

Instytut Geografii
Akademia Pedagogiczna im. Komisji Edukacji Narodowej, Kraków

Tomasz BRYNDAL

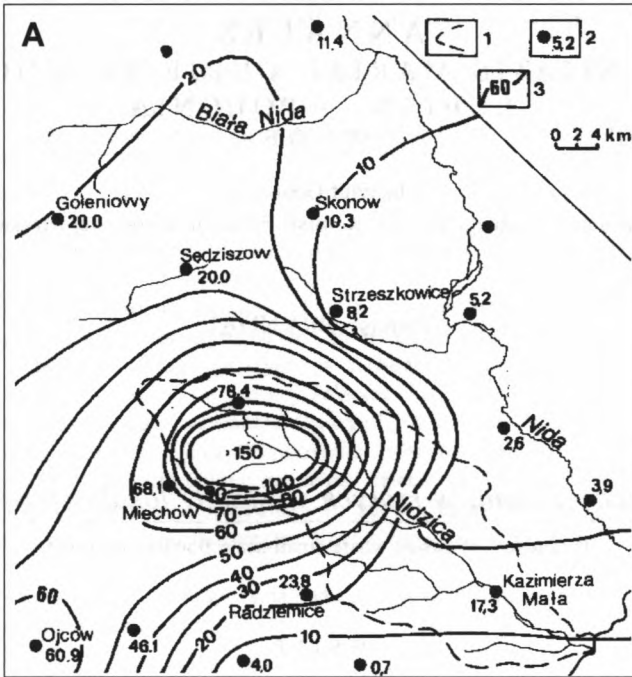
*Parametry zlewni, w których wystąpiły lokalne powodzie**

Parameters of basins where small-scale flooding occurred

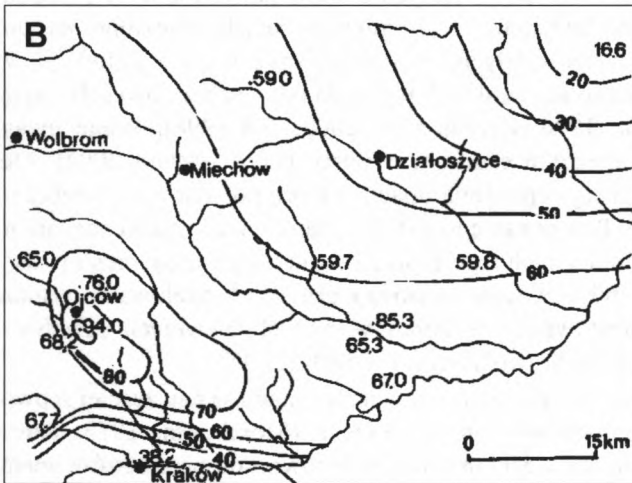
WSTĘP

Gwałtowne wezbrania małych cieków od dawna były przedmiotem różnego typu badań. W badaniach tych główny nacisk kładziono na poznanie zmian morfologicznych powstałych na stokach oraz w dnie doliny w wyniku wpływu powierzchniowego lub na skutek przejścia fali wezbraniowej (Beuselinck i in. 2000; Boardman i in. 1996; Cerdan i in. 2002; Gil 1998). Wiele uwagi poświęcono również gospodarczym skutkom wezbrań (m.in. Ziętara 2002). Meteorologiczne uwarunkowania występowania opadów, które powodowały wezbrania, były przedmiotem badań Parczewskiego (1960), natomiast syntetyczne opracowania parametrów hydrologicznych tego typu wezbrań znajdujemy między innymi w pracach Dębskiego (1969) i Ciepiałowskiego (1970). Modelowanie parametrów hydrologicznych gwałtownych wezbrań w małych zlewniach przedstawiono między innymi w pracy Dobrowolskiego i innych (2007).

Gwałtowne wezbrania w małych zlewniach są najczęściej spowodowane przez krótkotrwałe intensywne opady deszczu (Mogil i in. 1978; Parczewski 1960). Przebieg i rozmiary wezbrania zależą zarówno od parametrów opadu (czas, intensywność, suma), jak również cech zlewni. Opad, który powoduje wezbranie, ma charakter lokalny. Bardzo często nie jest on notowany na posterunkach opadowych lub pomierzone wartości są wielokrotnie niższe niż te, które wystąpiły w centrum ulewy (ryc. 1). Dlatego parametry opadu szacuje się, korzystając dodatkowo z danych radarowych i zdjęć satelitarnych (Cebulak, Niedźwiedz 1998). Pogląd



Źródło: Niedźwiedz (1998)



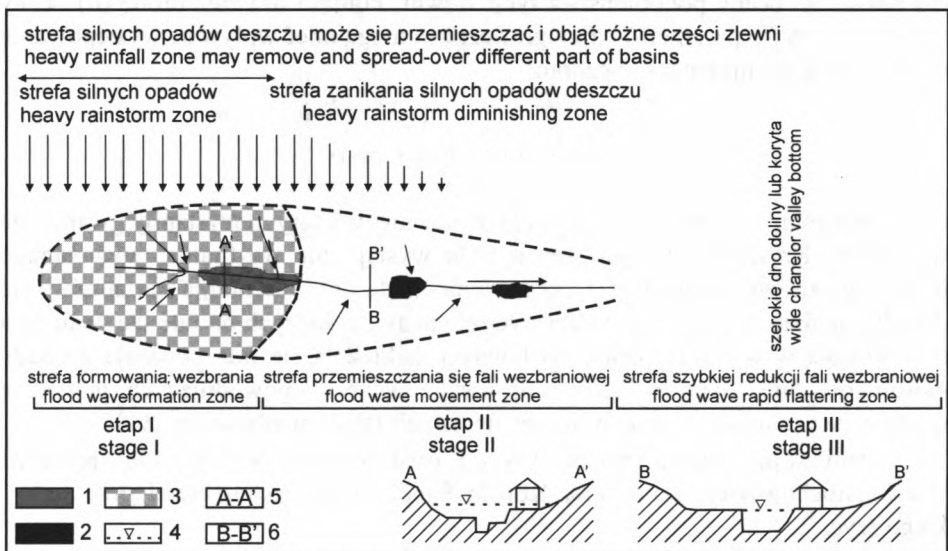
Źródło: Kondracki (1937)

Ryc. 1. Przestrzenne rozmieszczenie opadów dobowych, które spowodowały gwałtowne wezbrania małych cieków w okolicach Kaliny Wielkiej 15 września 1995 roku – A, oraz w okolicach Ojcowa 22 maja 1937 roku – B. 1 – granice zlewni, 2 – wartości opadów na posterunkach opadowych, 3 – izohiety

Spatial distribution of daily precipitation rainfall which caused flash flood in small basins near Kalina Wielka on the 15th September 1995 – A, and near Ojców on the 22nd May 1937– B. 1 – watershed, 2 – precipitation values at precipitation stations, 3 – isohyets

o wpływie zlewni na formowanie i przebieg wezbrania jest w literaturze powszechny (Brzeziński 1996; Dobija, Dynowska 1975; Gutry-Korycka 1993). Jednakże brakuje opracowania podejmującego problematykę związaną z parametrami zlewni, w których wystąpiły gwałtowne wezbrania, powodujące lokalne powodzie. W większości prac pojawia się krótka charakterystyka podstawowych cech zlewni jako tło prowadzonych rozważań – głównie geomorfologicznych. Słabe rozpoznanie cech zlewni, w których wystąpiły takie wezbrania, stanowiło impuls do podjęcia tej problematyki.

Gwałtowne wezbrania w małych zlewniach wywołane przez krótkotrwałe intensywne opady deszczu mają podobny przebieg (Bryndal i in. 2008). Fala wezbraniowa jest formowana w obszarze intensywnych opadów deszczu (ryc. 2, etap I). Spływająca po stoku woda zalewa całe dno doliny, a jeżeli jest ono zabudowane, to wezbranie ma charakter lokalnej powodzi. Uformowana fala wezbraniowa przemieszcza się, a jej wysokość ulega stopniowemu zmniejszaniu (ryc. 2, etap II). Może to być spowodowane ograniczonym zasięgiem opadu (Szczęsny, Bojarski, 2000) lub zwiększeniem retencji korytowej (Dobija, Dynowska 1975).



Ryc. 2. Model formowania gwałtownego wezbrania. 1 – część zlewni, w której nastąpiło przekroczenie przepływu pełnokorytowego; wezbranie powodowało lub mogło spowodować lokalną powódź (obszar badań), 2 – lokalne podtopienia, 3 – część zlewni, w której następowało formowanie wezbrania, 4 – maksymalny zasięg fali wezbraniowej, 5 – przekrój poprzeczny w części zlewni, w której nastąpiło przekroczenie przepływu pełnokorytowego i wystąpiła powódź, 6 – przekrój poprzeczny w części zlewni, w której nie nastąpiło przekroczenie przepływu pełnokorytowego

The pattern of flash flood formation. 1 – part of the basin where bank full capacity was exceeded and small-scale flooding occurred (study basins), 2 – local inundate areas, 3 – part of the basin where flood wave is formed, 4 – maximum level of flood wave, 5 – valley crosssection where small scale flooding occurred, 6 – valley crosssection where bank full capacity is not exceeded and small-scale flooding does not occur

W tej części zlewni przekroczenie przepływu pełnokorytowego występuje sporadycznie. Fala wezbraniowa może wpłynąć na szerokie dno doliny lub do koryta większej rzeki, gdzie „rozlewa się”, a jej wysokość ulega szybkiej redukcji (ryc. 2, etap III). Prowadzone obserwacje wskazują, że przekroczenie przepływu pełnokorytowego i zalanie całego dna doliny występuje tylko w pewnej części zlewni (ryc. 2). Bardzo często są to jej górne części. Z gospodarczego punktu widzenia, szczególnie cenne jest badanie tych zjawisk w odniesieniu do części zlewni, w której fala wezbraniowa była na tyle duża (min. 0,5 m), że spowodowała lub mogła spowodować (w przypadku zabudowy dna doliny) lokalną powódź. Ten fragment zlewni był przedmiotem dalszych badań.

