

## OCENA ODPŁYWU PODPOWIERZCHNIOWEGO W REJONIE HORNSUNDU (SW SPITSBERGEN)

### ESTIMATION OF SUBSURFACE RUNOFF IN THE HORNSUND REGION (SW SPITSBERGEN)

HENRYK MARSZAŁEK<sup>1</sup>, STANISŁAW STAŚKO<sup>1</sup>, MIROSLAW WĄSIK<sup>1</sup>

**Abstrakt.** Na podstawie wyników badań hydrogeologicznych przeprowadzonych w rejonie Hornsundu (SW Spitsbergen) określono średnią wielkość odpływu całkowitego  $Q = 3,346 \text{ m}^3/\text{s}$ . Pomiary prowadzono w strefie wybrzeża Morza Grenlandzkiego o powierzchni  $49,95 \text{ km}^2$ , ograniczonego lodowcami Werenskiolda i Hansa w sezonach letnich 2005–2007. Na odpływ całkowity składają się odpływy: rzeczny ( $3,008 \text{ m}^3/\text{s}$ ) i podpowierzchniowy ( $0,338 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Składowe odpływy są formowane w głównej mierze przez wody pochodzące z topniejących lodowców i wieloletniej zmarzliny oraz drugorzędnie z wód opadowych.

**Słowa kluczowe:** odpływ podpowierzchniowy, warstwa aktywna, Hornsund, Spitsbergen.

**Abstract.** Based on hydrogeological investigations carried out in the Hornsund region (SW Spitsbergen) the mean water runoff in amount of  $3.346 \text{ m}^3/\text{s}$  was estimated. The measurements were carried out in the coastal zone of Greenland Sea with an area of  $49.95 \text{ km}^2$ , limited by Werenskiold and Hans glaciers, during summer seasons of 2005–2007. River and subsurface parts of total runoff amounts to respectively  $3.008 \text{ m}^3/\text{s}$  and  $0.338 \text{ m}^3/\text{s}$ . Runoff components are formed mainly by water from melting glaciers and permafrost, and secondary from rainwater.

**Key words:** subsurface runoff, active layer, Hornsund, Spitsbergen.

## WSTĘP

Obserwowane w obszarach polarnych zmiany klimatyczne, w efekcie których następuje kurczenie się pokrywy lodowej (Przybylak, 2003; Styszyńska, 2005), skłoniły autorów do rozpoczęcia regularnych obserwacji odpływu rzecznego w strefie wybrzeża Morza Grenlandzkiego w rejonie SW Spitsbergenu (fig. 1). Badania hydrogeologiczne przeprowadzone w sezonach letnich w latach 2005–2007 pozwoliły na ocenę odpływu całkowitego z obszaru o powierzchni  $49,95 \text{ km}^2$  z wydzieleniem niektórych jego składowych. Odpływ podziemny w postaci odpływu podpowierzchnio-

wego jest formowany w głównej mierze w przypowierzchniowej strefie skał luźnych tzw. warstwy aktywnej, powstałej w okresie lata arktycznego w wyniku topnienia górnych partii wieloletniej zmarzliny (permafrostu). Głębsze strefy występowania wód podziemnych (w obrębie permafrostu i poniżej niego; Haldorsen, Heim, 1999) nie były objęte badaniami. Przeprowadzone pomiary włączono do cyklu badań bilansu wodnego prowadzonego w tej części Spitsbergenu z przerwami od kilkudziesięciu lat (Jahn, 1975; Baranowski, 1977; Kida, Piasecki, 1985).

