

TOMASZ BRYNDAL

*Parametry hydrologiczne wezbrań spowodowanych
krótkotrwałymi intensywnymi opadami deszczu w Polsce**

Hydrological parameters of flood waters caused by intense short duration rainfall in Poland

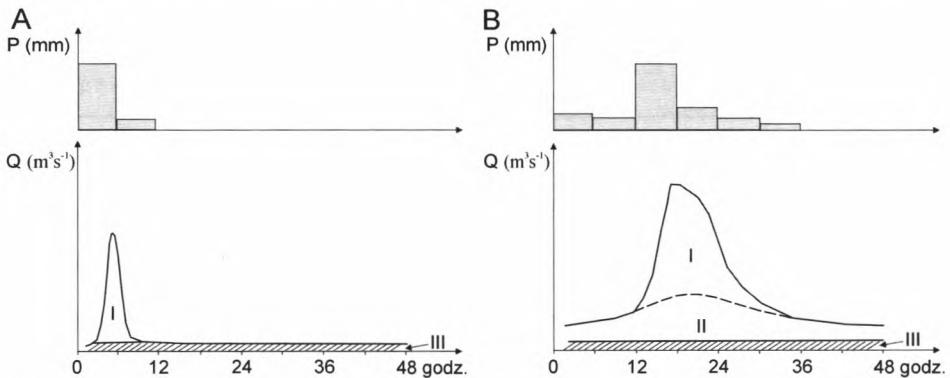
Słowa kluczowe: gwałtowne wezbranie, mała zlewnia, parametry hydrologiczne

Key words: flash flood, small basin, hydrological parameters

WSTĘP

Najczęstszą przyczyną gwałtownych wezbrań w małych zlewniach są przelotne intensywne opady deszczu (Parczewski 1960). Zasięg opadu generującego ten typ wezbrań wynosi od 10 do 100 km², przy czym w pięćdziesięciu procentach nie przekracza on 25 km² (Lenart 1993). Czas trwania opadu rzadko przekracza trzy godziny (Parczewski 1960), podczas gdy jego suma często jest wyższa od 80 mm (Bryndal 2006). Uformowane w wyniku gwałtownych opadów wezbrania trwają kilka godzin (Gil 1998), a czas trwania kulminacji wezbrania nie przekracza godziny (ryc. 1A), stąd też ich angielska nazwa *flash flood*. Powodują one znaczne straty materialne, często opisywane w literaturze (Cabaj i in. 2002; Gutiérrez i in. 1998; Ziętara 2002). Gwałtowne ulewy mogą wystąpić również w okresie deszczów rozlewnych. Wówczas ich skutkiem są wezbrania i powódzie na mniejszych lokalnych ciekach oraz większych rzekach. Wysokie stany wody w większych rzekach są dodatkowo wzmacniane przez fale

* Praca w części wykonana w ramach grantu PZB-KBN-086/P04/2003/.



Ryc. 1. Hydrogram obrazujący przebieg wezbrania wywołanego przez pojedynczy krótkotrwały intensywny opad deszczu – A, wywołany przez opad nawałny poprzedzony deszczami rozlewными – B. I – fala wezbraniowa wywołana przez opad nawałny, II – fala wezbraniowa wywołana przez opad rozlewny, III – odpływ bazowy

The flood wave hydrogram generated as a result of intense short duration rainfall event – A, intense short duration rainfall event preceded by long-lasting rainfall. I – flood wave generated by heavy rainstorm, II - flood wave generated by long lasting rainfall, III – base outflow

pochodzące z lokalnych ulew (Starkel 1999). Wezbrania takie obejmują zlewnie o powierzchni kilkudziesięciu km^2 i trwają od kilkunastu do kilkudziesięciu godzin (ryc. 1B). Można do nich zaliczyć np. wezbranie Uszwicy i Łososiny 9 lipca 1997 roku (Gorczyca 2004), Kamienicy Nawojowskiej, Łubianki i Łęgowianki w lipcu 2001 roku (Lach, Lewik 2002), Wilczki w lipcu w latach 1997 i 1998 (Żurawek 1999) lub Kalniczki i Hoczewki w lipcu 2005 roku (obserwacje własne).

Przy projektowaniu zabudowy hydrotechnicznej wymagana jest znajomość warunków hydrologiczno-meteorologicznych w danym terenie (Ciepielowski 1970; Ciepielowski, Dąbkowski 2006). W dużych zlewniach istnieje materiał obserwacyjny, który pozwala ustalić określone charakterystyki hydrologiczne. Natomiast w małych zlewniach, przeważnie pozbawionych obserwacji, informacje hydrologiczne pozyskuje się metodami pośrednimi (Ciepielowski, Dąbkowski 2006). Należy do nich między innymi metoda analogii hydrologicznej, którą stosuje się w przypadku, gdy istnieje podobieństwo pomiędzy zlewniami kontrolowaną i niekontrolowaną. Stosowane są również metody statystyczne, symulacyjne, zależności typu opad-odpływ, które opierają się na znajomości procesów obiegu wody i parametrów fizycznogeograficznych zlewni (Ciepielowski, Dąbkowski 2006). Zastosowanie tych metod wymaga odpowiednich danych meteorologicznych i hydrologicznych, które dla małych zlewni nie zawsze można pozyskać. W przypadku braku danych hydrometrycznych można zastosować wzory empiryczne, które są wyprowadzone na podstawie analizy

zależności między wybranymi cechami zlewni a parametrami hydrologicznymi. W miarę gromadzenia materiału hydrologicznego powinny być one co pewien czas weryfikowane (Punzet 1977).

Pomimo iż gwałtowne wezbrania w małych zlewniach występują niemal rokrocznie, to spośród wszystkich genetycznych typów wezbrań wciąż pozostają stosunkowo najslabiej poznane. A. Niedbała i R. Soja (1998) twierdzą: „Znikomo mała ilość materiału nie pozwala na przybliżoną chociażby regionalizację tego niezmiernie ważnego gospodarczo zjawiska. Nie można powiedzieć, czy wezbrania w obszarze wyżynnym są częstsze niż w Karpatach i czy osiągają większe rozmiary lub odwrotnie”. Stosunkowo słabe poznanie tych zjawisk było impulsem do podjęcia badań nad gwałtownymi wezbraniem. Szczególną uwagę poświęcono parametrom hydrologicznym.

W niniejszej pracy dokonano analizy zróżnicowania natężenia przepływu maksymalnego oraz natężenia maksymalnego odpływu jednostkowego dla 50 gwałtownych wezbrań, które wystąpiły w zlewniach o powierzchni mniejszej od 40 km². Granica ta była podyktowana wynikami badań nad parametrami fizjograficznymi zlewni w Karpatach i na wyżynach, w których wystąpiły tego typu zdarzenia (Bryndal 2008). Wskazano na maksymalne wartości natężenia przepływu maksymalnego oraz maksymalnego odpływu jednostkowego w zlewniach wyżynnych, pogórskich i beskidzkich. Wartości przepływu maksymalnego, które wystąpiły podczas wezbrań, porównano z wartościami obliczonymi przy pomocy wzorów empirycznych, które umożliwiają oszacowanie tego parametru w małych zlewniach na świecie, w Europie i Polsce. W oparciu o zebrany materiał hydrologiczny badano zależność statystyczną pomiędzy natężeniem przepływu maksymalnego a powierzchnią zlewni oraz zweryfikowano wyznaczone przez K. Dębskiego (1969) współczynniki formuły Pagliariego na obliczanie potencjalnego przepływu maksymalnego małych rzek Polski.

MATERIAŁY I METODY

Większość małych zlewni, w których mogą wystąpić gwałtowne wezbrania, nie jest objęta siecią monitoringu hydrometeorologicznego. Przekłada się to na bardzo ograniczone możliwości pozyskiwania danych hydrologicznych i meteorologicznych. Źródłem informacji hydrologicznej mogą być dane pozyskane w toku realizacji programu Małych Zlewni IMGW (Ostrowski 1997) albo dane zebrane w małych zlewniach eksperymentalnych ośrodków uniwersyteckich lub instytutów badawczych. Trzeba jednak zaznaczyć, że liczba badanych zlewni, których powierzchnia jest mniejsza od 40 km², jest mała (Ostrowski 1997).

Wydaje się, że prowadzone obserwacje dostarczyły stosunkowo mało danych hydrometeorologicznych dla gwałtownych wezbrań, które spowodowały lokalne powodzie w zlewniach o powierzchni mniejszej od 40 km², o czym może świadczyć np. zestawienie najwyższych jednostkowych odpływów rzek polski z uwzględnieniem danych pozyskanych w programie Małych Zlewni IMGW (Ostrowski 2000). Dlatego najczęściej jedynym źródłem informacji hydrologicznej o gwałtownych wezbraniach są dane uzyskane *post factum*, na podstawie pomiarów geodezyjnych i obliczeń hydraulicznych. Należy jednak zaznaczyć, że liczba tego typu danych jest również niewielka. Najprawdopodobniej jest to spowodowane kosztownością prowadzonych badań, w wyniku których otrzymuje się dosyć ograniczoną ilość informacji o danym wezbraniu. W zlewniach niekontrolowanych w wyniku prac terenowych można uzyskać tylko jeden parametr wezbrania, czyli natężenie przepływu maksymalnego w danym profilu pomiarowym, który trudno jest powiązać z niewiadomymi danymi o opadzie i przebiegu wezbrania (Niedbała, Soja 1998). Stąd też w literaturze rzadko można znaleźć opracowania pojedynczych wezbrań w małych zlewniach, dla których obliczono parametry hydrologiczne. Zajmowali się tym między innymi: A. Ciepielowski (1970); A. Ciepielowski i L. Dąbkowski (1967, 1968); M. Cygan i in. (1997); H. Gareth i in. 2003, F. Gutieres i in. (1998), K. Dębski (1958); E. Gil (1998); A. Majewski (2002); A. Niedbała i R. Soja (1998); A. Ribolzi i in. 2000, A. Stawnicka-Stolarska (1963), D. Turner-Gillespie i in. (2003). Syntetyczne ujęcie tematu zróżnicowania parametrów hydrologicznych gwałtownych wezbrań w małych zlewniach w Polsce zawierają prace K. Dębskiego (1969), A. Ciepielowskiego (1970), T. Bryndała (2009a, b), T. Bryndała i in. (2008).

