

Tadeusz CIUPA

Instytut Geografii, Uniwersytet Humanistyczno-Przyrodniczy im. Jana Kochanowskiego w Kielcach

Institute of Geography, Jan Kochanowski University of Humanities and Natural Sciences, in Kielce

Wpływ częstotliwości pomiarów transportu fluwialnego na określenie jego wielkości i dynamiki podczas wezbrań w zlewniach o zróżnicowanym użytkowaniu na przykładzie rzeki Silnicy i Sufraganiec (Kielce)

Frequency of field measurements as a clue for determination of the magnitude and dynamics of the fluvial transport during high water stands within catchments of different use as exemplified by the rivers Silnica and Sufraganiec (Kielce)

Słowa kluczowe: odpływ jednostkowy, transport fluwialny, koncentracja zawiesiny, koncentracja materiału rozpuszczonego, częstotliwość pomiarów

Key words: single unit flow, fluvial transport, concentration of dissolved matter, concentration of suspended matter, frequency of measurements

Wprowadzenie

Istotnym problemem w badaniach hydrologicznych i fluwialnych o charakterze ilościowym jest dokonanie oceny metod i wyników na podstawie analizy błędów. Uzyskane wyniki zawsze są nimi obciążone. Problem ten jest przedmiotem szerokiej dyskusji. Wielu badaczy analizuje wielkość i przyczyny

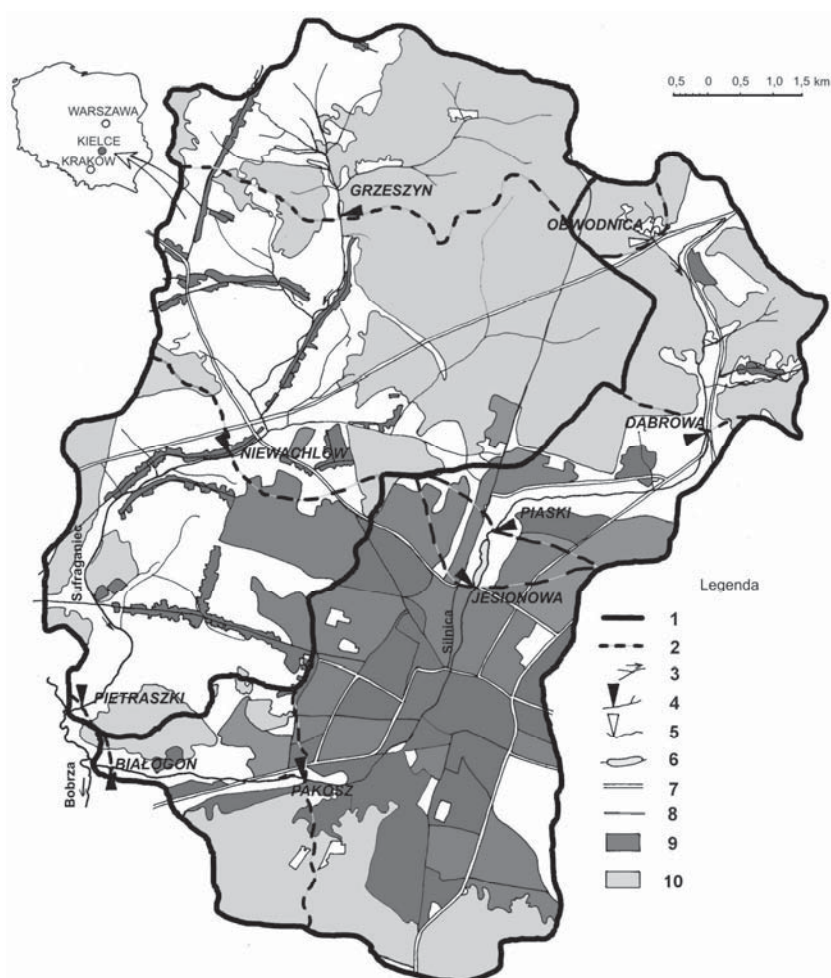
popelnianych błędów (Paślowski 1965, Brański 1967, 1968, Walling 1978, Froehlich 1982, Ciupa 1991, Banasik 1994). W rzekach górskich i wyżynnych głównym źródłem błędów jest mała częstotliwość poboru próbek (Froehlich 1975, 1982, Ciupa 1991).