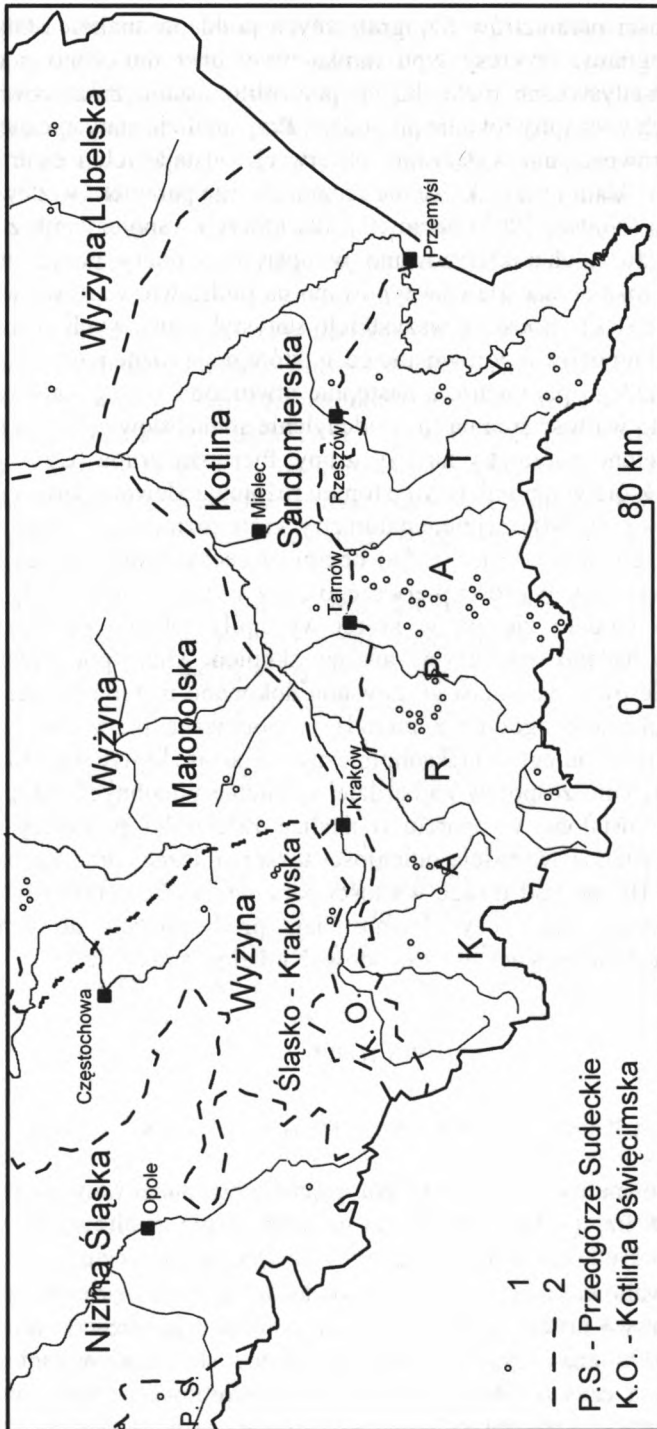
W niniejszym opracowaniu (1) podjęto próbę wytypowania parametrów fizjograficznych zlewni, które w znaczący sposób wpływają na formowanie gwałtownych wezbrań spowodowanych krótkotrwałymi opadami deszczu, (2) przeprowadzono charakterystykę zlewni, w której wystąpiły gwałtowne wezbrania, (3) przeprowadzono analizę zróżnicowania parametrów fizjograficznych zlewni, (4) opracowano model zlewni, w której występują gwałtowne wezbrania, oraz (5) dokonano oceny podobieństwa tych zlewni. Podjęto również próbę (6) oceny tego, czy wartości parametrów fizjograficznych mogą mieć wpływ na występowanie w zlewniach gwałtownych wezbrań.

MATERIAŁY I METODY

Badaniami objęto osiemdziesiąt trzy zlewnie, w których wystąpiły gwałtowne wezbrania. Kryterium doboru zlewni było wystąpienie wezbrania, wywołanego jednym gwałtownym opadem. Czas trwania opadu oraz wezbrania ograniczały się do kilku godzin. Starano się wykluczyć przypadki, w których na falę wezbraniową uformowaną w wyniku opadów rozlewnych nakładała się fala powstała z opadu nawalnego. Nie brano również pod uwagę wezbrań powodujących powódzie w zlewniach miejskich, tzw. powodzi miejskich (Dobrowolski i in. 2007).

Analizowane zlewnie pochodziły z Karpat, Wyżyny Małopolskiej, Krakowsko-Częstochowskiej i Lubelskiej, Kotliny Sandomierskiej oraz Przedgórze Sudeckiego (ryc. 2).

Na podstawie badań opisujących mechanizmy formowania odpływu podczas krótkotrwałych intensywnych opadów deszczu, podjęto próbę wytypowania tych parametrów zlewni, które w znaczący sposób wpływają na formowanie wezbrań. Ponadto, starano się dobrać parametry w taki sposób, aby charakteryzowały badany obiekt całościowo. Ostatecznie, do charakterystyki zlewni wybrano piętnaście parametrów fizjograficznych, które opisywały rozmiary, kształt, warunki hydrologiczne, użytkowanie oraz warunki geologiczno-glebowe zlewni (ryc. 4). Parametry obliczono, korzystając ze wzorów powszechnie stosowanych w hydrologii (Baścik 2003) i stosując odpowiednie materiały kartograficzne. Przy ich doborze postępowano zgodnie z istniejącymi w tym zakresie zaleceniami (Czarnecka 1987).



Ryc. 3. Przestrzenne rozmieszczenie badanych zlewni, 1 - zlewnia, 2 - granice regionów fizycznogeograficznych za Kondrackim (1998)
 Spatial distribution of investigated basins, 1 - basin, 2 - geographical regions boundaries after Kondracki (1998)

Obliczone wartości parametrów fizjograficznych poddano analizie statystycznej. Wykonano histogramy, wykresy typu ramka-wąsy oraz obliczono podstawowe charakterystyki statystyczne rozkładu, co pozwoliło ustalić zróżnicowanie cech zlewni, w których wystąpiły lokalne powodzie. Przy analizie statystycznej analizowano całą zbiorowość, nie wyłączając obserwacji odstających i ekstremalnych. Pozwoliło to na dokładniejsze określenie zróżnicowania parametrów zlewni. Zgodnie z zaleceniem (Nowak 2003) parametry, dla których współczynnik zmienności był wyższy od 50%, charakteryzowano w oparciu o miary pozycyjne. Cechy upodabniające i różnicujące zlewnie typowano na podstawie wartości współczynnika zmienności (C_v). Spośród wszystkich statystyk opisowych jest to miara bezwymiarowa, i umożliwia porównanie cech, które mają różne jednostki. Miarę tę obliczono dla każdego parametru, a następnie utworzono szereg statystyczny, dla którego obliczono wartość średnią (μ) i odchylenie standardowe (σ). Na podstawie tych miar podzielono parametry na trzy grupy. Pierwsza grupa ($C_v < \mu - 0,5\sigma$) obejmuje cechy, które w najmniejszym stopniu różnicują zlewnie. Druga grupa ($C_v > \mu + 0,5\sigma$ i $C_v < \mu - 0,5\sigma$) obejmuje parametry, które różnicują zlewnie w średnim stopniu. Trzecia grupa ($C_v > \mu + 0,5\sigma$) obejmuje cechy, które różnicują zlewnie w stopniu największym. Wartości pierwszego i czwartego kwantyla były podstawą do opracowania modelu zlewni, w której wystąpiły lokalne powodzie. Podobieństwo zlewni badano przy użyciu analizy skupień. Miarą podobieństwa była odległość euklidesowa, natomiast grupowania dokonano metodą Warda. Podziału dendrogramu dokonano zgodnie z metodą proponowaną przez Helliga (1968), obliczając z macierzy odległości taksonomicznych wartość krytyczną (W_k). Pozwala ona na wydzielenie zespołów najbardziej do siebie podobnych. Stopień podobieństwa zlewni ustalono w oparciu o analizę zależności pomiędzy wartością krytyczną, maksymalną wartością odległości taksonomicznej oraz liczbą wydzielonych skupień. Biorąc pod uwagę wartości parametrów fizjograficznych zlewni, podjęto próbę oceny tego, czy zlewnie mają predyspozycje do generowania gwałtownych wezbrań mogących spowodować lokalne powodzie.

WYNIKI

PARAMETRY ZLEWNI A FORMOWANIE GWAŁTOWNEGO WEZBRANIA

W oparciu o analizę literatury hydrologicznej przeanalizowano wpływ wybranych parametrów fizjograficznych zlewni na formowanie gwałtownego wezbrania spowodowanego krótkotrwałymi intensywnymi opadami deszczu.

Podczas gwałtownych ulew główną składową odpływu ze zlewni jest odpływ bezpośredni (Gutry-Korycka, Mikulski 1982). Główną jego część stanowi odpływ powierzchniowy. Można przyjąć, że elementy środowiska, które warunkują formowanie, rozmiary i czas trwania odpływu powierzchniowego, będą w znaczący sposób oddziaływać na parametry wezbrania, ponieważ wpływają na ilość wody,

która spływając po stoku, trafia do koryta. Przebieg i rozmiary wezbrania uzależnione są ponadto od cech morfologicznych zlewni. Wskazanie tych cech jest przedmiotem badań hydrologii dynamicznej (Gutry-Korycka 1993). Przy ich identyfikacji można zastosować różne podejścia. Pierwsze polega na uwzględnieniu cech, które mają fizyczny wpływ na możliwość transformacji opadu w odpływ (Brzeziński 1994; Soczyńska 1993). Drugie podejście polega na szukaniu zależności pomiędzy parametrami morfologicznymi i parametrami hydrogramu przy wykorzystaniu metod analizy statystycznej (Ciepielowski 1987; Dobija, Dynowska 1975; Ostrowski 1994). Trzecia metoda bazuje na wynikach badań podstawowych prowadzonych w małych zlewniach (Figuła 1966; Prochal, Niemiec 1986; Soja 1981). Istotne znaczenie mają badania zawężone do fragmentów zlewni. Wykazały one wpływ takich elementów stoku, jak naturalne rozcięcie erozyjne, droga polna itd., na formowanie wezbrania (Słupik 1981). W niniejszej pracy identyfikację tych cech, które znacząco wpływają na formowanie gwałtownego wezbrania, prowadzono na podstawie wyników badań eksperymentalnych nad formowaniem odpływu, prowadzonych w małych zlewniach eksperymentalnych lub na poletkach doświadczalnych.

