

Parametry hydrologiczne wezbrań opadowo-nawalnych w polskiej, słowackiej i rumuńskiej części Karpat

*Hydrological parameters of rainstorm-induced flash floods
in the Polish, Slovakian and Romanian parts of the Carpathians*

TOMASZ BRYNDAL

Instytut Geografii, Uniwersytet Pedagogiczny w Krakowie
30-084 Kraków, ul. Podchorążych 2; tbryndal@ap.krakow.pl

Zarys treści. Analizowano przepływy maksymalne oraz maksymalne odpływy jednostkowe w małych zlewniach położonych na obszarze polskiej, słowackiej i rumuńskiej części Karpat. Podczas $\frac{3}{4}$ badanych wezbrań przepływ maksymalny był mniejszy od $50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, a odpływ jednostkowy nie przekraczał $5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Maksima tych charakterystyk w polskiej, słowackiej i rumuńskiej części Karpat wynosiły odpowiednio 84, 230 i $320 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ dla przepływu oraz 15, 26 i $12,9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ dla odpływu jednostkowego. Opracowano równania, za pomocą których można oszacować maksima przepływów maksymalnych oraz odpływu jednostkowego przy określonej powierzchni zlewni.

Słowa kluczowe: gwałtowne wezbranie, przepływ maksymalny, krzywa obwiedni, Karpaty.

Wstęp

Gwałtowne wezbrania są najczęściej rezultatem krótkotrwałych i intensywnych opadów deszczu. Ze względu na straty materialne są one postrzegane jako jedno z największych naturalnych zagrożeń ze strony środowiska geograficznego (Barredo, 2007). Szkody, które powodują, są często rezultatem nieprawidłowych decyzji planistycznych, podejmowanych przy braku lub w warunkach niepełnej informacji hydrologicznej. Dlatego wiedza na temat zróżnicowania parametrów hydrologicznych tego typu wezbrań jest istotna ze względów zarówno poznawczych, jak praktycznych. Większość zlewni, w których występują gwałtowne wezbrania jest bowiem pozbawiona monitoringu, a parametry hydrologiczne wezbrań uzyskuje się metodami pośrednimi. Posiadanie informacji na temat parametrów hydrologicznych gwałtownych wezbrań pozwala ocenić, czy przepływ maksymalny (Q_{\max}) oraz maksymalny odpływ jednostkowy (q_{\max}) uzyskane metodami

pośrednimi, najczęściej poprzez zastosowanie określonego modelu hydrologicznego, są możliwe do osiągnięcia w danych warunkach klimatycznych.

W artykule omówiono zróżnicowanie Q_{\max} i q_{\max} w małych zlewniach, położonych na obszarze polskiej, słowackiej i rumuńskiej części Karpat. Wyznaczono tzw. krzywe obwiedni oraz opracowano wzory empiryczne pozwalające oszacować maksima przepływu maksymalnego oraz maksymalnego odpływu jednostkowego w wymienionych regionach. Dokonano również oceny podatności badanych zlewni (rzek) na występowanie powodzi.

Materiały i metody

Utworzenie bazy danych o gwałtownych wezbraniach w sześciu regionach Europy było jednym z celów programu badawczego HYDRATE. Baza zawiera między innymi informacje o wezbraniach, jakie wystąpiły w zlewniach na obszarze słowackiej i rumuńskiej części Karpat. Dane zebrane w Hydrate flash flood data center (www.hydrate.tesaf.unipd.it) zostały poszerzone o materiał hydrologiczny zgromadzony dla polskiej części Karpat (Bryndal, 2003, 2006; Bryndal i inni, 2010a, b, c; Ciepielowski, 1970; Ciepielowski i Dąbkowski, 1968; Gil, 1998; Soja, 1981; Stawnicka-Stolarska, 1963). W analizie uwzględniono wyłącznie wezbrania uformowane w wyniku krótkotrwałych opadów ulewnych, tzw. oberwania chmury. Zebrany materiał obejmował wielolecie 1957-2009. Zgromadzono 114 wartości Q_{\max} pomierzonego lub obliczonego podczas 71 wezbrań w 65 zlewniach. Około 40% – to dane pomierzone na posterunkach, pozostałe to dane obliczone na podstawie śladów wielkiej wody. Polska i rumuńska część Karpat była reprezentowana przez 44 i 46 wartości Q_{\max} . Dla słowackiej części Karpat zgromadzono 24 obserwacje.

Materiał hydrometryczny, mimo że niezbyt obfity, stanowi jedyny zbiór danych pomiarowych, jakim dysponujemy dla tak małych zlewni. Ponieważ gwałtowne wezbrania występują na ogół w zlewniach pozbawionych monitoringu hydro-meteorologicznego, nie należy się spodziewać, że w ciągu najbliższych kilku lat liczba danych hydrologicznych znacząco się powiększy. Wedle wiedzy autora zgromadzony materiał obejmuje wszystkie odnotowane i opisane w literaturze przypadki gwałtownych wezbrań opadowo-nawalnych w małych zlewniach karpaccich, dla których zostały obliczone parametry hydrologiczne.

Dane zestawiono w ciągu, wykonano histogramy i wykresy skrzynkowe oraz obliczono podstawowe statystyki opisowe rozkładów. Pozwoliło to określić zróżnicowanie charakterystyk hydrologicznych wezbrań oraz rozmiarów zlewni, w których one wystąpiły. Zgodnie z zaleceniem (Nowak, 2003) parametry, dla których współczynnik zmienności był większy od 50%, charakteryzowano na podstawie miar pozycyjnych.

Najwyższe wartości przepływu maksymalnego przedstawiono za pomocą tzw. krzywych obwiedni, a granicę ich zasięgu opisano równaniami. Metoda ta

jest „odporna” na różnice w liczebności danych, ponieważ na położenie krzywej obwiedni wpływają najwyższe wartości w badanej próbie (Gaume i inni, 2009). Opracowanie krzywych pozwoliło porównać przepływy maksymalne w badanych regionach Karpat, jak również umożliwiło ocenę ich zróżnicowania w odniesieniu do maksimów odnotowanych w Europie, na półkuli północnej oraz na świecie.

Do analiz porównawczych wykorzystano również odpływ jednostkowy (q_{\max}) oraz indeks powodziowości K (Françou i Rodier, 1969). Pierwsza z miar informuje o ilości wody odpływającej z powierzchni 1 km^2 zlewni podczas kulminacji wezbrania ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$). Maksima odpływu jednostkowego również można przedstawić za pomocą tzw. krzywej obwiedni. Dla rzek Europy i świata (Gaume i inni, 2009) krzywe takie wyznaczono stosując równanie:

$$q_{\max} = \alpha A^{\beta} \quad (1)$$

gdzie: q_{\max} – maksymalny odpływ jednostkowy ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$), α – tzw. „współczynnik redukcyjny” ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2(1+\beta)}$), A – powierzchnia zlewni (km^2), β – wykładnik.

Zastosowanie tej samej procedury obliczeniowej umożliwiło porównanie odpływu jednostkowego w badanych regionach Karpat oraz ich odniesienie do innych regionów geograficznych. Wartość wykładnika β , zgodnie z zaleceniami (Gaume i inni, 2009), uzyskano w wyniku analizy regresji liniowej pomiędzy $\log q_{\max}$ i $\log A$.