<sup>1</sup> Uniwersytet Wrocławski, Instytut Nauk Geologicznych, Zakład Hydrogeologii Stosowanej, pl. Maksa Borna 9, 50-204 Wrocław; e-mail: henryk.marszalek@ing.uni.wroc.pl, stanislaw.stasko@ing.uni.wroc.pl, miroslaw.wasik@ing.uni.wroc.pl

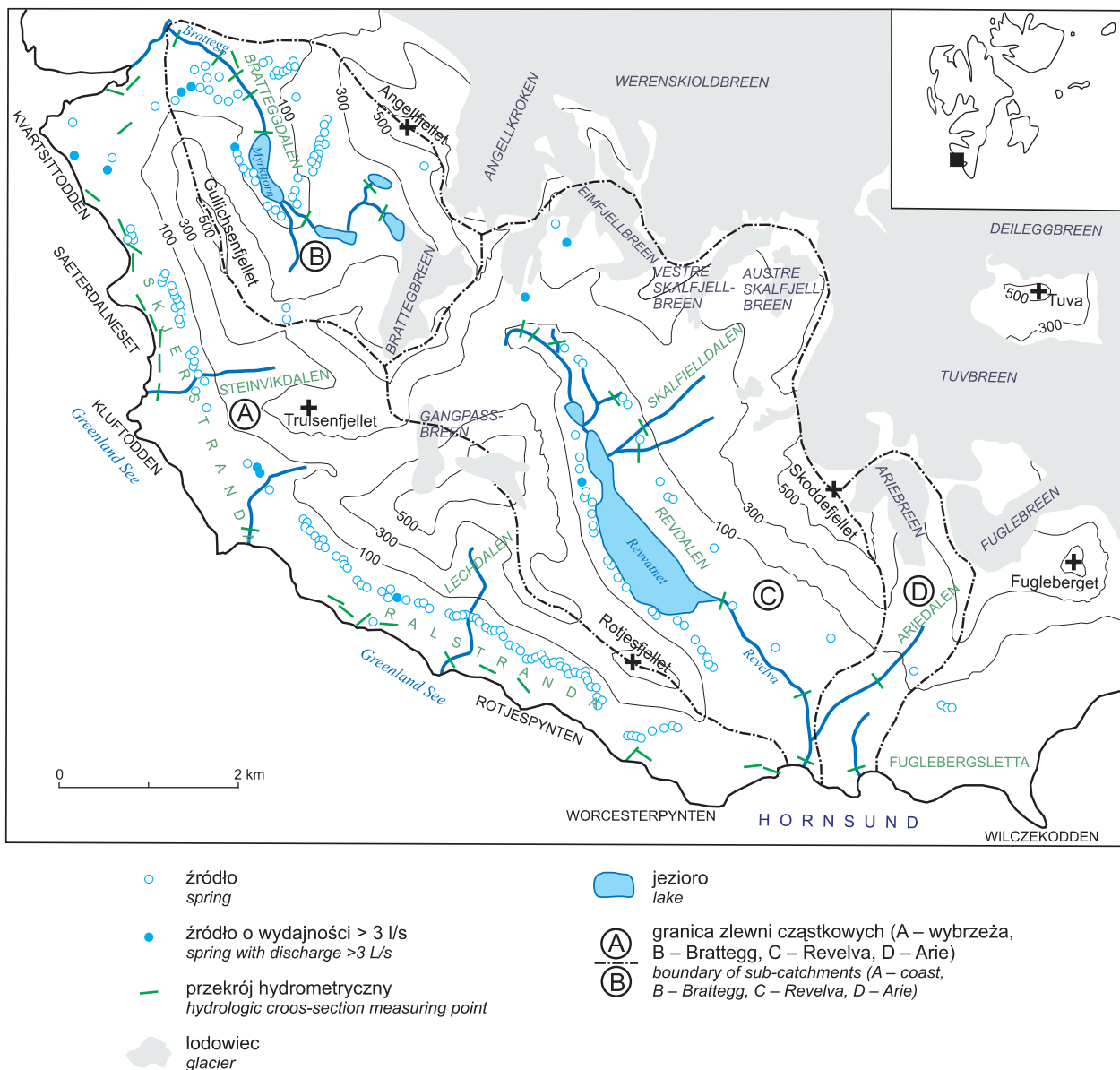


Fig. 1. Lokalizacja punktów pomiarowych w rejonie Hornsundu

Location of measurements points in the Hornsund region

## WARUNKI PRZYRODNICZE

Badany obszar obejmuje fragment wybrzeża Skjerstranda wraz z dwiema zlewniami większych rzek: Bratteggi na północy i Revelvy na południu (fig. 1). W okresie letnim jest on pozbawiony pokrywy lodowej. Ograniczają go od północy i południa dwa duże lodowce (Werenskiolda i Hansa), ponadto w najwyższych partiach dolin występują lodowce szczątkowe.

