

**CHARAKTERYSTYKA ZMIENNOŚCI ODPLYWU  
ARKTYCZNEJ RZEKI LODOWCOWEJ W SEZONIE LETNIM  
NA PRZYKŁADZIE RZEKI WALDEMARA, SVALBARD**

RUNOFF VARIABILITY IN THE SUMMER SEASON OF PROGLACIAL ARCTIC RIVER  
ON THE SAMPLE OF THE WALDEMAR RIVER, SVALBARD

Marcin Nowak, Ireneusz Sobota

Stacja Polarna UMK, Katedra Hydrologii i Gospodarki Wodnej, Wydział Nauk o Ziemi,  
Uniwersytet Mikołaja Kopernika, ul. Lwowska 1, 87-100 Toruń  
mnowak@umk.pl

**Zarys treści.** W pracy przedstawiono wybrane elementy zmienności odpływu Rzeki Waldemara (Svalbard) w sezonie letnim 2014 roku. Przeprowadzone badania stanowią kontynuację pomiarów trwających nieprzerwanie od 1996 roku. Przeanalizowano zmienność w sezonie (na podstawie uśrednionych danych dobowych) oraz zmienność w ciągu doby (na podstawie danych godzinowych). Wybrane elementy odpływu nawiązano do przebiegu wybranych elementów meteorologicznych, zarówno w ujęciu ich wpływu na kształtowanie przepływu w sezonie letnim, jak i nagłych zdarzeń znacznie modyfikujących odpływ. W okresie pomiarowym średni przepływ wyniósł  $0,72 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  i wahał się od  $0,11$  do  $1,85 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . Zmienność odpływu była powiązana głównie z trzema zmiennymi meteorologicznymi: temperaturą powietrza, opadem atmosferycznym i wilgotnością względną. W sezonowym rytmie odpływu stwierdzono zmniejszenie przepływów wraz z czasem. Dobowy rytm odpływu wykazywał cechy typowe dla rzek lodowcowych: maksimum natężenia przepływu występowało w godzinach popołudniowych, minimum zaś w godzinach porannych. Zmienność odpływu Rzeki Waldemara w sezonie letnim 2014 roku była znacznie modyfikowana dwoma epizodami opadowymi, które wystąpiły w drugiej dekadzie lipca oraz w ostatnich dniach sierpnia.

**Słowa kluczowe:** odpływ proglacjalny, zmienność odpływu, relacje hydrometeorologiczne, rzeki lodowcowe, Kaffiøyra, Svalbard.

## 1. Wstęp

Lodowce i wieloletni śnieg gromadzą około 70% światowych zasobów wody słodkiej, stanowiąc ważną część globalnego cyklu hydrologicznego (Shiklomanov 1999). Wiedza o przebiegu procesów zachodzących w zlewniach zlodowaconych jest ważna nie tylko dla nauk hydrologicznych. Efekty oddziaływania tych procesów nie ograniczają się przestrzennie jedynie do skali lokalnej. Współcześnie w obrębie większości tych obszarów obserwuje się dynamiczne zmiany w zakresie intensywności zjawisk, które je kształtują (UNEP 2007, Sobota 2013). Powszechnie zwraca się uwagę na powiązania hydrologii glacialnej z zagadnieniami o wymiarze praktycznym i naukowo-poznawczym (Jansson i in. 2003, UNEP 2007, Bennet i Glasser 2009). Aktualnie są to problemy szacowania zasobów wodnych na potrzeby zaopatrzenia w wodę pitną, dostaw wody do hydroelektrowni i nawadniania pól uprawnych. Ważnym problemem jest również poznanie wpływu procesów związanych z występowaniem

i oddziaływaniem wody pochodzenia lodowcowego na dynamikę systemów glacialnych oraz bilans masy lodowców, dynamikę procesów morfogenetycznych (w tym również na obszarach peryglacialnych) czy charakterystykę i zmiany interakcji systemu lód-łód-ocean. Wszystkie te zagadnienia wymuszają stałą potrzebę poszukiwania elastycznych i wydajnych metod identyfikacji, charakteryzowania oraz prognozowania złożonych procesów znajdujących się na pograniczu glaciologii, hydrologii oraz klimatologii czy geomorfologii. Jednym z najistotniejszych zjawisk o takim charakterze jest występujący lub nasilający się jedynie w okresie sezonu letniego odpływ wody z systemów lodowcowych poza obszary zlodowacone.

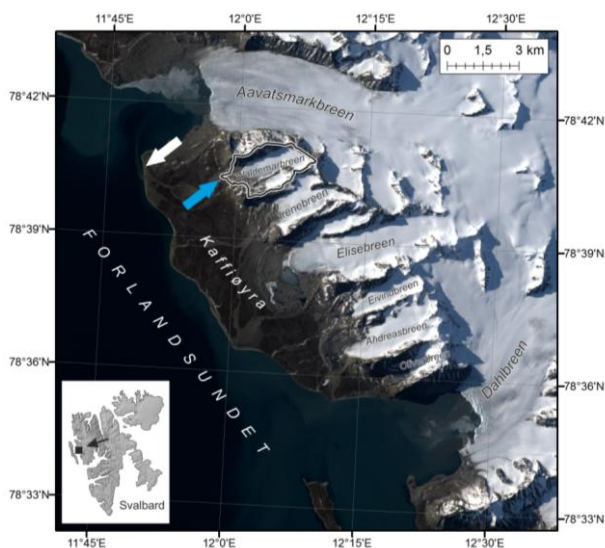
Opracowania dotyczące wielkości i zmienności odpływu proglacialnego oraz jego modelowania często nawiązują do relacji między zmiennymi meteorologicznymi i ablacją lodowców oraz bilansem ich masy (m.in. Hock 1998, 2005; Englehardt 2013). Warto nadmienić, że w tym zakresie w odniesieniu do obszaru Spitsbergenu ważny udział stanowią badania polskie (m.in. Baranowski 1977, Jania 1994, Leszkiewicz 1987, Piasecki 1988, Bartoszewski 1991, 1998; Sobota 1997a, 1997b, 1998, 2000, 2004, 2005, 2007, 2013; Wójcik i in. 1999, Szafranec 2002, Bartoszewski i in. 2004, Migala i in. 2006, 2007, 2008; Głowacki 2007, Rachlewicz 2007, 2009; Małecki 2013, 2015).

