna miąższość śniegu wystąpiła w dolnej partii lodowca 20 września i sięgała 60-70 cm, na wzniesieniach była jeszcze niższa i wynosiła zaledwie 30-40 cm (tyczka III i VI). W wyższych partiach lodowca akumulacja trwała dalej i maksymalne jej wartości wystąpiły w październiku, np. przy XII tyczce było 177 cm śniegu w dniu 21 października, a przy XV tyczce maksimum wystąpiło 30 listopada (164 cm). Ostatnia tyczka w profilu, zlokalizowana na największej wysokości, ale na wzniesieniu, nie odznaczała się najgrubszą pokrywą śnieżną.

Tabela 3 - Table 3

Akumulacja śniegu [cm] na Lodowcu Ekologii w okresie od 21 marca do 10 grudnia 1996 r.
Accumulation of snow [cm] on Ecology Glacier in the period 21 March-10th December 1996

T	h	21.03	1.04	1.05	1.06	1.07	1.08	1.09	1.10	1.11	1.12	10.12	Min	Max
Profil podłużny - Profile longitudinal														
I	64.0	0	-6	-11	-13	-1	-20	5	5	14	4	-25	-25	58
II	72.3	0	-7	-12	-15	30	35	41	24	20	6	-7	-15	67
III	85.7	0	-7	-4	-8	16	6	14	1	-7	-20	-35	-35	37
IV	91.3	0	-6	-10	-4	23	20	28	17	25	8	-5	-10	70
V	101.9	0	-5	-10	-8	31	34	55	27	20	12	-17	-17	74
VI	114.3	0	-5	-13	-15	-14	-12	17	-8	-3	-4	-20	-20	35
VII	118.7	0	-6	-11	-11	2	7	30	27	36	43	25	-11	69
VIII	122.0	0	-5	-7	0	6	47	69	70	74	74	43	-7	117
IX	130.4	0	-1	-4	5	51	90	115	102	120	126	90	-4	142
X	142.1	0	-5	4	13	78	75	93	95	95	100	72	-5	141
XI	153.6	0	0	2	16	56	83	126	106	125	127	90	-1	143
XII	165.5	0	-2	-2	10	52	98	125	135	163	168	150	-2	177
XIII	177.6	0	0	6	9	65	77	109	103	108	121	95	0	136
XIV	188.3	0	0	15	30	59	61	80	94	97	100	68	-1	128
XV	201.3	0	-1	12	22	75	113	145	140	150	100	164	-1	164
XVI	217.3	0	0	6	14	51	99	120	115	118	125	110	-1	133
Profil poprzeczny - Profile cross														
XVII	43.2	0	-7	-10	-2	56	70	102	72	84	53	3	-10	120
XVIII	56.6	0	-6	-3	-8	55	29	66	32	10	3	-33	-33	75
XIX	67.3	0	-5	-10	-9	36	36	57	27	7	0	-27	-27	76
XX	74.9	0	-3	-8	-9	17	19	35	28	15	10	-5	-9	78
XXI	74.7	0	-6	-10	-10	37	16	36	32	23	13	0	-10	77
XXII	72.3	0	-7	-12	-15	30	35	41	24	20	4	-7	-15	67
XXIII	73.4	0	-2	-10	-8	25	30	45	32	27	13	-7	-10	80
XXIV	72.8	0	-7	-6	-4	33	20	47	44	35	25	0	-7	97
XXV	73.3	0	-7	-13	-2	11	24	29	13	20	10	-10	-16	57

T - tyczka - stakes, h - m n.p.m. - m a.s.l

W profilu poprzecznym najwięcej śniegu (do 120 cm) gromadziło się po północnej stronie lodowca, w obniżeniu na kontakcie lodowca z moreną boczną. Znacznie mniejsze miąższości śniegu notowano w centralnej części profilu i po stronie południowej (57 cm). Wynika to ze zwiewania śniegu w kierunku moren po północnej stronie lodowca przez częste wiatry południowe.

Akumulacja śniegu nie odbywała się bez zakłóceń. W przebiegu wystąpiły znaczne przyrosty pokrywy śnieżnej po opadach śniegu oraz duże jej ubytki spowodowane odwilżami lub przenoszeniem śniegu przez wiatr. Po odwilży w trzeciej dekadzie września (temperatury powietrza przekraczały 6°C) ubyło na czole lodowca od 36 do 51 cm, a w górnej części profilu od 18 do 45 cm śniegu. Ociepleniu towarzyszyły opady deszczu. Na Kopule Warszawy w tym samym czasie padał śnieg dlatego też zanotowano dalszy przyrost jego miąższości.