Średnia roczna temperatura powietrza wynosi na tym obszarze  $-2,1^{\circ}\text{C}$ , a średnie miesięczne temperatury wahają się do  $-11,5^{\circ}\text{C}$  w lutym do  $+4,4^{\circ}\text{C}$  w lipcu. Suma rocznych opa-

dów atmosferycznych wynosi średnio 422 mm, z odchyleniami od 230 mm w roku suchym 1987 do 635 mm w roku mokrym 1996. Trwała pokrywa śnieżna tworzy się zwykle już w drugiej połowie września i trwa na ogół do pierwszej dekady czerwca (Kwaczyński, 2003; Przybylak, Araźny, 2006).

Omawiany obszar budują proterozoiczne utwory metamorficzne, należące do kilku krystalicznych formacji skalnych (Czerny i in., 1993). W północnej części obszaru dominują różnego typu amfibolity, łupki łyszczykowe i kwarcyty formacji Bratteggdalen oraz białe i zielone kwarcyty formacji

Gulliksenfjellet. W kierunku południowym występują gnejsy, łupki łuszczkowe, kwarcyty, amfibolity, migmatyty, marmury i skały wapienno-krzemianowe kilku formacji: Skålfjellet, Eimfjellbreen i Skjerstranda. W południowej części obszaru największe rozprzestrzenienie zajmują serie gnejsowo-łupkowe i marmury grupy Ibsjörnhamna, składającej się z formacji Skoddefjellet, Arienkammen i Revdalen (Czerny i in., 1993; Birkenmajer, 1990). W strefie wybrzeża na skałach krystalicznych zalegają piaski i żwiry pochodzenia morskiego tworzące szereg tarasów oraz głazowiska i utwory pokryw rumoszowych z domieszką frakcji ilastej.

Środowisko skalne przepływu wód tworzy w większości warstwa luźnych utworów okruchowych w postaci zwietrzelin skał metamorficznych oraz osadowych utworów pochodzenia rzeczno, morskiego i lodowcowego. Spąg warstwy aktywnej, w której sezonowo odbywa się odpływ wód do Morza Grenlandzkiego, stanowi pokrywa wieloletniej zmarzliny, a jej miąższość zmienia się w zakresie od kilkudziesięciu cm do około 2,1 m (Migała, 1994). Miąższość permafrostu na obszarze Svalbardu zmienia się od 100 do 400 m (Haldorsen, Heim, 1999).

## METODY BADAŃ

Celem przeprowadzonych badań była ilościowa ocena odpływu całkowitego z wydzieleniem fazy odpływu podpowierzchniowego, tworzącego się w warstwie aktywnej permafrostu w okresie lata arktycznego (przeciętnie od czerwca do września). Obliczenia wykonano na bazie wyników kartowania hydrogeologicznego, przeprowadzonego latach 2005–2007. Łącznie wykonano pomiary 209 źródeł oraz

rzek i mniejszych cieków w 46 przekrojach (fig. 1). Wydajności źródeł mierzono metodą wolumetryczną, a natężenie przepływu rzek – za pomocą młynka hydrometrycznego. Ponadto podjęto próbę oszacowania odpływu podpowierzchniowego metodą hydrodynamiczną z wykorzystaniem wzoru na przepływ objętościowy (Pazdro, Kozerski, 1990).