Specyfika odpływu rzekami lodowcowymi wykazuje określone, charakterystyczne cechy, które wyraźnie odróżniają je od rzek położonych na obszarach niezlodowaconych (m.in. Pardé 1957, Østrem 1973, Leszkiewicz 1987, Bartoszewski 1998, Jania 1997, Rachlewicz 2007, Sobota i in. 2010, Sobota 2013). Około 80-90% rocznego odpływu przypada na okres letni, tj. sezon ablacyjny. Rzeki lodowcowe wykazują również specyficzną zmienność odpływu zarówno w ciągu doby, sezonowej jak i wieloletniej. Dobowy i sezonowy rytm odpływu są formowane przez nałożenie na siebie szybkiego spływu powierzchniowego w obrębie lodowca z wolnym odpływem o charakterze sub- lub inglacialnym (Jansson i in. 2003). Kształt sezonowego hydrogramu rzeki lodowcowej zależy głównie od czynników meteorologicznych: czynnika termiczno-radiacyjnego, opadów atmosferycznych oraz zjawisk epizodycznych (np. efektu fenowego). Opisane elementy pozostają ścisłym związkiem ze stanem hydrologicznym systemu lodowcowego, tj. rozległością pokrywy śnieżnej oraz drożnością jego systemu drenażu (Sobota i Nowak 2012).

Głównym celem niniejszego opracowania jest wskazanie najważniejszych cech hydrologicznych sezonu letniego 2014 roku. W związku ze specyfiką rytmu odpływu rzek lodowcowych analizę przeprowadzono zarówno w odniesieniu do średnich dobowych wartości przepływu, jak i do wartości godzinowych. W pracy przeanalizowano zmienność odpływu w sezonie letnim oraz odniesiono ją do przebiegu wybranych warunków meteorologicznych. W zakresie opisu zmienności wewnątrzdobowej celem pracy było wskazanie kierunków ewolucji natężenia przepływu. Kolejnym celem pracy było przedstawienie przebiegu znacznych wezbrań opadowych zaobserwowanych w trakcie prowadzenia badań.

## **2. Obszar i metody badań**

Zlewnia Rzeki Waldemara jest położona na obszarze NW Spitsbergenu, w regionie nadmorskiej równiny Kaffiøyry (ryc. 1). Profil hydrometryczny zlokalizowany w miejscu ujścia rzeki poza strefę marginalną lodowca, na wysokości 75 m n.p.m. zamyka zlewnię o powierzchni 5,0 km<sup>2</sup>, której stopień zlodowacenia wynosi 48%. Miejsce to ma charakter przelomu wyciętego w wale morenowym nałożonym na podniesiony próg skalny (Sobota 2014), a rzeka płynie tu jednym, zwartym korytem. W ostatnich latach jest to jedyny punkt, w którym obserwuje się odpływ powierzchniowy ze zlewni.



Ryc. 1. Lokalizacja zlewni Rzeki Waldemara (niebieska strzałka – profil hydrometryczny, biała strzałka – automatyczna stacja pogodowa) (Sobota i in. 2016, zmienione)

Fig. 1. Waldemar River catchment localization (blue arrow – hydrometric profile, white arrow – automatic weather station) (Sobota et al. 2016, modified).

Lodowiec Waldemara stanowiący główne źródło zasilania rzeki jest niewielkim lodowcem dolinym typu alpejskiego. Od czasu maksymalnej transgresji w okresie Małej Epoki Lodowcowej jego powierzchnia zmniejszyła się o ponad 31% (Sobota i in. 2016). Na podstawie bezpośrednich pomiarów temperatury lodu (Sobota 2009) oraz obecności względnie dużych płyt lodu nalodziowego na przedpolu Lodowca Waldemara (Sobota 2016) stwierdzono, że jest on lodowcem politermalnym. W roku 2014 zajmował powierzchnię 2,4 km<sup>2</sup>. Najniższe części jego czoła były położone na wysokości 130-140 m n.p.m., najwyższe partie strefy akumulacyjnej zaś sięgały wysokości 570-590 m n.p.m.

Warto nadmienić, że przeprowadzone badania są kontynuacją prac rozpoczętych w 1977 roku (Szczepanik 1993) i trwających nieprzerwanie od 1996 roku (Sobota 2013).

W zakresie badań terenowych przeprowadzono ciągły monitoring zmienności odpływu ze zlewni oraz przebiegu wybranych elementów meteorologicznych. Pomiary prowadzono w okresie 13.07-31.08 2014 r. (n = 50 dni). Wahania stanów wody w rzece rejestrowano za pomocą limnimetru OTT Thalimedes w interwale 15-minutowym z rozdzielczością 1 cm. W 1-2 dniowych odstępach dokonywano pomiarów natężenia przepływu z wykorzystaniem młynka hydrometrycznego Hega-II. Dane meteorologiczne wykorzystane w opracowaniu zostały pozyskane z automatycznej stacji pogodowej HOBO U30 zlokalizowanej na obszarze nadmorskim ok. 3 km w kierunku północno-zachodnim od profilu hydrometrycznego. Pozyskane dane uśredniono następnie do wartości godzinowych oraz dobowych.

Na podstawie zebranych danych przeprowadzono analizę:

- podstawowej charakterystyki hydrologicznej sezonu letniego 2014 r. oraz sezonowej zmienności odpływu w nawiązaniu do przebiegu warunków meteorologicznych na podstawie średnich dobowych,
- wewnątrzdobowej, periodycznej zmienności przepływu rzecznoego i jej ewolucji na podstawie średnich godzinowych,
- nieperiodycznych, nagłych wezbrań o genezie opadowej na podstawie średnich godzinowych.

W pierwszej części wykorzystano standardowe miary odpływu (średni, maksymalny i minimalny przepływ, objętość odpływu, warstwę odpływu, odpływ jednostkowy, odchylenie standardowe i auto-

korelacja 1. rzędu) oraz zbadano związki między poszczególnymi zmiennymi meteorologicznymi oraz wielkością odpływu ze zlewni uwzględniając wartości współczynnika liniowej korelacji Pearson'a ( $r$  wraz ze stopniem jego istotności  $p$ ).