Za rozpoczęcie ablacji pozimowej przyjęto moment po maksimum akumulacji. Dla większości punktów nastąpiło to ok. 20 września, w górnej partii lodowca zaznaczył się jeszcze obfity opad śniegu w drugiej dekadzie października, po którym i tam rozpoczęła się silna ablacja. W momencie zakończenia pomiarów (10 grudnia) śnieg zimowy całkowicie się stopił do wysokości 115 m n.p.m. (VI tyczka), a ablacja objęła nawet lód lodowcowy do głębokości 35 cm (tyczka III). W górnych partiach lodowca śnieg się topił ale pozostało go jeszcze od 25 cm (VII) do 150 cm (XII).

Na Kopule Warszawy przez cały okres od 30 lipca do 30 listopada przybywało śniegu. Maksymalne przyrosty pokrywy śnieżnej sięgały od 68 do 130 cm, w tym samym czasie na Lodowcu Ekologii maksymalnie przybyło od 31 do 79 cm śniegu. Akumulacja na kopule jest więc dwukrotnie wyższa. Także i tu największe miąższości śniegu nie występują na wierzchołku kopuły, ale na płaskiej powierzchni na jej wschodnim skłonie (tab. 4, ryc. 3).

Zakumulowany śnieg podlega procesom transformacji. Ze względu na częste odwilże sięgające do wysokości 200-300 m n.p.m. na Lodowcu Ekologii dominuje transformacja śniegu w lód z udziałem wody (transformacja mokra). W głębszych warstwach śniegu oraz przy ustaniu odwilży zachodzi firnizacja, która zaznacza się w profilu w postaci warstw i soczewek lodu. Zjawisko to można zaobserwować na diagramach przedstawiających stan pokrywy śnieżnej na Lodowcu Ekologii w dniu 28 października. Miąższość pokrywy śnieżnej wahała się od zaledwie 16-20 cm na czole lodowca do 177 cm na wysokości 166 m n.p.m. i 134 cm na wysokości 217 m n.p.m.

(ryc.4). W dolnej partii lodowca wystąpiło już zjawisko ablacji, w związku z czym na powierzchni stwierdzono kilkucentymetrową warstwę mokrego śniegu. Głębiej śnieg był ziarnisty z wkładkami lodu. W profilach leżących powyżej 200 m n.p.m. zaznaczała się warstwa świeżego śniegu (o maksymalnej miąższości do 45 cm - tyczka XII). W profilach można wyróżnić kilkucentymetrowej grubości warstwy lodu, które powstały w czasie odwilży. Na wysokości 122 m n.p.m. są cztery takie warstwy, a powyżej tylko trzy. Powstały one prawdopodobnie w czasie kilkakrotnych odwilży jakie miały miejsce w lipcu i sierpniu 1996 r.

Tabela 4 - Table 4

Akumulacja śniegu [cm] na Kopule Warszawy w okresie od 30 lipca do 30 listopada 1996

Accumulation of snow [cm] on Warszawa Icefield
in the period 30th July - 30th November 1996

T	30.07	5.08	7.08	27.08	6.09	12.09	17.09	20.09	4.10	24.10	1.11	5.11	30.11
XXVI	0	1	1	27	28	44	52	52	50	62	47	47	68
XXVII	0	2	2	38	76	83	102	102	104	111	107	100	130
XXVIII	0	4	7	32	45	46	50	53	53	59	52	57	80
XXIX	0	10	12	35	47	47	55	60	58	66	70	71	90
XXX	0	5	2	29	32	39	50	50	60	71	67	66	88
XXXI	0	0	1	34	37	46	60	60	63	70	75	70	102
XXXII	0	5	6	41	38	43	51	55	62	70	82	83	95
XXXIII	0	0	1	31	34	38	45	44	52	56	59	60	90
XXXIV	0	1	2	37	37	42	62	65	64	72	70	75	80
XXXV	0	0	11	22	26	40	45	48	50	56	50	52	75
XXXVI	0	6	6	22	28	37	40	34	37	40	36	40	50

T - tyczki - Stakes

Średnia gęstość zakumulowanego śniegu wahała się od 365 kg/m³ do 478 kg/m³ (tab. 5). Większe gęstości śniegu występują u czoła lodowca oraz na wyniesieniach, w miejscach gdzie występowała silniejsza ablacja i intensywniejsze wywiewanie śniegu. Pobrane w dniu 28 października 1996 r. próby na zawartość wody w warstwie zgromadzonego śniegu wykazały znaczne zróżnicowanie zasobów wody na obszarze lodowca (tab. 5).

