

ZALEŻNOŚĆ PRZEPIYU KORYTOTWÓRCZEGO RZEK GÓRSKICH OD SKŁADU GRANULOMETRYCZNEGO RUMOWISKA WLECZONEGO

Alicja Michalik, Artur Radecki-Pawlik

Streszczenie: W artykule podjęto próbę przedstawienia wpływu drobnych frakcji rumowiska wleczonego na wielkość jednostkowego przepływu korytotwórczego. Badania przeprowadzono dla siedmiu potoków górskich w Karpatach Polskich: Kamienicy, Targaniczanki, Łubinki (ze zlewni Skawy) oraz Tarnawki, Paleczki i Stryszawki (ze zlewni Dunajca) oraz Raby. Dla niektórych potoków w celu obliczenia transportu rumowiska wleczonego skorzystano z formuły Meyera-Petera i Millera, dla Raby i Targaniczanki wykorzystano wyniki pomiarów radioizotopowych transportu rumowiska. Do obliczeń przepływu korytotwórczego wykorzystano metodę Wolmana-Millera.

Słowa kluczowe: przepływ korytotwórczy, transport rumowiska wleczonego, potok górski

WSTĘP

W badaniach związanych z potokami i rzekami góorskimi jedną z ważniejszych ról odgrywa znajomość wielkości przepływu korytotwórczego, a co jest ściśle z tym związane – znajomość wielkości transportu rumowiska wleczonego. Pojęcie przepływu korytotwórczego (Q_{dd}) zostało wprowadzone przez Schaffernaka [1922], który określa go jako przepływ powodujący w ciągu dłuższego czasu maksymalny transport rumowiska. Z czasem, ta bardzo ogólna definicja uległa modyfikacjom i uzupełnieniom. Marlette i Walker [1968] definiują Q_{dd} jako przepływ, powyżej którego połowa (z ilości wyliczonej teoretycznie) rumowiska wleczonego zostanie przemieszczona. Poziom wody odpowiadający Q_{dd} nazywają oni „stanem budowy koryta cieku”. Lambor [1971] uzupełnia definicję Schaffernaka, mówiąc, że Q_{dd} to przepływ, który najbardziej wpływa na formowanie się koryta rzecznoego, tzn. taki przepływ, przy którym koryto ulega największym przeobrażeniom. Mordziński [1972] uważa, że jest to przepływ, który trwając jako stały przez pewien czas (np. przez rok), powoduje po tym czasie takie same deformacje koryta, jak seria zmiennych przepływów naturalnych trwających kró-

cej, a jednocześnie deformujących koryto ciekę wyłącznie ze względu na swą intensywność. Leopold [Bray 1975] mówi, że Q_{dd} powinien być szacowany za pomocą przepływu brzegowego, a pojawić się może w okresie 1,5-rocznym cyklu hydrologicznego. Prins i De Vries [1971] łączą przepływ korytotwórczy z brzegowym poprzez spadek i szerokość ciekę w linii zwierciadła wody. Podobnie czyni Carling [1988], definiując Q_{dd} jako przepływ, podczas którego następuje transport większości rumowiska dla ustalonego spadku zwierciadła wody. Wyznaczaniem Q_{dd} zajmowali się także Wolman i Miller [1960]. Autorzy ci koncentrują się na częstotliwości występowania przepływów w ciągu określonego czasu obserwacyjnego (wystarczająco długiego z hydrologicznego punktu widzenia) oraz na implikacjach geomorfologicznych tego zjawiska. Analiza ilości transportowanego materiału rzeką doprowadza ich do wniosku, że największa ilość rumowiska transportowana jest przez wodę występującą średnio co 2 lata. Autorzy twierdzą, że za zmiany w geometrii przekroju odpowiedzialne są przepływy mniejsze lub bliskie brzegowemu. Według nich, częstotliwość występowania takich przepływów ma zasadniczy wpływ na możliwość zmian przekroju poprzecznego ciekę. Oznacza to, że wszystkie cechy morfologiczne koryta rzeki są zmieniane przez przepływy występujące częściej, a w efekcie dłużej, a nie przez wody katastrofalne pojawiające się raz na 100 i więcej lat.

Wartości Q_{dd} są to takie przepływy, przy których przekroczone są naprężenia krytyczne ruchu rumowiska. Metoda Wolmana i Millera sprowadza się do analizy transportu rumowiska rzeczno-ego wraz z analizą częstotliwości występowania przepływów w ciekę.