W części drugiej przeanalizowano przebieg wartości następujących parametrów: współczynnika nieregularności  $\alpha$  (równanie 1), amplitudy względnej  $A$  (równanie 2), amplitudy rzeczywistej  $a$  (równanie 3) oraz wskaźnika zmienności  $\psi$  (równanie 4; za Korską 2006).

$$\alpha = \frac{Q_{\min}}{Q_{\max}} \quad (1)$$

$$A = \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{Q_{sr}} \quad (2)$$

$$a = Q_{\max} - Q_{\min} \quad (3)$$

$$\psi = \frac{s}{Q_{sr}} \quad (4)$$

gdzie:  $Q_{\min}$  – minimalny średni przepływ godzinowy w ciągu doby,  $Q_{\max}$  – maksymalny przepływ godzinowy w ciągu doby;  $Q_{sr}$  – dobową średnią arytmetyczną przepływów,  $s$  – odchylenie standardowe przepływów godzinowych w ciągu doby.

W odniesieniu do każdego z tych elementów obliczono trend liniowy oraz określono jego istotność statystyczną. Dodatkowo, za pomocą współczynnika korelacji  $r$  przeprowadzono analizę występowania liniowych relacji między opisanymi współczynnikami i wartościami parametrów meteorologicznych. W części trzeciej opisano dwa zaobserwowane wezbrania opadowe.

### 3. Wyniki badań

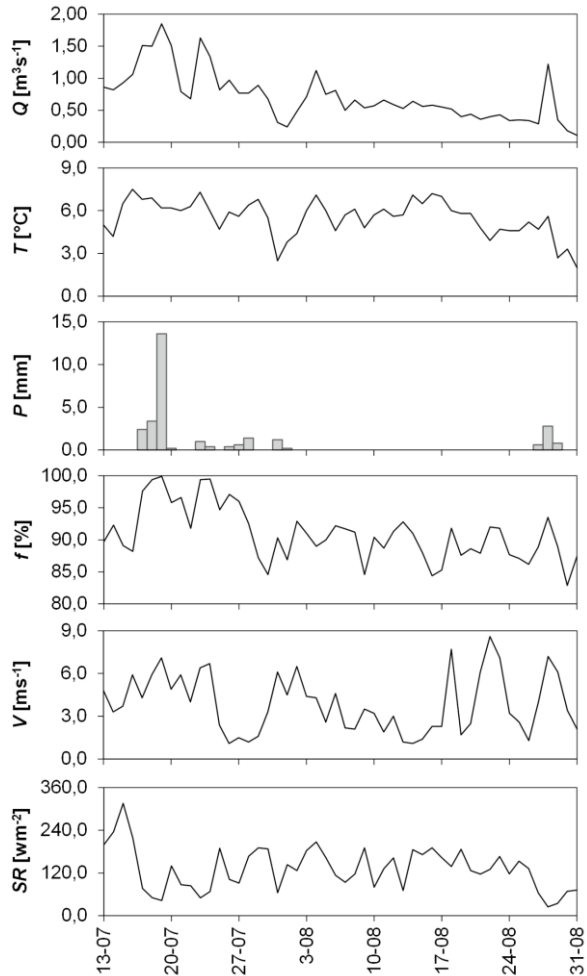
#### 3.1. Ogólna charakterystyka hydrologiczna sezonu letniego 2014 roku

Podstawową charakterystykę hydrologiczną sezonu letniego 2014 r. przedstawiono w tabeli 1. W okresie prowadzenia pomiarów (13.07-31.08) średnie natężenie przepływu wyniosło  $0,72 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . Największy przepływ dobowy ( $1,85 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ) wystąpił w dniu 19.07 i był on związany z rekordową w ciągu badanego sezonu dobową sumą opadów atmosferycznych (13,6 mm). Najniższy przepływ wystąpił w końcu sezonu pomiarowego (31.08) i wyniósł  $0,11 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . W analizowanym sezonie letnim odpływ całkowity ze zlewni (RV) wyniósł  $3\,110\,000 \text{ m}^3$ , co w ujęciu miar warstwy odpływu ( $H$ ) i odpływu jednostkowego ( $q$ ) dało wartości odpowiednio: 622,8 mm oraz  $144 \text{ dm}^3\text{s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ . Odchylenie standardowe średnich dobowych przepływów wyniosło  $0,40 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , współczynnik ich autokorelacji pierwszego rzędu ( $ar_1$ ) był równy 0,68. Opisane wartości mieszczą się w zakresie wyników badań prowadzonych we wcześniejszych latach (Sobota 2014, Nowak i Sobota 2015).

Hydrogram natężenia przepływu oraz zmienności wybranych elementów meteorologicznych przedstawiono na ryc. 2. Średnia temperatura powietrza w analizowanym okresie wyniosła  $5,5^\circ\text{C}$ , a suma opadów 29 mm. Rytm przepływu ( $Q$ ) nawiązywał do przebiegu trzech pierwszych zmiennych meteorologicznych: temperatury powietrza ( $T$ ), opadu atmosferycznego ( $P$ ) oraz wilgotności względnej ( $f$ ). Największe wezbrania wystąpiły w okresach deszczowych (wybrane dni lipca oraz koniec sierpnia) lub ciepłych (druga część pierwszej dekady sierpnia). Okres niżówki był związany z wystąpieniem niskiej temperatury powietrza (przełom lipca i sierpnia).

Ryc. 2. Zmienność dobowych wartości przepływu Rzeki Waldemara ( $Q$ ) oraz temperatury powietrza ( $T$ ), opadu atmosferycznego ( $P$ ), wilgotności względnej ( $f$ ), prędkości wiatru ( $V$ ) i promieniowania słonecznego ( $SR$ ) w sezonie letnim 2014 roku

Fig. 2. Variability of the daily values of Waldemar River discharge ( $Q$ ), air temperature ( $T$ ), precipitation ( $P$ ), relative humidity ( $f$ ), wind speed ( $V$ ) and solar radiation ( $SR$ ) in summer season 2014.