Celem pracy jest analiza błędów oznaczeń odpływu jednostkowego, koncentracji materiału rozpuszczonego i zawiesiny oraz temperatury wód rzecznych, wynikających z częstotliwości ich pomiarów, oraz ich wpływ na określenie wielkości i dynamiki wyżej wymienionych parametrów podczas wezbrań w zlewniach o zróżnicowanym użytkowaniu, w tym zurbanizowanych, na przykładzie rzeki Silnicy i Sufraganiec (Kielce).

Teren badań

Badane zlewnie, sąsiadujące ze sobą, cechują się podobną powierzchnią, budową geologiczną, rzeźbą terenu, natomiast różnią się użytkowaniem ziemi.

Powierzchnia zurbanizowanej zlewni Silnicy wynosi 49,40 km², a rolniczo-leśnej zlewni Sufragańca – 62,01 km². W ich obrębie wydzielono zlewnie cząstkowe o różnym charakterze użytkowania (rys. 1). W górnej części zlewni



RYSUNEK 1. Położenie i użytkowanie zlewni rzeki Silnicy i Sufragańca: 1 – dział wodny główny, 2 – dział wodny do wodowskazów, 3 – ciek, 4 – wodowskaz obserwacji dobowych, 5 – wodowskaz obserwacji okresowych, 6 – zbiornik wodny, 7 – drogi główne, 8 – drogi drugorzędne, 9 – tereny zabudowane, 10 – lasy

FIGURE 1. Position and cultivation of a catchments of the rivers Silnica and Sufraganiec: 1 – major watershed, 2 – a watershed up to the water-gauge, 3 – flows, 4 – a water-gauge for twenty-four hours observations, 5 – a water-gauge for temporary observations, 6 – artificial dammed water basin, 7 – main roads, 8 – minor roads, 9 – industrial areas, 10 – woodland

Silnicy, po profil Dąbrowa, lasy zajmują 72,9% ogólnej powierzchni zlewni. W kolejnych, niżej położonych zlewniach cząstkowych: Piaski, Jesionowa i Pakosz, zmniejsza się udział lasów, a wzrasta powierzchnia terenów zakrytych (drogi, utwardzone parkingi, zabudowania). Powierzchnie te są nieprzepuszczalne i słabo przepuszczalne oraz charakteryzują się bardzo małą retencyjnością i szorstkością. Zatem z powierzchni tych woda wraz ze zgromadzonymi substancjami, pochodzenia naturalnego i antropogenicznego, spływa z dużą łatwością. Między profilami Piaski i Jesionowa znajduje się zbiornik retencyjny o powierzchni 10,5 ha i pojemności 170 000 m³. Po profil Pakosz, położony poniżej centrum Kielc, udział terenów zakrytych wynosi 30,2%. W dół zlewni, aż do profilu Białogon, zwiększa się nieco powierzchnia lasów i łąk, a tereny zakryte zmniejszają się do 27,6%. W zlewni Sufragańca udział lasów zmniejsza się również w dół zlewni. W zlewni zamkniętej profilem Grzeszyn udział ten wynosi 65,5%, a w zlewni po profil Pietraszki, który położony jest w odcinku ujściowym rzeki, zmniejsza się do 46,7%. Jednocześnie udział powierzchni słabo przepuszczalnych lub nieprzepuszczalnych zwiększa się tu odpowiednio od 1,7 do 6,7% (rys. 1).

Metody badań

W latach hydrologicznych 1998–2001 w ośmiu profilach hydrometrycznych (Silnica – 5, Sufraganiec – 3) prowadzono stacjonarne badania hydrologiczne (ponadto w półroczach letnich funkcjonowało tu 6 limnigrafów) oraz fluwialne. W profilach tych podczas wy-

branych wezbrań (11 wezbrań o różnej genezie) prowadzono pomiary koncentracji materiału rozpuszczonego i zawiesiny oraz temperatury wody (odpowiednio: w półroczu letnim co 1 godzinę od 7:00 do 20:00 i w zimowym – co 2 godziny od 7:00 do 19:00). Koncentrację zawiesiny oznaczano metodą filtracyjną, stosując sączi ilościowe średniej twardości (Brański 1968). Przewodność właściwą badano metodą konduktometryczną, a otrzymane wartości przeliczano na koncentrację materiału rozpuszczonego metodą zaproponowaną przez Markowicz i Pulinę (1979).