Celem niniejszego artykułu jest ukazanie zależności między przepływem korytotwórczym i składem granulometrycznym materiału dennego rzeki górskiej, ze szczególnym uwzględnieniem zawartości drobnych frakcji, tj. ziaren o średnicach mniejszych niż $d = 0,01$ m. Ponadto, w pracy przedstawiono wybrane wielkości fizyczne, takie jak naprężenia styczne czy też opory ruchu, dotyczące koryt badanych potoków górskich.

MATERIAŁY I METODYKA BADAŃ

Charakterystyka badanych potoków

Badaniami objęto siedem cieków. Wśród nich są potok Targaniczanka (ze zlewni Skawy) i rzeka Raba, na których przeprowadzono bezpośrednie pomiary intensywności transportu rumowiska i początku ruchu poszczególnych frakcji [Michalik 1990, Bartnik 1992]. Pozwoliło to na wykorzystanie ich do testowania metod wyznaczania przepływu korytotwórczego. Pozostałe ciekę, na których przeprowadzono badania (w wybranych przekrojach hydrologicznych), to: Kamienica Nawojowska i Łubinka (ze zlewni Skawy) oraz Tarnawka, Paleczka i Stryszawka (ze zlewni Dunajca). Różnią się one zarówno wielkościami zlewni, jak i składem materiału dennego (tab. 1). W celu ujednoczenia obserwacji badawcze odcinki pomiarowe, a także pomiarowe przekroje poprzeczne zostały usytuowane w obszarach szyi rozpatrywanych cieków [Wołoszyn i in. 1994]. Przeanalizowanie wartości parametru Łochtina (który wyraża stosunek przeciętnej średnicy ziaren do spadku koryta) [Wołoszyn i in. 1994] dla poszczególnych cieków, pro-

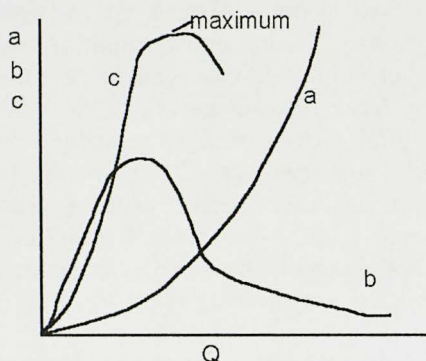
wadzi do wniosku, że część potoków transportuje rumowisko denne przez cały rok (trwały ruch rumowiska), część tylko podczas wezbrań, a pozostałe okresowo. I tak, dla potoków Stryszawka i Łubinka wartość parametru Łochtina (R) wynosi mniej niż 5 (dla Stryszawki $R = 2,3$, a dla Łubinki $R = 2,8$), co oznacza, że transport na tych potokach odbywa się w sposób stały, lecz o różnym natężeniu. Potok Stryszawka kwalifikuje się do tzw. potoków wędrujących, tworzących meandry i często zmieniających swoje koryto ($R < 2,5$). Potoki: Targanicznka ($R = 7,3$), Tarnawka ($R = 6,5$) i Kamienica ($R = 6,3$) mają okresowy ruch rumowiska, a ich materiał denny łatwo podlega transportowi nawet przy najmniejszych wezbraniach. Rzeka Raba ($R = 17,4$) i potok Paleczka ($R = 13,9$) uruchamiają rumowisko denne wyłącznie podczas wezbrań. Żaden z rozpatrywanych potoków nie ma koryta stałego ($R > 40$).

Tabela 1. Podstawowe parametry zlewni i przekrojów poprzecznych badanych cieków
Table 1. Basic catchment and cross-section parameters of investigated streams

Potok Stream	Zlewnia – Catchment			Przekrój – Cross-section	
	Powierzchnia zlewni Catchment area	Opad atmosferyczny Precipitation	Długość rzeki River length	Szerokość przekroju Cross section width	Stosunek szerokości (W) przekroju do średniej głębokości (D)
	F [km ²]	P [mm]	L [km]	W [m]	W/D ratio
Raba (1988)	768	900	58	51	30,9
Raba (1991)	796	900	61	53	31,7
Targanicznka	23,5	850	9	7	10,7
Kamienica	106,7	900	14,1	34	34
Łubinka	26,1	800	4,5	9	12,5
Paleczka	47	970	11,2	14	12,9
Stryszawka	22,8	925	6,1	5	6,25
Tarnawka	24,6	950	5,2	10	18,8