Ekwiwalent wody zgromadzonej w śniegu przy maksymalnej miąższości pokrywy śnieżnej można porównać z zimowym bilansem masy Lodowca Ekologii. Bilans ten różnie się kształtuje w zależności od wysokości

nad poziom morza oraz sytuacji morfologicznej. Najniższe jego wartości występują u czoła lodowca (84.9 mm) oraz na wyniesieniach (76.4 mm), maksymalne wartości natomiast nie wystąpiły przy najwyżej położonej tyczce ale stoku po zawietrznej stronie wyniesienia (645.4 mm na wysokości około 170 m n.p.m).

W stosunku do sum opadów atmosferycznych (od 21.03 do 31.10) wartości zimowego bilansu znacznie się różnią. U czoła lodowca - w punkcie LE1 - w śniegu zgromadzone było 141.5 mm wody podczas gdy suma opadów wyniosła 230.0 mm. Na stanowisku LE2 ekwiwalent wodny przewyższa ponad dwukrotnie sumę opadów, których suma wyniosła 270.3 mm. Średnio (dane z 6 stanowisk) na obszarze Lodowca Ekologii zakumulowało się około 306 mm wody w postaci śniegu. Jest to wartość o około 50 mm wyższa niż suma opadów (średnia obliczona z LE1 i LE2) w tym okresie. Nadwyżka ta wynika z transportu śniegu z wyższych partii Kopuły Warszawy przez dryf wiatrowy.

Tabela 5 - Table 5

Gęstość oraz ekwiwalent wodny śniegu w wybranych profilach na Lodowcu Ekologii (28.10.1996 r.)

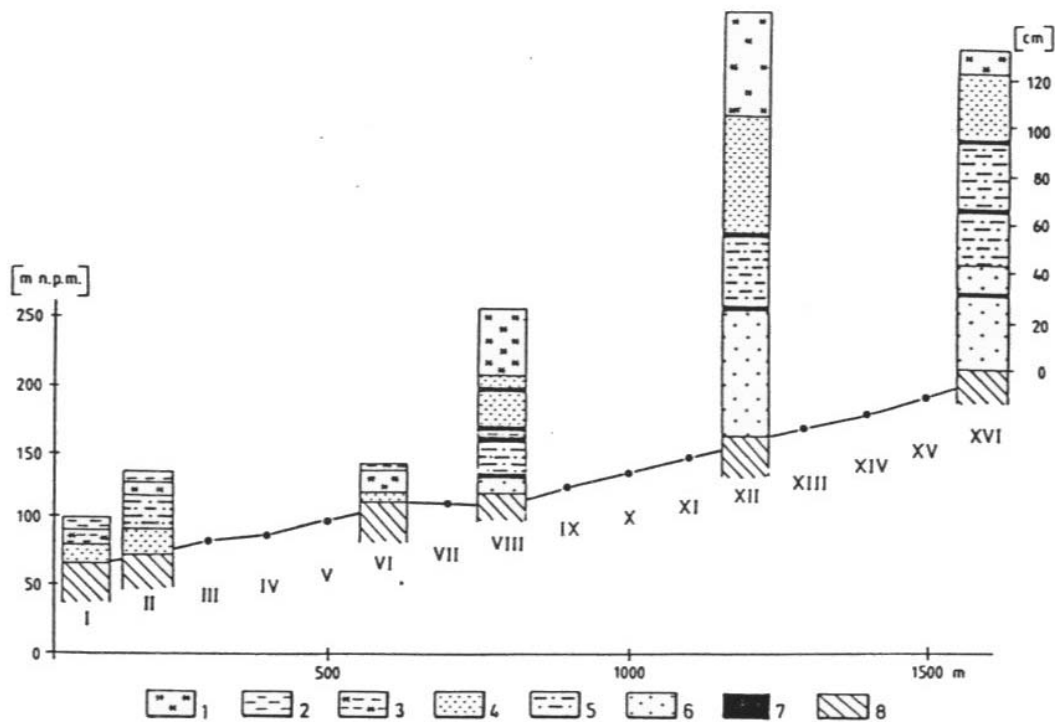
Density and water equivalent of snow of selected profiles on Ecology Glacier (28.10.1996 r.)