Uzyskane wartości wyżej wymienionych parametrów określone o godzinie 7:00 podczas każdego wezbrania porównano z wynikami z innych godzin w czasie określonej doby, a następnie obliczono ich średnie wielkości w wezbraniu. Tak określone wartości posłużyły do ustalenia błędów oznaczeń (B_o):

$$B_o = \frac{\text{wyniki pomiarów godzinowych} \cdot 100\%}{\text{wyniki z godz. 7:00}}$$

Obliczony błąd oznaczeń średnich wartości odpływu jednostkowego, koncentracji zawiesiny, materiału rozpuszczonego oraz temperatury wody, przy pomiarach dokonywanych raz na dobę (godz. 7:00 – 100%) w stosunku do wielkości obliczonych na podstawie pomiarów godzinowych, wykazuje duże zróżnicowanie w zakresie poszczególnych parametrów, profili pomiarowych oraz typu wezbrania.

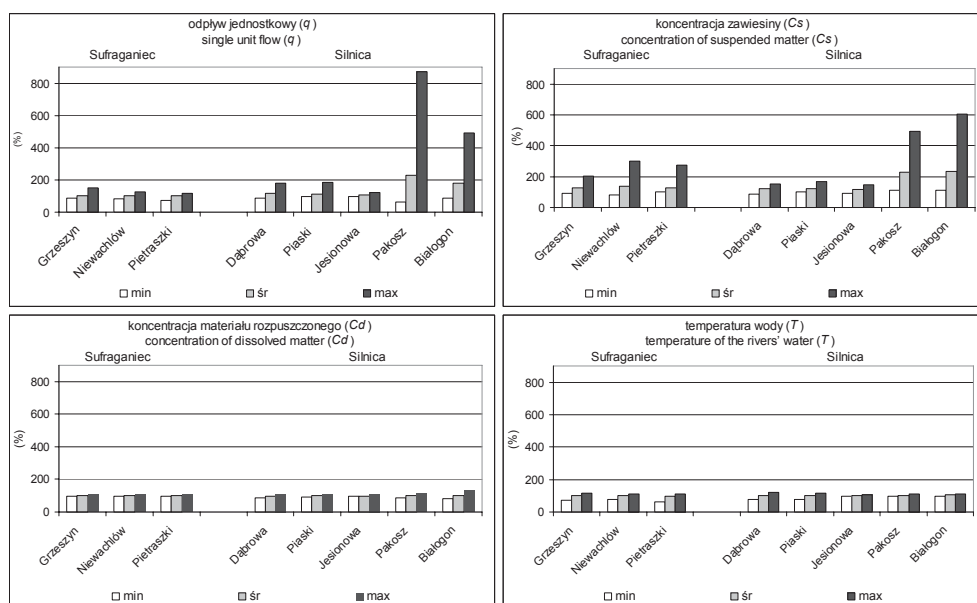
Wyniki

Odływ jednostkowy, koncentracja materiału rozpuszczonego i zawiesiny

oraz temperatura wód rzeki Sufraganiec i Silnicy wykazują bardzo duże czasowe i przestrzenne zróżnicowanie w cyklu rocznym i podczas wezbrań, nawiązując wyraźnie do zagospodarowania ich zlewni (leśne, leśno-rolnicze i zurbanizowane). Zagadnienia te były przedmiotem wcześniejszych publikacji (Ciupa 2006a, b, c).

Podczas wezbrań błąd oznaczenia odpływu jednostkowego wykazuje, spośród analizowanych parametrów, największe zróżnicowanie, zmieniając się w zakresie od 65,4 do 873% (profil Pakosz). Maksymalne jego wartości za-

rejestrowano w profilach Pakosz (873%) i Białogon (492,2%). Również wartość średniego błędu zmienia się w szerokim zakresie, tj. od 103,0% (Niewachlów) do 228,0% (Pakosz) i 179,3% (Białogon). Zdecydowanie wyróżniają się tu dwa profile, tj. Pakosz i Białogon, zamykające zlewnie o największym stopniu urbanizacji (rys. 2). Wartości omawianego błędu różnicują również wezbrania roztopowe i opadowe – wywołane deszczem długotrwałym i konwekcyjnym. Podczas wezbrań wywołanych opadami konwekcyjnymi zarejestrowano największe przestrzenne zróżnicowanie średniego anali-