Obliczenie przepływu korytotwórczego metodą Wolmana-Millera

Jak wspomniano we wstępie, według Wolmana-Millera [1960] wartości Q_{dd} są to takie przepływy, przy których przekroczone są naprężenia krytyczne ruchu rumowiska. Metoda obliczenia sprowadza się do analizy transportu rumowiska rzecznoego wraz z analizą częstotliwości występowania przepływów w cieku. Autorzy sugerują, że znalezienie tych zależności dla dowolnego cieku pozwala wykreślić krzywą transportu rumowiska oraz częstotliwości przepływu, jednocześnie konstruując wspólną krzywą powstałą wskutek przemnożenia wartości rzędnych obu wspomnianych wyżej funkcji (iloczyn wartości transportu i częstotliwości). Wielkość maksymalna uzyskanej w ten sposób krzywej będzie odpowiednikiem przepływu mającego największy wpływ na ewentualne zmiany w geometrii przekroju poprzecznego cieku, przepływem odpowiedzialnym za większość transportowanego rumowiska, a co za tym idzie – przepływem dominującym w kształtowaniu koryta cieku (rys. 1).



- a – krzywa przemieszczeń – rate curve
 b – krzywa częstotliwości występowania zjawiska – frequency curve
 c – iloczyn krzywej przemieszczeń i częstotliwości – product of „a” and „b”

Rys. 1. Zależność Wolmana i Millera między częstotliwością danego zjawiska a intensywnością przemieszczeń

Fig. 1. Wolman and Miller relationship between frequency of occurrence and a rate of movement

Według Wolmana i Millera, przepływy rzędu kilkudziesięciu procent przepływu brzegowego (zdefiniowanego jako ten, który wypełnia koryto ciek do krawędzi jego brzegów) są wystarczające, by uznać je za dominujące. Z kolei, rozpatrując rolę wód katastrofalnych – wielkie wody katastrofalne są odpowiedzialne często za kształt całych dolin rzecznych, przecinanie meandrów, odkładanie się ogromnych ilości materiału dennego w różnych miejscach, uskoki terenowe, obsunięcia skarp, podmycia czy też dewastacje koryt. Może dlatego kojarzą się one właśnie z przepływami najważniejszymi dla zmian morfologicznych koryta ciek. W efekcie tak nie jest. Rzadkość ich występowania nie ma wpływu (lub ma znikomym) dla codziennych, cotygodniowych i corocznych zmian geometrii przekroju poprzecznego ciek w skali mikro. Skala mikro odniesiona jest do doliny rzecznej czy też zlewni, a skala makro do samego ciek i jego brzegów. Szczegóły wykorzystania omawianej metody przepływu korytotwórczego można znaleźć w pracach Michalik i Radeckiego-Pawlika [1993] oraz u Radeckiego-Pawlika [1994, 1997].

WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Badania empiryczne wybranych cieków obejmowały geometrię przekrojów poprzecznych, spadki koryt oraz skład granulometryczny materiału dennego. W celu pokazania różnorodności badanego rumowiska włączono jego cechy charakterystyczne zestawiono w tabeli 2, natomiast istotne wyniki pomiarów geometrycznych i związanych z nimi wielkości fizycznych ujęto w tabeli 3.

Tabela 2. Parametry granulometryczne badanych potoków
Table 2. Granulometric parameters of investigated streams

Potok – Stream	d_m [m]	d_{50} [m]	μ [-]	ϵ [-]	C_d [-]	δ [-]
Targaniczanka km 9+000	0,1100	0,1070	2,93	6,43	0,69	1,94
Raba km 58+000	1988 rok 0,0720	0,0700	3,29	8,87	0,60	2,94
km 61+000	1990 rok 0,0480	0,0450	5,40	14,6	0,47	3,08
Kamienica km 14+100	0,0590	0,0467	21,96	167,6	0,13	3,92
Łubinka km 4+500	0,0366	0,0147	24,7	177,4	0,36	5,71
Stryzawka km 6+100	0,0270	0,0100	28,57	280	0,49	6,56
Tarnawka km 5+200	0,0504	0,0540	7,84	27,88	0,24	2,33
Paleczka km 11+200	0,0436	0,0300	11,52	66,15	0,27	3,11

Tabela 3. Wybrane parametry geometryczne i hydrauliczne badanych potoków
Table 3. Chosen hydraulics and geometric parameters of investigated streams