Parametr Parameter	Tyczki - Stakes					
	I	II	VI	VIII	XII	XVI
Wysokość [m n.p.m.] - Altitude [m a.s.l.]	63.9	72.3	114.5	122.0	165.5	217.3
Pokrywa śnieżna - Snow cover [cm]	20	36	16	76	177	134
Gęstość śniegu - Density of snow [kg/m ³]	424	393	478	425	365	422
Ekwiwalent wody - Water equivalent [mm]	84.9	141.5	76.4	322.7	645.4	566.2
Opad atmosferyczny - Precipitation [mm] 21.03-31.10.1996	-	230.0	-	-	270.3	-

Zależność akumulacji śniegu od warunków pogodowych

Stan pokrywy śnieżnej zależy od wielu przeciwstawnie działających czynników. W warunkach klimatycznych Wyspy Króla Jerzego szczególną rolę odgrywa transport śniegu przez wiatr, który znacznie modyfikuje pokrywę śnieżną niezależnie od warunków atmosferycznych: zachmurzenia, usło-

niecznienia, temperatury i opadów atmosferycznych. Dlatego też prosta zależność między sumami opadów atmosferycznych a dekadowymi zmianami miąższości pokrywy śnieżnej nie znajduje potwierdzenia w analizowanym okresie. Jedynie dla pierwszej fazy akumulacji, gdy przyrasta systematycznie miąższość pokrywy śnieżnej, występują istotne związki statystyczne, dla stanowiska LE2 współczynnik korelacji liniowej Pearsona wynosi 0.597, ale dla stanowiska na czołę LE1 zależność ta nie jest istotna statystycznie. Stwierdzono natomiast negatywny związek akumulacji i ablacji z usłonecznieniem ($r = -0.506$ dla LE1 i -0.481 dla LE2) oraz z temperaturą powietrza, dla LE1 $r = -0.526$ a dla LE2 $r = -0.492$.



Ryc. 4. Profile śniegowe na Lodowcu Ekologii (28 października 1996 r.)
Fig. 4. Profiles of snow on Ecology Glacier (28th October 1996)

1 - śnieg świeży, 2 - śnieg topniejący, 3 - śnieg z wkładkami lodu, 4 - śnieg drobnoziarnisty, 5 - śnieg drobnoziarnisty z wkładkami lodu, 6 - śnieg średnio i gruboziarnisty, 7 - warstwy lodu z ablacji, 8 - lód lodowcowy

Podsumowanie

Akumulacja śniegu na Lodowcu Ekologii w 1996 r. rozpoczęła się u czoła lodowca dopiero pod koniec maja, podczas gdy na wysokości powyżej 150 m n.p.m. śnieg zaczął się gromadzić już w I dekadzie kwietnia. Miąższość pokrywy śnieżnej zgromadzonej w okresie zimowym na Lodowcu Ekologii wykazuje znaczne zróżnicowanie przestrzenne uzależnione od wysokości n.p.m. i sytuacji morfologicznej lodowca. Maksymalne miąższości pokrywy śnieżnej sięgały od 58 cm u czoła lodowca i 35 cm na wzniesieniach do 177 cm. W warunkach klimatu subantarktycznego, z częstymi zmianami kierunku adwekcji i napływu różnych mas powietrza, proces akumulacji jest przerywany przez częste odwilże prowadzące do wystąpienia silnej ablacji. W momencie wystąpienia maksymalnej miąższości pokrywy śnieżnej (28 października) w śniegu było zgromadzone od 84.9 mm wody u czoła lodowca i 76.4 mm na wyniesieniach do 645.4 mm na wysokości około 170 m n.p.m. Wartości te różnią się w stosunku do zmierzonych sum opadów atmosferycznych. Wynika to z przenoszenia ogromnych mas śniegu przez wiatr. Od września (u czoła lodowca) i października (w wyższych partiach lodowca) rozpoczęła się ablacja. W momencie zakończenia badań (10 grudnia) śnieg zimowy całkowicie się stopił do wysokości 115 m n.p.m. i ablacja objęła nawet lód lodowcowy do głębokości 35 cm. W górnych partiach lodowca śnieg się topił ale pozostało go jeszcze od 25 cm do 150 cm.