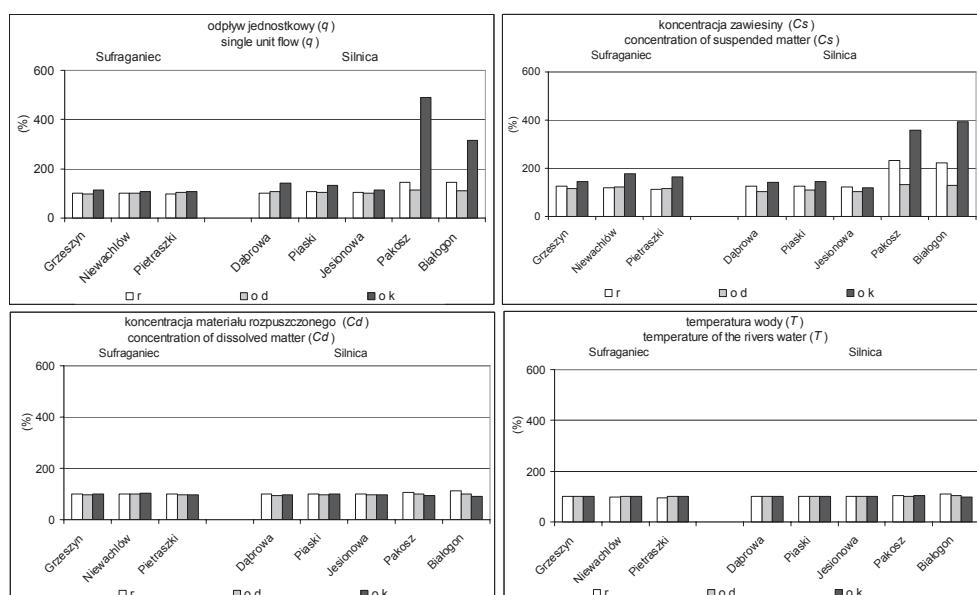
RYSUNEK 2. Ekstremalne i średnie błędy [%]: odpływu jednostkowego, koncentracji zawiesiny i materiału rozpuszczonego oraz temperatury wody, określone podczas 11 wezbrań o różnej genezie w latach 1998–2001 w profilach pomiarowych rzeki Sufragańca i Silnicy przy pomiarach dokonywanych raz na dobę (godz. 7:00 – 100%) w stosunku do wielkości obliczonych na podstawie pomiarów co 1 godzinę (półrocze letnie) i co 2 godziny (półrocze zimowe)

FIGURE 2. Maximum and mean error [%] of the single unit outflow, concentration of suspended and dissolved matter, and temperature of the rivers' water established according to 11 high rivers' stands, of different origin, at the measuring sections along the rivers Sufragańca i Silnicy, in the years 1998–2001. Simple comparison of the assessed error for a measurement per day (7:00 – 100%), and measurements every hour or two hours a day

zowanego błędu oznaczeń od 106,9% (Niewachlów) do 490,7% (Pakosz). W wezbraniach roztopowych największe wartości tego błędu wystąpiły również w zlewniach zurbanizowanych (Pakosz – 144,85%, Białogon – 145,63%). Zlewnie te w największym stopniu reagują na dobowe zmiany temperatury powietrza podczas wiosennych i śródzimowych wezbrań roztopowych. Najmniejsze przestrzenne zróżnicowanie błędu oznaczeń odpływu jednostkowego zanotowano w czasie wezbrań opadowych wywołanych deszczami długotrwałymi, tj. od

99,1% (Grzeszyn) do 114,0% (Pakosz) – rysunek 3.

Ekstremalne wartości błędu oznaczenia koncentracji zawiesiny zmieniały się od 83,6 do 604,5%, a zatem w mniejszym zakresie niż w przypadku odpływu jednostkowego. Jego wartości maksymalne wystąpiły również w profilach zamykających zlewnie o znacznym stopniu urbanizacji, tj. Białogon (604,5%) i Pakosz (494,5%). W profilach tych średni błąd oznaczenia koncentracji zawiesiny był dwa razy większy niż w pozostałych (odpowiednio 235,4 i 230,2%).



RYSUNEK 3. Średnie błędy wartości [%]: odpływu jednostkowego, koncentracji zawiesiny i materiału rozpuszczonego oraz temperatury wody, określone podczas wezbrań o różnej genezie: r – roztopowe, od – opadowe wywołane deszczem długotrwałym, ok – opadowe wywołane deszczem konwekcyjnym) w profilach pomiarowych rzeki Silnicy i Sufragańca przy pomiarach dokonywanych raz na dobę (godz. 7:00 – 100%) w stosunku do wielkości obliczonych na podstawie pomiarów co 1 godzinę (półrocze letnie) i co 2 godziny (półrocze zimowe) w latach 1998–2001