Potok – Stream	b_{pwl} [m]	b'_{zw} [m]	h_{dd} [m]	$\frac{b_{zw}}{h_{dd}}$	$\frac{b_{pwl}}{h_{dd}}$	τ_m [N/m ²]	f_m	f_{15}	f_{95}
Raba km 61+000	30,0	53	1,00	53,0	30,0	32,37	0,042	0,499	0,0173
Targaniczanka km 9+000	6,0	7	0,59	12,7	10,2	81,03	0,045	0,626	0,0257
Kamienica km 14+100	14,0	34	0,45	75,5	31,1	41,27	0,043	1,279	0,0221
Łubinka km 5+500	6,1	9	0,46	19,6	13,3	32,49	0,101	1,004	0,0236
Paleczka km 11+200	10,5	14	0,75	18,7	14,0	32,95	0,033	0,709	0,0173
Stryzawka km 6+100	3,5	5	0,40	12,5	8,7	26,17	0,107	0,808	0,0197
Tarnawka km 5+200	9,5	10	0,45	22,2	21,1	34,47	0,042	0,709	0,0245

Wyniki zaprezentowane w tabeli 3 wykorzystano do wyznaczenia przepływu korytotwórczego poszczególnych cieków, co ujęto w tabeli 4, w której dodatkowo zamieszczono również zawartość procentową drobnych frakcji.

Tabela 4. Wielkości związane z przepływem korytotwórczym oraz zawartością drobnych frakcji badanych potoków

Table 4. Parameters connected with dominant discharge and fine bedload of investigated streams

Potok – Stream	Q_{dd} [m ³ /s]	q_{dd} [m ² /s]	J_{dd}	d_m [m]	Zawartość drobnych frakcji Fine bedload	
					[%]	
					$d < 0,005$ m	$d < 0,01$ m
Raba km 61+000	45,0	1,50	0,0033	0,048	6,0	11
Targaniczanka km 9+000	7,0	1,16	0,0140	0,110	2,5	4
Kamienica km 14+100	18,5	1,32	0,0093	0,059	15,0	21
Łubinka km 5+500	4,3	0,70	0,0072	0,020	31,0	44
Paleczka km 11+200	14,3	1,31	0,0031	0,043	13,0	22
Stryszawka km 6+100	2,5	0,71	0,0067	0,015	37,0	50
Tarnawka km 5+200	8,7	0,89	0,0078	0,051	7,0	12

Oznaczenia do tabel 1–4 są następujące:

b_{pwl} – szerokość pasa wleczenia (m),

b_{zw} – szerokość zwierciadła wody (m),

$C_d = (d_{90} \cdot d_{10})/d_{50}^2$ – cecha dominacji Kollisa,

D (lub h_{max}) – największa głębokość w przekroju (m),

d – średnica ziaren rumowiska (m),

d_m – średnica miarodajna rumowiska (m),

f – bezwymiarowe naprężenie krytyczne (parametr Shieldsa),

f_m – bezwymiarowe naprężenie krytyczne dla średnicy miarodajnej,

f_{in} – bezwymiarowe naprężenie krytyczne dla frakcji, od których $n\%$ ziaren jest mniejszych (np. f_{i5} lub f_{i95} itp.),

F – powierzchnia zlewni (km²),

h – średnia głębokość wody w przekroju (m),

h_{dd} – głębokość wody przy przepływie korytotwórczym (m),

J_{dd} – spadek zwierciadła wody przy przepływie korytotwórczym,

L – długość ciek (km),

P – opad atmosferyczny (mm),

q_{dd} – przepływ jednostkowy wody przy przepływie korytotwórczym (m³ · s⁻¹ · m⁻¹),