Drużga z miar, indeks powodziowości K (Françou i Rodier, 1969), liczona jest według zależności:

$$K = 10 - \left(1 - \frac{\text{Log} Q_{\max} - 6}{\text{Log} A - 8} \right) \quad (2)$$

gdzie: A – powierzchnia zlewni (km^2), Q_{\max} – natężenie przepływu maksymalnego ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Formuła powyższa jest przekształceniem równania obwiedni przepływów maksymalnych (Françou i Rodier, 1969). Indeks K jest wartością niemianowaną i umożliwia porównanie wielkości wezbrań w zlewniach o różnej wielkości. Im większy indeks K , tym większa podatność zlewni (rzeki) na występowanie powodzi (Bartnik i Jokiel, 2008, 2012; Françou i Rodier, 1969). Miara ta pozwoliła ocenić powodziowość małych rzek karpaccich oraz porównać ją z innymi rzekami Europy i świata.

Wyniki i dyskusja

Rozmiary zlewni oraz

zróżnicowanie parametrów hydrologicznych wezbrań

Zróżnicowanie wielkości zlewni (A), przepływu maksymalnego (Q_{\max}) oraz maksymalnego odpływu jednostkowego (q_{\max}) prezentuje rycina 1. Powierzchnia przeciętnej zlewni, w której wystąpiły gwałtowne wezbrania, wynosi około 15 km^2 (ryc. 1A). Około trzy czwarte zlewni ma powierzchnię większą od 9 km^2 .

Można jednak zaobserwować dosyć duże zróżnicowanie regionalne – w polskiej części Karpat przeciętna wielkość zlewni wynosi około 9 km^2 , podczas gdy w słowackiej i rumuńskiej części odpowiednio 12 i 28 km^2 . Poziom zróżnicowania w polskiej i rumuńskiej części Karpat jest podobny, w słowackiej jest nieco większy (ryc. 1A).

Analiza histogramów wskazuje, że w polskiej i słowackiej części Karpat gwałtowne wezbrania są z reguły notowane w zlewniach o powierzchni mniejszej od 20 km^2 . W części rumuńskiej liczebnie przeważają zlewnie większe od 20 km^2 (ryc. 1A). Pewną prawidłowością jest wzrost powierzchni zlewni w miarę przemieszczania się na południe. Obserwowaną zależność można tłumaczyć warunkami klimatycznymi. W południowej części Europy gwałtowne wezbrania generowane są głównie przez rozległe nize baryczne, w których dochodzi do wykształcenia kilku komórek z intensywnymi opadami deszczu (Borga i inni, 2007; Gaume i inni, 2004, 2009).

Średnie natężenie przepływu maksymalnego wynosi około $29 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (ryc. 1B), należy jednak zaznaczyć, że parametr ten wykazuje bardzo duże zróżnicowanie. Pojawiają się tzw. obserwacje odstające ($100 < Q_{\max} < 160$) i ekstremalne ($Q_{\max} > 160$), które znacząco odbiegają od badanego rozkładu. Najczęściej notowano natężenie przepływu maksymalnego mniejsze od $50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (ryc. 1B). Podczas kilku wezbrań, w słowackiej i rumuńskiej części Karpat, natężenie przepływu przekroczyło $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Najwyższe dotychczas wartości Q_{\max} odnotowane w polskiej, słowackiej i rumuńskiej części Karpat wyniosły odpowiednio: $84,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Osławica, 12/13.07.1957), $230 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Malá Svinka, 20.07.1998) i $320 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Hauzeasca, 29.07.1980).

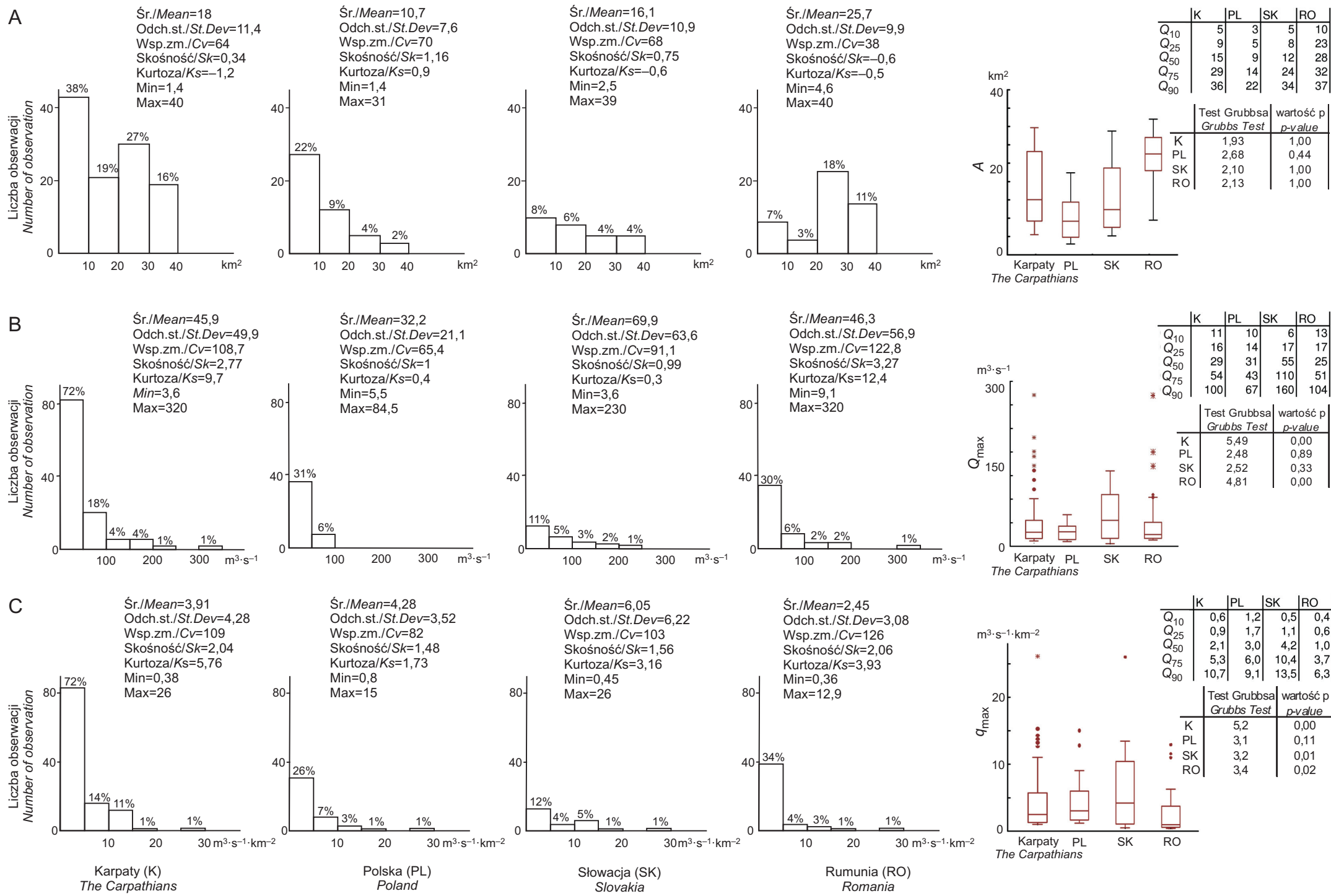
Średnia q_{\max} wynosi $2,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ (ryc. 1C). Podczas 75% wezbrań parametr ten był mniejszy od $5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Zaledwie podczas sześciu wezbrań odnotowano wartości przekraczające $12 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$, z maksimum $26 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Niewielkie są różnice pomiędzy przeciętnym odpływem jednostkowym w polskiej ($3,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$) i słowackiej ($4,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$) części Karpat. W części rumuńskiej q_{\max} jest znacznie niższy ($1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$).