FIGURE 3. Mean error [%] of the single unit outflow, concentration of suspended and dissolved matter, and temperature of the rivers' water established according to 11 high rivers' stands, of different origin: i.e. r – due to melting of snow; od – due to atmospheric precipitation of widespread rains at the measuring sections; ok – due atmospheric precipitation of convection rains along the rivers Sufraganiec and Silnica. The same comparison, as in Figure 2 of the assessed error for a measurement per day (7:00 – 100%), and measurements every hour or two hours a day

Najmniejszy zaś zanotowano w profilu Jesionowa (114,6%), usytuowanym poniżej zbiornika wodnego (rys. 2). Omawiany błąd oznaczenia w wezbraniach wywołanych deszczem konwekcyjnym charakteryzował się największymi wartościami (od 120,2 do 392,7%), a podczas wezbrań wywołanych deszczem długotrwałym zaobserwowano niewielkie jego wartość i przestrzenne zróżnicowanie (od 101,8 do 131,6%). Wynika to z odmiennego sposobu zasilania i dostawy materiału klastycznego do koryt rzecznych, podczas wezbrań o różnej genezie, w zlewniach o innym sposobie zagospodarowania (rys. 3).

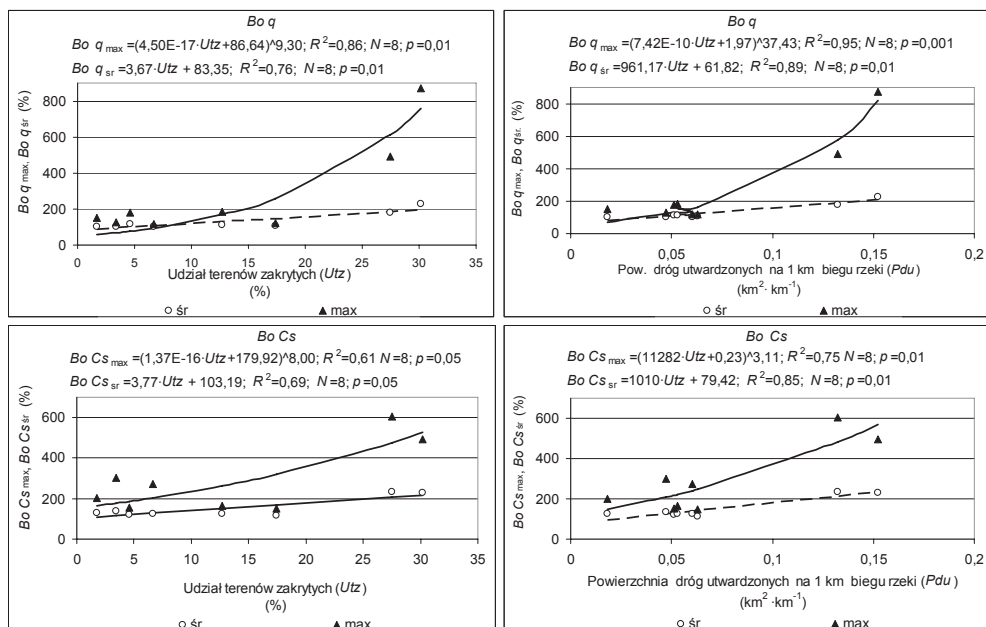
Obliczone ekstremalne wartości błędu oznaczenia koncentracji materiału rozpuszczonego zmieniały się od 80,9 do 132,2%, a średnie jedynie od 98,5 do 101,7%. Maksymalne wartości, podobnie jak w przypadku wyżej omawianych charakterystyk, wystąpiły w profilach poniżej zlewni zurbanizowanych (Pakosz – 116,7%, Białogon – 132,2%) – rysunek 2. Podczas wezbrań roztopowych we wszystkich profilach średni omawiany błąd przekroczył 100%, wykazując największe przestrzenne różnice. Podczas pozostałych typów wezbrań prawie nigdy nie osiągał tej wartości (rys. 3). Wynika z tego, że w badaniach transportu materiału rozpuszczonego, szczególnie w zlewniach o niewielkich wpływach antropogenicznych, wzrost częstotliwości pomiarów w ciągu doby nie wpływa w istotny sposób na zwiększenie dokładności uzyskanych wyników (Froehlich 1975, 1982, Walling 1978, Ciupa 1991).

Błąd oznaczenia temperatury wody wykazywał jeszcze mniejsze zróżnicowanie przestrzenne i czasowe niż błąd

oznaczenia koncentracji materiału rozpuszczonego (rys. 2 i 3).