Q_{dd} – przepływ korytotwórczy (m³ · s⁻¹),

W – maksymalna szerokość przekroju poprzecznego (m),

$\varepsilon = d_{95}/d_5$ – wskaźnik różnoziarnistości według Kronza,

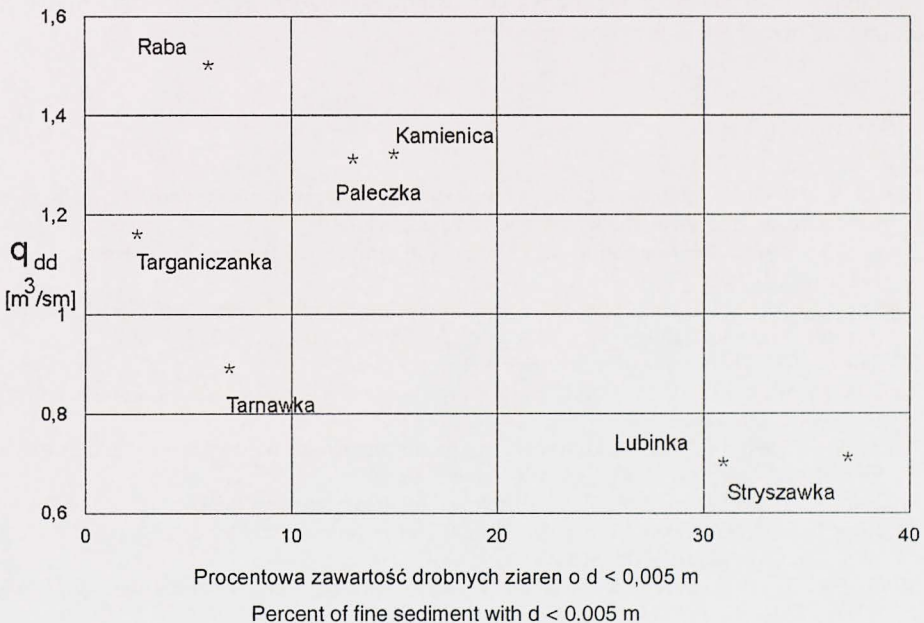
$\delta = (d_{84}/d_{16})^{1/2}$ – odchylenie standardowe krzywej przesiewu,

$\mu = d_{60}/d_{10}$ – współczynnik sortowania według Hazena,

τ – naprężenia styczne (ścinające) lub siła poruszająca ($N \cdot m^{-2}$),

τ_m – naprężenia styczne na średnicę miarodajną dla przepływu korytotwórczego ($N \cdot m^{-2}$).

Analizując wyniki obliczeń, można stwierdzić, że przy porównywalnych napełnieniach (odpowiadających przepływowi korytotwórczemu) występują znaczne różnice naprężeń stycznych, co szczególnie widoczne jest w wartościach parametru Shieldsa dla średnic miarodajnych. Na przykład, rozpatrując trzy potoki: Stryszawkę, Łubinkę i Targaniczankę, dla których napełnienie (h_{dd}) wyniosło około 0,45 m, bezwymiarowe naprężenie (f_m) dla Stryszawki wynosi 0,107, dla Łubinki 0,101, a dla Targaniczanki 0,045. Natomiast dla frakcji d_{95} naprężenia bezwymiarowe są bardziej wyrównane. Tak znaczną różnicę dla parametru Shieldsa dla średniej frakcji wydaje się najłatwiej wyjaśnić poprzez dużą zawartość drobnych ziaren w materiale dennym. I tak, dla Stryszawki zawartość drobnych frakcji wynosi 50%, dla Łubinki 44%, a dla Targaniczanki tylko 4%. Można stwierdzić również, że zarówno Stryszawka, jak i Łubinka mają najbardziej różnoziarnisty materiał, o czym świadczy wartość parametru różnoziarnistości (tab. 2). W celu pełniejszej ilustracji wpływu zawartości drobnych ziaren rumowiska na przepływ korytotwórczy na rysunku 2 przedstawiono zależność jednostkowego przepływu korytotwórczego od zawartości drobnych ziaren $d < 0,005$ m.



Rys. 2. Zależność między jednostkowym przepływem korytotwórczym a zawartością frakcji $d < 0,005$ m

Fig. 2. Unit dominant discharge and fine bedload $d < 0.005$ m relationship

PODSUMOWANIE

Na podstawie rozkładu punktów uzależniających jednostkowy przepływ korytotwórczy można przypuszczać, że oprócz spadku drugim czynnikiem decydującym o jego wielkości jest zawartość procentowa drobnych ziaren. Na przykładzie wyników uzyskanych dla Stryszawki i Łubinki widać, że fakt, iż prawie połowa rumowiska ma ziarna mniejsze niż 1 cm, powoduje, że przepływ jednostkowy $q_{dd} = 0,7 \text{ m}^2/\text{s}$ może wywołać deformację dna koryta.