W tym opracowaniu wykorzystano dane hydrologiczne opublikowane w literaturze jak również zgromadzone w wyniku własnych badań. Zgromadzony materiał obejmuje pięćdziesiąt wezbrań. Łącznie zebrano sześćdziesiąt osiem wartości natężenia przepływu maksymalnego (tab. 1). Następnie obliczono maksymalne natężenie odpływu jednostkowego. Analizowane wezbrania wystąpiły głównie na Wyżynach Małopolskiej i Lubelskiej oraz w Karpatach (ryc. 2). Pojedyncze przypadki pochodzą z innych regionów fizyczno-geograficznych. Zlewnia Potoku Północnego położona jest w obrębie Przedgórze Sudeckiego, zlewnia rzeki Kacza jest na granicy Pobrzeża Gdańskiego oraz Pojezierza Kaszubskiego, a zlewnia w Krzemienicy w obrębie Podgórze Rzeszowskiego w Kotlinie Sandomierskiej. W badaniach starano się uwzględnić wezbrania, które były spowodowane „pojedynczym” opadem przelotnym trwającym do kilku godzin w zlewniach o powierzchni do 40 km². Starano się wykluczyć przypadki, w których fala wezbraniowa powstała w wy-

Tab. 1. Parametry hydrologiczne gwałtownych wzebrań w zlewniach o powierzchni mniejszej od 40 km²
 Hydrological parameters of flash floods in the basins smaller than 40 km²

Lp. No	Data Date	Nazwa ciek River name	Przekrój pomiarowy Cross section name	Powierzchnia zlewni do przekroju Basin area km ²	Q_{\max} m ³ ·s ⁻¹	q_{\max} m ³ ·s ⁻¹ ·km ²	Źródło Reference
1	2	3	4	5	6	7	8
1	13/14 V 1936	Grodzisz	prawdopodobnie ujście do Wisły	29	106	3,66	Ciepielowski 1970
2	16 V 1937	Kacza	prawdopodobnie Gdynia – Kack	ok. 11,1	111	10	Ciepielowski 1970; Dębski 1969
3	22 V 1937	Miechówka	Miechów	34	244	7,15	Dębski 1969
4	19 V 1941	Czerwonka	Czerwonka	22,1	260	11,8	Parczewski 1960
5	23 VI 1948	Łopuszanka	Piaski Szlacheckie*	11,5	192,1	16,7	Dębski 1958
6	16/17 VIII 1949	potok bez nazwy w rejonie Izbicy	prawdopodobnie ujście ciek do Wierzy	0,8	15,5	19,4	Dębski 1958
7		Kalniczka	przy połączeniu z rz. Tamawką	4,1	28,8	7,07	
8		Dołżyca	Dołżyca	9,7	42,6	4,39	
9		Tamawka	Kalnica, prawdopodobnie powyżej miejscowości	13,7	37,8	2,76	
10	12/13 VII 1957	Borowiec	Mokre	9,2	9,3	1,01	Ciepielowski 1970; Stawnicka-Stolarska 1963
11		Barbarka	Ponizze miejscowości Czysztoborb	13,4	67	4,7	
12		Ostławica	po połączeniu z potokiem Radoszanka (dawna Barbora)	31,1	84,5	2,71	
13	28 V 1965	ciek bez nazwy płynący od miejscowości Trościanka	Wojstawice	3,22	7,82	2,44	Ciepielowski i Dąbkowski, 1967

1	2	3	4	5	6	7	8
14	28 V 1965	ciek bez nazwy płynący od miejscowości Majdan Stary	Kukawka	11,6	12,8	1,04	Ciepielowski i Dąbkowski, 1967
15	27 VI 1965	Potok Kobylański	Kobylany	6,4	7,8	1,21	Kaszowski, Kotarba 1970
16		ciek bez nazwy w Krzemienicy	Krzemienica	5,8	99,2	17,1	
17	26 IV 1966	ciek bez nazwy, płynący spod miejscowości Błędówka	brak danych	5	32,7	6,55	Ciepielowski, Dąbkowski 1968; Ciepielowski 1970
18		Ryjak w Zabartówce	Zabartówka	14,35	31,3	2,18	
19	15 VI 1969	sucha dolina w miejscowości Dzierzkowice	ujście do rz. Wyżnicy w Dzierzkowicach	4,6	8,6	1,88	Burczyński, Wojtanowicz 1969
20		potok bez nazwy, Siary, przysiółek Rzemieszka	ujście potoku do Sekówki	3	15,6	5,2	
21	5 VIII 1973	potok bez nazwy w Szymbarku, płynący spod Bartniej Góry, przysiółek Pod Lasem	ujście potoku do Ropy	2,2	16,29	9,0	Soja 1981
22	7 VI 1985	Bielanka	ujście do Ropy**	6,5	75	11,5	Gil 1998
23	20 V 1990	Potok Północny	Henryków	2,2	5	2,2	Teisseyre 1994
24	15 IX 1995	Kalinka	Śladów P5***	23,2	83,2	3,59	
			P6***	29,8	102	3,42	
			P7***	32,3	119	3,68	
			P8***	33,7	125	3,71	
			P9***	38,6	134	3,47	
25		Niecka	ujście do rz. Nidzicy	20	33,6	1,68	Cygan i in. 1998

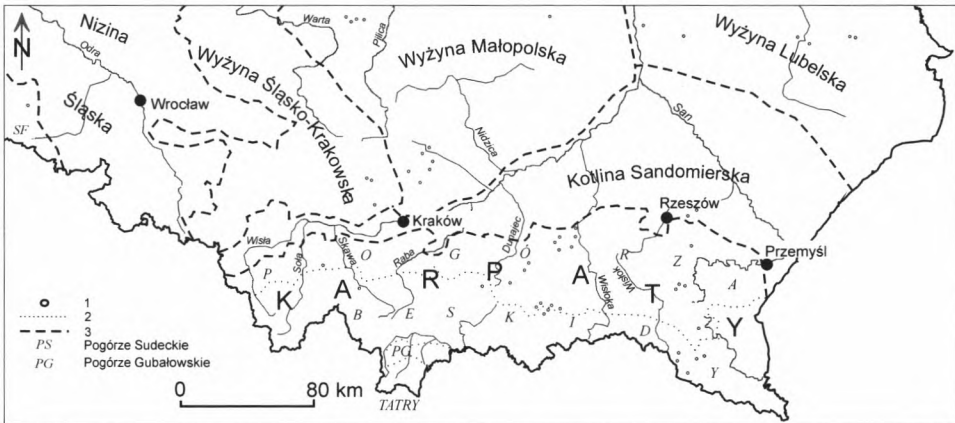
1	2	3	4	5	6	7	8
26	18 V 1996	sucha dolina, miejscowości Sułoszowa III	Sułoszowa III P1***	1	37	37	Niedbala, Soja 1998
			P2***	1,98	50,8	25,6	
			P3***	2,63	66	25,1	
			P4***	2,86	72,2	25,2	
27	18 V 1996	sucha dolina, źródłowa część rz. Prądnik	Sułoszowa I P5***	4,80	38,9	8,1	Niedbala, Soja 1998
			P6***	9,91	66,1	6,67	
			P7***	11,24	77,7	6,91	
			P8***	12,23	83,1	6,79	
			P9***	17,15	69	4,02	
			P10***	17,63	32,5	1,84	
28	4 IV 2000	potok bez nazwy w Patecznicy**	Patecznica, powyżej centrum	2	30	15	Cabaj, Ciupa 2001
29	13 V 2003	sucha dolina, źródłowa część rz. Luciaż	Granice, P4***	3,24	11	3,4	Bryndal i in. 2008
sucha dolina, źródłowa część rz. Śmiigi		Wola Malowana, P1***	2,5	8	2,3		
sucha dolina, źródłowa część rz. Widawki		Zapolice, P2***	1,78	6	3,3		
sucha dolina, źródłowa część rz. Świętojanki		Zakrzew, P3***	8,7	15	2,6		
33	9 VI 2003	ciek bez nazwy w Gromniku Biała	powyżej centrum miejscowości	4,6	5,5	1,2	Bryndal 2003
34	18 VII 2004	Sudoł	Biała Niżna	4,8	24	5	Bryndal 2006

1	2	3	4	5	6	7	8
35	18 VII 2004	ciek bez nazwy w miejscowości Grybów	Grybów	1,4	10,2	7,3	Bryndal 2006
36	19 VII 2004	sucha dolina, źródłowa część rz. Miechówki**	Wola Podleśna, P1***	8,0	8,0	1,0	Bryndal i in. 2008
37		Wolanka	Lubcza	13,1	14	1,1	
38		ciek bez nazwy w miejscowości Słotowa	Słotowa	6	10,2	1,7	
39	20 VIII 2004	ciek bez nazwy w miejscowości Pilzno	Pilzno	7,5	35	4,6	
40		ciek bez nazwy w miejscowości Zagórze	Zagórze	4,1	6,3	1,5	
41		Świnka	Jabłonka	9,3	15,8	1,66	
42	3 V 2005	ciek bez nazwy w miejscowości Niebocko	Niebocko	3,6	16,50	4,58	Bryndal 2006
43		ciek bez nazwy w miejscowości Niebocko – Grabownica	Niebocko	8,3	14,30	1,68	
44		Wątok	Szynwałd Górny	10	20,8	2,1	
45	5 VII 2005	Dulcza	Łęki Górne	16,6	13,2	0,8	
46		Zalasówka	Zalasowa	5,2	10,2	6	
47	3 VIII 2005	Zasępnica	Sucha Beskidzka	6,2	11,7	1,9	
48	24 VIII 2005	Targanice	Sułkowice	23	43	1,9	
49	20 IX 2006	potok bez nazwy w Radziemicach	Radziemice, P1***	1,99	53,9	27,1	Bryndal i in. 2008
			Radziemice, P2***	2,49	58	23,3	
			Radziemice, P3***	5,19	53,4	10,3	

1	2	3	4	5	6	7	8
50	20 IX 2006	potok bez nazwy w Pałeczniczy	Pałecznicza, P1*** Pałecznicza, P2*** Pałecznicza, P3*** Pałecznicza, P4***	0,59 1,19 2,05 2,36	13 9,1 31 16,5	22,0 7,6 15,1 7,0	Bryndal i in. 2008

Q_{\max} – natężenie przepływu maksymalnego, q_{\max} – maksymalny odpływ jednostkowy, * profil powyżej Ostrzycy, ** parametry wzebrania odniesione zostały do dolnej części zlewni, która istotnie wpłynęła na rozmiary wzebrania, ponieważ znajdowała się w obszarze silnych opadów, *** numery profili zgodne z numeracją w opracowaniu źródłowym

Q_{\max} – maximum discharge; q_{\max} – maximum specific discharge; * cross section over Ostrzyca, ** parameters of flood related to the lower part of the basin, which influenced flood formation predominantly due to the fact that this part of basin was affected by heavy rainstorm, *** numbers of cross section are in accordance with cross section numbers in the reference books



Ryc. 2. Przestrzenne rozmieszczenie zlewni, w których badano parametry hydrologiczne gwałtownych wezbrań. P.S. – Przedgórze Sudeckie, K.O. – Kotlina Oświęcimska. 1 – położenie zlewni, 2 – granica pomiędzy Pogórzem Karpackim a Beskidami, 3 – granice regionów fizycznogeograficznych

Spatial distribution of basins where hydrological parameters were investigated. P.S. – Sudety Foothills, K.O. – Oświęcimska Basin. 1 – basins, 2 – the boundary between the Carpathian Foothills and the Beskids region, 3 – the boundary of the geographical regions

niku opadu nawalnego nakładała się na wysoką falę uformowaną przez opady rozlewne.