Najwyższe przepływy maksymalne

Zasięg krzywych obwiedni graficznie prezentuje najwyższe natężenie przepływu lub odpływu jednostkowego w zlewni o określonej powierzchni. Posługując się nimi, łatwo porównać maksima Q i q w różnych regionach geograficznych. Zasięg obwiedni Q_{\max} dla polskiej (PL), słowackiej (SK) i rumuńskiej (RO) części Karpat prezentuje rycina 2.

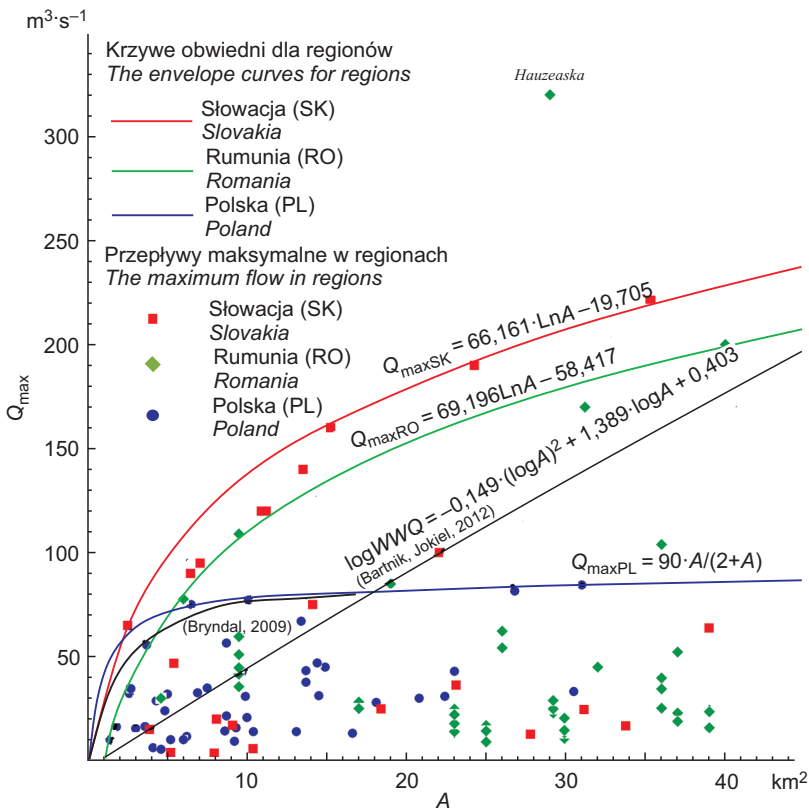
Równania obwiedni związku pomiędzy maksymalnymi przepływami rzek karpaccich w poszczególnych regionach i powierzchniami ich zlewni (A) mają postaci:

$$Q_{\max\text{PL}} = 90A / (2+A), \quad Q_{\max\text{SK}} = 64,16 \ln A - 19,705 \quad \text{i} \quad Q_{\max\text{RO}} = 69,196 \ln A - 58,417.$$



Ryc. 1. Zróżnicowanie: rozmiarów zlewni – A, przepływów maksymalnych – B oraz odpływów jednostkowych – C, podczas gwałtownych wezbrań w małych zlewniach karpackich
Differences in catchment areas – A, maximum flows – B and maximum specific discharges – C, recorded during flash floods in small Carpathian catchments

Dla części polskiej zależność tę opisano hiperbolą formuły F. Pagliariego (Dębski, 1969). Krzywa ta najlepiej aproksymuje maksima Q_{\max} , zwłaszcza w zlewniach o powierzchni mniejszej od 15 km^2 . Zebranie większej liczby obserwacji pozwoliło na nieznaczną modyfikację opracowanego przez autora (Bryndał, 2009) równania dla polskiej części Karpat. Nowe współczynniki lepiej dopasowały przebieg krzywej w zlewniach o powierzchni mniejszej od 6 km^2 (ryc. 2). Dla pozostałych



Ryc. 2. Krzywe obwiedni dla przepływów maksymalnych w polskiej, słowackiej i rumuńskiej części Karpat

Envelope curves for maximum flows in the Polish, Slovakian, and Romanian parts of the Carpathians

Opracowanie własne. / Authors' own elaboration.

dwóch regionów zależność pomiędzy przepływem maksymalnym a powierzchnią zlewni, zdaniem autora, najlepiej opisywały funkcje logarytmiczne. Równania te mogą być traktowane jako swoiste granice przepływu, jaki może wystąpić podczas gwałtownych wezbrań, w małych zlewniach karpacczych.

Analiza położenia krzywych wskazuje, że najwyższe przepływy maksymalne odnotowano dotychczas w słowackiej części Karpat. Na wykresie krzywe obwiedni dla słowackiej i rumuńskiej części Karpat są położone dosyć blisko siebie, jednak niemal dwukrotnie wyżej od krzywej opisującej maksima tego parametru w części polskiej.

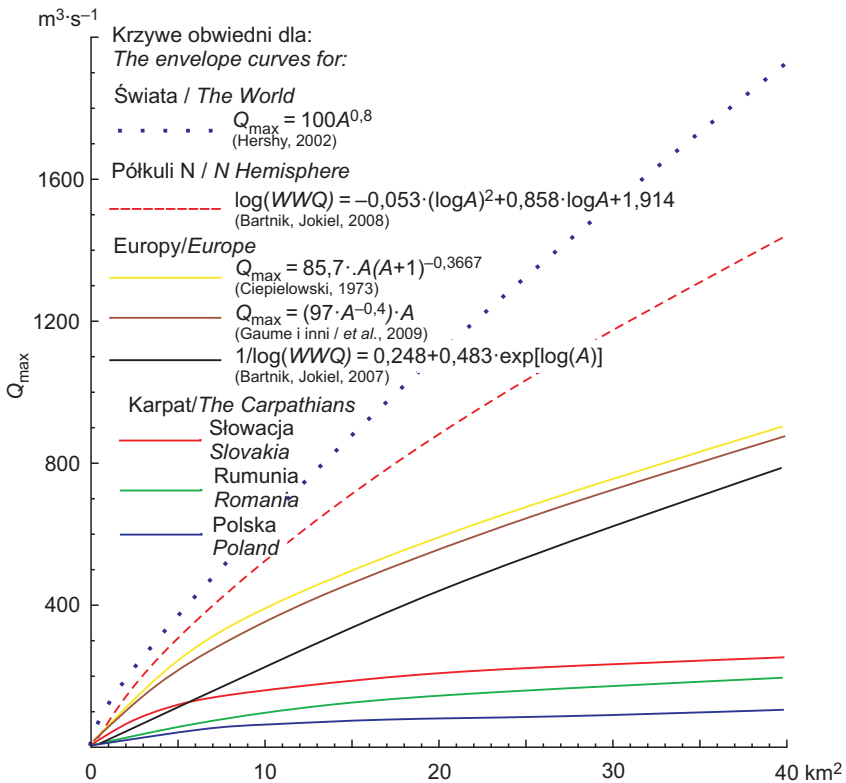
Na rycinie 2 naniesiono również przebieg krzywej obwiedni opracowanej przez A. Bartnika i P. Jokiel (2012) na podstawie analizy przepływów maksymalnych w zlewniach objętych monitoringiem hydrologicznym z terenu Karpat Polskich. Zlewnie miały powierzchnię od 1,4 do 16 824 km². Przebieg obu krzywych jest różny. Maksima Q_{\max} , w zlewniach o powierzchni <17 km² obliczone za pomocą wzoru A. Bartnika i P. Jokiel (2012) są niższe od maksimów obliczonych przy zastosowaniu równania $Q_{\max PL} = 90A / (2+A)$. W zlewniach większych jest odwrotnie. Znaczny wpływ na przebieg krzywej opracowanej przez A. Bartnika i P. Jokiel (2012), miały wysokie wartości przepływów zarejestrowane w dużych zlewniach. Maksima przepływów rzek karpaccich objętych monitoringiem hydrologicznym, o powierzchni $A < 40$ km², nie przekraczają 80 m·s⁻¹ (Bartnik i Jokiel, 2012). W większych zlewniach zaczynają jednak bardzo szybko rosnać, co wpłynęło na położenie i kształt krzywej obwiedni. Konieczne są dalsze badania, które pozwolą zebrać bogatszy materiał pomiarowy w małych zlewniach karpaccich.