Z przeprowadzonych badań wynika, że skład granulometryczny materiału dennego cieków ma wpływ na wartość naprężeń krytycznych poszczególnych frakcji, a tym samym na wartość przepływu korytotwórczego. W związku z tym można stwierdzić, że:

- im większa jest zawartość drobnych frakcji rumowiska, tym mniejszy przepływ może okazać się kształtującym koryto cieków,
- parametr Shieldsa dla średnicy miarodajnej w potoku o większej zawartości drobnych frakcji (potoki Łubinka i Stryszawka) jest niemal trzykrotnie większy niż dla pozostałych cieków.

Reasumując, można stwierdzić, że w ciekach, w których materiału dennego o średnicy $d < 0,001 \text{ m}$ jest mniej niż 20%, łatwo dochodzi do zmian w geometrii dna, gdyż stosunkowo mała wartość przepływu jednostkowego, rzędu $q_{dd} = 1,0 \text{ m}^2/\text{s}$, może już okazać się przepływem korytotwórczym.

PIŚMIENNICTWO

- Bartnik W., 1992. *Hydraulika potoków i rzek górskich z dnem ruchomym. Początek ruchu rumowiska*. Rozpr. hab. Zesz. Nauk. AR w Krakowie, Kraków.
- Bray D.J., 1975. Representative discharges for gravel-bed rivers in Alberta, Canada. *Journ. of Hydrol.*, 27, 143–153.
- Carling P.A., 1988. The concept of the dominant discharge applied to two gravel-bed streams in relation to channel stability thresholds. *Earth Surf. Proc. and Land.*, 13, 355–367.
- Lambor J., 1971. *Hydrologia inżynierska*. PWN, Warszawa.
- Marlette R., Walker H., 1968. Dominant discharge at plate Missouri confluence. *Journ. of Wat. Div.*, 94, 5801–5805.
- Michalik A., 1990. *Badania intensywności transportu rumowiska wleczonego w rzekach karpacczych*. Rozpr. hab. Zesz. Nauk. AR w Krakowie, Kraków.
- Michalik A., Radecki-Pawlik A., 1993. Discharge of stream forming the channel in the Dunajec River basin. *International Conference: Runoff and Sediment Yield Modelling*, (ed.): K. Banasik i A. Żbikowski, RSY-93, SGGW Warszawa, 273–280.
- Mordziński S., 1972. Przepływ kształtujący koryto i metody jego wyznaczania. *Wiad. Mel. i Uzyt. Ziel.*, X, 4, 76–93.
- Prins A., De Vries M., 1971. On dominant discharge concept of rivers. *Proc. of XIV Congress of IAHR*, 163–169.
- Radecki-Pawlik A., 1994. Wyznaczenie przepływu kształtującego koryto rzeki górskiej na przykładzie rzeki Raby poniżej zbiornika Dobczyce. *Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu*, 143, 165–173.

- Radecki-Pawlik A., 1997. The determination of the dominant discharge for a mountain river – it's impact for a training of a river cross section. Roczn. Nauk. AR w Poznaniu, 19, 2, 7–15, poz. bibl.16.
- Schaffernak F., 1922. Neue Grundlagen für die Berechnung der Geschiebeführung in Flussläufen. F. Deuticke, Leipzig und Wien, 1–47.
- Wolman M., Miller J., 1960. Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes. Journ. of Geol., 68, 951–958.
- Włoszyn J., Czamara W., Eliasiewicz R., Krężel J., 1994. Regulacja rzek i potoków. Wydaw. AR we Wrocławiu, Wrocław.

THE INFLUENCE OF FINE SEDIMENT IN BEDLOAD ON DOMINANT DISCHARGE FOR MOUNTAIN STREAMS

Abstract: The paper presents the way in which the presence of fine sediment in bedload influences the unit dominant discharge value. The investigations were carried on seven streams chosen in Polish Carpathians: the Raba River and the Kamiénica Stream, the Targaniczanka Stream and Lubinka stream (from the Skawa river catchment) and the Tarnawka stream, the Paleczka stream and the Stryżawka stream (from the Dunajec catchment). For some streams the bedload transport was calculated using Meyera-Petera i Millera formulae, for the Raba River and the Targaniczanka stream the radioisotope method of measurement bedload transport was used. To calculate the dominant discharge Wolman-Miller method was chosen.

Key words: dominant discharge, bed-load transport, mountain stream

A. Michalik, A. Radecki-Pawlik, Katedra Inżynierii Wodnej, Akademia Rolnicza w Krakowie, al. Mickiewicza 21, 30-039 Kraków