Ponieważ wezbrania wystąpiły w zlewniach pozbawionych posterunków hydrologicznych, parametry wezbrania wyznaczono na podstawie zapisu śladów wezbrania. Materiał hydrologiczny zbierano zgodnie z istniejącymi zaleceniami (Przewodnik... 1978). Bezpośrednio po wezbraniu dokumentowano zasięg wielkiej wody, a następnie prowadzono odpowiednie pomiary geodezyjne. Natężenie przepływu maksymalnego obliczano wg wzoru:

$$Q_{\max} = P \cdot v \quad (1)$$

gdzie: Q_{\max} – natężenie przepływu maksymalnego ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), P – pole powierzchni przekroju (m^2), v – prędkość wody ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) obliczona wg wzoru Manniga (Hydrauliczne... 2003). Pole przekroju mierzono w miejscu, gdzie przepływ wody nie był zakłócany przez przeszkody terenowe.

Analizę zróżnicowania parametrów hydrologicznych prowadzono w ujęciu regionalnym oraz w odniesieniu do powierzchni zlewni. Obserwacje zestawiono w formie ciągu rosnącego, wykonano histogramy i wykresy skrzynkowe oraz obliczono podstawowe statystyki opisowe rozkładów. Pozwoliło to określić zróżnicowanie parametrów wezbrań. Podczas analizy statystycznej badano całą zbiorowość, nie wyłączając obserwacji odstających i ekstremalnych. Zgodnie

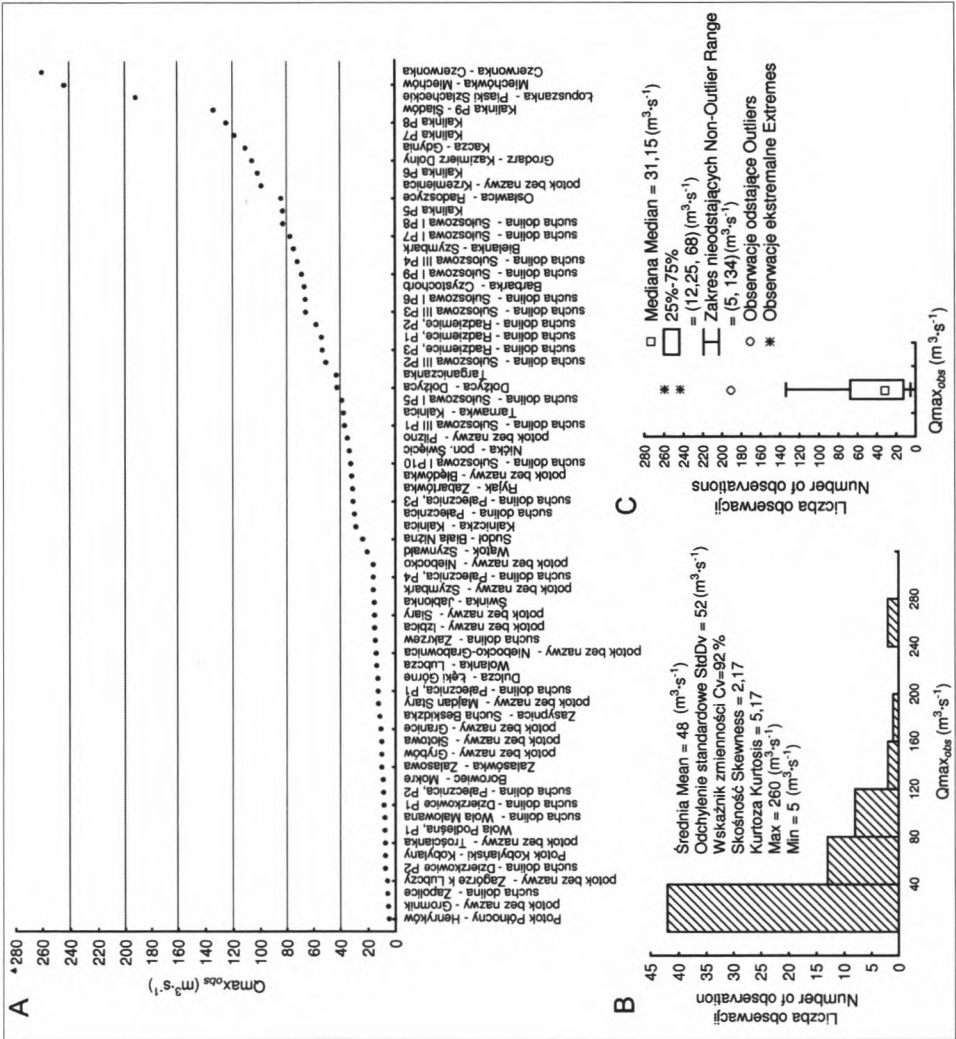
z zaleceniem (Nowak 2004) parametry, dla których współczynnik zmienności był wyższy od 50%, charakteryzowano w oparciu o miary pozycyjne.

WYNIKI I DYSKUSJA

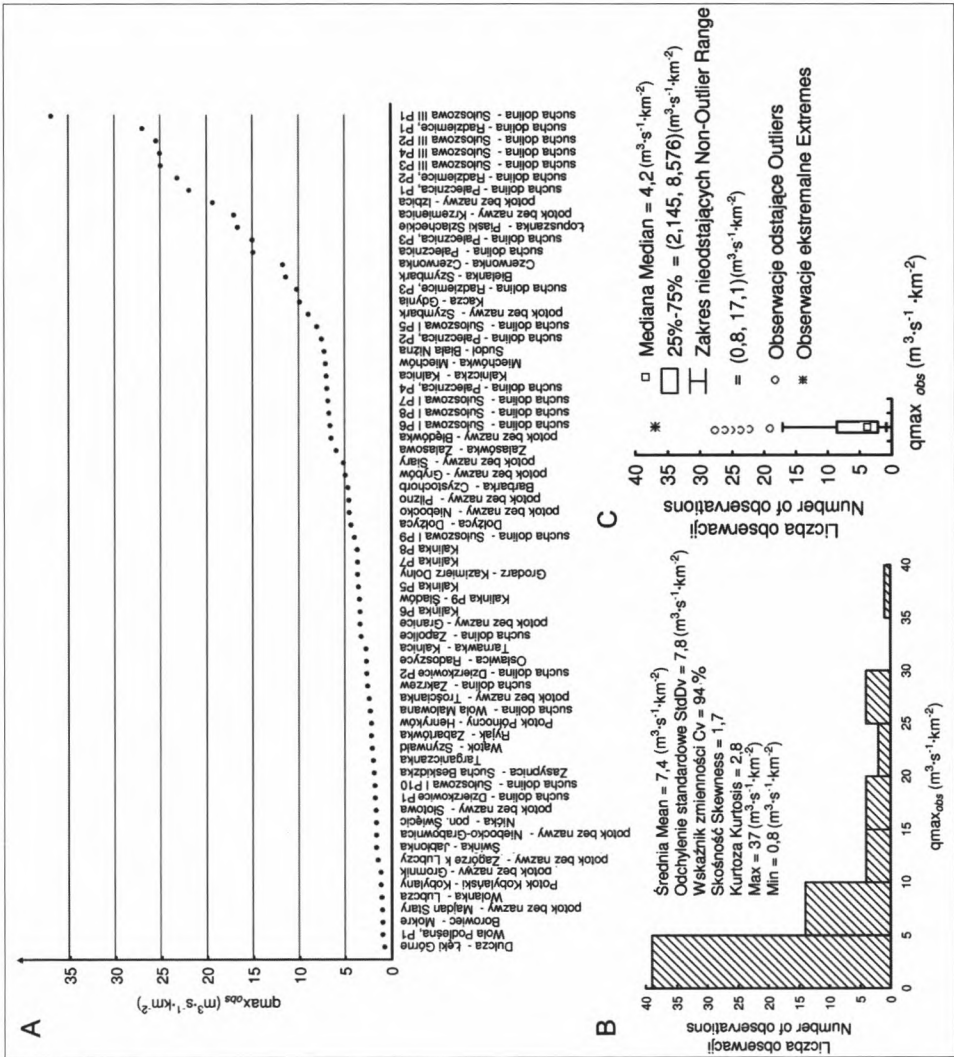
ZRÓŻNICOWANIE PARAMETRÓW HYDROLOGICZNYCH

Ryciny 3 i 4 prezentują zróżnicowanie natężenia przepływu maksymalnego oraz maksymalnego odpływu jednostkowego. Średnio wartości tych parametrów wynoszą odpowiednio ok. $31 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ i $4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Miary zmienności wskazują na silne zróżnicowanie parametrów. W połowie analizowanych przypadków przepływ maksymalny i odpływ jednostkowy zawierają się odpowiednio w przedziałach $12,2\text{--}68 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ i $2,1\text{--}8,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Najczęściej mieszczą się w przedziałach $5\text{--}40 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ oraz $0,8\text{--}5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Kolejne przedziały (ryc. 3B, 4B) grupują dużo niższą liczbę obserwacji. Na tle analizowanej zbiorowości wyróżniają się wezbrania Czerwonki, Miechówki oraz Łopuszanki, podczas których odnotowano przepływ maksymalny rzędu 260, 244 oraz $192,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (ryc. 3A). Wysokie wartości przepływu (powyżej $99 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), wystąpiły również podczas wezbrań Kalinki, rzeki Kacza w Gdyni, potoku Grodarz w Kazimierzu Dolnym oraz potoku bez nazwy w Krzemienicy (ryc. 3A). Pod względem odpływu jednostkowego wyróżnia się wezbranie w suchej dolinie w miejscowości Sułoszowa III, podczas którego zanotowano odpływ jednostkowy w wysokości $37 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Jest to do tej pory najwyższa wartość odnotowana w Polsce. Wysokie wartości odpływu jednostkowego, przekraczające $20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$, wystąpiły podczas wezbrań w Pałecznicy, Radziemicach i Sułoszowej (ryc. 4A).