Wpływ poszczególnych elementów środowiska na przebieg i rozmiary spływu bezpośredniego i śródpokrywowego w znacznej mierze wyjaśniły badania stacjonarne prowadzone w zlewni Bystrzanki i Homerki np. przez Gila (1986, 1999), Słupika (1972, 1973, 1981). Wyniki badań wskazują, że spływ powierzchniowy zależy od uziarnienia i struktury gleby, charakteru opadów, użytkowania ziemi, stanu gruntu i ekspozycji stoków (Słupik 1973). O przebiegu i rozmiarach spływu decydują warunki pogodowe i terenowe (Słupik 1973). Przy formowaniu gwałtownych wezbrań szczególnie istotne są przebieg i rozmiary spływu powierzchniowego spowodowanego krótkotrwałymi silnymi opadami deszczu. Podczas tego typu opadów głównym czynnikiem wpływającym na przebieg spływu powierzchniowego jest użytkowanie terenu. Największe zróżnicowanie spływu powierzchniowego występuje na użytkach rolnych (Gil 1999). Jest to spowodowane w dużej mierze różną gęstością szaty roślinnej (Słupik 1972, 1973). Badania Gila (1999) wskazują, że w czasie krótkotrwałych ulew o sumie 20–50 mm różnice spływu powierzchniowego na poszczególnych użytkach rolnych są największe. Duży spływ powierzchniowy notowany jest na poletkach o mało zwartej szacie roślinnej, takich jak uprawy ziemniaczane oraz buraczane. Na pozostałych użytkach gęsta roślinność przez swoją szorstkość i opór stawiany płynącej wodzie wpływa na późniejszą organizację spływu powierzchniowego i znacznie krótsze jego trwanie, co przy krótkotrwałych opadach burzowych ma istotne znaczenie dla wielkości spływu wody (Gil 1999; Słupik 1981). Wpływ roślinności na rozmiary spływu maleje przy wzroście sumy opadu i czasu jego trwania (Gil 1999). W miarę wzrostu sumy opadu różnice w wielkości spływu na poszczególnych użytkach maleją (Gil 1999). Podczas opadów ulewnych rzędu 50–100 mm (czyli takich, które najczęściej powodują gwałtowne wezbrania), po przekroczeniu pojemności wodnej gleby spływ

powierzchniowy na wszystkich użytkach rolnych ma podobne rozmiary, stanowiąc 60–70% opadu, a sposób użytkowania ziemi zaznacza się w natężeniu spływu powierzchniowego, który zależy od gęstości roślinności (Gil 1999).

Formowanie spływu powierzchniowego zależy również od składu mechanicznego gleby oraz jej wilgotności. Podczas krótkotrwałych intensywnych opadów deszczu wpływ wilgotności gleby warunkuje typ formowania spływu powierzchniowego. Jeżeli silny opad wystąpi w warunkach wysokiej wilgotności gleby, to powoduje on formowanie nasyconego spływu powierzchniowego (Etzenberg i in. 1997). Jeżeli gleba nie jest w pełni nasycona wodą, wówczas dochodzi do wytworzenia nienasyconego spływu powierzchniowego. Skład mechaniczny gleby wpływa między innymi na przepuszczalność gleby. Gleby, w których składzie mechanicznym dominują części ziemiste (zwłaszcza frakcje pylasta i ilasta), są mniej przepuszczalne i mają predyspozycje do formowania spływu powierzchniowego. Badania wskazują, że podczas krótkotrwałych intensywnych opadów deszczu w glebach o składzie mechanicznym gliny (nawet tej ze znaczną ilością frakcji kamienistych i żwirowych) zwykle nie notuje się spływu śródglebowego lub jego wielkość jest niewielka (Gil 1999). Woda opadowa gromadzi się głównie w warstwie ornej gleby (Słupik 1973). Na przykład, podczas ulewy o sumie 40 mm wzrost wilgotności w glebie był ograniczony do poziomu ok. 25 cm (Słupik 1981). W przypadku opadu o sumie 100 mm notowano spływ śródglebowy, który na głębokości 1 m stanowił tylko 6% sumy opadu. Można przypuszczać, że w terenach pokrytych przez less lub utwory lessopodobne jest porównywalnie. Właściwości geotechniczne tych skał powodują stosunkowo szybko ograniczenie przepuszczalności na skutek zwilżenia. Powodem jest zawartość minerałów ilastych (Maruszczak 2000; Römkens i in. 1995) oraz rozpad agregatów wodonieodpornych (Dwucet 1999; Römkens i in. 1995). W przypadku gleb o uziarnieniu kamienistym lub żwirowym formowanie spływu powierzchniowego jest utrudnione. Jednakże duża zawartość części szkieletowych gleby powoduje, że woda opadowa może łatwo infiltrować w głąb, a spływ odbywa się w strefie gruzowej, z równie dużą prędkością jak na powierzchni.

W hydrologii powszechne jest stwierdzenie, że las może wpłynąć redukująco na wezbranie poprzez swoje zdolności retencyjne (Bielecki 1975; Osuch 1997) oraz zmniejszenie spływu powierzchniowego (Lambor 1954). Parczewski (1960), zestawia poglądy dotyczące wpływu lasu (lesistość, skład gatunkowy) na możliwość wystąpienia nagłego wezbrania. Autor podkreśla, że wpływ ten maleje w miarę zwiększania się natężenia opadu. Badania Figuły (1966) wskazują, iż w miarę powiększania opadu dobowego wpływ zalesienia stopniowo zmniejsza się i zanika przy opadach o wysokości 100 mm. Badania Osucha (1997) pokazują, że możliwości retencyjne lasu, przejawiające się w możliwości retencji wody przez rośliny (intercepcji), są niezbyt duże. Maksymalna zdolność retencyjna dla drzewostanu w pięćdziesięcioletnim lesie z przewagą świerka wyniosła 4,25 mm, a w drzewostanie pięćdziesięcioletniego lasu grabowego 2,19 mm. Niewiele więcej wody

niż w warstwie drzew może zostać zatrzymanej w warstwach niższych lasu. Badania prowadzone na Politechnice Krakowskiej (Homa, Osuch 1994) wykazały, że zdolności retencyjne ściółki są kilkakrotnie wyższe niż lasu, w którym się ona tworzy. Należy jednak podkreślić, że pomimo dużej zdolności retencyyjnej proces magazynowania wody przez ściółkę jest długi i rozłożony nierównomiernie w czasie. Badania laboratoryjne wskazują, iż przy ciągłym zraszaniu wodą o natężeniu $0,15 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ po pierwszej godzinie możliwości retencyjne ściółki są wykorzystane w połowie. Pozostała część zdolności retencyjnych jest uzupełniana powoli, w czasie do 3–4 dni. Zdaniem Osucha (1997) większe możliwości retencyjne należy przypisać retencji gruntowej, czyli zdolności zatrzymania wilgoci w glebie. Autor podaje, że maksymalna retencja wody w glebach Karpat fliszowych wynosi 20–25 mm. Przyrównanie zdolności retencyjnych lasu do sumy opadu, który może spowodować gwałtowne wezbranie (często nawet 100 mm), nie pozwala w nim upatrywać sporych możliwości redukcji wezbrania. Zdaniem Osucha (1997) las nawet po wykorzystaniu możliwości retencyjnych wywiera wpływ na przebieg wezbrania. Przejawia się on przede wszystkim w tym, że w lesie w dominuje spływ podpowierzchniowy, który jest wolniejszy od spływu powierzchniowego. Pogląd ten należy zestawić z wynikami badań prowadzonych w Karpatach Wschodnich, na które powołuje się Soja (1981). Potwierdzają one, że intensywne opady nie spowodują spływu powierzchniowego, jednakże przepływ w strefie gruzowej może zachodzić z taką samą szybkością jak na powierzchni. Zestawione wyniki badań wskazują, iż podczas krótkotrwałych silnych opadów lasy pełnią rolę regulacyjną, jednakże nawet wysoka lesistość zlewni nie jest elementem, który może zapobiec wystąpieniu gwałtownego wezbrania. Obszary zabudowane (powierzchnie dachów, utwardzone powierzchnie w gospodarstwach) są elementami, na których niemal natychmiast dochodzi do transformacji opadu w opad efektywny. Ponadto, znacząco przyspieszają spływ wody. Do powierzchni zajętej przez tego typu tereny należy dodać powierzchnię, którą zajmują drogi. Z badań Soi (2002) wynika, że ich powierzchnia stanowi ok. 1,5% obszaru zlewni. Spływ z tego typu obszarów najszybciej znajduje odzwierciedlenie we wzroście stanu wody w korycie (Słupik 1973, 1981). Układ pól oraz związana z nim sieć i układ bruzd ornych są elementami, które przyspieszają spływ wody ze stoku do dna doliny (Ludwig i in. 1995; Takken i in. 2001), co znajduje odzwierciedlenie w kulminacjach (Słupik 1973). Jak dowodzą badania Słupika (1976), w zlewni Bystrzanki gęstość bruzd powstałych corocznie w wyniku zabiegów agrotechnicznych może osiągnąć wartość $350 \text{ m} \cdot \text{ha}^{-1}$ pola ornego, co w przeliczeniu na 1 km^2 daje wartość ok. 35 km. Należy przypuszczać, iż w pozostałych obszarach jest podobnie. W przypadku bruzd równoległych do spadku woda spływa nimi miąższą warstwą, a co za tym idzie z większą prędkością (Słupik 1972). Orka poprzeczna do spadku zmniejsza rozmiary spływu powierzchniowego (Słupik 1973), jednak powoduje niebezpieczeństwo upłynnienia gleby (Słupik 1972; Figuła 1960; Gerlach 1976). Czynnikiem, który istotnie przyspiesza spływ wody, jest sieć drogowa. Figuła (1955), podaje, że

na stoku o spadku 15–37° prędkość wody spływającej na darni wyniosła 8–9 cm·s⁻¹, na roli 13 cm·s⁻¹, natomiast na drodze polnej przekroczyła 1 cm·s⁻¹. Na duże znaczenie dróg w krążeniu wody zwracali uwagę w swoich pracach Słupik (1976, 1981), Froehlich i Słupik (1986) oraz Soja (2002). Obserwacje terenowe dowodzą, że nawet niewielki opad deszczu powoduje powstanie lokalnego spływu na drogach, czego przyczyną jest utrudniona infiltracja (Froehlich, Słupik 1986). Drogi, bez względu na stopień utwardzenia powierzchni i charakter ich użytkowania, mają zawsze wyższe współczynniki odpływu niż pozostałe formy użytkowania (Soja 2002). Dla dróg utwardzonych (beton, asfalt) szacowany współczynnik odpływu wynosi ok. 0,95, a dla dróg o nawierzchni nieutwardzonej mieści się on w przedziale 0,75–0,9 (Radwan-Dębski 1995). Na przebieg i rozmiary wezbrania w dużym stopniu wpływają drogi polne. Według Słupika (1981) wyróżniają się one w dostawie wody ze stoku do koryta potoku. Badania prowadzone w zlewni Homerki (Słupik 1981) wskazują, że szybki wzrost stanu wody w korycie ciekłu jest spowodowany w głównej mierze dopływem wody z terenów o małej przepuszczalności, między innymi z dróg. Podczas wezbrania 18 sierpnia 1969 roku drogi miały decydujące znaczenie w kształtowaniu przepływów Homerki. Dostarczały one ze stoku doświadczalnego do koryta 60% wody, a maksymalne wartości spływu jednostkowego na drogach były znacznie wyższe niż w korycie (Froehlich, Słupik 1986). Podobną zależność obserwowano w zlewni Bystrzanki (Słupik 1973; Gil 1998). Z cech morfologicznych zlewni, które wpływają na formowanie wezbrania należy również zwrócić uwagę na nachylenie zlewni oraz spadek dna dolin. W spływie powierzchniowym nachylenie wpływa przede wszystkim na jego prędkość (Słupik 1981), co znajduje odzwierciedlenie w szybkości dostawy wody ze stoku do dna dolin bocznych oraz dna doliny głównej. Spadek dna doliny ma wpływ na prędkość przemieszczania się fali wezbraniowej. Rozmiary i przebieg wezbrania zależą również od gęstości i układu sieci dolin. Gęsta i bardziej rozbudowana sieć dolin przyspiesza dostawę wody ze stoku do dna doliny głównej oddziałując na rozmiary wezbrania. Z cech morfologicznych zlewni należy zwrócić również uwagę na jej kształt. Wezbrania w zlewniach wydłużonych charakteryzują się dłuższym czasem koncentracji oraz mniejszym przepływem w porównaniu ze zlewniami o kształcie zbliżonym do koła (Dobija, Dynowska 1975).