Zróżnicowanie maksymalnych i średnich wartości błędu oznaczenia odpływu jednostkowego i koncentracji zawiesiny nawiązuje wyraźnie do charakteru użytkowania zlewni. Przeprowadzona analiza związku między wartościami procentowego udziału terenów zakrytych (U_{tz}) w określonej zlewni cząstkowej oraz powierzchni dróg utwardzonych (P_{du}) przypadających na 1 km biegu rzeki ($\text{km}^2 \cdot \text{km}^{-1}$) a wielkością określonych maksymalnych i średnich błędów oznaczeń wskazuje tu na wyraźne zależności. Potwierdzają to stosunkowo wysokie współczynniki determinacji (R^2) – od 0,61 do 0,95, istotnych na poziomie od 0,05 do 0,001 (rys. 4). Stwierdzono, że wraz ze wzrostem powierzchni przekształconych antropogenicznie wzrasta wielkość błędu oznaczeń, szczególnie odpływu jednostkowego i koncentracji zawiesiny.

Zależności te przejawiały się również podczas różnych typów wezbrań (rys. 5). Związek określający prawidłowości przestrzennego zróżnicowania omawianych parametrów podczas wezbrań wywołanych opadami konwekcyjnymi opisują równania wykładnicze, a współczynnik determinacji (R^2) przyjmuje wartości od 0,75 do 0,88, istotne na poziomie 0,01 i 0,001. Podczas wezbrań roztopowych przybliżają go równania liniowe, a współczynnik R^2 jest również wysoki (od 0,78 do 0,87) i istotny statystycznie. Najslabszy analizowany związek, lub jego brak, odnotowano w trakcie wezbrań opadowych wywołanych deszczem długotrwałym (rys. 5).



RYSUNEK 4. Związek pomiędzy udziałem terenów zakrytych (Utz) oraz powierzchnią dróg utwardzonych przypadających na 1 km biegu rzeki (Pdu) a wartościami maksymalnymi ($Bo q_{max}$) i średnimi błędów oznaczeń odpływu jednostkowego ($Bo q_{sr}$) oraz koncentracji zawiesiny ($Bo Cs_{max}$, $Bo Cs_{sr}$) w 11 wezbraniach w poszczególnych zlewniach cząstkowych zlewni Sufragańca i Silnicy przy pomiarach dokonywanych raz na dobę (godz. 7:00 – 100%) w stosunku do wielkości obliczonych na podstawie pomiarów co 1 godzinę (półrocze letnie) i co 2 godziny (półrocze zimowe) w latach 1998–2001 [%]

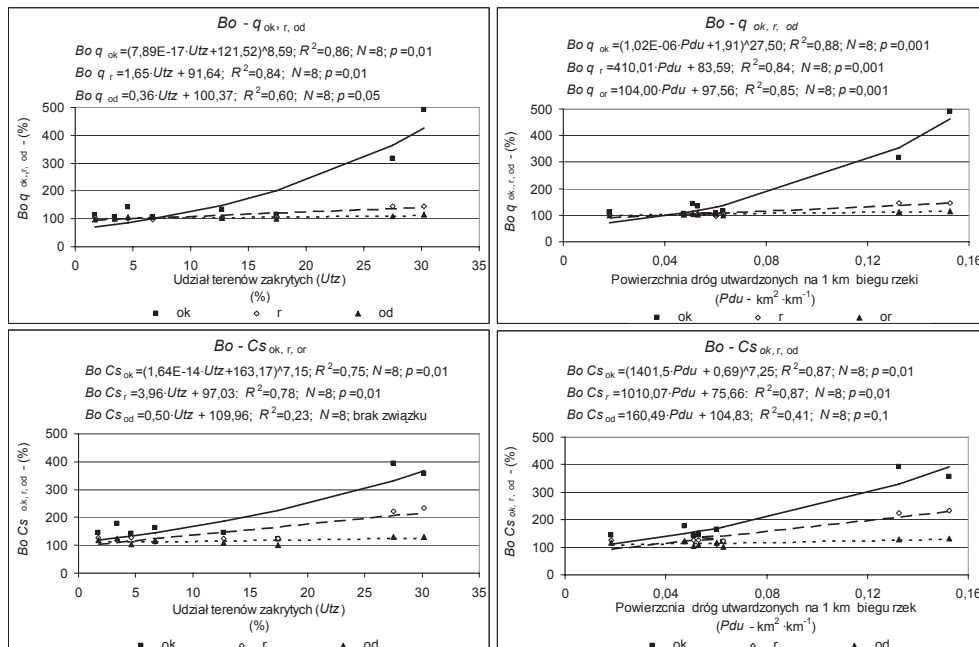
FIGURE 4. Relationship between “covered” areas (Utz) and areas of permanent roads per a km of the river bed (Pdu) and maximum ($Bo q_{max}$), and mean ($Bo q_{sr}$) percentage of the error for the measured values of the single unit outflow, concentration of suspended matter at sub-catchments of the rivers Silnica and Sufaganiec during 11 high rivers’ stands. All the measurements have been done either one per day (7:00 – 100%) or every hour, or two hours a day