Tab. 1. Wybrane miary odpływu z glacialnej części zlewni Rzeki Waldemara w okresie 13.07-31.08.2014 r. ( $Q_{sr}$  – średni przepływ,  $Q_{max}$  – maksymalny przepływ,  $Q_{min}$  – minimalny przepływ,  $RV$  – objętość odpływu,  $H$  – warstwa odpływu,  $q$  – odpływ jednostkowy,  $\sigma$  – odchylenie standardowe,  $ar_1$  – autokorelacja 1. rzędu)

Table 1. Selected parameters of the Waldemar River runoff in 13.07-31.08.2014 period ( $Q_{sr}$  – mean discharge,  $Q_{max}$  – maximum discharge,  $Q_{min}$  – minimum discharge,  $RV$  – runoff volume,  $H$  – runoff layer,  $q$  – specific runoff,  $\sigma$  – standard deviation,  $ar_1$  – first-order autocorrelation).

Miara odpływu – Runoff parameter	Jednostka – Unit	Wartość – Value
$Q_{sr}$	$[m^3s^{-1}]$	0,72
$Q_{max}$	$[m^3s^{-1}]$	1,85
$Q_{min}$	$[m^3s^{-1}]$	0,11
$RV$	$[10^3 m^3]$	3 110,4
$H$	$[mm]$	622,8
$q$	$[dm^3s^{-1} km^{-2}]$	144,0
$\sigma$	$[m^3s^{-1}]$	0,40
$ar_1$	$[-]$	0,68

W stosunku do średnich dobowych natężenia przepływu wysokie wartości liniowej korelacji Pearsona ( $r$ ) uzyskano dla wilgotności powietrza (0,728), temperatury powietrza (0,600) oraz opadu atmosferycznego (0,554) – patrz tabela 2. Przepływ wykazywał słabą korelację z prędkością wiatru i promieniowaniem słonecznym (odpowiednio: 0,289 oraz -0,105). Dodatkowo, między wybranymi zmiennymi meteorologicznymi stwierdzono istotne statystycznie korelacje o charakterze przeciętnym.

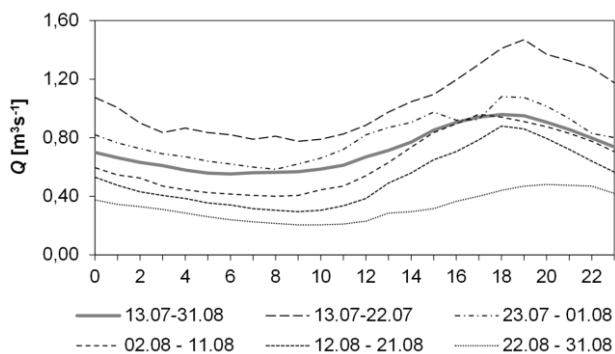
Tab. 2. Macierz korelacji między dobowymi wartościami przepływu Rzeki Waldemara ( $Q$ ), temperatury powietrza ( $T$ ), opadu atmosferycznego ( $P$ ), wilgotności względnej ( $f$ ), prędkości wiatru ( $V$ ) i promieniowania słonecznego ( $SR$ ) w sezonie letnim 2014 roku

Table 2. Correlation matrix for daily values of Waldemar River discharge ( $Q$ ), air temperature ( $T$ ), precipitation ( $P$ ), relative humidity ( $f$ ), wind speed ( $V$ ) and solar radiation ( $SR$ ) in summer season 2014.

	$Q$	$T$	$P$	$f$	$V$	$SR$
$Q$	1					
$T$	<b>0,600</b>	1				
$P$	<b>0,554</b>	0,116	1			
$f$	<b>0,728</b>	0,262	<b>0,457</b>	1		
$V$	<b>0,289</b>	-0,166	<b>0,309</b>	<b>0,363</b>	1	
$SR$	-0,105	0,263	<b>-0,425</b>	<b>-0,425</b>	<b>-0,290</b>	1

### 3.2. Wewnątrzdobowa periodyczna zmienność przepływu rzecznoego i jego ewolucja

W dobowym rytmie przepływu (ryc. 3) uwidoczniła się charakterystyczna cecha rzek o ustroju lodowcowym: maksimum natężenia przepływu występowało w godzinach popołudniowych (17:00-18:00), najmniejszy przepływ występował zaś w godzinach porannych (5:00-8:00). Jednocześnie, zaznaczyła się wyraźna, jednokierunkowa ewolucja dobowego rytmu odpływu. Wciąż zachowany był ogólny rytm zmienności wewnątrzdobowej, jednak wraz z biegiem czasu zmniejszały się zarówno wartości natężenia przepływu oraz jego amplitudy. Najwięcej wody odpłynęło ze zlewni w pierwszej dekadzie obserwacji (13.07-22.07). Dobowa amplituda przepływu w tym okresie wyniosła 0,70  $m^3s^{-1}$ . Nieco niższe wartości tego parametru stwierdzono w kolejnych trzech okresach dekadowych: 23.07-01.08, 02.08-11.08 oraz 12.08-21.08 – kolejno 0,59, 0,50 i 0,56  $m^3s^{-1}$ . Najmniejszy przepływ oraz jego najmniejsze zróżnicowanie wystąpiły w ostatnim okresie dekadowym: 22.08-31.08. Amplituda przepływów wyniosła wówczas 0,28  $m^3s^{-1}$ .



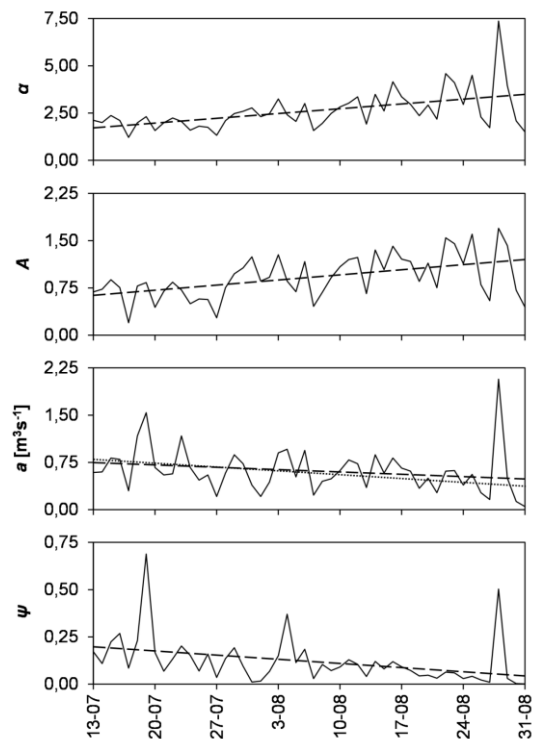
Ryc. 3. Średni dobowy rytm przepływu Rzeki Waldemara w pełnym okresie pomiarowym sezonu letniego 2014 r. oraz w kolejnych okresach 10-dniowych

Fig. 3. Mean daily course of the Waldemar River discharge in whole 2014 measurements period and in consecutive 10-days periods.