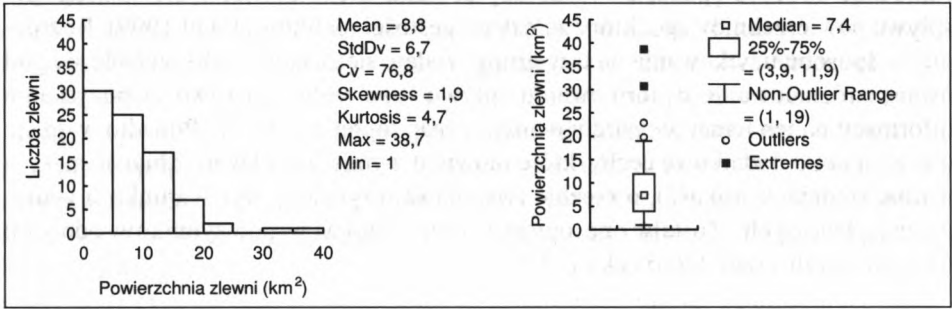
Pośród wszystkich parametrów, na podstawie których może być opisana zlewnia i które w zasadniczy sposób wpływają na formowanie wezbrania, zaliczono: powierzchnię zlewni, kształt, nachylenie zlewni, nachylenie dna doliny głównej, gęstość i układ sieci dolin, strukturę użytkowania, gęstość dróg. Wpływ struktury użytkowania na formowanie spływu spowodowanego opadem nawałnym został zredukowany do trzech wydzielen: obszarów o zwartej zabudowie, lasów i użytków rolnych. Użytki rolne grupują zarówno grunty orne, jak również użytki zielone. Podstawą do połączenia użytków rolnych w jedną całość są badania, które wskazują, że w przypadku opadów nawałnych o sumie przekraczającej 50–100 mm spływ powierzchniowy na wszystkich użytkach rolnych ma podobne rozmiary,

stanowiąc 60–70% opadu, a sposób użytkowania ziemi zaznacza się w natężeniu spływu powierzchniowego, który zależy od gęstości roślinności (Gil 1999). Rozróżnienie sposobu użytkowania na trzy grupy wydaje się zasadne, jeśli weźmie się pod uwagę zróżnicowanie w formowaniu spływu oraz realne możliwości pozyskania informacji na ich temat w oparciu o analizę map topograficznych. Ponadto w opisie uwzględniono dodatkowe cechy, które mówią o wymiarach zlewni (długość maksymalna, średnia szerokość), o rzeźbie (wysokość względna) oraz warunkach geologiczno-glebowych. Zostały one opisane przy pomocy współczynników odpływu opracowanych przez Czarnecką (1976).

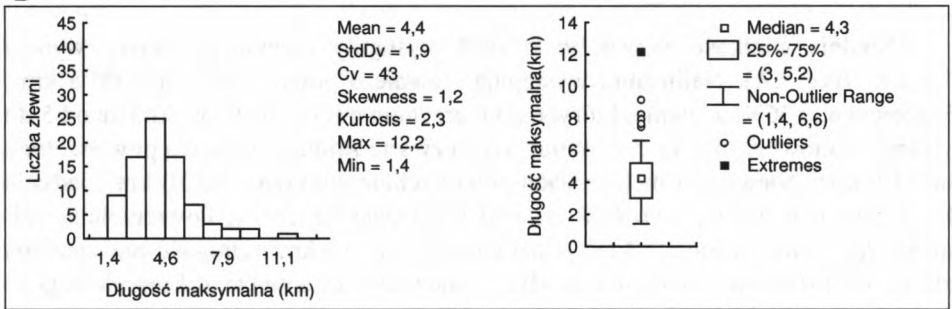
CHARAKTERYSTYKA ZLEWNI

Średnia wielkość zlewni, w których wystąpiły lokalne powodzie, wynosi $7,4 \text{ km}^2$ (ryc. 4A). Najliczniej występują zlewnie o powierzchni od 1 do 5 km^2 . Stanowią one 36%. Zlewnie, których powierzchnia mieści się w przedziale od 5 do 10 km^2 , stanowią kilka procent mniej. Trzy czwarte zajmuje mniejszą powierzchnię od $11,9 \text{ km}^2$. Niewiele z nich posiada powierzchnię większą – od 20 km^2 . Jedyne kilka z nich wyraźnie wyróżnia się pod względem tej cechy. Powierzchnia najmniejszej zlewni wynosi 1 km^2 , a największej ok. 39 km^2 . Długość maksymalna zlewni wynosi średnio $4,4 \text{ km}$ (ryc. 4B). Najliczniej występują te, w których długość maksymalna znajduje się w przedziale $3,6\text{--}4,6 \text{ km}$. Długość trzech czwartych zlewni jest mniejsza niż $5,2 \text{ km}$. Zaledwie kilka zlewni ma długość powyżej 6 km . Maksymalna długość zlewni nieznacznie przekracza 12 km . Średnia szerokość zlewni wynosi przeciętnie $1,8 \text{ km}$ (ryc. 4C). Najliczniej występują te, w których średnia szerokość waha się od $1,0$ do $1,5 \text{ km}$. Trzy czwarte badanych zlewni ma średnią szerokość poniżej $2,3 \text{ km}$. Dwie są zdecydowanie szersze od pozostałych. Wskaźnik kolistości wskazuje, że zlewnie charakteryzują się lekko wydłużonym kształtem (ryc. 4D). Średnia wartość wskaźnika wynosi $0,7$. Najwięcej jest zlewni, w których wskaźnik kolistości wynosi od $0,7$ do $0,8$. Tylko kilka charakteryzuje się znacznie wydłużonym kształtem. Przeciętna wartość średniego nachylenia zlewni wynosi $7,35^\circ$ (ryc. 4E). Najwięcej jest zlewni, w których nachylenie mieści się w przedziale od $7\text{--}8,5^\circ$. Połowa zlewni charakteryzuje się średnim nachyleniem w przedziale od 6° do 9° . Kilka charakteryzuje się bardzo dużym nachyleniem (pow. 12°), jednakże występują również takie, w których średnie nachylenie wynosi mniej niż 3° . Średnia wartość wysokości względnej wynosi $232,8 \text{ m}$ (ryc. 4F). Połowa zlewni charakteryzuje się wysokością względną w przedziale od 125 do 313 m . Najwięcej jest takich, w których parametr ten wynosi od 141 to 197 m . W kilku zlewniach różnica wysokości względnej przekracza 493 m . Średni spadek doliny głównej wynosi przeciętnie $19,2\text{‰}$ (ryc. 4G). Najliczniej występują zlewnie, w których parametr ten mieści się w przedziale od 10 do 20‰ . W jednej czwartej zlewni nachylenie doliny głównej przekracza 36‰ , a w siedmiu z nich wartość ta jest wyższa od 60‰ . Średnia gęstość sieci dolinnej wynosi $3,5 \text{ km}\cdot\text{km}^{-2}$ (ryc. 4H).