Maksymalne przepływy rzek karpaccich na tle Europy, półkuli północnej i świata

W literaturze spotkać można kilka równań, za pomocą których można oszacować przepływ maksymalny w małych zlewniach, przy czym granice „małej zlewni” nie są jednoznacznie zdefiniowane. R. Herschy (2002) opublikował równanie, które umożliwia oszacowanie przepływu maksymalnego w zlewniach o powierzchni mniejszej od 100 km². Przepływy z 1007 rzek o powierzchni od 1,7 do 2 928 300 km² posłużyły do utworzenia równania określającego przepływ maksymalny w zlewniach półkuli północnej (Bartnik i Jokiel, 2008). Podobne zależności dla Europy opracowali A. Ciepielowski (1973) oraz A. Bartnik i P. Jokiel (2007). Krzywe obwiedni wraz z równaniami opracowane dla obszaru Polski przedstawiają prace K. Dębskiego (1969), B. Fal (2004), A. Bartnika i P. Jokiel (2010) oraz T. Bryndala (2010).

Maksima przepływów rzek w Karpatach, Europie, na półkuli północnej i na świecie, opisane równaniami obwiedni przez różnych autorów, prezentuje rycina 3. Przyjmując, że krzywa dla słowackiej części opisuje maksima przepływu w małych zlewniach karpaccich, można z jej położenia wnioskować, że w zlewniach o powierzchni 10 km² maksima karpaccie są około pięć razy niższe niż maksima światowe. W miarę wzrostu powierzchni zlewni różnice te urastają do dziewięciu razy. Wydaje się, że krzywa obwiedni opisująca maksima przepływu

dla świata (ryc. 3), w bardzo małych zlewniach, daje wartości zawyżone. Fakt ten wymaga krótkiego komentarza. Dane z literatury wskazują, że maksima przepływów wzebraniowych na świecie, w zlewniach o powierzchni mniejszej od 10 km^2 , nie przekraczają $220 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Bartnik i Jokiel, 2012). W zlewniach, których powierzchnia jest zbliżona do badanych zlewni karpackich, maksima



Ryc. 3. Najwyższe przepływy rzek w Karpatach, Europie, półkuli północnej i na świecie, opisane, przez różnych autorów, równaniami obwiedni
 Highest river flows in the Carpathians, Europe, the Northern Hemisphere and the World, as described by envelope curves
 Opracowanie własne. / Authors' own elaboration.

te są niższe od $960 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (tab. 1). Natomiast w zlewniach o większej powierzchni, maksima przepływów rosną bardzo szybko. Dwukrotny wzrost powierzchni zlewni przekłada się na ponad trzykrotny wzrost przepływu (Meksyk, rzeka Arrayo, profil San Bartolo, $A=81 \text{ km}^2$, $Q_{\max}=3000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ – Bartnik i Jokiel, 2012). Porównując maksima Q_{\max} wyznaczone przez obwiednie dla świata oraz wartości pomierzone obserwujemy znaczne różnice. Wydaje się, że na położe-

nie i przebieg krzywej dla świata silny wpływ wywierają wartości odnotowane w dużych zlewniach. Przy ustalaniu przebiegu krzywej dla świata, przepływy maksymalne w zlewniach $<100 \text{ km}^2$ traktowano jako jeden zbiór danych (Hersch, 2002). Analiza maksimów przepływu w bardzo małych zlewniach wskazuje, że granica 100 km^2 powinna być obniżona.

Tabela 1. Wezbrania w zlewniach o powierzchni zbliżonej do zlewni karpackich, podczas których odnotowano bardzo wysokie wartości przepływu maksymalnego – wybrane przykłady
Flash floods in small basins of similar area to those in the Carpathians in which very high values for maximum flow have been observed during selected floods

Kraj <i>Country</i>	Rzeka <i>River</i>	Przekrój <i>Cross-section</i>	A (km^2)	Data <i>Date</i>	Q_{\max} ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	q_{\max} ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$)
Nowa Zelandia	Kopuawhara	–	40,4	2.1938	960	23,8
Indonezja	Sempor	Bijong Weir	46,6	11.1953	900	19,3
Stany Zjednoczone	Halawa Stream	Halava	12,0	2.04.1965	762	63,5
Włochy	Frigido	Canevara	46,0	23.08.1965	785	17,1
Włochy	Strona di Cossato	Vallemosso	32,0	11.02.1968	704	22,0
Włochy	Teiro	Pero	22,0	1.11.1968	580	26,4
Włochy	Leiro	Foce	28,0	10.07.1970	510	18,2
Kuba	Jibacoa	Praga	42,0	30.05.1977	803	19,1

A – powierzchnia, Q_{\max} – przepływ maksymalny, q_{\max} – odpływ jednostkowy.

Opracowanie własne na podstawie Rodier i Roche (1984), *World Catalogue...* (2004).