## OCENA SKŁADOWEJ PODPOWIERZCHNIOWEJ ODPLYWU PODZIEMNEGO

Na podstawie pomiarów natężenia przepływu rzek oraz obliczeń metodą hydrodynamiczną określono sumaryczną wielkość odpływu całkowitego do Morza Grenlandzkiego z badanego obszaru (49,95 km<sup>2</sup>). Wyniosła ona średnio  $Q=3,346 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $q=0,067 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ ). Odpływ całkowity z badanego obszaru to suma odpływów rzeczno ze zlewni rzek oraz podpowierzchniowego z obszarów, z których odpływ odbywa się bezpośrednio do Morza Grenlandzkiego. Uwzględniając fakt, że odpływ wody odbywa się przeciętnie w ciągu 3 miesięcy w roku, otrzymano dla tego okresu ekwiwalent słupa wody równy 532 mm. Wartość ta jest zbliżona do wartości 539–1050 mm podawanych przez Killingtveit i in. (2003) dla innych rzek Arktyki (Endalen, Isdammem, De Geerdalen).

Wielkość odpływu rzeczno określona pomiarami hydrometrycznymi wynosi  $3,008 \text{ m}^3/\text{s}$ , co stanowi 90% odpływu całkowitego. O wielkości odpływu decydują rzeki lodowcowe (m.in. Brattegg i Arie), prowadzące wody z topniejących lodowców w ilości  $2,840 \text{ m}^3/\text{s}$ , co stanowi prawie 95% odpływu rzeczno. Natężenie przepływu tych rzek zmierzone przed czołami lodowców wynosi  $1,930 \text{ m}^3/\text{s}$ . Pozostała wartość ( $0,91 \text{ m}^3/\text{s}$ ) jest uzupełniana wodami pochodzącymi z topniejącej zmarzliny oraz z wód opadowych.

Źródła na badanym obszarze pojawiają się głównie u podnóży stoków górskich i tarasów rozciągających się wzdłuż wybrzeża oraz otaczających doliny. Ich sumaryczna

wydajność wynosiła w okresie badań  $0,202 \text{ m}^3/\text{s}$ . Wyprowadzają one na powierzchnię wody pochodzące głównie z topniejącej zmarzliny. Przejmowane są one następnie przez rzeki lub wsiąkają w tundrę, stanowiąc część odpływu podpowierzchniowego oraz rzeczno.

Odpływ podpowierzchniowy, obliczony metodą hydrodynamiczną, stanowi pozostałe 10% odpływu całkowitego, tj.  $0,338 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $0,00677 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ ). Określony procentowy udział odpływu podpowierzchniowego w odpływie całkowitym jest zbliżony do wartości podawanych przez innych badaczy (Marciniak, Dragon, 2010). Mimo że ma on znacznie mniejszy udział w odpływie całkowitym, to określenie jego wartości jest niezbędne do prawidłowego zestawienia bilansu wodnego omawianego obszaru.

Wyniki obliczeń odpływów, przeprowadzone dla czterech wydzielonych obszarów cząstkowych (A – strefy wybrzeża Morza Grenlandzkiego, B – zlewni rzeki Brattegg, C – zlewni Revelvy i D – zlewni potoku Arie), kształtowały się w przedziałach:  $0,0695\text{--}1,9895 \text{ m}^3/\text{s}$  dla odpływu całkowitego oraz  $0,0068\text{--}0,3082 \text{ m}^3/\text{s}$  dla podpowierzchniowego (fig. 2).

Wyznaczona wartość odpływu całkowitego przewyższa wartość rocznej sumy opadów. Potwierdza to, że dominującą składową zasilania w badanej części Spitsbergenu stanowią wody topniejących lodowców i wieloletniej zmarzliny.