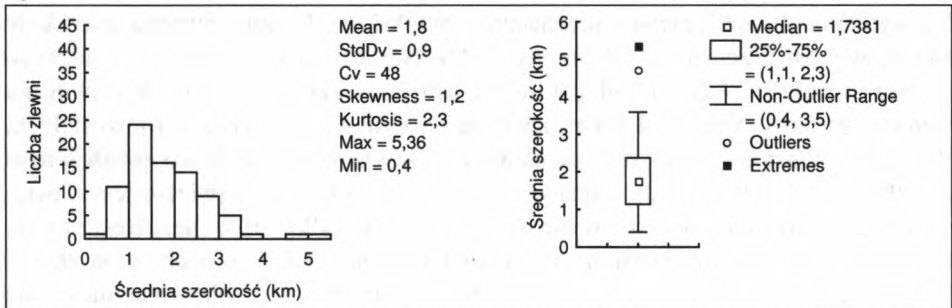
A



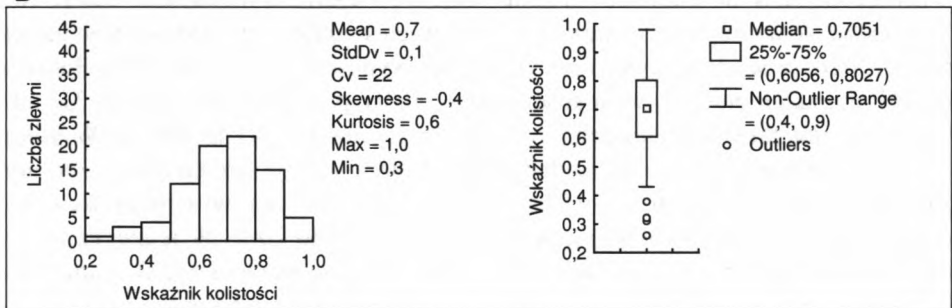
B



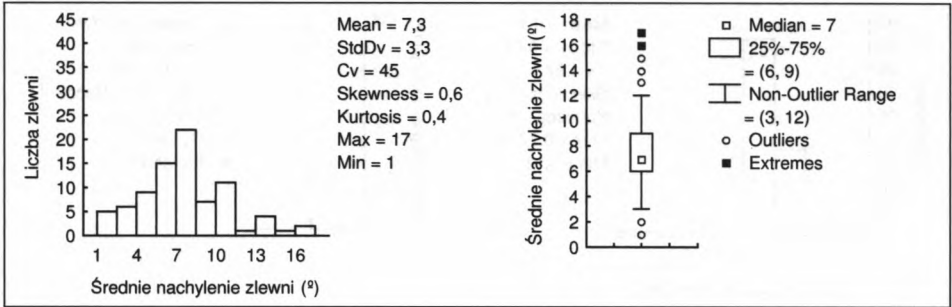
C



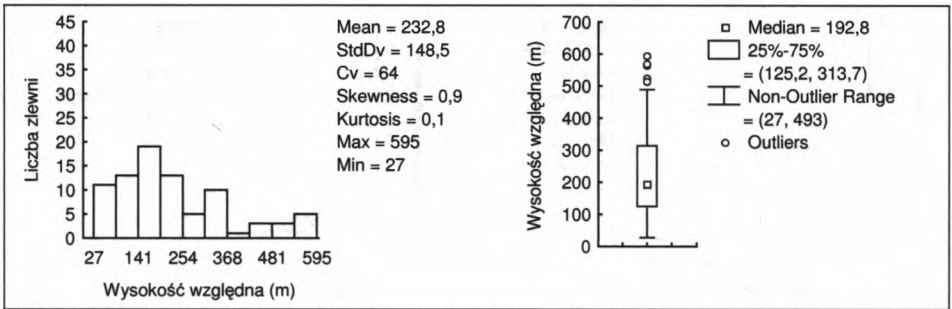
D



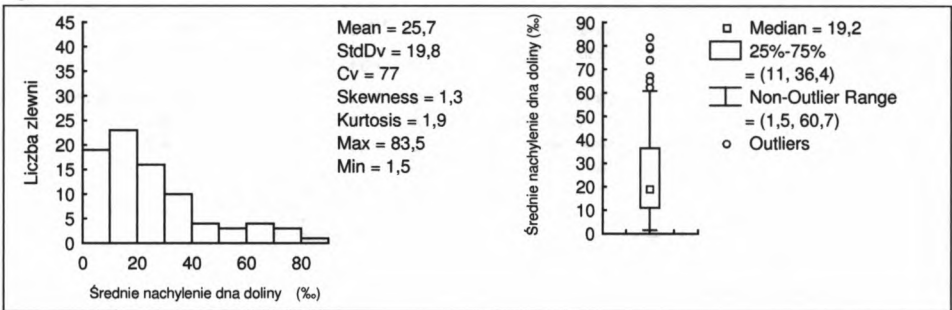
E



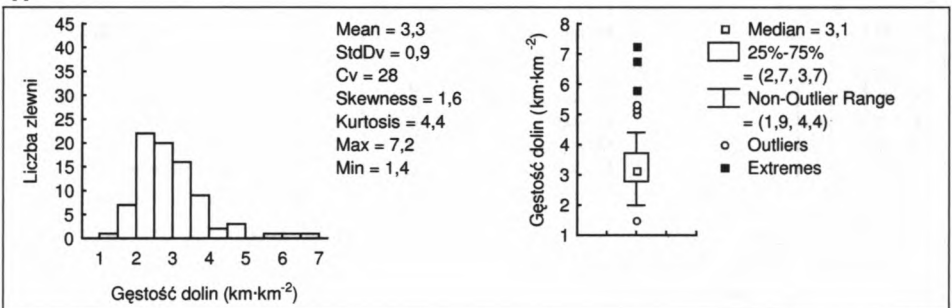
F



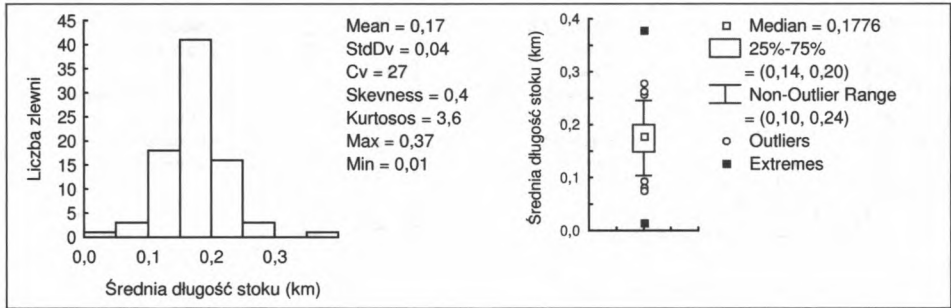
G



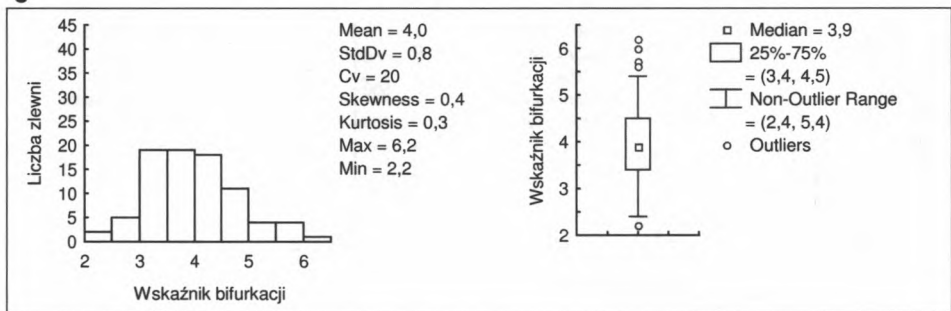
H



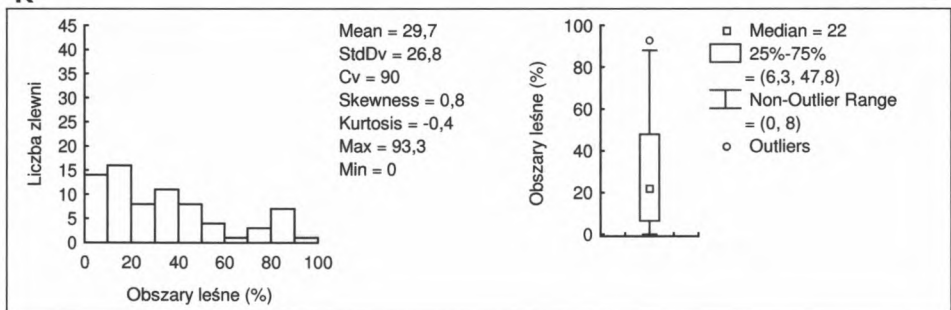
I



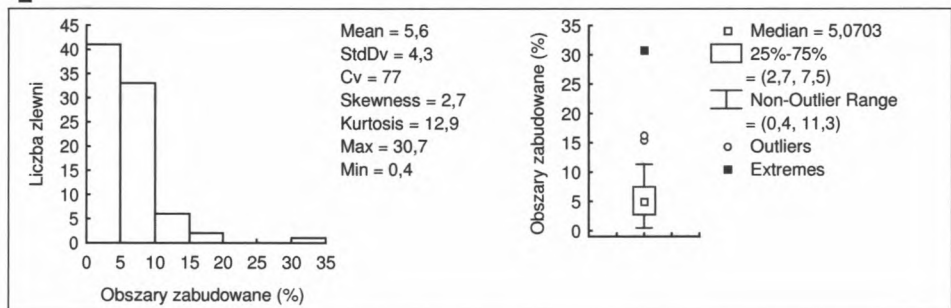
J



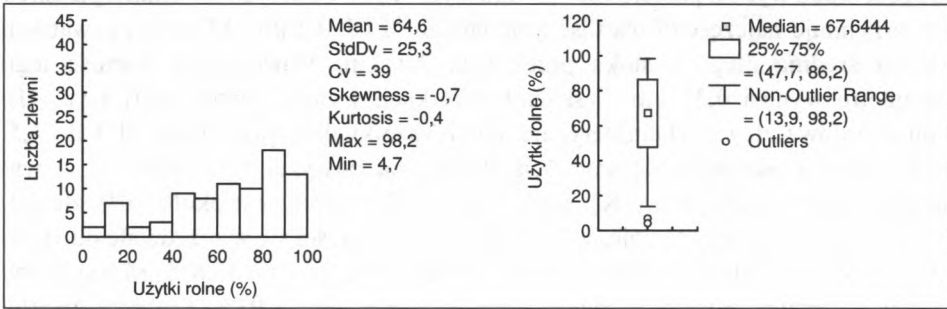
K



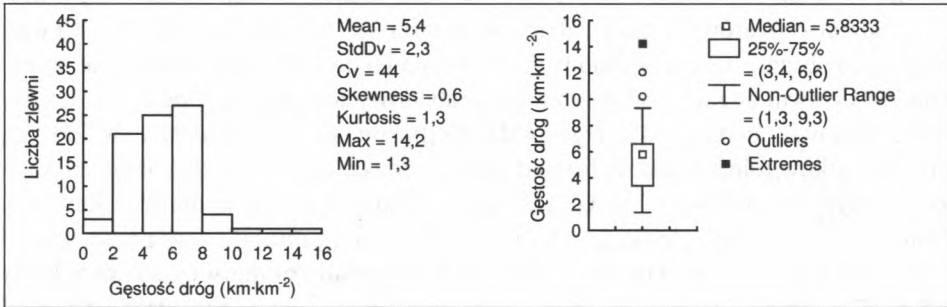
L



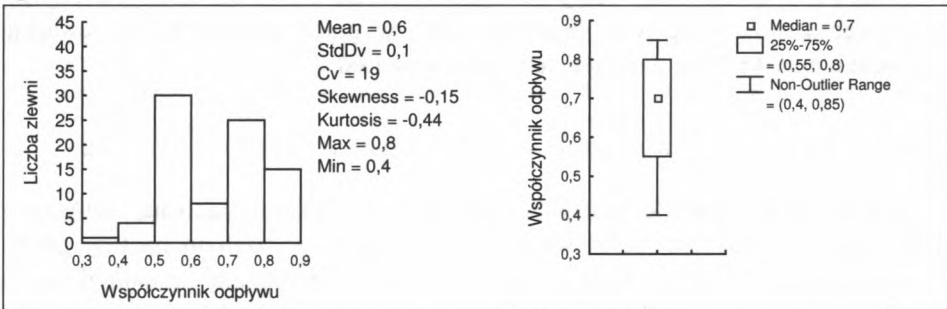
M



N



O



Ryc. 4. Zróżnicowanie parametrów fizjograficznych zlewni, w których wystąpiły lokalne powodzie. Mean – średnia, StdDv – odchylenie standardowe, Cv – wskaźnik zmienności, Skewness – skośność, Kurtosis – kurtoza, Max – wartość maksymalna, Min – wartość minimalna, Median – mediana, Non-Outlier Range – zakres obserwacji nieodstających od rozkładu, Outliers – obserwacje odstające, Extremes – obserwacje ekstremalne