Wnioski

Spośród rozpatrywanych parametrów największy błąd oznaczenia podczas wezbrań o różnej genezie wykazywał średni odpływ jednostkowy. Błąd ten zmieniał się w zakresie od 65,4 do 873%. Największe jego przestrzenne zróżnicowanie zanotowano podczas wezbrań wywołanych opadami konwekcyjnymi, a najmniejsze w czasie wezbrań opadowych wywołanych deszczami długotrwałymi. Zdecydowanie największe

wartości występują w profilach zamykających zlewnie zurbanizowane (Pakosz, Białogon).

Ekstremalne wartości błędu oznaczenia koncentracji zawiesiny zmieniły się od 83,6 do 604,5%. Największe jego wartości wystąpiły w wezbraniach wywołanych deszczem konwekcyjnym, szczególnie w profilach zamykających zlewnie zurbanizowane, a najmniejsze podczas wezbrań wywołanych deszczem długotrwałym.



RYSUNEK 5. Związek pomiędzy udziałem terenów zakrytych (Utz) oraz powierzchnią dróg utwardzonych przypadających na 1 km biegu rzeki (Pdu) a wartościami średnich błędów oznaczeń odpływu jednostkowego ($Bo q$) i koncentracji zawiesiny ($Bo Cs$) w wezbraniach różnej genezy (ok – opadowe wywołane deszczem konwekcyjnym; r – roztopowe; od – opadowe wywołane deszczem długotrwałym) w profilach pomiarowych rzeki Sufragańca i Silnicy przy pomiarach dokonywanych raz na dobę (godz. 7:00 – 100%) w stosunku do wielkości określonych na podstawie pomiarów co 1 godzinę (półrocze letnie) i co 2 godziny (półrocze zimowe) w latach 1998–2001 [%]

FIGURE 5. Relationship between “covered” areas (Utz) and areas of permanent roads per a km of the river bed (Pdu) and mean ($Bo q$) percentage of the error for the measured values of the single unit outflow, concentration of suspended matter during the 11 high rivers’ stands, of different origin: ok – due atmospheric precipitation of convection rains; i.e. r – due to melting of snow; od – due to atmospheric precipitation of widespread rains. Observations have been carried out at the measuring sections along the rivers Silnica and Sufragańec either one per day (7:00 – 100%) or every hour, or two hours a day

Błędy oznaczenia koncentracji materiału rozpuszczonego zmieniały się od 80,9 do 132,2%, a średnie jedynie od 98,5 do 101,7%. Maksymalne wartości, podobnie jak w przypadku wyżej omawianych charakterystyk, wystąpiły w profilach poniżej zlewni zurbanizowanych.

Z przeprowadzonej analizy błędów oznaczeń wynika, że w badaniach odpływu i transportu zawiesiny w zlewniach rzecznych wraz ze wzrostem powierzch-

ni przekształconych antropogenicznie rośnie błąd oznaczeń wynikający z częstotliwości pomiarów.

W badaniach fluwialnych, szczególnie transportu zawiesiny w zlewniach zurbanizowanych, zmierzających do ujęć bilansowych oraz określenia mechanizmu transportu fluwialnego, niezbędna jest duża częstotliwość pomiarów (np. co 1–2 godziny). Przypuszczać można jednak, że dopiero przy zastosowaniu pomiarów ciągłych można w pełni wy-

jaśnić wiele mechanizmów transportu fluwialnego oraz uzyskać szczegółowe ujęcia bilansowe.