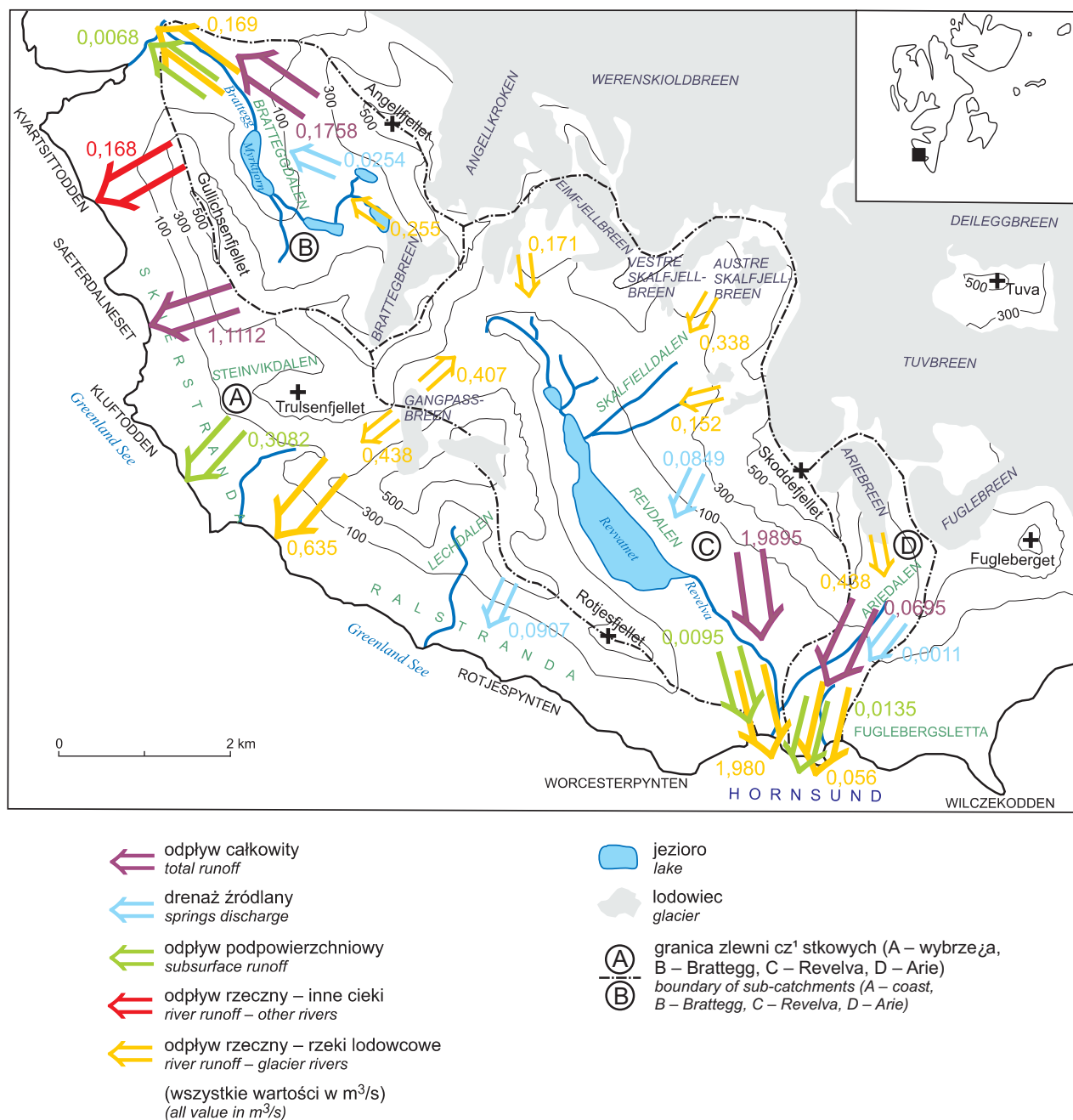


Fig. 2. Rozkład składowych odpływu w zlewniach cząstkowych

Distribution of runoff components in sub-catchments

## PODSUMOWANIE

Ocena odpływu wód pochodzących z topniejącego śniegu i lodu oraz opadów atmosferycznych do Morza Grenlandzkiego stanowi ważną składową bilansu wodnego i może stanowić argument w dyskusji o globalnych zmianach klimatycznych. Podane wartości odpływu rzeczno i podpowierzchniowego należy traktować jako średnie. Wartości

ekstremalnie znacznie się od nich różnią. Wskazują na to obserwacje stacjonarne prowadzone na wybranych rzekach. Wielkość odpływu może się dynamicznie zmieniać w ciągu całego sezonu letniego, a zmiany te są głównie uzależnione od warunków atmosferycznych.