Diversity of physiographic parameters of basins where small-scale flooding has occurred. StdDv – standard deviation, Cv – coefficient of variability, Max – maximum value, Min – minimum value

Półowa zlewni charakteryzuje się gęstością w przedziale od 2,78 do 3,73 km·km⁻². Najwięcej jest zlewni, w których parametr ten wynosi 2–2,5 km·km⁻². Tylko jedna czwarta zlewni posiada gęstość sieci dolinnej poniżej 2,78 km·km⁻². Kilka z nich charakteryzuje się bardzo wysoką gęstością dolin (maksimum 7,2 km·km⁻²). Średnia

długość stoku wynosi przeciętnie 0,17 km (ryc. 4I). W badanych zlewniach parametr ten przyjmuje najczęściej wartość z przedziału 0,15–0,2 km. W trzech czwartych zlewni średnia długość stoku przekracza 0,2 km. Maksymalna wartość tego parametru wynosi 0,37 km. Wskaźnik bifurkacji wynosi średnio 4,01 (ryc. 4J). Ponad połowa zlewni charakteryzuje się wskaźnikiem w przedziale od 3 do 4,5. Kilka zlewni odznacza się wartością wskaźnika powyżej 5,5. Lesistość zlewni wynosi średnio 22% (ryc. 4K). Całkowicie wylesionych jest około 10% zlewni. Najliczniej występują zlewnie, w których lesistość mieści się w przedziale od 10 do 20%. Tylko w jednej czwartej z nich lesistość przekracza 47,8%. Maksymalny udział obszarów leśnych w zlewni wyniósł nieco ponad 93%. Obszary zwartej zabudowy stanowią średnio 5,07% (ryc. 4L). Najliczniej występują zlewnie, w których udział obszarów zwartej zabudowy mieści się w przedziale 0–5%. Zlewni, w których obszary zwartej zabudowy stanowią od 5 do 10%, jest nieznacznie mniej. Dla 75% zlewni udział obszarów zwartej zabudowy jest mniejszy od 7,5%. Użytki rolne stanowią średnio 64% (ryc. 4M). Najliczniejsze są przedziały, w których udział użytków rolnych jest wyższy od 80%. W trzech czwartych zlewni udział użytków rolnych przewyższa 47%. Gęstość sieci drogowej wynosi średnio 5,4 km·km⁻². Najliczniej występują zlewnie, w których gęstość dróg mieści się w przedziale od 6 do 8 km·km⁻². W połowie zlewni wartość tego parametru mieści się w przedziale od 3,22 do 6,71 km·km⁻². Kilka zlewni ma bardzo gęstą sieć dróg (powyżej 9 km·km⁻²). Współczynnik odpływu wynosi średnio 0,6. Najwięcej jest zlewni, w których współczynnik odpływu mieści się w granicach 0,5–0,6. Przeważają jednak takie, w których parametr ten jest wyższy od 0,7.

PARAMETRY UPODABIAJĄCE I RÓŻNICUJĄCE ZLEWNIE

W oparciu o wartość wskaźnika zmienności (V_x) wskazano na cechy upodabniające oraz różnicujące zlewnie (tab. 1). Cechy podzielono na trzy grupy. W pierwszej ($V_x < 31\%$) znajdują się cechy, które odznaczają się najmniejszym stopniem zróżnicowania. Określono je mianem cech podobnych. Są nimi: cechy odzwierciedlające warunki geologiczno-glebowe, kształt zlewni, cechy hydrologiczne, takie jak: gęstość i układ dolin, średnia długość stoku. W drugiej grupie ($37 < V_x < 67\%$) znajdują się cechy, które określono mianem średnio podobnych. Znalazły się w niej następujące cechy: udział użytków rolnych, cechy liniowe zlewni, takie jak: długość maksymalna i średnia szerokość, gęstość sieci drogowej oraz średnie nachylenie zlewni. W trzeciej grupie ($V_x > 61\%$) znajdują się cechy, które najbardziej różnicują zlewnie. Określono ich mianem cech mało podobnych. Są to właściwości odzwierciedlające powierzchnię zlewni, wysokość względną, średnie nachylenie doliny, udział obszarów zwartej zabudowy i udział lasów.

Zlewnie, w których wystąpiły lokalne powodzie, podobne są pod względem kształtu, gęstości i układu dolin oraz pod względem współczynnika odpływu.

Tab. 1. Podział cech pod względem ich właściwości różnicujących
 Classification of features considering their diversified properties

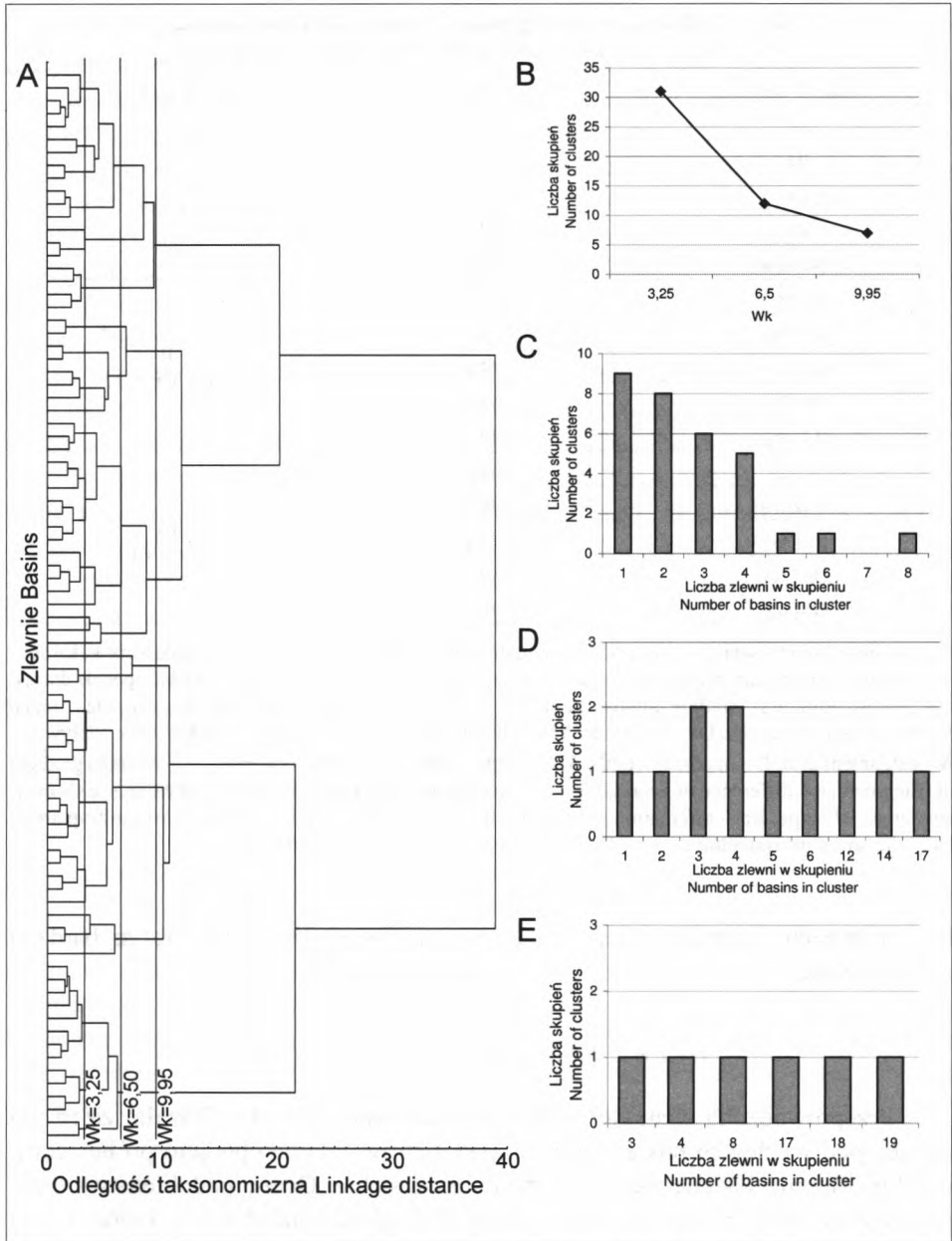
Nazwa cechy	Vx	Klasa
φ	19,5	I $V_x < 37$
Rb	20,5	
Ck	22	
Ls	27,9	
D [km/km ²]	28,6	
Or [%]	39,3	II $61 < V_x < 37$
L [km]	43	
Dr [km/km ²]	44,6	
Ψ [°]	45,7	
B [km]	48,4	
h [m]	64,4	III $V_x > 61$
A [km ²]	76,8	
Ir ₁ [‰]	77,1	
Oz [%]	89,5	
OI [%]	90,1	

A – powierzchnia zlewni, L – długość maksymalna, B – średnia szerokość, Ck – wskaźnik kolistości, Ψ – średnie nachylenie zlewni, h – różnica wysokości bezwzględnych, Ir₁ – średni spadek doliny, D – gęstość dolin, Ls – średnia długość stoku, Rb – wskaźnik bifurkacji, OI – udział lasów, Oz – udział obszarów zabudowanych, Or – udział użytków rolnych, Dr – gęstość dróg, φ – współczynnik odpływu
 A – catchment area, L – maximal length, B – average width, Ck – circularity index, Ψ – average gradient of catchment, h – difference of height, Ir₁ – average gradient of valley, D – density of valleys, Ls – average length of slope, Rb – bifurcation index, OI – the share of forests, Oz – the share of built-up areas, Or – the share of agriculture lands, Dr – road density, φ – runoff coefficient

Pozostałe cechy (użytkowanie, gęstość dróg, rozmiarów i nachylenie) są bardziej zróżnicowane.