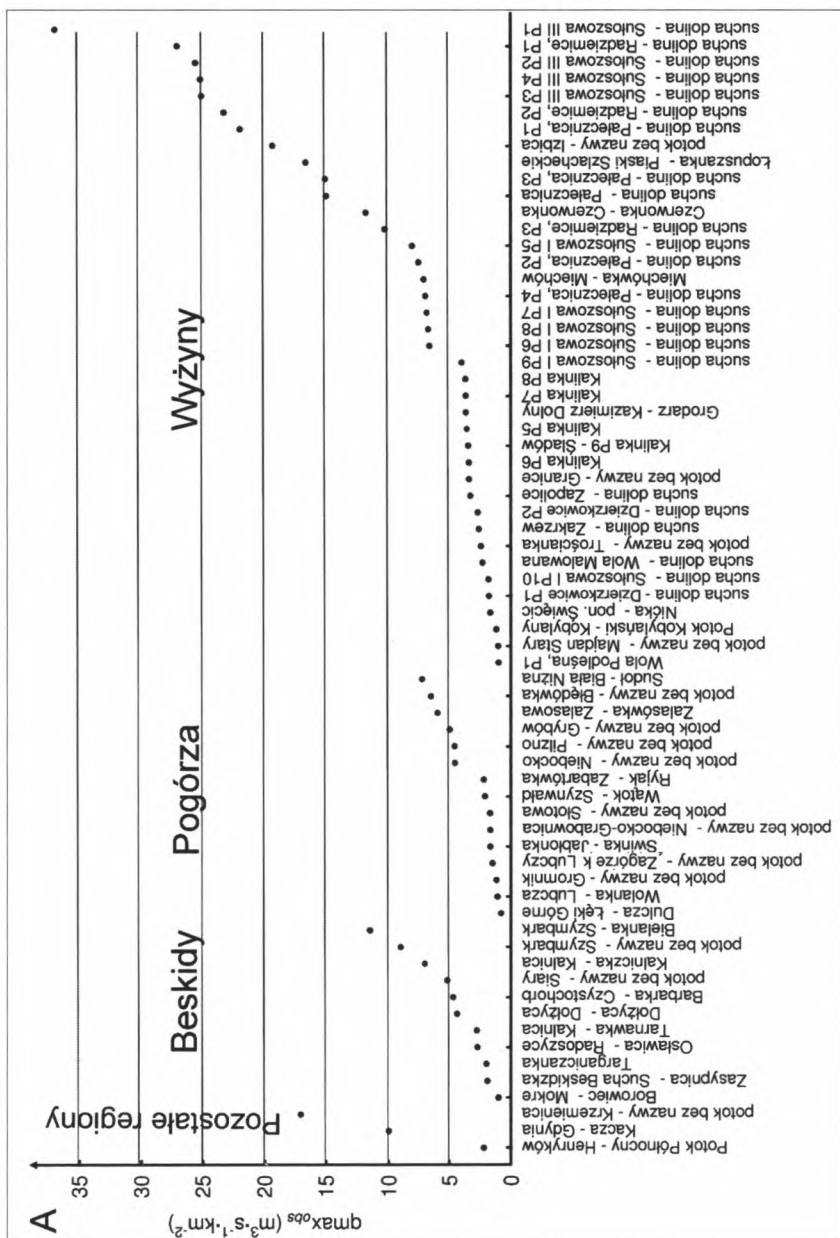
Analizując zróżnicowanie parametrów hydrologicznych w nawiązaniu do regionu fizycznogeograficznego należy zwrócić uwagę na znaczne różnice w liczebności wezbrań w poszczególnych regionach. Najliczniej reprezentowane są zlewnie wyżynne (39 przypadków), podczas gdy zlewnie beskidzkie i pogórskie są reprezentowane przez 11 i 15 przypadków. Zgromadzone na obecnym etapie badań dane hydrologiczne pozwalają tylko na bardzo ogólną analizę zróżnicowania parametrów w regionach. Ryciny 5 i 6 wskazują, że zarówno pod względem wielkości przepływu maksymalnego, jak również odpływu jednostkowego wyróżniają się zlewnie wyżynne. W zlewniach tych wartość odpływu jednostkowego najczęściej nie przekracza $10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Jednakże w kilkunastu przypadkach notuje się odpływ jednostkowy wyższy od $20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. W Karpatach w zlewniach beskidzkich natężenie przepływu maksymalnego podczas gwałtownych wezbrań nie przekracza $90 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, a maksymalny odpływ jednostkowy osiąga $11,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Najczęściej jest on



Ryc. 3. Zróżnicowanie natężenia przepływu maksymalnego podczas gwałtownych wezbrań w zlewniach mniejszych od 40 km² w formie ciągu rosnącego – A, histogramu – B, wykresu typu ramka wąsy – C. Diversity of the maximum discharge during flash floods in basins smaller than 40 km² presented as: ascending series – A, histogram – B, box and whisker plot – C



Ryc. 4. Zróżnicowanie maksymalnego odpływu jednostkowego podczas gwałtownych wzebrań w zlewniach mniejszych od 40 km² w formie uporządkowanego ciągu rosnącego – A, histogramu – B, wykresu typu ramka wąsy – C
 Diversity of the maximum specific discharge during flash floods in basins smaller than 40 km² presented as: ascending series – A, histogram – B, box and whisker plot – C

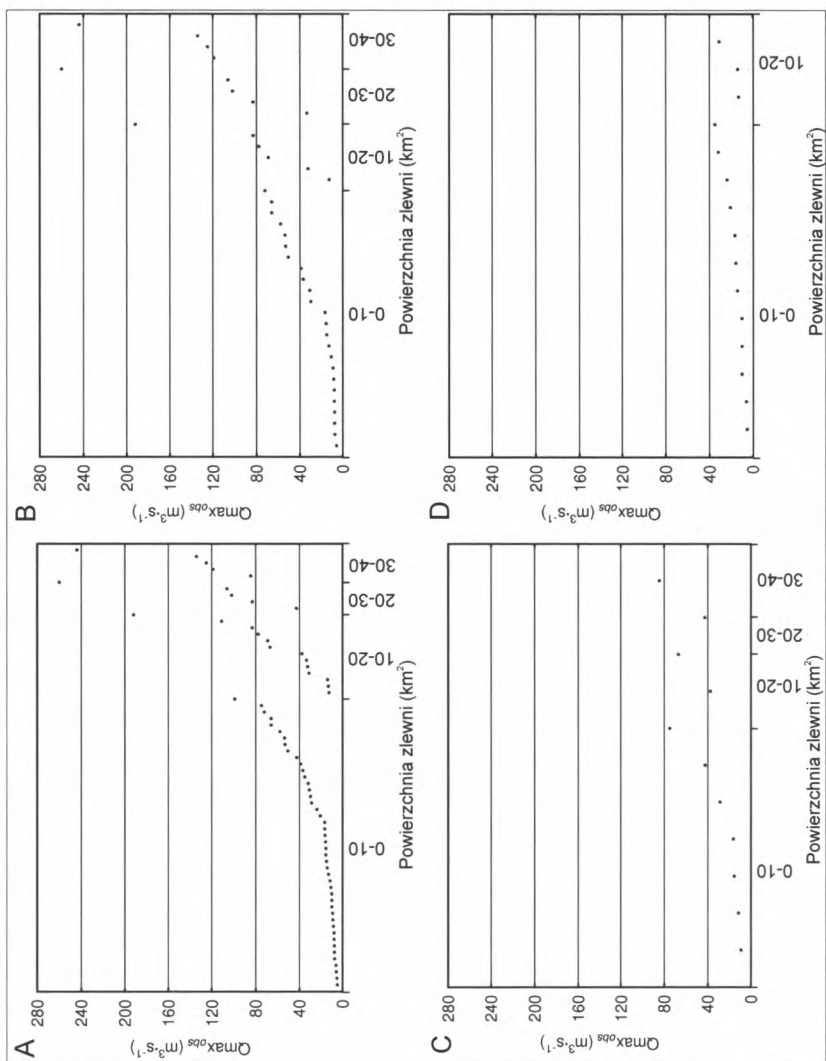


Ryc. 6. Zróżnicowanie maksymalnego odpływu jednostkowego w regionach
 Diversity of the maximum specific discharge with regard to regions