Czasową ewolucję wybranych miar zmienności odpływu przedstawiono na ryc. 4. Dla każdej z miar obliczono wartości trendu dobowego i poziomu jego istotności (tab. 3). W czasowej zmienności wartości opisywanych parametrów zaznaczył się wyraźny wzrost współczynnika nieregularności i amplitudy względnej, amplituda rzeczywista i wskaźnik zmienności zaś wykazywały spadek swoich wartości. Warto zauważyć, że w przypadku dwóch ostatnich parametrów dużo wyraźniej zaznaczyły się epizody wezbraniowe związane ze zwiększonymi opadami deszczu i wzrostem temperatury. Wahania te były na tyle duże, że w przypadku analizy amplitudy rzeczywistej trend obliczony dla całego okresu pomiarowego nie był istotny statystycznie. Istotną wartość trendu uzyskano dopiero po wyłączeniu wspomnianych przypadków wezbrań deszczowych.

Ryc. 4. Wybrane miary wewnątrzdobowej zmienności odpływu Rzeki Waldemara w sezonie letnim 2014 r.:  $\alpha$  – współczynnik nieregularności,  $A$  – amplituda względna,  $a$  – amplituda rzeczywista,  $\psi$  – wskaźnik zmienności; dla każdej z miar rysowano trend liniowy (linia przerywana); dla miary  $a$  rysowano dodatkowo trend liniowy nieuwzględniający wystąpienia wezbrań deszczowych (linia kropkowana)

Fig. 4. Selected parameters of the inter-diurnal variability of the Waldemar River in summer season 2014:  $\alpha$  – irregularity factor,  $A$  – relative amplitude,  $a$  – amplitude,  $\psi$  – variability factor; for each parameter the linear trend was drawn (dashed line); additionally for the  $a$  parameter the linear trend omitting rain floods events was drawn (dotted line).



Tab. 3. Wartości liniowych trendów: współczynnika nieregularności ( $\alpha$ ), amplitudy względnej ( $A$ ), amplitudy bezwzględnej ( $a$ ), amplitudy bezwzględnej bez uwzględnienia wezbrań opadowych ( $a^*$ ) i wskaźnika zmienności ( $\psi$ ) oraz wartości ich współczynników determinacji ( $R^2$ ) i istotności statystycznej ( $p$ )

Table 3. Linear trends for: irregularity factor ( $\alpha$ ), relative amplitude ( $A$ ), amplitude ( $a$ ), amplitude without rain events ( $a^*$ ) and variability factor ( $\psi$ ) and values of their coefficient of determination ( $R^2$ ) and statistical significance ( $p$ ).

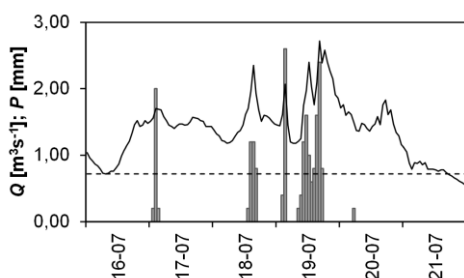
	Trend	$R^2$	$p <$
$\alpha$	0,0363 ( $\pm 0,0090$ )	0,252	0,001
$A$	0,0115 ( $\pm 0,0030$ )	0,233	0,001
$a$	-0,0051 ( $\pm 0,0028$ )	0,047	0,131
$a^*$	-0,0062 ( $\pm 0,0024$ )	0,131	0,013
$\psi$	-0,0032 ( $\pm 0,0012$ )	0,135	0,009

### 3.3. Nagłe wezbrania o charakterze nieperiodycznym

W ciągu analizowanego sezonu letniego zaznaczyły się dwa większe wezbrania spowodowane wysokimi opadami deszczu: w dniach 17.07-20.07 oraz w dniu 28.08.

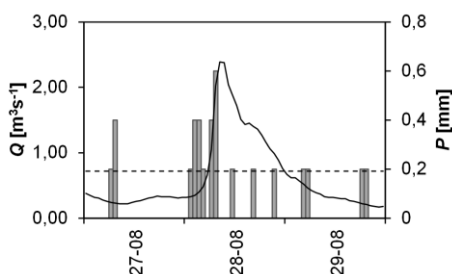
Pierwsze, największe i jednocześnie najdłuższe wezbranie (ryc. 5) stanowiło dynamiczną odpowiedź rzeki na wystąpienie rekordowych w sezonie opadów deszczu. W istocie stanowiło ono kilka rozłącznych okresów wezbraniowych związanych z nieregularnym występowaniem opadu. Natężenie przepływu zmieniało się w okresie tego wezbrania dynamicznie, szybko nawiązując do aktualnych warunków pogodowych i osiągając największe wartości rzędu 2,40-2,70 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>. Maksymalne opóźnienie wzrostu lub spadku natężenia przepływu w zależności od wielkości opadu wynosiło 1-2 godziny.

Drugie wyraźne wezbranie opadowe wystąpiło w końcowym okresie prowadzenia pomiarów, tj. w dniu 28.08 (Ryc. 6). Było ono zdecydowanie krótsze niż opisane powyżej wezbranie z początku drugiej połowy lipca. Cechą charakterystyczną tego okresu wezbraniowego było wyraźne zaburzenie opisanego wcześniej dobowego rytmu odpływu. Opady deszczu trwały w godzinach 01:00-07:00, przy czym ich kulminacja wystąpiła w godz. 06:00-07:00. Największy przepływ (rzędu 2,40 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>) stwierdzono z opóźnieniem 1-2 godzinnym.



Ryc. 5. Przebieg wezbrania z dn. 17.07-20.07 na tle godzinowych sum opadów atmosferycznych (linią kreskowaną zaznaczono średni przepływ sezonowy)

Fig. 5. Course of the rain flood (17.07-20.07) against hourly precipitation sums (dashed line – mean seasonal discharge).