OCENA PODOBIENSTWA ZLEWNI

Przeprowadzona charakterystyka zróżnicowania zlewni wykazała, że różnią się one pod względem poszczególnych parametrów. Dlatego podjęto próbę oceny, w jakim stopniu badane zlewnie różnią się od siebie. Ocena podobieństwa przeprowadzono przy użyciu analizy skupień. Odległość Euklidesowa, która została użyta jako miara podobieństwa, nie pozwala na bezwzględną ocenę podobieństwa zlewni, ponieważ przyjmuje wartości od 0 do +?. Jednakże stopień podobieństwa można ustalić, porównując wartość odległości, na której doszło do utworzenia określonego skupienia do maksymalnej wartości odległości taksonomicznej, która występuje w macierzy. W wyniku grupowania zlewni powstał dendrogram (ryc. 5A). Analizując proces grupowania zlewni, można zauważyć, że następuje ono



Ryc. 5. Dendrogram prezentujący zróżnicowanie badanych zlewni – A, redukcja skupień przy zwiększaniu odległości krytycznej (Wk) – B, liczba skupień i ich liczebność przy podziale dendrogramu na poziomie wartości krytycznej 3,25 – C, 6,5 – D, 9,95 – E

Hierarchical tree presenting diversity of investigated basins – A, reduction of clusters as a result of critical value (Wk) increasing – B, number of clusters and their numerical strength on the level 3.25 – C, 6.5 – D, 9.95 – E

na niskiej wartości odległości taksonomicznej. Podział dendrogramu przy użyciu wartości krytycznej równej 3,25 wydzielił 31 skupień (ryc. 5B). Około 10% zlewni zostało wydzielonych jako skupienia jednoelementowe (ryc. 5C). Jest to spowodowane występowaniem zlewni, które pod względem pewnych parametrów wyraźnie wyróżniały się od pozostałych (obserwacje odstające i ekstremalne na wykresach typu ramka-wąsy). Dominują skupienia cztero- lub mniej elementowe, które grupują 77% zlewni. Niewiele jest skupień wieloelementowych. Wartość krytyczna 3,25, która dzieli dendrogram na zespoły najbardziej homogeniczne, stanowi zaledwie 9% maksymalnej wartości odległości taksonomicznej. Jeżeli wartość krytyczna ulegnie podwojeniu, to liczba skupień gwałtownie maleje z 31 do 12 – to jest o 60% (ryc. 5B). Równocześnie szybko maleje liczba skupień o małej liczebności (ryc. 5D). Skupienia cztero- i mniej elementowe stanowią już tylko 28%. Warto zaznaczyć, że podwójna wartość krytyczna stanowi zaledwie 18% maksymalnej wartości odległości taksonomicznej. Jeżeli przy podziale dendrogramu zastosujemy potrójną wartość krytyczną, wówczas liczba skupień maleje z 31 do 7, czyli o 78% (ryc. 5B). Skupienia cztero- i mniej elementowe, które dominowały w podziale dendrogramu przy wartości krytycznej 3,25, grupują już tylko 8% zlewni a dominują skupienia wieloelementowe (ryc. 5E). Należy podkreślić, że potrójna wartość krytyczna stanowi tylko 27% maksymalnej odległości taksonomicznej.

Grupowanie zlewni na niskiej odległości taksonomicznej, niska wartość krytyczna oraz szybka redukcja wydzielonych skupień przy zwiększaniu odległości krytycznej wskazuje na to, że zlewnie, w których wystąpiły gwałtowne wezbrania powodujące lokalne powodzie, są do siebie podobne, mimo iż pochodzą z różnych regionów fizycznogeograficznych, tj. wyżyny, pogórza, kotliny, gór średnich.

MODEL ZLEWNI, W KTÓRYCH NAJCZĘŚCIEJ WYSTĄPIŁY GWAŁTOWNE WEZBRANIA

Przy opracowaniu modelu zlewni, w których wystąpiły gwałtowne wezbrania, wzięto pod uwagę wartości pierwszego i trzeciego kwartyla. Zlewnia modelowa ma powierzchnię od ok. 4 do 12 km². Długość maksymalna mieści się w zakresie od 3 do 5,2 km, a średnia szerokość wynosi od 1,1 do 2,3 km. Wskaźnik kolistości mieści się w przedziale 0,6–0,8. Średnie nachylenie zlewni wynosi od 6–9°, a wysokość względna od 125 do 313 m. Średni spadek dna doliny mieści się w granicach od 11 do 36%, gęstość sieci dolinnej wynosi od 2,7 do 3,7 km·km⁻² przy wskaźniku bifurkacji z przedziału od 3,4–4,5. Średnia długość stoku mieści się w przedziale 0,14–0,2 km. Obszary leśne zajmują od 6 do 48%, obszary zabudowane od 2,7–7,5%, natomiast użytki rolne stanowią od 48 do 86%. Gęstość dróg mieści się w przedziale 3,4 do 6,6 km·km⁻².

DYSKUSJA

CECHY MORFOLOGICZNE A PODATNOŚĆ ZLEWNI NA WYSTĄPIENIE
GWAŁTOWNYCH WEZBRAŃ POWODUJĄCYCH LOKALNE POWODZIE

W oparciu o analizę cech morfometrycznych podjęto próbę oceny podatności zlewni na wystąpienie gwałtownych wezbrań powodujących lokalne powodzie. Zlewnie, w których występują gwałtowne wezbrania, charakteryzują się małymi rozmiarami. Ponad 36% zajmuje powierzchnię mniejszą niż 5 km². Zdaniem Ciepielowskiego (1970) zlewnie takie najsilniej reagują na gwałtowne opady deszczu. Niewiele jest zlewni, w których powierzchnia przekracza 20 km². Największa zlewnia ma powierzchnię ok. 39 km². Trzy czwarte zlewni ma długość poniżej 5,2 km i jest węższa niż 2,3 km. Najdłuższa zlewnia ma zaledwie 12,2 km, a najszersza 5,4 km. Można przypuszczać, że podczas silnych opadów deszczu zlewnie o tak małych rozmiarach w całości znajdują się w strefie silnych opadów deszczu, dlatego reakcja na opad jest bardzo szybka. Większość zlewni ma kształt zbliżony do koła, o czym świadczy wskaźnik kolistości. Kształt taki wpływa na skrócenie czasu koncentracji i wzrost wielkości przepływu (Dobija, Dynowska 1975). Zlewnie te charakteryzują się dużymi deniwelacjami terenu. Dla trzech czwartych zlewni przekraczają one 125 m, co wpływa na znaczne spadki stoków. Ponad trzy czwarte zlewni ma średnie nachylenie powyżej 6°. Strone stoki zwiększają szybkość spływu powierzchniowego (Figuła 1966) i skracają czas koncentracji. Zlewnie te mają dobrze rozbudowaną sieć dolinną. Prawie trzy czwarte zlewni ma gęstość dolin wyższą ok. 3 km·km⁻², co ułatwia odprowadzanie wody ze stoków. Wpływa również na długość drogi, jaką woda opadowa musi przebyć, zanim trafi do dna doliny. W większości zlewni średnia długość stoku nie przekracza 0,2 km. Spadek dna doliny głównej jest znaczny, charakterystyczny dla rzek górskich (Dynowska, Tłałka 1982), co wpływa na prędkość przemieszczania się fali wezbraniowej. Sieć drogowa, która wyróżnia się w dostawie wody ze stoku (Słupik 1972), jest dobrze rozwinięta i w trzech czwartych zlewni ma wartość wyższą od ok. 3 km·km⁻². Gęstość elementów, którymi woda płynie w sposób zorganizowany, a więc z dużą szybkością, dla większości zlewni przekracza 6 km·km⁻². Niewątpliwie skraca to czas koncentracji. W strukturze użytkowania dominują użytki rolne. Średnio stanowią one 64%, ale najliczniej występują zlewnie, w których udział użytków rolnych przekracza 80%. Przekłada się to na gęstość bruzd ornych, którymi woda płynie w sposób zorganizowany z dużą szybkością. Zlewnie, w których wystąpiły gwałtowne wezbrania, są generalnie słabo zalesione. Prawie połowę zlewni stanowią te, w których lesistość nie przekracza 20%. Należy również zaznaczyć, że w większości zlewni są to lasy łęgowe w dnie doliny głównej lub małe płyty lasów na stoku. Zbiorowiska leśne na stokach są rozbite na małe płyty, co nie wpływa korzystnie na ograniczenie spływu powierzchniowego. W kilku zlewniach udział lasów przekracza 80%. Należy jednak zaznaczyć, że są to zlewnie beskidzkie o małych rozmiarach, dużych nachyleniach

stoków, w których pokrywy zwietrzelinowe zawierają duży procent frakcji szkieletowych. Można przypuszczać, że w zlewniach takich podczas gwałtownych opadów może zachodzić spływ podpowierzchniowy w obrębie gruzowych pokryw zwietrzelinowych, o czym wspomina Soja (1981). Udział obszarów zabudowanych, w których następuje szybka transformacja opadu w odpływ, jest generalnie niewielki. Dla większości zlewni nie przekracza on 11%. Wskaźnik odpływu jest dosyć wysoki. Najczęściej mieści się on w przedziale 0,5–0,6, ale prawie połowa zlewni ma wartość wyższą od 0,7.

Wartości parametrów wskazują, że zlewnie te mogą być podatne na występowanie gwałtownych wezbrań mogących powodować lokalne powodzie.

PODSUMOWANIE

Przeprowadzona analiza wskazała cechy charakterystyczne dla zlewni, w których wystąpiły gwałtowne wezbrania powodujące lokalne powodzie. Wartości parametrów zlewni powodziowych wskazują, że nie mają one predyspozycji do tego, aby występowały w nich tego typu zjawiska. Można przypuszczać, że jeżeli nad zlewnią o takich parametrach wystąpią silne opady deszczu, to istnieje wysokie prawdopodobieństwo, że spowodują one gwałtowne wezbranie. Cechy morfologiczne zlewni można badać przed powodzią, a przyrównując je do parametrów zlewni modelowej, można wskazać w terenie zlewnie, które są podatne na występowanie gwałtownych wezbrań mogących spowodować lokalne powodzie. W zlewniach takich należałoby stosować środki biernej ochrony powodziowej.

LITERATURA

- Banasik K., Ignar S., 1983: Określenie opadu efektywnego metodą SCS na podstawie pomierzonego opadu i odpływu, *Przeł. Geof.* XXVIII, z. 3–4; 401–408.
- Baścik M., 2003: Parametry fizjograficzne, [w:] J. Pociask-Karteczka (red.), *Zlewnia: właściwości i procesy*; 21–36.
- Beuselinck L., Steegen A., Govers G., Nachtergaele J., Takken I., Poesen J., 2000: Characteristics of sediment deposits formed by intense rainfall events in small catchments in the Belgian Loam Belt, *Geomorphology* 32; 69–82.
- Bielecki H., 1975: Las a gospodarka wodna, *Zeszyty Prob. Post. Nauk Rol.* 162; 389–401.
- Boardman J., Burt T. P., Ewans R., Slattery M. C., Shuttleworth H., 1996: Soil erosion and flooding as a result of summer thunderstorm in Oxfordshire and Berkshire, May 1993, *Pergamon*, vol. 16, No. 1; 21–34.
- Bryndal T., Cabaj W., Ciupa T., 2008: Gwałtowne wezbrania w małych ciekach w Niece Nidziańskiej, *Przeł. Geograficzny*, 80, 1; 101–120.
- Brzeziński J. 1996: Obiektywizacja doboru zlewni podobnej, *Gosp. Wodna*, z. 4; 163–167.
- Cebulak E., Niedźwiedz T. 1998: Ekstremalne zjawiska opadowe w dorzeczu górnej Wisły w latach 1995–1996, *Dok. Geogr.* 11; 11–30.
- Cerdan O., Le Bissonnais Y., Couturier A., Bourennane H., Souchere V., 2002: Rill erosion on cultivated hillslopes during two extreme rainfall events in Normandy, France, *Soil & Tillage Research*, 67; 99–108.