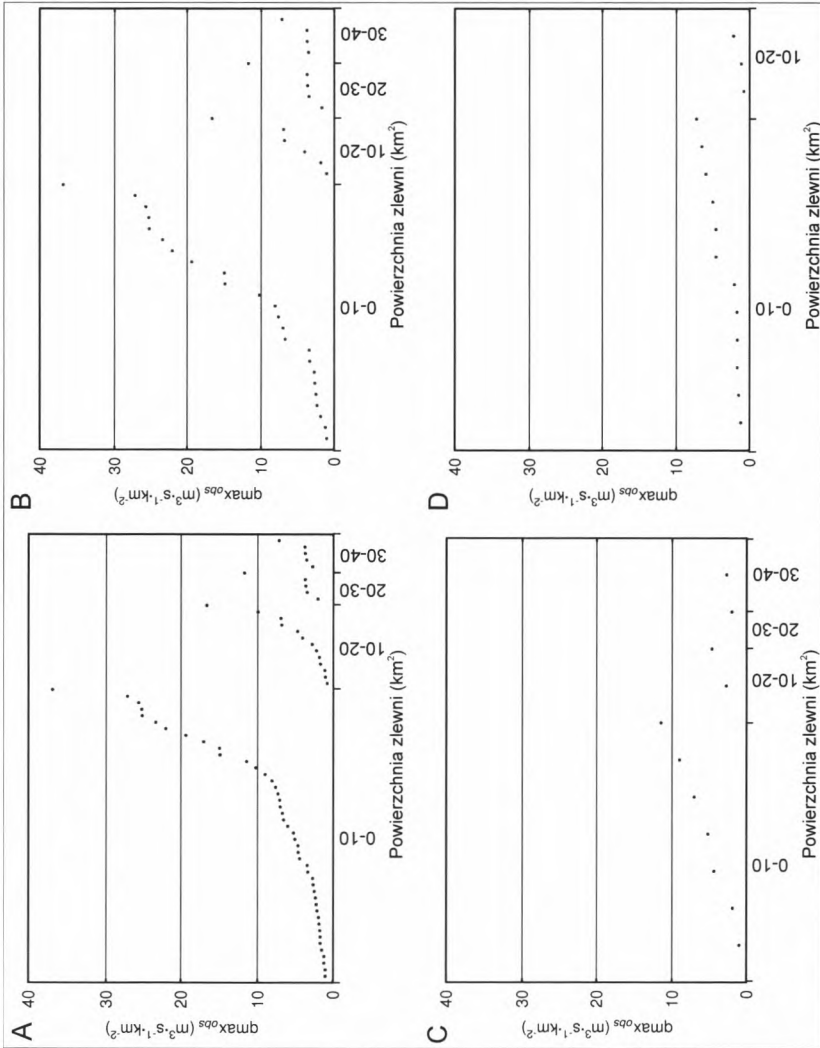
jednak niższy od $5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Należy zaznaczyć, że sześć spośród dziewięciu analizowanych wezbrań powstało w wyniku jednego opadu, zatem wyniki tej analizy trzeba traktować z dużą ostrożnością. W zlewniach pogórskich natężenia przepływu maksymalnego i odpływu jednostkowego są nieco niższe i nie przekraczają odpowiednio $35 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ i $6,6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Podobnie jak w zlewniach beskidzkich odpływ jednostkowy nie przekracza $5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ (ryc. 6). W pozostałych regionach fizycznogeograficznych liczba wezbrań, dla których dysponujemy parametrami hydrologicznymi, jest za mała, aby na jej podstawie wywodzić istotne wnioski dotyczące przestrzennego zróżnicowania. Podczas wezbrania w Krzemienicy ($99,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) w Kotlinie Sandomierskiej odnotowano nieznacznie wyższe natężenie przepływu maksymalnego niż podczas wezbrań, które wystąpiły w Beskidach. Wezbranie rzeki Kacza na Pojezierzu przewyższało pod względem przepływu wezbrania odnotowane w Beskidach, na Pogórzu i w Kotlinie Sandomierskiej.

Istotne jest określenie zróżnicowania parametrów hydrologicznych wezbrań w stosunku do wielkości zlewni (ryc. 7A, 8A). Należy również zwrócić uwagę na znaczne różnice liczebności wezbrań w zlewniach o określonych przedziałach powierzchni. Najliczniej reprezentowane są zlewnie mniejsze od 10 km^2 . W miarę wzrostu powierzchni zlewni liczba obserwacji maleje. W zlewniach o powierzchni mniejszej od 10 km^2 dominują wezbrania, w których natężenie przepływu maksymalnego jest mniejsze od $20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Notowano jednakże przepływy osiągające nawet $99 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (ryc. 7A). W zlewniach o takiej powierzchni odnotowano najwyższe wartości odpływu jednostkowego. W kilkunastu przypadkach przekroczyły one wartość $19 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$, osiągając maksimum równe $37 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ podczas wezbrania w Sułoszowej. Najczęściej jednak maksymalny odpływ jednostkowy jest niższy od $10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Liczba zgromadzonego materiału dla zlewni większych od 10 km^2 jest zbyt mała, aby formułować istotne wnioski dotyczące ich zróżnicowania. Rycina 7A dowodzi, że natężenie przepływu maksymalnego zmienia się w szerokim przedziale. W zlewniach o powierzchni $10\text{--}20 \text{ km}^2$ oraz $20\text{--}30 \text{ km}^2$ przyjmuje on odpowiednio wartości $13\text{--}192 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ i $43\text{--}260 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. W zlewniach większych od 30 km^2 parametr ten waha się od ok. 85 do $244 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Odpływ jednostkowy w zlewniach o powierzchni $10\text{--}20 \text{ km}^2$ tylko w jednym przypadku (Łopuszanki w Piaskach Szlacheckich – $16,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$) przekroczył wartość $10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. W zlewniach większych od 20 km^2 parametr ten był zwykle niższy od $4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Tylko podczas wezbrań Czerwonki ($11,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$) oraz Miechówki ($7,17 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$) wartość ta została przekroczona (ryc. 7A).

Podjęto również próbę określenia zróżnicowania parametrów hydrologicznych w zlewniach wyżynnych, beskidzkich i pogórskich przy uwzględnieniu ich



Ryc. 7. Zróżnicowanie natężenia przepływu maksymalnego w nawiązaniu do powierzchni zlewni: dla ogółu wezbrań – A, dla wezbrań w zlewniach beskidzkich – B, pogórskich – C, wyżynnych – D
 Diversity of the maximum discharge versus to basin's area presented to: all floods events – A, floods in the Beskids region – B, floods in foothills region – C, floods in upland region – D



Ryc. 8. Zróżnicowanie maksymalnego odpływu jednostkowego w nawiązaniu do powierzchni zlewni dla ogółu wzebrań – A, dla wzebrań w zlewniach beskidzkich – B, pogórskich – C, wyżynnych – D
 Diversity of the maximum discharge versus to basin's area presented to: all floods events – A, floods in the Beskids region – B, floods in foothills region – C, floods in upland region – D

wielkości (ryc. 7B, C, D; 8B, C, D). Należy jednak zaznaczyć, iż na obecnym etapie badań ilość zgromadzonego materiału jest wciąż zbyt mała, aby móc formułować istotne wnioski co do tego zagadnienia. Dotyczy to zwłaszcza zlewni pogórskich i beskidzkich o powierzchni powyżej 10 km². W zlewniach wyżynnych mniejszych od 10 km² natężenie przepływu osiąga wartość od 8 do 37 m³·s⁻¹, a maksymalny odpływ jednostkowy wzrasta stopniowo od 1 do 28 m³·s⁻¹·km⁻², osiągając maksimum równe 37 m³·s⁻¹·km⁻². W zlewniach beskidzkich o powierzchni poniżej 10 km² w większości analizowanych wzebrań natężenie przepływu było niższe od 40 m³·s⁻¹. Tylko podczas jednego wzebrania przepływ osiągnął wartość 75 m³·s⁻¹. Odpływ jednostkowy w tych zlewniach stopniowo wzrasta od 1 do 11,5 m³·s⁻¹·km⁻². W zlewniach pogórskich o powierzchni mniejszej od 10 km² natężenie przepływu maksymalnego rzadko przekracza 21 m³·s⁻¹. Tylko w dwóch przypadkach parametr ten przekroczył 30 m³·s⁻¹. Maksymalny odpływ jednostkowy jest zróżnicowany i wynosi od ok. 1 do 6,55 m³·s⁻¹·km⁻² (ryc. 8D).

W zlewniach wyżynnych o powierzchni od 10 do 20 km² przepływ maksymalny waha się od ok. 13 do 192 m³·s⁻¹, a maksymalny odpływ jednostkowy jest w większości przypadków niższy od 7 m³·s⁻¹·km⁻². Został on przekroczony tylko raz podczas wzebrania Łopuszanki w Piaskach Szlacheckich – 16,7 m³·s⁻¹·km⁻². W zlewniach o powierzchni 20–30 km² notuje się przepływy maksymalne z przedziału od 33 do 260 m³·s⁻¹, natomiast w zlewniach większych natężenie przepływu wynosi od 134 do 244 m³·s⁻¹ (ryc. 7B). Wartości odpływu jednostkowego w zlewniach o powierzchni większej od 20 km² najczęściej są niższe od 4 m³·s⁻¹·km⁻². Wartość ta została przekroczona dwukrotnie podczas wzebrań Czerwonki i Miechówki (ryc. 8B). Zlewnie karpackie o powierzchni przekraczającej 10 km² są reprezentowane tylko przez siedem wartości. W Beskidach (4 przypadki) przepływ maksymalny waha się od ok. 38 do 85 m³·s⁻¹, podczas gdy odpływ jednostkowy mieści się w przedziale od 2 do 4,7 m³·s⁻¹·km⁻² (ryc. 7C, 8C). W zlewniach pogórskich (3 przypadki) przepływ maksymalny wynosi od 13 do 31 m³·s⁻¹, podczas gdy odpływ jednostkowy wynosi od ok. 1 do 6,55 m³·s⁻¹·km⁻² (ryc. 7D, 8D).

GRANICE MAKSYMALNYCH PRZEPŁYWÓW RZECZNYCH W MAŁYCH ZLEWNIACH – RÓWNANIA EMPIRYCZNE

Oszacowanie przepływu maksymalnego w małych zlewniach umożliwiają wzory empiryczne. Są to zależności, które najczęściej ujmują relację pomiędzy powierzchnią zlewni a natężeniem przepływu maksymalnego. Istnieje kilka równań, które umożliwiają oszacowanie tego parametru w małych zlewniach, przy czym, granice „małej zlewni” nie są jednoznacznie zdefiniowane.

J.A. Rodier i M. Roche (1984) na podstawie danych o natężeniu przepływu maksymalnego zestawionych w Word Catalogue of Maximum Observed Floods opracowali równanie, które umożliwia oszacowanie przepływu maksymalnego w zlewniach o powierzchni mniejszej od 90 km². Ma ono postać następującą:

$$Q_{\max} = 100 \cdot A^{0,8} \quad (2)$$

gdzie: Q_{\max} – natężenie przepływu maksymalnego m³·s⁻¹; A – powierzchnia zlewni w km².

Równanie to zostało opracowane na podstawie największych wezbrań odnotowanych na świecie i może być stosowane niezależnie od regionu geograficznego.

Andrzej Ciepeliowski (1973) opracował równanie, które wyraża największe przepływy w warunkach europejskich. Równanie to może być stosowane w zlewniach mniejszych od 150 km². Przyjmuje ono postać:

$$Q_{\max} = 85,7 \cdot A(A+1)^{-0,3667} \quad (3)$$

(oznaczenia jak we wzorze 2).

Na podstawie analizy danych o natężeniu przepływów maksymalnych dla 533 rzek europejskich i tureckich o powierzchni od 0,4 do 1 350 000 km² A. Bartnik i P. Jokiel (2007) opracowali równanie:

$$1/\log Q = 0,248 + 0,483 \cdot \exp[-\log(A)] \quad (4)$$

gdzie: $\log Q$ – przepływ maksymalny m³s⁻¹, A – powierzchnia zlewni. Równanie to umożliwia określenie przepływu maksymalnego dla dowolnej rzeki europejskiej (Bartnik, Jokiel 2007).