Na Kopule Warszawy przez cały okres badawczy występowała akumulacja śniegu, nie przerywana okresami ablacji, które stwierdzono w niższych partiach lodowca. W okresie od 30 lipca do 30 listopada na Kopule przybyło od 68 do 130 cm śniegu.

Literatura

Bintanja R., 1995, The local energy balance of the Ecology Glacier, King George Island Antarctica: measurements and modelling, *Antarctic Science* 7 (3).

Bryazgin N.N., Govorucha L.S., 1986, Osobiennosti klimata i sovremiennogo oledeniya o-va King Dzordz (Waterloo), Meteorologicheskie issledovaniya v Antarktike, Z. II, AANII, Leningrad.

Leszkiewicz J., Pulina M., 1996, Analiza zimowej pokrywy śnieżnej pod kątem wydzielenia faz sypania śniegu (Lodowiec Hansa, region Hornsundu), Spitsbergen, *Problemy Klimatologii Polarnej* 5, Toruń.

Martianov V., Rakusa-Suszczewski S., 1990, Ten years of climate observations at the Arctowski and Bellingshausen station (King George Is., South Shetlands, Antarctic), w: *Global Change Regional Research Centres: Scientific Problems and Concept Developments*, Warszawa.

Noble H., 1965, Glaciological observations at Admiralty Bay, King George Island in 1957-58. British Antarctic Survey Bulletin No 5, Cambridge.

Piasecki J., 1984, Sprawozdanie z badań glacioklimatycznych na lodowcach szetlandzkich w rejonie Zatoki Admiralicji w lecie 1978/79 r. Biul. Met. 29 (4).

Piasecki J., 1988, Wybrane problemy przebiegu elementów meteorologicznych w regionie lodowca Sphinx, Acta Univ. Wratisl. No 738, Wrocław.

Rachlewicz G., 1995, Ablacja Lodowca Ekologii, Wyspa Króla Jerzego (Szetlandy Południowe) w roku 1991, XXII Sympozjum Polarne, Wrocław, Książ.

Rodriguez R., Llasat C.M., Rakusa-Suszczewski S., 1996, Analysis of the mean and extreme temperature series of the Arctowski Antarctic Base, Problemy Klimatologii Polarnej 6, Gdynia.

Zamoruev V.V., 1972, Rezultaty glaciologicheskikh nabludenij na Stancii Belingshausen v 1968 g., Trudy SAE, t. 55.

ACCUMULATION OF SNOW ON ECOLOGY GLACIER (KING GEORGE ISLAND, SOUTH SHETLAND ISLANDS, ANTARCTICA) IN 1996

Summary

The accumulation of snow was investigated on Ecology Glacier and Warszawa Icefield (King George Island) over the period 21.03-10.12.1996 (Fig. 1). 36 measurement stakes were installed to measure the thickness of the snow cover (Tab. 2 and 3). In 1996 positive air temperature anomalies occurred (Tab. 1). On the Ecology Glacier the gradient of the air temperature was $1.0^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ while that one of the atmospheric precipitation 65 mm in 100 m. In 1996 the ablation zone on the Ecology Glacier reached to 350-400 m a.s.l. The accumulation of the snow began at the upper part of the glacier (above 150 m n.p.m.) at the beginning of April and at the snout of the glacier at the end of May. The maximum of the snow cover thickness reached 58 cm at the snout of the glacier and 35 cm on the uplands up to 177 cm (Tab. 2, Fig. 2). The accumulation process was disturbed by frequent thawing (Fig. 2) and by snow drift. At the moment of the maximal snow cover thickness (28th October) the amount of water accumulated in the snow was 84.9 mm at the snout of the glacier, 76.4 mm on the uplifts up to 645.4 mm at the heights about 170 m a.s.l. (Tab. 5). From September (at the snout) and October (at the upper part of the glacier) the ablation began. At the time of the last investigation (10 December) the entire winter snow had melted to 115 m n.p.m. height and the ablation had concerned even the glacial ice to 35 cm depth. At the upper part of the glacier the snow melted but there still remained a layer from 25 cm to 150 cm. On the Warszawa Icefield snow accumulation could be observed during the whole research period in the period from 30 July till 30 i November the snow thickness grew 68-130 cm (Tab. 4, Fig 3).