## LITERATURA

- BARANOWSKI S., 1977 — The subpolar glaciers of Spitsbergen seen against the climate of this region. *Acta Univ. Wratisl.*, **410**.
- BIRKENMAJER K., 1990 — Mapa geologiczna regionu fjordu Hornsund w skali 1:75 000. Uniw. Śląski, Katowice.
- CZERNY J., KIERES A., MANECKI M., RAJCHEL J., 1993 — Geological map of the SW part of Wedel Jarlsberg Land Spitsbergen (1:25 000). Wyd. AGH, Kraków.
- HALDORSEN S., HEIM M., 1999 — An Arctic Groundwater System and its Dependence upon Climatic Change: An Example from Svalbard. *Permafrost and Periglacial Processes*, **10**: 137–149.
- JAHN A., 1975 — Zagadnienia strefy peryglacjalnej. PWN. Warszawa.
- KIDA J. PIASECKI J., 1985 — Hydrology. *W: Results of investigation of the geographical research expedition Spitsbergen, 1985*, (red. R. BRÁZDIL i in.): 69–82, Univerzita JE Purkyne, Brno.
- KILLINGTVEIT A., PETTERSSON L.E., SAND K., 2003 — Water balance investigation in Svalbard. *Polar Res.*, **22**, 2: 161–174.
- KWACZYŃSKI J., 2003 — Meteorological yearbook Hornsund 2001/2002. *Publ. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc.*, **D-60** (351).
- MARCINIAK M., DRAGON K., 2010 — The hydrogeology of the glaciated catchment in the arctic environment. Extended abstract book XXXVIII IAH Congress: 1115–1122. University of Silesian Press.
- MIGAŁA K., 1994 — Cechy warstwy aktywnej wieloletniej zmarliny w warunkach klimatycznych Spitsbergenu. *Acta Univ. Wratisl.*, **1590**. *Pr. Inst. Geogr., ser. C. Meteorologia i Klimatologia*, Wrocław **1**: 79–111.
- PAZDRO Z., KOZERSKI B. 1990 — Hydrogeologia ogólna. Wyd. Geol., Warszawa.
- PRZYBYŁAK R., 2003 — The climate of the Arctic, Atmospheric and Oceanographic. Sciences Library, **26**. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- PRZYBYŁAK R., ARAŻNY A., 2006 — Climatic condition of the north-west part of Osoat II Land (Spitsbergen) in the period between 1975 and 2000. *Pol. Polar Res.*, **27**, 2: 139–152.
- STYSZYŃSKA A., 2005 — Przyczyny i mechanizmy współczesnego (1982–2002) ocieplenia atlantyckiej Arktyki. Wyd. Uczel. Akad. Morskiej w Gdyni.

## SUMMARY

Climatic changes observed in polar regions result in the shrinkage of ice cover which make some changes in forming of groundwater runoff. The paper is concentrated on the estimation of river and groundwater runoff in the coastal zone of the Greenland Sea, located N of the Hornsund fjord, between the mouths of two rivers: Revelva and Brattegg (SW Spitsbergen). Springs and river discharge were measured during summer seasons of 2005–2007. The objective of the studies in the Hornsund area was a quantitative evaluation of total runoff, with separation of the groundwater runoff in the active layer of permafrost which arises during the Arctic summer. The top aquifer is formed mostly of a layer of loose cla-

stic formations in the shape of weathering cover of metamorphic rocks and sedimentary formations of alluvial, marine and glacial origin. The basement of the active layer is the cover of permafrost which thickness varies from a few dozen cm to c. 2.1 m. The permafrost thickness in the Svalbard area ranges from 100 to 400 m. The mean value of river and groundwater runoff from the studied area (49.95 km<sup>2</sup>) is 3.346 m<sup>3</sup>/s and the module value is 0.0067 m<sup>3</sup>/s km<sup>2</sup>. The share of shallow groundwater (subsurface) runoff in the total value amounts of 10%. The calculated water equivalent was equal 532 mm, and the flow values in the rivers Revelva and Brattegg were close to those recorded in 1972–1985.