W Polsce opracowano kilka równań, które ujmowały zależność pomiędzy powierzchnią zlewni a natężeniem przepływu maksymalnego podczas pojedynczych wezbrań. Powstał wzór Lambora (1938) do obliczania przepływu maksymalnego w małych zlewniach górnej części dorzecza Dniestru, w podobny sposób ujęła zależność pomiędzy powierzchnią zlewni i przepływem maksymalnym A. Stawnicka-Stolarska (1963) podczas wezbrania Osławy. Wyprowadzone zależności mają zastosowanie regionalne, ograniczone najczęściej do określonego dorzecza.

Dane hydrologiczne zebrane z wezbrań, które wystąpiły w różnych regionach kraju, były podstawą opracowania „ponadregionalnych” wzorów empirycznych, umożliwiających oszacowanie natężenia przepływu maksymalnego w małych zlewniach. Zależność taką opracował K. Dębski (1969), korzystając z metody zaproponowanej przez włoskiego hydrologa F. Pagliariego. Uogólnione równanie Pagliariego ma postać:

$$Q = \frac{aA}{b + A} \quad (5)$$

gdzie: Q – natężenie przepływu $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, A – powierzchnia zlewni km^2 , a , b – współczynniki równania. Autor (1969), analizując 10 przypadków gwałtownych wezbrań w zlewniach o powierzchni 0,8–269 km^2 , określił potencjalny największy przepływ z krótkotrwałych deszczów nawalnych. Równanie przyjęło postać:

$$Q_{\max} = \frac{361A}{12,2 + A} \quad (6)$$

(oznaczenia jak we wzorze 5).

Według A. Ciepiewskiego i L. Dąbkowskiego (2006) wzór ten wskazuje na *maksimum maksimorum* przepływu na terenie Polski, a przepływy maksymalne obliczane metodami probabilistycznymi powinny być porównywane, aby wiedzieć, czy taki przepływ w warunkach polskich jest realny i czy już występował.

Podobny charakter ma równanie opracowane przez B. Fal (2004). Autorka na podstawie ośmiu danych o przepływie maksymalnym zestawionych przez A. Ciepiewskiego (1970) opracowała równanie regresji, które umożliwia oszacowanie wartości natężenia przepływu maksymalnego w zlewniach mniejszych od 50 km^2 . Ma ono następującą postać:

$$Q_{\max} = 22,4 \cdot A^{0,727} \quad (7)$$

(oznaczenia jak we wzorze 2).

Na rycinie 9 zestawiono wartości natężenia przepływu maksymalnego, które odnotowano podczas gwałtownych wezbrań, oraz krzywe, które wykreślono na podstawie równań empirycznych. Zestawienie wskazuje, że natężenia przepływu maksymalnego odnotowane w Polsce są kilkanaście razy niższe od światowych (wzór 2) oraz kilkakrotnie niższe od europejskich (wzory 3, 4). Można również zauważyć, że równanie „obwiedni” opracowane przez K. Dębskiego (1969), mimo iż uwzględniało tylko dziesięć wezbrań, poprawnie opisuje *maksimum maksimorum* najwyższych przepływów w małych zlewniach w Polsce. Tylko w dwóch przypadkach – wezbrania Łopuszanki w Piaskach Szlacheckich oraz Czerwonki – obserwowane natężenie przepływu maksymalnego było wyższe niż wartość obliczona wzorem Dębskiego. Równanie B. Fal (2004), które zostało opracowane w większości na podstawie tego samego materiału hydrologicznego co równanie K. Dębskiego (1969), daje nieco niższe wartości dla zlewni o powierzchni ok. 27,5 km^2 , natomiast dla zlewni większych wartości natężenia przepływu są wyższe. Jest to wynik różnic w podejściu obliczeniowym.

BADANIE ZALEŻNOŚCI POMIĘDZY NATĘŻENIEM PRZEPLYWU
MAKSYMALNEGO A POWIERZCHNIĄ ZLEWNI

Liczniejszy materiał hydrologiczny był podstawą szukania zależności pomiędzy natężeniem przepływu maksymalnego a powierzchnią zlewni. Wartości natężenia przepływu maksymalnego obliczone przy pomocy równań B. Fal (2004) i K. Dębskiego (1969) są dużo wyższe w porównaniu z obserwowanymi (ryc. 9). Dlatego podjęto próbę opracowania równania, które pozwoli dokładniej oszacować natężenie przepływu maksymalnego w zlewniach o powierzchni do 40 km², w których najczęściej występują gwałtowne wezbrania opadowo-nawalne.

Rycina 10 prezentuje zależność pomiędzy natężeniem przepływu maksymalnego i powierzchnią zlewni. Chmura punktów obserwowana na wykresie rozrzutu wskazuje, że zależność pomiędzy analizowanymi cechami ma charakter liniowy. Zależność tę opisano przy pomocy równania regresji liniowej, które przyjęło postać:

$$Q_{\max} = 10,56 + 3,67A \quad (8)$$

(oznaczenia jak we wzorze 2).

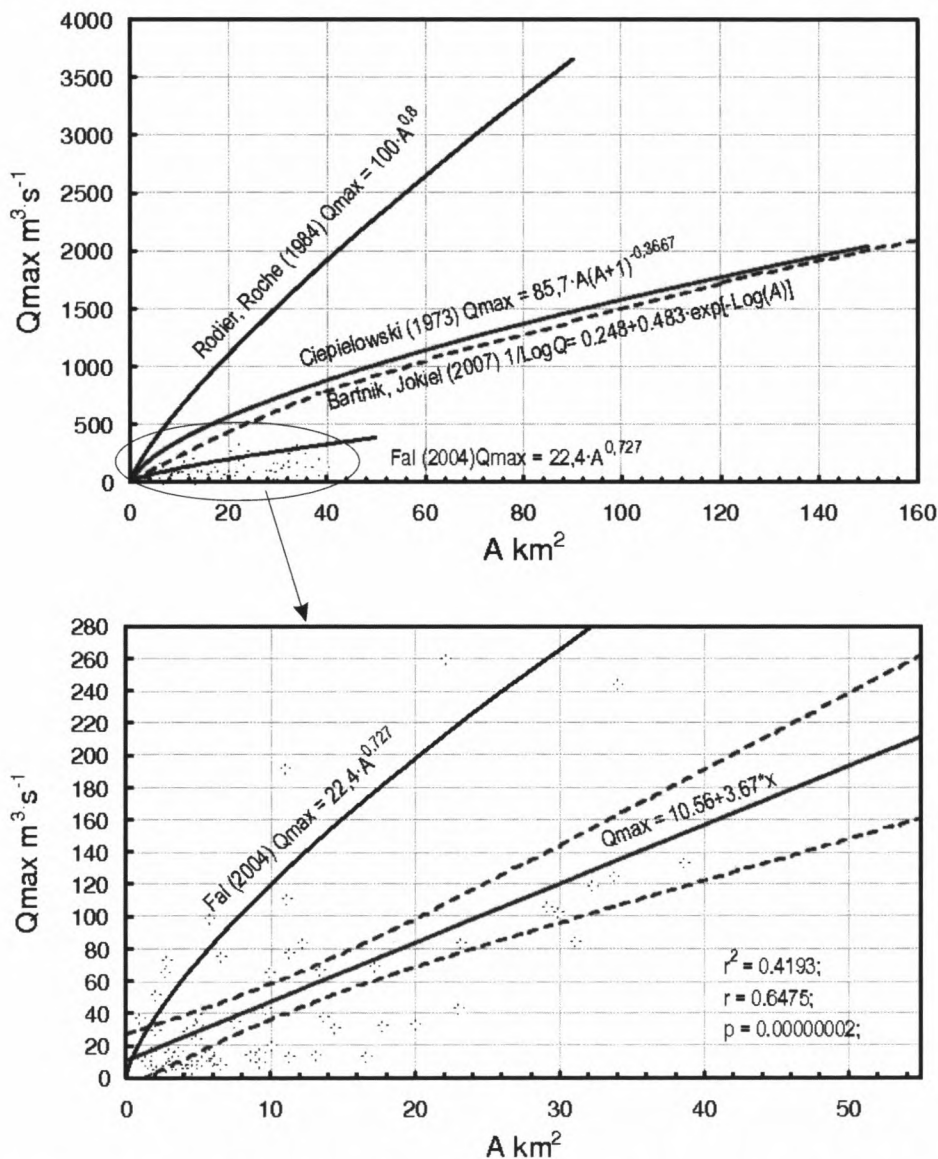
Poprawność uzyskanego modelu oceniono na podstawie współczynnika korelacji liniowej i współczynnika determinacji. Współczynnik korelacji wynosi 0,65 i jest istotny statystycznie. Przyjmując klasyfikację jakościową korelacji liniowej opracowaną przez W. Ziobronia (1977), można stwierdzić, że zależność pomiędzy analizowanymi cechami jest „mierna”. Wartość współczynnika determinacji równa 0,42 klasyfikuje ten model jako niezadowolającą (Soczyńska 1995).

Ponieważ model regresji w niezadowolający sposób opisuje zależność pomiędzy analizowanymi cechami, skorzystano z podejścia zaproponowanego przez K. Dębskiego i do określenia zależności pomiędzy natężeniem przepływu maksymalnego a powierzchnią zlewni zastosowano równanie F. Pagliariego. Przy obliczaniu współczynników równania korzystano z wytycznych zawartych w pracy K. Dębskiego (1969). Równanie przyjęło postać:

$$Q_{\max} = \frac{143,6A}{2,83 + A} \quad (9)$$

(oznaczenia jak we wzorze 5).