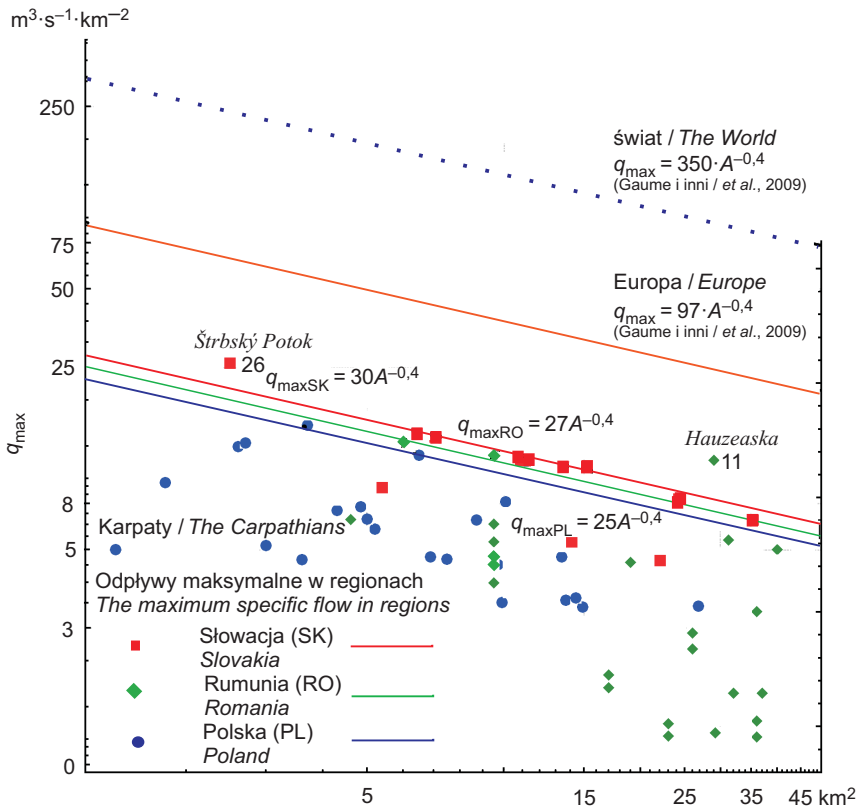
A – catchment area, Q_{\max} – maximum flow, q_{\max} – maximum specific flow.

Source: this study on the basis of Rodier and Roche (1984), *World Catalogue...* (2004).

Nieco mniejsze różnice można zaobserwować, jeżeli zestawimy krzywe karpackie z tymi, które opisują najwyższe przepływy na półkuli północnej (Bartnik i Jokiel, 2008) i w Europie (Ciepielowski, 1973; Gaume i inni, 2009). Przepływy w Karpatach są od 4-7 razy mniejsze od maksimów notowanych na półkuli północnej oraz 3-4 razy niższe od tych, które notuje się w Europie. Najwyższe przepływy w małych zlewniach odnotowano na rzekach włoskich i francuskich (tab. 1), co jest związane ze wspomnianymi wcześniej uwarunkowaniami meteorologicznymi. Na północy Europy przepływy w małych zlewniach są mniejsze. Najwyższy przepływ jaki autor odnalazł, dotyczący zlewni o powierzchni $<40 \text{ km}^2$, odnotowano na rzece West Lyn (Wielka Brytania). W zlewni $A=23,5 \text{ km}^2$, 15.08.1952 r. odnotowano przepływ maksymalny równy $252 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Rodier i Roche, 1984). W Polsce, w zlewniach o powierzchni $<40 \text{ km}^2$ Q_{\max} nie przekracza $80 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Bartnik i Jokiel, 2012).

Maksymalne odpływy jednostkowe oraz indeksy powodziowości

Krzywe obwiedni maksymalnego odpływu jednostkowego pozwalają oszacować ilość wody, jaka może odpłynąć z 1 km² powierzchni zlewni podczas kulminacji wezbrania. Maksima tych wartości dla Karpat prezentuje rycina 4. Dla porównania naniesiono również krzywe obwiedni q_{\max} dla Europy i świata (Gaume i inni, 2009).



Ryc. 4. Krzywe obwiedni maksymalnego odpływu jednostkowego w Karpatach na tle Europy i świata

Envelope curves for maximum specific flow in the Carpathians, as set against Europe and the World

Opracowanie własne. / Authors' own elaboration.

Wartości wykładnika, uzyskanego na drodze analizy regresji liniowej, dla każdego z badanych regionów Karpat wyniosły około $-0,4$. Współczynniki regresji były istotne statystycznie na poziomie $p = 0,05$, chociaż dla danych dotyczących

rumuńskiej części Karpat błąd estymacji współczynnika kierunkowego był dosyć znaczny (prawie 40%). Podobną wartość współczynnika kierunkowego uzyskali E. Gaume i inni (2009), analizując najwyższe odpływy jednostkowe w Europie i na świecie. Zbliżone wykładniki wskazują, że odpływ jednostkowy maleje w podobnym tempie niezależnie od regionu geograficznego. Maksima odpływu jednostkowego w Karpatach są podobne, a ich przebieg opisują równania:

$$q_{\max\text{PL}}=25A-0,4, \quad q_{\max\text{SK}}=30A-0,4, \quad q_{\max\text{RO}}=22A-0,4.$$

Najwyższy obliczony odpływ wyniósł $26 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ (Štrbský Potok na Słowacji), natomiast kolejne wartości są już dużo niższe: Kisielina (Polska) $15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$, Malá Svinka (Słowacja) $14 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$, Iris (Rumunia) $12,9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Tylko w 14 spośród 114 badanych przypadków odpływ jednostkowy przekroczył $10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$.

Położenie krzywych obwiedni sugeruje, że najwyższe odpływy jednostkowe w Karpatach, w odniesieniu do maksimów światowych, są ponad 12 razy niższe. Wydaje się jednak, że podobnie jak w przepływie maksymalnym, przebieg krzywej maksimów odpływu jednostkowego w małych zlewniach na świecie (Gaume i inni, 2009) daje zawyżone wyniki. Jest to spowodowane ekstrapolacją przebiegu krzywej ze zlewni o powierzchni $>100 \text{ km}^2$ na zlewnie mniejsze. Potwierdzają to dane o odpływach przytaczane w literaturze (tab. 2). Zestawiając zlewnie, których powierzchnia jest zbliżona do badanych zlewni karpaccich można stwierdzić, że odnotowane maksima q_{\max} są znacznie niższe niż wynikałoby to z położenia krzywej obwiedni (tab. 2, ryc. 4). Jest to zatem kolejna przesłanka, aby zlewnie o bardzo małej powierzchni traktować jako oddzielną grupę.

Krzywa maksimów q_{\max} dla rzek karpaccich jest również znacznie niżej położona od krzywej europejskiej. Usytuowanie krzywej dotyczącej Europy (Gaume i inni, 2009) jest uwarunkowane odpływem rzek włoskich, francuskich i hiszpańskich położonych w warunkach klimatu śródziemnomorskiego; w głębi kontynentu na ogół odpływy jednostkowe są niższe. Maksima odpływu jednostkowego polskich rzek objętych monitoringiem hydrologicznym są generalnie niższe od $4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$, z tego znaczna część jest mniejsza od $0,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ (Bartnik i Jokiel, 2012). Dla rzek karpaccich maksima odpływu jednostkowego zawierały się w przedziale $0,5-2,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Najwyższe odpływy jednostkowe w zlewniach górskich $A < 40 \text{ km}^2$ objętych monitoringiem hydrologicznym nie przekraczały $10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ (Złotna, Miskowice – 9,5); w Karpatach mieściły się one w przedziale $3,38-4,69 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ (Bartnik i Jokiel, 2012). Warto jednak zaznaczyć, że również w głębi kontynentu mogą wystąpić bardzo wysokie odpływy jednostkowe. W małych zlewniach lessowych, po nawalnych opadach deszczu o sumie $>100 \text{ mm}$, odpływy jednostkowe przekroczyły $20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ (Bryndal, 2010), osiągając maksimum równe $37 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ (Niedbała i Soja, 1998). Tak wysokie wartości odpływu są skutkiem nie tylko silnych opadów deszczu, ale również cech fizjograficznych zlewni, która transformuje opad w odpływ i sprzyja formowaniu gwałtownych fal wezbraniowych (Bryndal, 2008).