Ryc. 6. Przebieg wezbrania z dn. 28.08 na tle godzinowych sum opadów atmosferycznych (linią kreskowaną zaznaczono średni przepływ sezonowy)

Fig. 6. Course of the rain flood (28.08) against hourly precipitation sums (dashed line – mean seasonal discharge).

## 4. Dyskusja

W pracy przedstawiono wybrane elementy zmienności natężenia przepływu typowej rzeki odwadniającej częściowo zlodowalone zlewnie górskie w regionie Arktyki Atlantycznej. Analizą objęto podstawowe cechy hydrologiczne, jak zmienność odpływu i jego powiązanie z przebiegiem warunków meteorologicznych. Przy ocenie posiadanego materiału badawczego należy podkreślić, że terminy rozpoczęcia i zakończenia badań warunkowane były ekspedycyjnym charakterem Wypraw Polarnych UMK na Spitsbergen. W związku z tym nie istniała możliwość objęcia pomiarami całości czynnego okresu hydrologicznego, który w definicji Bartoszewskiego (1998) oznacza przedział czasu, kiedy



wody rzeczne odpływają poza obszar zlewni. Biorąc jednak pod uwagę, że w warunkach Svalbardu czynny okres hydrologiczny trwa przeważnie od końca maja do połowy września, z wyraźną przewagą wielkości odpływu w lipcu i sierpniu (Sund 2008), uznano że przeprowadzona analiza dotyczy znacznej większości całkowitego odpływu, który wystąpił w opisywanym sezonie letnim.

Na podstawie przeprowadzonych analiz wykazano cechy typowe dla rzek o przewodzie zasilania lodowcowego, m.in. silną i dynamiczną zależność od zmienności warunków pogodowych czy ustalony, dobowy rytm odpływu (Østrem 1973; Leszkiewicz 1987; Bartoszewski 1998; Jania 1997; Rachlewicz 2007; Sobota i in. 2010; Sobota 2013).

Jedną z najprostszych metod identyfikacji relacji hydrometeorologicznych zachodzących w zlewni może być współczynnik korelacji Pearsona  $r$ . Świadczy on nie tylko o mocy związku, ale i o jego kierunku. Porównanie wartości tego współczynnika z różnych sezonów letnich pozwala zarówno na określenie „uśrednionej” odpowiedzi zlewni na typowy, wieloletni przebieg warunków pogodowych (w ujęciu klimatologicznym), jak i na prostą identyfikację wszelkich zmian w relacjach pogoda-lodowiec oraz ewolucji systemu alimentacji rzeki (ściśle powiązanej ze stwierdzonymi obecnie dynamicznymi przeobrażeniami krajobrazu górskich zlewni Svalbardu). Analiza porównawcza danych z sezonu letniego 2014 r. –  $r_{14}$  oraz danych z sezonów 2010-2012 –  $r_{10-12}$  (Nowak i Sobota 2015) może wskazywać na duże podobieństwo w relacjach wielkości odpływu z temperaturą powietrza ( $r_{14} = 0,600$ ;  $r_{10-12} = 0,614$ ), opadem atmosferycznym ( $r_{14} = 0,554$ ;  $r_{10-12} = 0,467$ ) i prędkością wiatru ( $r_{14} = 0,289$ ;  $r_{10-12} = 0,228$ ). Znaczącą różnicę odnotowano w stosunku do zmiennej wilgotności względnej ( $r_{14} = 0,728$ ;  $r_{10-12} = -0,137$ ). W sezonie letnim 2014 r. odpływ korelował z tą zmienną najsilniej, w latach 2010-2012 korelacja była nieistotna statystycznie (nieznacznie ujemna).

Należy jednak pamiętać, że pomiary meteorologiczne na potrzeby bieżącego opracowania prowadzono w strefie przybrzeżnej, w punkcie o odmiennej topografii, położonym około 130 m n.p.m. niżej od punktu, z którego dane były wykorzystane w opracowaniu Nowaka i Soboty (2015). W związku z genetyczną niejednorodnością danych pomiarowych twierdzenie o nagłej zmianie w sposobie funkcjonowania hydrologicznego systemu zlewni Rzeki Waldemara należy traktować z pewną rezerwą.

## 5. Podsumowanie

W pracy przeanalizowano zmienność odpływu lodowcowej Rzeki Waldemara w sezonie letnim 2014 roku. Uwzględniono zarówno zmienność w ciągu sezonu (opartą na średnich dobowych wartościach przepływu), jak i zmienność dobową (na podstawie średnich godzinowych) oraz jej ewolucję czasową w analizowanym okresie.

W sezonie letnim 2014 roku średnie natężenie przepływu wyniosło  $0,72 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  i wahało się od  $0,11$  do  $1,85 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . Rytm odpływu Rzeki Waldemara nawiązywał do przebiegu trzech zmiennych meteorologicznych: temperatury powietrza, opadu atmosferycznego i wilgotności względnej. Współczynniki korelacji pomiędzy natężeniem przepływu i opisanymi zmiennymi wskazują na ich silny związek. W ujęciu sezonowym stwierdzono zmniejszenie średnich dobowych przepływów wraz z biegiem czasu. Trend ten był jednak silnie zaburzany okresami wysokich i niskich wartości temperatury powietrza oraz wystąpieniem dwóch znacznych epizodów opadowych.

Dobowy rytm przepływu wykazywał cechy typowe dla rzek lodowcowych: maksimum natężenia przepływu występowało w godzinach popołudniowych, podczas gdy najniższy przepływ występował w godzinach porannych. W zakresie ewolucji dobowego rytmu odpływu uwidoczniła się pewna prawi-

dłowość polegająca na zmniejszaniu zarówno wartości przepływów, jak i ich amplitud. Przegnalizowane w pracy miary zmienności przepływów w postaci współczynnika nieregularności  $\alpha$ , amplitudy względnej  $A$ , amplitudy rzeczywistej  $a$  oraz wskaźnika zmienności  $\psi$  uwiaryściły dodatkowo występowanie silnego zróżnicowania w przebiegu dobowego rytmu odpływu.