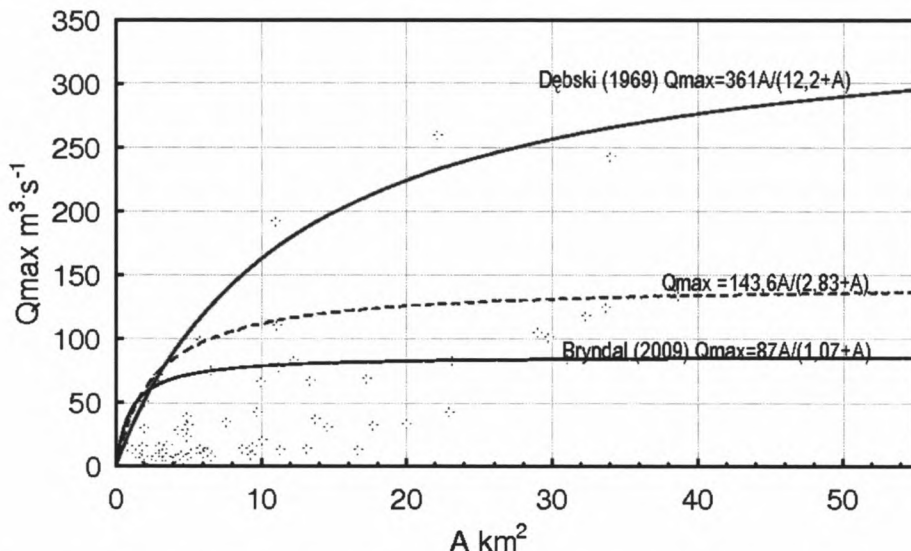
Wydaje się, że równanie to dokładniej opisuje analizowane zjawisko. Pominięte zostały wartości odstające, które znacząco różnią się od pozostałych danych. Tak wysokie wartości natężenia przepływu maksymalnego zdarzają się bardzo rzadko. Od wezbrania Łopuszanki w roku 1948 nie notowano tak wielkich przepływów. Nawet podczas wezbrań w okolicach Kaliny Wielkiej,



Ryc. 9. Porównanie natężenia przepływu maksymalnego obserwowanego podczas wzebrań z wartościami obliczonymi przy pomocy wzorów empirycznych

Maximum discharge observed during floods events versus the maximum discharge calculated by empirical equations

Sułoszowej, gdzie wystąpiły opady nawałne o sumie szacowanej na 150 mm (Niedźwiedź 1998) i 120 mm (Cebulak, Niedźwiedź 1997), przepływy były znacznie niższe (tab. 1). Krzywa wyznaczona na podstawie opracowanego



Ryc. 10. Zależność pomiędzy natężeniem przepływu maksymalnego a powierzchnią zlewni
Interrelation between maximum discharge and basin's area

równania w początkowej fazie niewiele różni się od wyznaczonej przez równanie Dębskiego (1969), dając nawet wartości nieco wyższe. Dla zlewni o powierzchni większej od 2 km^2 wartości otrzymane przy użyciu opracowanego równania są lepiej „dopasowane” do zgromadzonych danych hydrologicznych (ryc. 9). Na rycinie 9 naniesiono przebieg krzywej, która opisuje wartości natężenia przepływu maksymalnego w zlewniach karpackich o powierzchni mniejszej od 40 km^2 (Bryndal 2009b). Porównanie krzywej wykreślonej na podstawie równania 9 z krzywą karpacką wskazuje, że w regionie tym wartości natężenia przepływu maksymalnego są niższe.

PODSUMOWANIE

Prowadzone badania stanowią próbę podsumowania obecnego stanu wiedzy na temat parametrów hydrologicznych gwałtownych wezbrań w małych zlewniach. Przeprowadzona analiza pozwoliła określić zróżnicowanie natężenia przepływu maksymalnego oraz odpływu jednostkowego w zlewniach, w których nawalne opady deszczu spowodowały wezbrania i lokalne powodzie. Wskazano na graniczne wartości parametrów hydrologicznych w zlewniach o określonej powierzchni, położonych w wybranych regionach fizycznogeograficznych. Odnotowane podczas wezbrań wartości przepływu porównano z obliczonymi przy zastosowaniu równań empirycznych opracowanych dla świata,

Europy i Polski. Przepływy w Polsce są kilkakrotnie niższe do tych, które występują na świecie i w Europie. Porównanie wykazało, że formuła Pagliariego zmodyfikowana przez K. Dębskiego właściwie opisuje potencjalny maksymalny przepływ (*maksimum maksimorum*) z krótkotrwałych deszczów nawalnych w Polsce. Jednakże wartości obliczone przy zastosowaniu formuły w modyfikacji Dębskiego są bardzo wysokie, występują rzadko. Dlatego dysponując obszerniejszym materiałem hydrologicznym obliczono nowe współczynniki do formuły Pagliariego, uzyskując równanie, które umożliwi oszacowanie przepływu maksymalnego w zlewniach najczęściej narażonych na występowanie lokalnych powodzi. Oszacowanie przepływu maksymalnego, jaki może wystąpić w zlewni w wyniku gwałtownych opadów deszczu, jest istotne, ponieważ umożliwia ocenę zagrożenia powodziowego. Proste zależności empiryczne, uzyskane na podstawie gromadzonego materiału hydrologicznego, mogą być pomocne w oszacowaniu wartości przepływu maksymalnego w małych zlewniach i stanowić odniesienie dla wartości przepływów uzyskanych w wyniku analiz statystycznych lub przy zastosowaniu modeli hydrologicznych.

LITERATURA

- Bartnik A., Jokić P. 2007: Odprawy maksymalne i indeksy powodziowości rzek europejskich. *Gospodarka Wodna*, 1, 2007, 28–32.
- Bryndał 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*. Wyd. UP Kraków, 15–24.
- Bryndał T., 2006: *Przyrodnicze i antropogeniczne uwarunkowania występowania lokalnych powodzi w Polsce*. Instytut Geografii Akademia Pedagogiczna w Krakowie, maszynopis.
- Bryndał T., 2008: Parametry zlewni, w których wystąpiły lokalne powodzie. *Annales UMCS, Sec. B, vol. LXIII*, 177–200.
- Bryndał T., 2009a: Investigation of the maximum discharge in ungauged small basins in the Polish part of the Carpathian Mts., Extended abstracts of International Workshop on Status and Perspectives of Hydrology in Small Basins Goslar-Hahnenklee, Federal Republic of Germany 30 March – 2 April 2009 *Landschaftsökologie und Umweltforschung* 50; 39–42.
- Bryndał T., 2009b: Przepływy maksymalne odnotowane podczas gwałtownych wezbrań, spowodowanych krótkotrwałymi ulewnymi opadami deszczu w małych zlewniach karpackich, [w:] *Zasoby i ochrona wód. Obieg wody i materii w zlewniach rzecznych*, R. Bogdanowicz, J. Fac-Beneda (red.), Gdańsk 2009; 329–334.
- Bryndał T., Cabaj W., Ciupa T., 2008: Gwałtowne wezbrania małych cieków w Niece Nidziańskiej. *Przegl. Geogr.*, 80, 1, 127–146.
- Buraczyński J., Wojtanowicz J., 1971: Rozwój wąwozów lessowych w okolicy Dzieżkowic na Wyżynie Lubelskiej pod wpływem gwałtownej ulewy w czerwcu 1969 roku. *Annales UMCS, Sec. B, vol. XXVI*, 6, 135–164.

- Cabaj W., Ciupa T., 2001: Naturalne i antropogeniczne uwarunkowania przyczyn i skutków powodzi na rolniczych terenach w Niece Nidziańskiej, [w:] J. Balon, K. German (red.), *Przemiany środowiska przyrodniczego Polski i jego funkcjonowanie. Problemy Ekologii Krajobrazu t. 10*, IGiPZ UJ, Polska Asocjacja Ekologii Krajobrazu, Kraków, 338–343.
- Cabaj W., Ciupa T., Bryndal T., 2002: Rola czynników naturalnych i antropogenicznych w kształtowaniu lokalnych powodzi w południowej części Wyżyny Małopolskiej. *Prace IG AŚ w Kielcach*, nr 7, 353–360.
- Camarasa Belmonte A.M., Segura Beltrán F., 2001: Flood events in Mediterranean ephemeral streams (ramblas) in Valencia region, Spain. *Catena*, 45, 229–249.
- Cebulak E., Niedźwiedź T., 1998: Ekstremalne zjawiska opadowe w dorzeczu górnej Wisły w latach 1995–1996. *Dok. Geogr. IGiPZ PAN*, 11, 11–30.
- Ciepielowski A., 1970: Maksymalne wielkości spływów jednostkowych z deszczów nawalnych. *Przegl. Geogr.*, XV, z. 2, 179–193.
- Ciepielowski A., 1973: Przegląd wzorów empirycznych do określania maksymalnych przepływów letnich. *Zeszyty Naukowe AR w Warszawie, Melioracje Wodne*, 12.
- Ciepielowski A., Dąbkowski L., 1967: O katastrofalnym wezbraniu cieków w rejonie Chełma Lubelskiego. *Gosp. Wodna*, 4, 126–127.
- Ciepielowski A., Dąbkowski L., 1968: Charakterystyka hydrologiczna skutków katastrofalnego „oberwania chmury” nad Rzeszowskiem w dniu 26 kwietnia 1966 roku. *Przegl. Geofiz. r. XIII*, z. 3, 261–272.
- Ciepielowski A., Dąbkowski L., 2006: *Metody obliczeń przepływów maksymalnych w małych zlewniach rzecznych*. Oficyna Wydawnicza Projprzem–EKO, Bydgoszcz.
- Cygan M., Czulak J., Niedbała J., Niedbała J., 1997: Przepływy kulminacyjne i wielkość odpływu fali powodziowej w dorzeczu górnej Nidzicy w dniach 15/16 września 1995 roku. *Dokumentacja Geograficzna*, 8, 43–53.
- Dębski K., 1958: Odpływ z deszczu nawalnego we wsi Piaski Szlacheckie pod Krasnymstawem w czerwcu 1956 r. *Gosp. Wodna*, 8, 339–342.
- Dębski K., 1969: O potencjalnym najwyższym odpływie z krótkotrwałych deszczów nawalnych. *Rozp. Hydrotechn. z.* 23, 51–63.
- Fal B., 2004: Maksymalne przepływy rzek polskich na tle wartości zaobserwowanych w różnych rzekach świata. *Gosp. Wodna*, 5, 188–192.
- Gareth H. Old, Graham J.L., Packman J., Barnaby P.G., Lewis S., Hewitt E.J., Holmes M., Young A., 2003: The impact of a convective summer rainfall event on river flow and fine sediment transport in a highly urbanized catchment: Bradford, West Yorkshire. *The Science of the Total Environment* 314–316, 495–512.
- Gorczyca E., 2004: *Przekształcanie stoków fliszowych przez procesy masowe, podczas katastrofalnych opadów (dorzecze Łososiny)*. Wyd. UJ, Kraków.
- Gutiérrez F., Gutiérrez M., Sancho C., 1998: Geomorphological and sedimentological analyses of catastrophic flash flood in the Areás drainage basin (Central Pyrenees, Spain). *Geomorphology*, 22, 265–284.
- Gil E., 1998: Spływ wody i procesy geomorfologiczne w zlewniach fliszowych podczas gwałtownej ulewy w Szymbarku w dniu 7 czerwca 1985 roku. *Dok. Geogr.* 11, 85–107.