Rozkłady indeksu powodziowości K prezentuje rycina 5. Dla obszaru Karpat 80% indeksów K zawiera się w przedziale 2,6-4,3, przy medianie równej 3,4. Większe zróżnicowanie tej miary charakteryzuje rzeki Słowacji (Q_{10} 2,5; Q_{90} 4,4) i Rumunii (Q_{10} 2,5; Q_{90} 4,2). W polskiej części Karpat indeksy zawierają

Tabela 2. Odplywy jednostkowe odnotowane podczas wezbrań w małych zlewniach na świecie i w Europie – wybrane przykłady

Maximum specific flows recorded during flash floods in small basins in Europe and the World – selected examples

Kraj <i>Country</i>	Rzeka <i>River</i>	Przekrój <i>Cross-section</i>	A (km ²)	Data <i>Date</i>	Q_{\max} (m ³ ·s ⁻¹)	q_{\max} (m ³ ·s ⁻¹ ·km ⁻²)	K
Stany Zjednoczone	Honopou Stream	Huelo	1,7	18.11.1930	162	95,3	5,1
Stany Zjednoczone	Halawa Stream	Halawa	12,0	2.04.1965	762	63,5	5,5
Francja	Alzon		8,1	9.09.2002	330	40,7	5,1
Republika Ziel. Przyl.	Ribeira Brava	Villa de Ribeira Brava	6,7	26.09.1978	253	38,0	5,0
Stany Zjednoczone	Soldier Creek	Goff	5,34	5.10.1970	201	37,6	4,9
Tunezja	Zita	–	3,5	12.12.1973	131	37,0	4,8
Francja	Canideil	Prats de Mollo	11,6	18.10.1940	400	34,4	5,1
Reunion	Roches	Grand Bras (Abondance)	23,8	18.03.1952	750	31,5	5,3
Martynika	Riviere Blanche	Port Alma	4,3	20.08.1970	120	27,8	4,7
Włochy	Teiro	Pero	22,0	1.11.1968	580	26,4	5,1
Włochy	Strona di Cossato	Vallemosso	32,0	11.02.1968	704	22,0	5,1

A – powierzchnia, Q_{\max} – przepływ maksymalny, q_{\max} – odplyw jednostkowy, K – indeks Francou.

Opracowanie własne na podstawie: Rodier i Roche (1984), *World Catalogue...* (2004), Hydrate flash flood data center: www.hydrate.tesaf.unipd.it (1.09.2012).

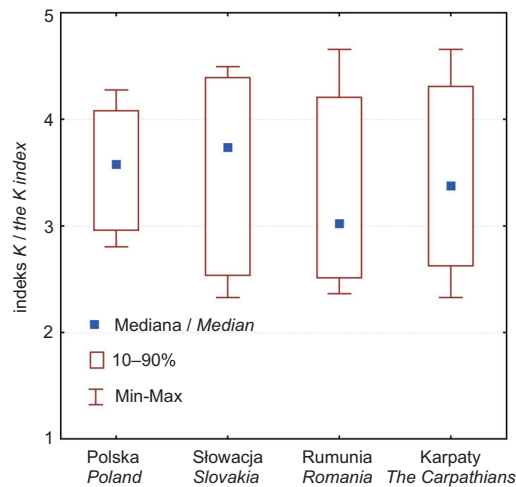
A – catchment area, Q_{\max} – maximum flow, q_{\max} – maximum specific flow, K – Francou index.

Source: this study, on the basis of Rodier and Roche (1984), *World Catalogue...* (2004), Hydrate flash flood data center: www.hydrate.tesaf.unipd.it (accessed on 1.09.2012).

się w przedziale 3,0-4,1. Podobne zróżnicowanie indeksów otrzymali A. Bartnik i P. Jokiel (2012). Obliczone przez nich indeksy dla 164 przekrojów rzek położonych w polskiej części Karpat generalnie zawierały się w przedziale 3,0-4,0.

Maksima indeksów w poszczególnych regionach wyniosły: Hauzeasca (Rumunia) – 4,7; Štrbský Potok (Słowacja) – 4,5; Kieselina (Polska) – 4,3.

Mając na uwadze, że wartość indeksu K charakteryzuje rzekę pod względem powodziowości, można stwierdzić, że badane rzeki karpackie cechuje „przeciętna powodziowość”. Żaden indeks nie przekroczył 5,0, która to wartość, w skali świata, wskazuje na dużą powodziowość (Bartnik i Jokiel, 2012). Wartość większą od 4,0 osiągnęły indeksy K około 20% przepływów rzek znajdujących się we wszystkich rozpatrywanych regionach (ryc. 5). Wartości indeksu niższe od 3,0 dotyczą przede wszystkim rzek rumuńskiej części Karpat.



Ryc. 5. Indeksy powodziowości K w Karpatach

Values for the K index in the Carpathians

Opracowanie własne. / Authors' own elaboration.

Maksima indeksu K dla wezbrań opadowo-nawalnych małych cieków nie przekraczają 5,5 (Halawa Stream, Stany Zjednoczone). W południowej Europie mogą osiągnąć wartość powyżej 5,0 (tab. 3). W Karpatach, poza rumuńską Hauzeasą, nie są większe od 4,5.

Podsumowanie

Gwałtowne wezbrania opadowo-nawalne występują niemal rokrocznie, jednak wciąż pozostają jednym z najslabiej poznanych typów genetycznych wezbrań. Poznanie zróżnicowania parametrów hydrologicznych, określenie najwyższych możliwych przepływów i odpływów jednostkowych ma duże znaczenie

praktyczne. Informacje te mogą być wykorzystane przy wyznaczaniu obszaru zagrożonego zalaniem podczas gwałtownego wezbrania.

W niniejszym artykule analizowano przepływy maksymalne oraz odpływy jednostkowe, jakie odnotowano podczas wezbrań spowodowanych tzw. oberwaniami chmury w małych zlewniach polskiej, słowackiej i rumuńskiej części Karpat. Dla 75% wezbrań przepływ maksymalny był mniejszy od $50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, a odpływ jednostkowy nie przekraczał $5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Maksyma tych charakterystyk w polskiej, słowackiej i rumuńskiej części Karpat wynosiły odpowiednio 84, 230 i $320 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ jeśli chodzi o przepływ oraz 15, 26 i $12,9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ dla odpływu jednostkowego.

Opracowano równania umożliwiające oszacowanie najwyższych przepływów maksymalnych przy określonej powierzchni zlewni. W odniesieniu do poszczególnych regionów mają one postaci:

$$Q_{\max\text{PL}}=90A/(2+A), Q_{\max\text{SK}}=64,16\text{Ln}A-19,705 \text{ i } Q_{\max\text{RO}}=69,196\text{Ln}A-58,417.$$

Maksymalny odpływ jednostkowy w poszczególnych regionach Karpat jest zbliżony, a najwyższe wartości tego parametru opisują równania $q_{\max\text{PL}}=25A-0,4$, $q_{\max\text{SK}}=30A-0,4$, $q_{\max\text{RO}}=27A-0,4$. Porównanie położenia i przebiegu krzywych obwiedni wskazuje, że maksima przepływów i odpływów jednostkowych w Karpatach są znacząco niższe od tych, które odnotowano w małych zlewniach Europy i świata.