Literatura

- BANASIK K. 1994: Model sedymentogramu wezbrania opadowego w małej zlewni rolniczej. Wydaw. SGGW, Warszawa.
- BRAŃSKI J. 1967: Dokładność punktowego pomiaru zmaczenia wody. *Wiad. Służ. Hydrol. i Meteor.* 1 (69): 19–30.
- BRAŃSKI J. 1968: Dokładność wielopunktowych pomiarów koncentracji rumowiska unoszonego w rzekach na podstawie analizy błędów przypadkowych. *Prace PIHM* 94: 23–39.
- CIUPA T. 1991: Współczesny transport fluwialny w zlewni Białej Nidy. Wydaw. WSP, Kielce.
- CIUPA T. 2006a: Temperatura wód i występowanie zjawisk lodowych na rzekach odwadniających zlewnie o różnym sposobie użytkowania na przykładzie Silnicy i Sufragańca (Góry Świętokrzyskie). W: Regionalne Studia Ekologiczno-Krajobrazowe. Problemy Ekologii Krajobrazu XVI/1. Red. A. Richling i in. Wydaw. WGiSR UW, IG AŚ w Kielcach, Warszawa: 381–390.
- CIUPA T. 2006b: Rola użytkowania terenu w kształtowaniu transportu materiału rozpuszczonego w małych rzekach na przykładzie Silnicy i Sufragańca (Góry Świętokrzyskie). W: Przemiany środowiska geograficznego Polski Północno-Zachodniej. Red. A. Kostrzewski, J. Czerniawska. Wydaw. UAM, Poznań: 177–184.
- CIUPA T. 2006c: Transport zawiesiny podczas różnych typów wezbrań w zurbanizowanej zlewni rzeki Silnicy i rolniczo-leśnej Sufragańca (Góry Świętokrzyskie). W: Funkcjonowanie geoekosystemów zlewni rzecznych 4. Procesy ekstremalne w środowisku geograficznym. Red. A. Kostrzewski, J. Szpikowski. Wydaw. UAM, Poznań: 81–96.
- FROEHLICH W. 1975: Dynamika transportu fluwialnego Kamienicy Nawojowskiej. *Prace Geogr. IGiPZ PAN*, 114.
- FROEHLICH W. 1982: Mechanizm transportu fluwialnego i dostawy zwietrzelin w górskiej zlewni fliszowej. *Prace Geogr. IGiPZ PAN* 143.
- MARKOWICZ M., PULINA M. 1979: Ilościowa półmikroanaliza chemiczna wód w obszarach krasu węglanowego. *Prace Nauk. UŚ* 289.
- PASŁAWSKI Z. 1965: Rozważania nad metodyką badań ilościowych unoszonego rumowiska rzeczno. *Wiad. Służ. Hydrol. i Meteor.* 1 (61): 77–89.
- WALLING D.E. 1978: Reliability considerations in the evaluation and analysis of river loads. *Z. f. Geomorph. Suppl.* 29: 29–42.

Summary

Frequency of field measurements as a clue for determination of the magnitude and dynamics of the fluvial transport during high water stands within catchments of different use as exemplified by the rivers Silnica and Sufraganiec (Kielce). A major problem in the quantitative hydrological studies, especially fluvial, might be dealing with assessment of methods and results basing on error analyses. As for the mountain and Upland Rivers, the most common source of the errors could be low frequency of measurements and collection of samples. These particular studies have been carried out for the 8 sectors (sub-catchments) of the Silnica and Sufraganiec catchments of different use. The urban catchments of the river Silnica has been spread over 49.40 km², and agricultural-woodland catchments of Sufraganiec has embraced 62.01 km². During 11 high rivers' stands, of variable origin, a few parameters have been determined, i.e. single unit outflow, concentration of suspended matter, concentration of dissolved matter, and temperature of the river waters every hours for the summer months and every two hours for the winter months. All the daily values of the above mentioned parameters have been compared with those values at 7 o'clock every day, and calculated mean values for the particular high rivers' stand. Maximum error for the values of single unit outflow has been highly variable compare to

the other values, being in the range of 65.4 to 873%. The highest spatial variability of the mean error of the measurements has been observed during high rivers' stands related to the convection rains, whereas the smallest spatial variability of that error has been noted during high rivers' stands due to widespread rains. The highest error while assessing our results has been found at the end of the urban catchments (Pakosz, Białogon). Maximum error for the concentration of the suspended matter has changed from 83.6 to 604.5%. Similarly, maximum error for the concentration of the dissolved matter has changed from 80.9 to 132.2%, whereas mean values have shown an error of 98.5 to 101.7%. All the observations have led to a conclusion that error for all the determined values is directly

related to the space modified anthropogenically. If that space increases, the error for measuring parameters of the fluvial transport increases too. It means, that only high frequency of field measurements of the fluvial transport could reduce the errors while determining parameters of the transport. Ideally, more or less continuous measurements could reveal some complex mechanisms of fluvial transport.

Author's address:

Tadeusz Ciupa
Uniwersytet Humanistyczno-Przyrodniczy im.
Jana Kochanowskiego
Instytut Geografii
al. Świętorzyska 15, 25-406 Kielce