- Kasowski L., Kotarba A., 1975: Wpływ katastrofalnych wezbrań na przebieg procesów fluwialnych (na przykładzie potoku Kobylanka na Wyżynie Krakowskiej). *Prace Geogr. IG PAN*, 80, 5–80.
- Kubrak J., Nachlik E. (red.), 2003: *Hydrauliczne podstawy obliczania przepustowości koryt rzecznych*. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- Lach J., Lewik P., 2002: Powódź w lipcu 2001 na Ślądczyźnie i jej skutki, [w:] Z. Górka A. Jelonek (red.), *Geomorfologiczne uwarunkowania rozwoju Małopolski*, 199–204.
- Lambor J., 1938: Najwyższe przepływy w dorzeczu górnego Dniestru przy małych zlewniach, *Gosp. Wodna*, z. 4–5, 196–309.
- Lenart W., 1993: Opad atmosferyczny, [w:] U. Soczyńska (red.), *Podstawy hydrologii dynamicznej*. Wyd. UW, Warszawa, 101–116.
- Majewski W., 2002: Powódź w Gdańsku w lipcu 2001 roku. *Gosp. Wodna*, z. 1, 21–23.
- Mikulski Z. (red.), 1978: *Przewodnik do ćwiczeń z hydrografii*. Wydawnictwo PWN, Warszawa.
- Niedbała A., Soja R., 1998: Odptyw z opadu nawalnego w dniu 18 maja 1996 roku w Sułozowej. *Dok. Geogr. IGiPZ PAN*, 11, 31–38.
- Niedźwiedz T., 1997: Katastrofalny deszcz nawalny w górnej części dorzecza Nidzicy w dniu 15 września 1995 r. *Dok. Geogr. IGiPZ PAN*, 8, 38–53.
- Nowak E., 2004: *Metody klasyfikacji w badaniach geograficznych (analiza porównawcza)*. Bogucki Wyd. Nauk., Poznań.
- Ostrowski J., 1997: Program Małych Zlewni IMGW w latach 1981–1995. Osiągnięcia i perspektywy. *Materiały badawcze IMGW, seria Hydrologia i Oceanografia* 22, 7–50.
- Ostrowski J., 2000: Powodzie lokalne w małych zlewniach – istotny problem ochrony przeciwpowodziowej, [w:] *Hydrotechnika III'2000. Program zabezpieczenia przeciwpowodziowego*, 19–21 września 2000, Ustroń 2000, 122–135
- Parczewski W., 1960: Warunki występowania gwałtownych wezbrań na małych ciekach. *Wiadomości Służby Hydrologicznej i Meteorologicznej*, 8, 3, 1–159.
- Punzet J., 1977: Ocena przepływów wielkich wód w małych zlewniach górnej Wisły. *Gosp. Wodna*, 6, 161–165.
- Rodier J. A., Roche M., 1984: *Word Catalogue of Maximum Observed Floods*. IAHS Publication, 143, Wallingford UK.
- Ribolzi O., Aundrieux P., Valles V., Bouzigues R., Bariac T., Voltz M., 2000: Contribution of groundwater and overall flows to storm flow generation in the cultivated Mediterranean catchments. Quantification by natural chemical tracing. *Journal of Hydrology* 233, 241–251.
- Soczyńska U., 1995: *Modelowanie systemów naturalnych*. Wyd. UW, Warszawa.
- Soja R., 1981: Analiza odpływu z fliszowych zlewni Bystrzanki i Ropy (Beskid Niski). *Dokumentacja Geograficzna*, z. 1, 1–91.
- Stawnicka-Stolarska A., 1963: Odptyw z dorzecza Osławy podczas powodzi w dniach 12–13 VII 1957. *Prace i Studia KLiGW*, t. 6, 197–211.
- Starkel L., 1999: Geomorfologiczne i sedimentologiczne skutki ekstremalnych opadów w Karpatach, [w:] *Hydrotechnika II'99 Sympozjum ogólnokrajowe. Wojewódzki Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej*, Katowice, 116–118.

- Teisseyre A. K. 1994; Spływ stokowy oraz współczesne osady deluwialne w lessowym regionie Henrykowa na Dolnym Śląsku. Prace Geologiczno Mineralogiczne XLIII, 1–200.
- Turner-Gillespie D. F., Smith J.A., Bates P.D., 2003: Attenuating reaches and the regional flood response of an urbanizing drainage basin. *Advances in Water Resources*, vol. 26, 673–684.
- Ziętara T., 2002: Rola gwałtownych ulew i powodzi w modelowaniu rzeźby terenu oraz niszczeniu infrastruktury osadniczej w górnej części dorzecza Wisły, [w:] Z. Górka, A. Jelonek (red.), *Geomorfologiczne uwarunkowania rozwoju Małopolski*. Wyd. UJ Kraków, 37–45.
- Ziobroń W., 1977: *Metody statystyczne*. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków.
- Żurawek R., 1999: Zmiany erozyjne w dolinach rzek Sudetów Kłodzkich wywołane powodzią w lipcu 1997 r. oraz w lipcu 1998 r. *Problemy Zagospodarowania Ziemi Górskich*, z. 45, 45–61.

SUMMARY

Short duration convective rainstorm may lead to flash flooding in small basins. Design of hydro-technical infrastructure such as bridges and dams requires information about hydro-meteorological properties of a watershed. Such information is also important for flood risk management. Flood risk is among the most severe risks to life and property, and has become more frequent and severe in more economically developed basins. Lack of hydro-meteorological data concerning flash floods in small basins often results in inappropriate spatial distribution of settlements, which are inundated during flood events. It should be noted that hydrological data are available for large monitored basins. Investigation of physiographical parameters of basins where flash flooding took place has revealed that basins which suffer from flash flooding are smaller than 40 km². Such basins are usually not monitored, which is reflected in the lack of the hydro-meteorological data. Even research program Small Basins managed by the Institute of Meteorology and Water Management, as well as data collected in experimental and research basins controlled by academic and research institutes have not resolved the problem of hydro-meteorological data shortage in small basins satisfactorily. Therefore, even though flash floods in small basins appear every year, they still remain one of the poorest recognized types of floods, specifically with regard to hydrological parameters. The goals of this study were: (1) to gather and analyse hydrological data of flash floods induced by short-duration convective rainstorms, (2) to create equation which allows to calculate the maximum peak flow in small basins affected by flash flooding.

Hydrological data cover parameters described in the literature as well as the data collected by the author after flood events. The maximum discharge was calculated by the use of the slope-area method. Flood wave velocity was computed using Manning's equation. In this manner sixty-eight cases of maximum discharge were collected. Then, the maximum specific discharge was computed. The analysis was performed in relation to the Upland, Foothills and the Beskids Region as well as to the basin's area. The scattered plots and line plots were created to determine the diversity of maximum peak flow and maximum specific discharge. On the basis of the collected data the coefficients of the formula created by the Italian hydrologist F. Pagliari (Dębski, 1969): $Q = a \cdot A / (b + A)$ where Q – discharge, A – basin's area, a , b – coefficients of the formula, were modified. In this manner, the formula was adapted for calculation of the maximum discharge in the basins smaller than 40 km².

The result has indicated that on average maximum peak flow amounted to $31 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, whereas maximum specific discharge reached $4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Standard deviation and coefficient of variability have indicated that hydrological parameters varied significantly. Maximum peak flow and maximum specific discharge between $12.2\text{--}68 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ and $2.1\text{--}8.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ were observed during fifty per cent of flood events. The ranges from 5 to $40 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ and from 0.8 to $5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ grouped the most of the cases. The highest values of the maximum peak flow: 260 , 244 and $192.1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ were recorded during flood in Czerwonka, Miechówka and Łopuszanka river basins. The highest values of the maximum specific discharge $37 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ were observed during flood in Sułoszowa village, which is the highest value recorded in Poland till now.

Taking into consideration the diversity of the hydrological parameters in the geographical regions it should be emphasized that maximum peak flow and maximum specific discharge reached the highest values in the upland basins. These basins had the specific discharge usually lower than $10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. However, in some basins this parameter exceeded $20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Basins located in the Beskids region (the Carpathian Mts.) were affected by maximum peak flow and maximum specific discharge lower than $90 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ and $11.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ respectively. However, specific discharge lower than $5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ occurred most frequently. Foothills basins had these parameters generally lower: $35 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ and $6.6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ respectively. These basins were similar in terms of specific discharge to basins located in the Beskids region.

Investigation of the hydrologic parameters in respect of the basin area has revealed that basins smaller than 10 km^2 were affected by floods during which the maximum flow discharge usually is lower than $20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. However, such basins may be affected by extraordinary flood with the maximum flow equal to $99 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. The maximum specific discharge is usually lower than $10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. However, this parameter may exceed the value $19 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$, reaching the highest value equal to $37 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ during the flood in Sułoszowa village.

The amount of the data collected is still insufficient to determine the diversity of hydrological parameters in basins larger than 10 km^2 properly. Therefore, the overall analysis was performed. The results have revealed that in the basins $10\text{--}20 \text{ km}^2$ and $20\text{--}30 \text{ km}^2$ maximum flow amounted to $13\text{--}192 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ and $43\text{--}260 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. This parameter varied from 85 to $244 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ in the basins larger than 30 km^2 . Basins from 10 to 20 km^2 had the maximum specific discharge usually lower than $10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. This value was exceeded only once (Łopuszanka, Piaski Szlacheckie – $16.7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$). The maximum specific discharge lower than $4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ is typical of the basins larger than 20 km^2 . This value was higher during Czerwonka ($11.8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$) and Miechówka ($7.17 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$) flood events.

Comparison between the value of the maximum peak flow observed after the flood events and those computed using equation no 2, 3 and 5 has indicated that this parameter is several times lower to the values that were observed during flood events in small basins in the world and Europe. Under Polish climate conditions the equation created by Pagliari formula with coefficients calculated by K. Dębski (1969) fairly characterize the highest maximum flow discharge which may occur in small basins. However, in the basins larger than 10 km^2 such high values occur very seldom. Therefore, the coefficient of Pagliari formula was modified. The equation has the value

$$Q_{\max} = \frac{143.6A}{2.83 + A}$$
 where Q_{\max} – maximum discharge, A – basin's area (km^2). The equation may be

used to calculate the maximum discharge in basins smaller than 40 km^2 .