Równania te mogą być traktowane jako pewnego rodzaju granice przepływu i odpływu, jaki może wystąpić podczas gwałtownych wezbrań w małych zlewniach karpaccich. Obliczone wartości mogą stanowić odniesienie dla parametrów hydrologicznych uzyskanych metodami pośrednimi, umożliwiając ocenę, czy otrzymane w wyniku modelowania hydrologicznego parametry wezbrania są możliwe do osiągnięcia w danych warunkach klimatycznych.

Piśmiennictwo / References

- Barredo J.I., 2007, *Major flood disasters in Europe: 1950-2005*, Natural Hazards, 42, 1, s. 25-148. doi:10.1007/s11069-006-9065-2.
- Bartnik A., Jokiel P., 2007, *Odptywy maksymalne i indeksy powodziowości rzek europejskich*, Gospodarka Wodna, 1, s. 28-32.
- Bartnik A., Jokiel P., 2008, *Odptywy maksymalne i indeksy powodziowości rzek półkuli północnej*, Przegląd Geograficzny, 80, 3, s. 361-383.
- Bartnik A., Jokiel P., 2010, *Maksymalne przepływy i odpływy w Polsce w latach 1956-2006*, [w:] A. Magnuszewski (red.), *Hydrologia w ochronie i kształtowaniu środowiska*, Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, 69, Warszawa, s. 43-53.
- Bartnik A., Jokiel P., 2012, *Geografia wezbrań i powodzi*, Wydawnictwo UŁ, Łódź.
- Borga M., Boscolo P., Zanon F., Sangati M., 2007, *Hydrometeorological analysis of the 29 August 2003 flash flood in the Eastern Italian Alps*, Journal of Hydrometeorology, 8, 5, s. 1049-1067.

- Bryndal T., 2003, *Wylesione zlewnie w Gromniku (Pogórze Rożnowskie), jako przykłady zlewni generujących lokalną powódź*, [w:] J. Lach (red.), *Dynamika zmian środowiska geograficznego pod wpływem antropopresji*, Wydawnictwo UP, Kraków, s. 15-24.
- Bryndal T., 2006, *Przyrodnicze i antropogeniczne uwarunkowania występowania lokalnych powodzi w Polsce*, Instytut Geografii, Akademia Pedagogiczna w Krakowie, maszynopis.
- Bryndal T., 2008, *Parametry zlewni, w których wystąpiły lokalne powodzie*, Annales UMCS, sec. B, 63, s. 177-200.
- Bryndal T., 2009, *Przeptywy maksymalne odnotowane podczas gwałtownych wezbrań, spowodowanych krótkotrwałymi ulewnymi opadami deszczu w małych zlewniach karpackich*, [w:] R. Bogdanowicz, J. Fac-Beneda (red.), *Zasoby i ochrona wód. Obieg wody i materii w zlewniach rzecznych*, Fundacja Rozwoju Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk, s. 329-334.
- Bryndal T., 2010, *Parametry hydrologiczne wezbrań spowodowanych krótkotrwałymi intensywnymi opadami deszczu w Polsce*, Annales UMCS, sec. B, 65, 1, s. 43-71.
- Bryndal T., Cabaj W., Suligowski R., 2010a, *Gwałtowne wezbrania potoków Kisielina i Niedźwiedź w czerwcu 2009 r. (Pogórze Wiśnickie)*, [w:] M. Barwiński (red.), *Obszary metropolitalne we współczesnym środowisku geograficznym*. 58. Zjazd Polskiego Towarzystwa Geograficznego, Oddział Łódzki PTG, Wydział Nauk Geograficznych UŁ, Łódź, s. 337-348.
- Bryndal T., Cabaj W., Suligowski R., 2010b, *Hydrometeorologiczna interpretacja gwałtownych wezbrań małych cieków w źródłowej części Wielopolki w dniu 25 czerwca 2009 roku*, [w:] A. Magnuszewski (red.), *Hydrologia w ochronie i kształtowaniu środowiska*, Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, 69, Warszawa, s. 81-91.
- Bryndal T., Cabaj W., Gębica P., Kroczał R., Suligowski R., 2010c, *Gwałtowne wezbrania spowodowane nawalnymi opadami deszczu w zlewni potoku Wątok (Pogórze Ciężkowickie)*, [w:] T. Ciupa, R. Suligowski (red.), *Woda w badaniach geograficznych*, Instytut Geografii, Uniwersytet Jana Kochanowskiego, Kielce, s. 307-319.
- Ciepielowski A., 1970, *Maksymalne wielkości sptywów jednostkowych z deszczów nawalnych*, Przegląd Geograficzny, 15, 2, s. 179-193.
- Ciepielowski A., 1973, *Przegląd wzorów empirycznych do określania maksymalnych przeptywów letnich*, Zeszyty Naukowe AR w Warszawie, Melioracje Wodne, 12.
- Ciepielowski A., Dąbkowski L., 1968, *Charakterystyka hydrologiczna skutków katastrofalnego „oberwania chmury” nad rzeszowskiem w dniu 26 kwietnia 1966 roku*, Przegląd Geofizyczny, 13, 3, s. 261-272.
- Dębski K., 1969, *O potencjalnym najwyższym odpływie z krótkotrwałych deszczów nawalnych*, Rozprawy Hydrotechniczne, 23, s. 51-63.
- Françou J., Rodier J.A., 1969, *Essai de classification des crues maximales*, [w:] *Floods and Their Computation: Proceedings of the Leningrad Symposium, August 1967*, IAHS-UNESCO-WMO, Gentbrugge, s. 518-527.
- Fal B., 2004, *Maksymalne przeptywy rzek polskich na tle wartości zaobserwowanych w różnych rzekach świata*, Gospodarka Wodna, 5, s. 188-192.
- Gaume E., Bain V., Bernardara P., Newinger O., Barbuc M., Bateman A., Blaškovičova L., Blöschl G., Borga M., Dumitrescu A., Daliakopoulos I., Garcia J., Irimescu A., Kohnowa S., Koutroulis A., Marchi L., Matreata S., Medina V., Preciso E., Sempre-Tores D., Stancalie G., Szolgay J., Tsanis I., Velasco D., Viglione A., 2009, *A compilation of data on European flash floods*, Journal of Hydrology, 367, s. 70-78. doi:10.1016/j.jhydrol.2008.12.028.

- Gaume E., Livet M., Desbordes M., Villeneuve J.P., 2004, *Hydrologic analysis of the Aude, France, flash-flood 12 and 13 November 1999*, Journal of Hydrology, 286, s. 135-154.
- Gil E., 1998, *Sptyw wody i procesy geomorfologiczne w zlewniach fliszowych podczas gwałtownej ulewy w Szymbarku w dniu 7 czerwca 1985 roku*, Dokumentacja Geograficzna, 11, s. 85-107.
- Hersch R.W., 2002, *The World's maximum observed floods*, Flow Measurement and Instrumentation, 13, s. 231-235.
- Niedbała A., Soja R., 1998, *Odptyw z opadu nawalnego w dniu 18 maja 1996 roku w Sułoszowej*, Dokumentacja Geograficzna, 11, Warszawa, s. 31-38.
- Nowak A. (red.), 2003, *Statystyka, teoria i zastosowanie*, Wydawnictwo C.H. Beck, Warszawa.
- Rodier J.A., Roche M., 1984, *World Catalogue of Maximum Observed Floods*, IAHS Publications, 143, Wallingford, Oxfordshire.
- Soja R., 1981; *Analiza odptywu z fliszowych zlewni Bystrzanki i Ropy (Beskid Niski)*, Dokumentacja Geograficzna, 1.
- Stawnicka-Stolarska A., 1963, *Odptyw z dorzecza Ostawy podczas powodzi w dniach 12-13 VII 1957*, Prace i Studia Katedry Inżynierii i Gospodarki Wodnej, Politechnika Krakowska, 6, s. 197-211.
- World Catalogue of Maximum Observed Floods, Errata and Supplementary Data*, 2004, IAHS Press, Wallingford, Oxfordshire.