- Ciepielowski A., 1970: Maksymalne wielkości spływów jednostkowych z deszczów nawalnych, *Przegl. Geofiz. r. XV, z. 2*; 179–193.
- Ciepielowski A., 1987: Badanie związków pomiędzy podstawowymi parametrami fal wezbraniowych w wybranych profilach rzek Polski, *Rozpr. Nauk. I Monogr. SGGW-AR w Warszawie*; 1–113.
- Czarnecka H., 1976: Próba obliczenia współczynnika odpływu „fi” przepływów maksymalnych, w małych niekontrolowanych zlewniach, na podstawie pokrywy glebowej, *Gosp. Wodna, nr 8–9*; 225–237.
- Czarnecka H., 1987: Zasady obliczania maksymalnych przepływów prawdopodobnych, parametry fizyczno-geograficzne cieków i zlewni, *Gosp. Wodna, z. 2*; 57–59.
- Dębski K. 1969: O potencjalnym najwyższym odpływie z krótkotrwałych deszczów nawalnych, *Rozpr. Hydrotechn. z. 23*; 51–63.
- Dobja A., Dynowska I., 1975: Znaczenie parametrów fizjograficznych dla ustalenia wielkości odpływu rzecznego, *Folia Geogr. ser. Geogr. Physica, vol. IX*; 77–127.
- Dobrowolski A., Ostrowski J., Kondzielski A., Zaniewska M., 2007: Historyczne i współczesne regiony występowania katastrofalnych powodzi w Polsce, [w:] J. Skutnicki i in. (red.), *Cywilizacja i żywyoty, Monografie IMiGW, Polskie Towarzystwo Geofizyczne, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa*; 147–156.
- Dwucet K., 1999: Litogeneza górnego lessu vistuliańskiego na wyżynach Polskich i na Nizinie Śląskiej, *Prace Nauk. Uniw. Śląskiego 1972. Wyd. UŚ. Katowice*.
- Dynowska I., Flałka A., 1982: *Hydrografia, PWN, Warszawa*; 1–299.
- Etzenberg C., Müller G., Peschke G., 1997: A water balance study in small representative mountainous forested basin, *Technical Documents in Hydrology, 14*; 117–122.
- Figuła K., 1955: Wstępna charakterystyka rozmiarów erozji na terenie kilku powiatów województwa krakowskiego, *Rocz. Nauk Rolniczych, ser. F, z. 1*; 30–45.
- Figuła K., 1960: Erozja w terenach górskich, *Wiad. Instyt. Melior. 1, 4*.
- Figuła K., 1966: Badania nad gospodarką wodną zlewni górskich zalesionych i nie zalesionych, cz. II Kształtowanie się odpływów w zlewniach potoków Biała Woda i Czarna Woda, *Rocz. Nauk. Roln. T. 118-D*; 51–87.
- Froehlich W., Słupik J., 1986: Rola dróg w kształtowaniu spływu i erozji, w karpaccich zlewniach fliszowych, *Przegl. Geogr. t. LVIII, z. 1–4*; 67–85.
- Gerlach T., 1976: Współczesny rozwój stoków w Polskich Karpatach Fliszowych, *Prace Geogr. 122*; 1–112.
- Gil E., 1986: Rola użytkowania ziemi w przebiegu spływu powierzchniowego i spłukiwania na stokach fliszowych, *Przegl. Geogr., t. LVIII, z. 1–2*; 51–65.
- 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.
- Gil E., 1999: Obieg wody i spłukiwanie na fliszowych stokach użytkowanych rolniczo w latach 1980–1990, *Zeszyty IGIPZ PAN, nr 60*; 1–78.
- Gutry-Korycka M., 1993: Zlewnia i jej parametry, [w:] U. Soczyńska (red.), *Podstawy hydrologii dynamicznej, Wyd. UW*; 41–61.
- Gutry-Korycka M., Mikulski Z., 1982: Odpływ powierzchniowy jako składowa odpływu rzeczno, *Przegl. Geof., t. XXVII, z. 1–2*; 45–52.
- Hellig Z. 1968: Zastosowanie metody taksonomicznej do typologicznego podziału krajów ze względu na poziom ich rozwoju oraz zasoby i strukturę wykwalifikowanych kadr, *Przegląd Statystyczny, 4*.
- Homa A., Osuch B., 1994: Rozpoznawcze badania retencyjności ściółki leśnej, *Czas. Techn. Wyd. PK Kraków*; 20–35.
- Kondracki J., 1938: Skutki ulewy w dniu 22 maja 1937 r. w dolinie Prądnika, *Czas. Geogr. T. XVI*; 161–165.
- Kondracki J., 1998: *Geografia regionalna Polski, Wyd. Nauk. PWN*.

- Lambor J., 1954: Rola lasów w sterowaniu fali powodziowej, *Gosp. Wodna*, R. XIV, z. 12; 467–471.
- Ludwig B., Boiffin J., Chadœuf J., Auzet A. V., 1995: Hydrological structure and erosion damage caused by concentrated flow in cultivated catchments, *Catena*, 25; 227–252.
- Maruszczak H., 2000: Definicja i klasyfikacja lessów oraz utworów lessopodobnych, *Przeł. Geol.* 7; 580–586.
- Mogil H. M., Monro J. C., Groper H. S., 1978: NWS's flash flood warning and disaster preparedness programs, *Bull. Am. Met. Soc.*, 79; 690–699.
- Niedbała A., Soja R., 1998: Odpływ z opadu nawalnego w dniu 18 maja 1996 roku w Sułoszowej, *Dok. Geogr.* 11; 31–38.
- Niedźwiedź T., 1997: Katastrofalny deszcz nawalny w górnej części dorzecza Nidzicy w dniu 15 września 1995 r., *Dok. Geogr. IGiPZ PAN*, nr 8; 38–53.
- Nowak A. (red.), 2003: *Statystyka, teoria i zastosowanie*, Wyd. C.H. Beck; 1–445.
- Ostrowski J., 1994: Model regionalny małej zlewni „MOREMAZ – 1”, *Materiały Badawcze IMiGW, Seria: Hydrologia i Oceanologia*, nr 17.
- Osuch B., 1997: Wpływ lasów na kształtowanie się powodzi w dorzeczu przy szczególnym uwzględnieniu intercepcji, *Hydrotechnika I*; 75–95.
- Ozga-Zielinska M., Brzeziński J., 1994: *Hydrologia stosowana*, Wyd. Nauk. PWN, Warszawa; 1–324.
- Parczewski W., 1960: Warunki występowania nagłych wezbrań na małych ciekach, *Wiad. Służby Hydrolog. i Meteorolog.*, t. VIII, z. 3; 1–159.
- Pociask-Karteczka J., 2003a: Opad efektywny, [w:] J. Pociask-Karteczka (red.), *Zlewnia: właściwości i procesy*; 109–116.
- Pociask-Karteczka J., 2003b: Geomorfoklimatyczny model odpływu, [w:] J. Pociask-Karteczka (red.), *Zlewnia: właściwości i procesy*; 185–195.
- Prochal P., Niemiec J., 1986: Zjawiska powodziowe a retencja zlewni górskich, *Zeszyty Naukowe AR im. H. Kołłątaja w Krakowie*, nr 205, z. 16; 187–193.
- Radwan-Dębski R., 1995: Szacunek opadu efektywnego na podstawie stopnia uszczelnienia terenu, *Gosp. Wodna*, nr 12; 315–320.
- Römken M. J. M., Luk S. H. Poesen J. W. A., Mermut A. R., 1995: Rain infiltration into losses soil from different geographic regions, *Catena* 25; 21–32.
- Słupik J., 1972: Spływ powierzchniowy na stokach górskich Karpat fliszowych, *Gosp. Wodna*, 8; 290–294.
- Słupik J., 1973: Zróżnicowanie spływu powierzchniowego na fliszowych stokach górskich, *Dok. Geogr.* z. 2; 1–117.
- Słupik J., 1976: Zastosowanie zdjęć lotniczych w określaniu wpływu bruzd i dróg polnych na strukturę bilansu wodnego stoków górskich, *Prace Nauk. UŚ*, 126, Fotointerpretacja w *Geogr.* 11; 31–38.
- Słupik J., 1981: Rola stoku w kształtowaniu odpływu w Karpatach fliszowych, *Prace Geogr. IGiPZ PAN*, nr 142; 1–99.
- Soczyńska U., 1993: Metody symulacji hydrogramu przy braku pełnej informacji hydrometrycznej, [w] *Podstawy hydrologii dynamicznej*, Wyd. UW; 341–366.
- Soja R., 1981: Analiza odpływu z fliszowych zlewni Bystrzanki i Ropy (Beskid Niski), *Dok. Geogr.*, z. 1; 1–91.
- Soja R., 2002: Hydrologiczne aspekty antropopresji w polskich Karpatach, *Prace Geogr. IGiPZ PAN*, nr 186; 1–131.
- Takken I., Jetten V., Govers G., Nachtergaele J., Steegen A., 2001: The effect of tillage-induced roughness on runoff and erosion patterns, *Geomorphology*, 37; 1–14.
- Ziętara T., 2002: Rola gwałtownych ulew i powodzi w modelowaniu rzeźby terenu oraz niszczeniu infrastruktury osadniczej w górnej części dorzecza Wisły, [w:] *Geomorfologiczne uwarunkowania rozwoju Małopolski*, Z. Górka, A. Jelonek (red.); 37–54.

SUMMARY

This article presents the results of investigations devoted to physiographic parameters of basins where small-scale flooding occurred. On the basis of literature devoted to mechanisms of runoff formation during heavy rainstorm, fourteen parameters that influence flood formation predominantly were selected. Eighty-three basins were described using the set of delineated parameters. The analysis allowed indicating typical values of physiographic parameters of basins in which small-scale flooding occurred. Moreover, parameters that diversify or make the basins similar were selected. The basins are similar and the parameters indicate that they are prone to flash floods generation. Moreover, the model of basins where small-scale flooding occurs was created. If such basins are affected by heavy rainstorm there is high probability that flash flood will occur. Investigation of physiographic parameters can be performed before flood events. Comparing parameters of any basin to parameters of the model where flash flood occurred it is possible to evaluate whether basin is prone to flash flood generation. Flood protection should be applied in basins prone to flash flood generation.