Należy zaznaczyć, że rytm przepływu Rzeki Waldemara w sezonie letnim 2014 roku był silnie zaburzany występowaniem okresów opadowych. Zaobserwowano dwa większe wezbrania spowodowane taką genezą w dniach 17.07-20.07 oraz w dniu 28.08. Opóźnienie wzrostu natężenia przepływu względem pojawienia się wysokich sum opadów atmosferycznych było małe i wynosiło 1-2 godziny. Szybka reakcja rzeki na pojawienie się intensywnych impulsów meteorologicznych wynika niewątpliwie z faktu, że opisywana zlewnia ma niewielką powierzchnię, co pozwala na dynamiczną migrację wody, zwłaszcza wewnątrz skomplikowanego systemu glacialnego.

Przeprowadzone badania są kontynuacją prac rozpoczętych w poprzednich sezonach. W związku z dynamicznymi zmianami obserwowanymi obecnie na obszarze większości zlewni zlodowaconych zgromadzone dotychczas dane stanowią cenne źródło informacji o warunkach i relacjach odpływu ze zlewni współcześnie zlodowaconych.

### Podziękowania

Autorzy składają podziękowania anonimowym recenzentom za cenne uwagi i wskazówki. Praca powstała w ramach realizacji grantu NCN (2011/03/B/ST10/06172).

### Literatura

- Baranowski S., 1977, *Subpolarne lodowce Spitsbergenu na tle klimatu tego regionu*. Acta Universitatis Wratislaviensis, No 393, Studia Geograficzne XXXI, Uniwersytet Wrocławski, Wrocław: 157 s.
- Bartoszewski S., 1991, *Ablation of Scott Glacier and its role in river flow formation*. [in:] Arctic environment research, Spitsbergen Geographical Expeditions, Polar Session, UMCS, Lublin: 107-121.
- Bartoszewski S., 1998, *Reżim odpływu rzek Ziemi Wedel Jartsberga, Spitsbergen*. Wyd. UMCS, Lublin, 167 s.
- Bartoszewski S., Gluza A., Siwek K., 2004, *Ablacja lodowcowa i odpływ rzeki Scotta (Spitsbergen) w sezonie letnim 2001*. Polish Polar Studies. 30th International Polar Symposium, Gdynia: 29-38.
- Bennet M.R., Glasser N.F., 2009, *Glacial geology*. John Wiley & Sons: 385 s.
- Engelhardt M., 2013, *Glacier mass-balance and discharge modeling*. PhD Thesis. Dept. of Geosciences, University of Oslo: 135 s.
- Głowacki P., 2007, *Rola procesów fizyczno-chemicznych w kształtowaniu struktury wewnętrznej i obiegu masy lodowców Spitsbergenu*. Materiały i Prace Instytutu Geofizyki PAN, M30 (400): 143 s.
- Hock R., 1998, *Modelling of glacier melt and discharge*. Zürcher Geographische Schriften 70. ETH, Zürich: 140 s.
- Hock R., 2005, *Glacier melt: a review of processes and their modelling*. Progress in Physical Geography, 29 (3): 362-391.
- Jania J., 1994, *Field investigations during glaciological expeditions to Spitsbergen in the period 1992-1994 (interim report)*. Uniwersytet Śląski, Katowice: 40 s.
- Jania J., 1997, *Glaciologia*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa: 359 s.
- Jansson P., Hock R., Schneider T., 2003, *The concept of glacier storage – a review*. Journal of Hydrology, 282: 115-129. doi: 10.1016/S0022-1694(03)00258-0
- Korska A., 2006, *Miary zmienności przepływów*. [w:] Pociask-Karteczka J. (red.). Zlewnia – właściwości i procesy. Wyd. UJ: 153-160.
- Leszkiewicz J., 1987, *Charakterystyczne cechy zlewni polarnych oraz próba modelowania statystycznego topnienia śniegu i odpływu ablacyjnego w zachodniej części Spitsbergenu*. Prace Naukowe UŚ, 920: 84 s.