[Wpłynęło: grudzień 2012; poprawiono: grudzień 2013 r.]

TOMASZ BRYNDAL

HYDROLOGICAL PARAMETERS OF RAINSTORM-INDUCED FLASH FLOODS IN THE POLISH, SLOVAKIAN AND ROMANIAN PARTS OF THE CARPATHIANS

Intense convective rainfall over short periods is the most frequent cause of flash flooding in small rivers. In seeking to study this phenomenon further, the work described here had as its goals: (1) to collate and analyse hydrological data on flash floods induced by short-duration convective rainstorms in the Polish (PL), Slovakian (SK) and Romanian (RO) parts of the Carpathians, (2) to create equations allowing maximum peak and maximum specific flows in small catchments affected by flash flooding to be calculated.

Hydrological data utilized in the work include parameters available in the literature, as well as data collected in the course of work on the HYDRATE program (www.hydrate.tesaf.unipd.it). The final data set included 114 values for maximum flows recorded during 72 flood events within 65 catchments.

The data collated were tabulated, prior to the generation of histograms, box plots and descriptive statistics. These then allowed investigated regions of the Carpathians to be characterized as regards differences in maximum flow and maximum specific flow.

Maximum flow was presented using the envelope curve method, this providing an effective graphic summary of floods in a given region widely used in past publications on extreme floods (Gaume *et al.*, 2009). A further advantage of the method relates to its being relatively unaffected by data compilation density, since maximum values for

a sample are made use of in determinations. The highest value for the maximum specific flow was established in line with the equation:

$$q_{\max} = \alpha A^{\beta}$$

where: q_{\max} – maximum specific flow ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$), α – is a coefficient supposedly independent of catchment area also called "reduced" discharge in ($\text{m}^3 \cdot \text{s} \cdot \text{km}^{2(1+\beta)}$), A is basin area (km^2), and β is a scaling exponent. The value of the exponent β has been estimated through a linear regression between $\log(q_{\max})$ and $\log(A)$, on the basis of datasets collated for each region of the Carpathians. An assessment of flood-event magnitudes was performed using the coefficient suggested by Françou (Françou and Rodier, 1969) given by:

$$K = 10 - \left(1 - \frac{\text{Log}Q_{\max} - 6}{\text{Log}A - 8}\right)$$

where Q_{\max} is maximum flow ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) and A basin area (km^2). The K index permits an assessment of whether one flood is 'larger' than another one, which was perhaps observed in a different river or basin area. A higher value of the K index denotes that a basin is more prone to flooding.

The results indicate that typical Carpathian catchments in which flash flood events have taken place cover some 15 km^2 . However, certain differences between regions are to be observed (Fig. 1A). Typical catchments of this kind in the Polish part of the Carpathians cover 9 km^2 , while those in the Slovakian and Romanian parts have catchments covering 12 and 28 km^2 respectively. Flash floods in the Polish and Slovakian parts of the Carpathians most frequently affect catchments covering up to 20 km^2 . However, in the Romanian part, the same phenomena arise in larger basins (Fig. 1A). This fact may be explained by meteorological factors associated with large low-pressure systems generating heavy rainstorms (Gaume *et al.*, 2004, 2009).

The maximum flow in the Carpathians was usually lower than $50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, with a mean value of $29 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. However, several floods differ significantly in terms of magnitude, as is confirmed by the outlying ($100 < Q_{\max} < 160$) and extreme ($Q_{\max} > 160$) observations (Fig. 1B). The regional differences in mean values as well as box-plots indicate that the Slovakian floods were greater in magnitude (at $55 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) than the Romanian ones ($25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). The highest values for this parameter amounted to $84.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Oslawica, 12/13.07.1957 Poland), $230 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Malá Swinka, 20.07.1998 Slovakia), $320 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Hauzeasca, 29.07.1980 Romania). The equations describing the envelope curves for maximum flow are given by:

$$Q_{\max\text{PL}} = 90A/(2+A), Q_{\max\text{SK}} = 64,16\text{Ln}A - 19,705; Q_{\max\text{RO}} = 69,196\text{Ln}A - 58,417.$$

Maximum flows in the Carpathians were found to be several times smaller than those recorded in small basins in the world as a whole or Europe (Fig. 3, Table 1).

The mean value for maximum specific flow was of $2.1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ (Fig. 1C), with three-quarters of cases studied reporting a value for this parameter below $5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Only six floods exceeded $12 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$, with the highest value being $26 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. The mean values for the maximum specific flows in the Polish and Slovakian parts (at 3.0 and $4.2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ respectively) would seem comparable, while both are distinct from the significantly lower value this parameter assumes in the Romanian part ($1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$). The envelope curves presenting the highest values for maximum specific flow were similar in each region, the equations describing the envelope curves being given by:

$$q_{\max\text{PL}}=25A^{-0,4}, q_{\max\text{SK}}=30A^{-0,4} \text{ and } q_{\max\text{RO}}=27A^{-0,4}.$$

The exponent -0.4 calculated for the Carpathian floods was similar to the values obtained for the world as a whole and Europe (Gaume *et al.*, 2009). This suggests that the reduction in the maximum specific flow is comparable, regardless of geographical and climatic region. Plots for the envelope curves (Fig. 4) reveal that the maximum specific flows attained during Carpathian floods were under one-twelfth as great as those observable in the world as a whole (Table 2). Values for the Francou coefficient K characterising Carpathian floods fell within the range 2.6-4.3 in the case of 80% of the events studied, with a mean value of 3.4. The highest diversity was observed in the cases of the floods in Slovakia (Q_{10} 2.5; Q_{90} 4.4) and Romania (Q_{10} 2.5; Q_{90} 4.2), as opposed to Poland (Q_{10} 3; Q_{90} 4.1). Assuming that the K coefficient reflects the predisposition on the part of a catchment to generate flooding, it can be concluded that the catchments in Slovakia are most prone to floods arising, the Romanian ones least so. The highest values for the K coefficient during flash floods anywhere in the world do not exceed 5.5 (reported at the Halawa Stream, USA). Corresponding values are slightly lower in Europe (Table 3).

Flood risk is among the most severe risks to life and property, all the more so since flooding has become more frequent and severe in basins that are more economically developed. A lack of hydro-meteorological data concerning flash floods in small basins often results in an inappropriate spatial distribution of settlements, which are inundated during flood events. The maximum flow and the maximum specific flow calculated using the equations created here may prove useful in the delineation of areas at risk of flash floods, which should then be considered in local planning documents. These actions may effectively limit the negative consequences of flash flooding in small Carpathian basins. Moreover, information on the highest values for hydrological parameters may allow for evaluation as to whether hydrological parameters derived as a result of the modelling process are capable of being obtained under given climate conditions.