- Malecki J., 2013, *The present-day state of Svenbreen (Svalbard) and changes of its physical properties after the termination of the Little Ice Age*. Maszynopis rozpr. dokt., Uniwersytet Adama Mickiewicza, Poznań: 166 s.
- Malecki J., 2015, *Glacio-meteorology of Ebbabreen, Dickson Land, central Svalbard, during 2008–2010 melt seasons*. Polish Polar Research, 36 (2): 145-161. doi: 10.1515/popore-2015-0010.
- Migala K., Luks B., Puczko D., Sikora S., Drzeniecka-Osiadacz A., Grabiec M., Glowacki P., 2008, *Ablation and vertical gradients of air temperature - a study from Hans Glacier, SW Spitsbergen*. [in:] The Dynamics and Mass Budget of Arctic Glaciers. Extended abstracts. Workshop and GLACIODYN (IPY) Meeting, Obergurgl (Austria): 74-77.
- Migala K., Piwowar B.A., Puczko D., 2006, *A meteorological study of the ablation process on Hans Glacier, SW Spitsbergen*. Polish Polar Research, 27: 243-258.
- Migala K., Puczko D., Jania J., Glowacki P. 2007, *Ablation of Hans Glacier (Svalbard) estimated using energy balance from the AWS data*. [in:] The Dynamics and Mass Budget of Arctic Glaciers. Extended abstracts. Workshop and GLACIODYN (IPY) Planning Meeting, 15-18 January 2007, Pontresina (Switzerland): 67-70.
- Nowak M., Sobota I., 2015, *Artificial neural networks in proglacial runoff simulation: application and efficiency analysis in comparison to the multivariate regression; a case study of Waldemar River (Svalbard)*. Geografiska Annaler, 97: 489-506. 10.1111/geoa.12089
- Østrem G., 1973, *Runoff forecasts for highly glacierized basins. The Role of Snow and Ice in Hydrology*. IAHS Publications, 107: 1111-1129.
- Pardé M., 1957, *Rzeki*. Wyd. PWN, Warszawa: 233 s.
- Piasecki J., 1988, *Accumulation and ablation on the Scott Glacier and Renard Glacier in 1987 (South Bellsund, Spitsbergen)*. [in:] XV Sympozjum Polarne. Stan obecny i wybrane problemy polskich badań polarnych. Wrocław: 242-253.
- Rachlewicz G., 2007, *Mechanizmy wezbrań rzecznych w zlewniach zlodowaconych (przykłady z doliny Ebba, Spitsbergen Środkowy)*. [w:] Kostrzewski A., Szpikowski J. (red.): Funkcjonowanie geoeosystemów zlewni rzecznych, 4, Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań: 197-208.
- Rachlewicz G., 2009, *Contemporary sediment fluxes and relief changes in high Arctic glacierized valley systems (Billefjorden, Central Spitsbergen)*. Seria Geograficzna nr 87, Wydawnictwo UAM, Poznań: 203 s.
- Shiklomanov I. A., 1999, *World Water Resources: Modern Assessment and Outlook for the 21st Century – Summary of World Water Resources at the Beginning of the 21st Century*. UNESCO, Federal Service of Russia for Hydrometeorology & Environment Monitoring, St. Petersburg.
- Sobota I., 1997a, *Preliminary characteristics of outflow from the Waldemar Glacier (Kaffiøyra, NW Spitsbergen) in the 1996 summer*. [w:] Dynamics of polar environment. Spitsbergen Geographical Expeditions, Polar Session, UMCS, Lublin: 157-162.
- Sobota I., 1997b, *Ablacja i odpływ z lodowca Waldemara w sezonie letnim 1997*. [w:] Rzeźba, współczesne procesy morfogenetyczne i problemy zmian środowiska obszarów polarnych, Streszczenia referatów i komunikatów Sesji Polarnej, UMCS, Lublin: 70-74.
- Sobota I., 1998, *Ablacja i odpływ z lodowca Waldemara w sezonie letnim 1997*. [w:] Relief, Quaternary Paleogeography and Changes of the Polar Environment Polar Session. Spitsbergen Geographical Expeditions. UMCS, Lublin: 149-168.
- Sobota I., 2000, *Ablation and discharge of the Waldemar Glacier, north-western Spitsbergen, in summer 1998*. Polish Polar Research, 21(1): 3-18.
- Sobota I., 2004, *Ablacja i odpływ z lodowca Waldemara i lodowca Ireney w sezonie letnim 2001 i 2003 roku*. XXX Międzynarodowe Sympozjum Polarne, Gdynia. Polish Polar Studies: 333-343.
- Sobota I., 2005, *Zarys hydrografii Kaffiøyry*. [w:] Grześ M., Sobota I. (red.), Kaffiøyra. Zarys środowiska geograficznego Kaffiøyry (NW Spitsbergen). Oficyna Wydawnicza TURPRESS, Toruń: 13-16.
- Sobota I., 2007, *Ablation and outflow from Kaffiøyra glaciers in 1996-2006, Svalbard*. [w:] Oerlemans J., Tijm-Reijmer C.H. (red.), The Dynamics and Mass Budget of Arctic Glaciers. IASC Working Group on Arctic Glaciology Meeting, IMAU: 104-107.
- Sobota I., 2009, *The near-surface ice thermal structure of the Waldemarbreen, Svalbard*. Polish Polar Research, 30(4): 317-338.

- Sobota I., 2013, *Współczesne zmiany kriosfery północno-zachodniego Spitsbergenu na przykładzie regionu Kaffiøyry*. Wydawnictwo Naukowe UMK, Toruń: 449 s.
- Sobota I., 2014, *Changes in dynamics and runoff from the High Arctic glacial catchment of Waldemarreen, Svalbard*. *Geomorphology*, 212: 16–27. doi: 10.1016/j.geomorph.2013.04.001.
- Sobota I. 2016, *Iceings and their role as an important element of the cryosphere in High Arctic glacier forefields*. *Bulletin of Geography. Physical Geography Series*, 10: 81-93.
- Sobota I., Ćmielewski M., Nowak M., 2010, *Charakterystyka i przyczyny zmienności natężenia przepływu rzeki lodowcowej w sezonie letnim na przykładzie Rzeki Waldemara, Svalbard*. *Problemy Klimatologii Polarnej*, 20: 143-159.
- Sobota I., Nowak M., 2012, *Dynamika odpływu ze zlodowaczonej zlewni Rzeki Waldemara (NW Spitsbergen) w sezonach letnich 2009-2011*. *Problemy Klimatologii Polarnej*, 22: 57-68.
- Sobota I., Nowak M., Weckwerth P., 2016, *Long-term changes of glaciers in north-western Spitsbergen*. *Global and Planetary Changes*, 144: 182-197.
- Szafranec J., 2002, *Influence of positive degree-days and sunshine duration on the surface ablation of Hansbreen, Spitsbergen glacier*. *Polish Polar Research*, 23 (3-4): 227-240.
- UNEP, 2007, *Global outlook for ice and snow*. UNEP/GRID-Arendal: 235 s.
- Wójcik G., Marciniak K., Przybylak R., 1999, *Ablacja lodowca Waldemara (Ziemia Oskara II, NW Spitsbergen) w sezonach letnich 1977, 1978 i 1980*. *Problemy Klimatologii Polarnej*: 89-102.

Wpłynęło: 4 grudnia 2016 r., poprawiono: 27 grudnia 2016 r., zaakceptowano: 30 grudnia 2016 r.

## Summary

In this work the selected elements of the Waldemar River discharge variations in summer season of 2014 were described. Discharge variability was analyzed in both scales: seasonal (based on daily means) and diurnal (based on hourly means). Runoff course was referenced to the selected meteorological parameters variability in both: their influence on the seasonal scale runoff shaping and sudden events, like rain floods.

In the study period mean discharge was  $0.72 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  and ranged from  $0.11$  to  $1.85 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . General course of the Waldemar River runoff was connected with three meteorological variables: air temperature, precipitation and relative humidity. Correlation coefficients between them and runoff indicate strong relationships. In the seasonal scale the discharge decreasing with time was observed. However, this trend was interrupted several times when the periods of high and low air temperature or rain floods occurred.

Daily discharge course was typical for proglacial rivers: maximum discharge was observed in the afternoon while the lowest discharge appeared in the morning. In the daily course evolution a certain regularity was revealed: discharges and its amplitudes were decreasing.

It is also worth noting that the Waldemar River runoff course in the summer season of 2014 was strongly interrupted by rain events. Two significant rain floods were observed in days 17.07-20.07 and 28.08. Delay between strong precipitation occurrence and high discharge was small and amounted to 1-2 hours. In relations to the dynamic changes presently observed in glaciated areas the collected data constitutes valuable source of information about conditions and relations of outflow from glacial catchments.

**Keywords:** proglacial discharge, runoff variability, proglacial rivers, Kaffiøyra, Svalbard.