

Wpłynęło 28.10.2013 r.
Zrecenzowano 11.12.2013 r.
Zaakceptowano 17.12.2013 r.

A – koncepcja
B – zestawienie danych
C – analizy statystyczne
D – interpretacja wyników
E – przygotowanie maszynopisu
F – przegląd literatury

MAKSYMALNE ROCZNE SUMY DOBOWE OPADÓW O OKREŚLONYM PRAWDOPODOBIEŃSTWIE PRZEWYŻSZENIA NA OBSZARZE ŚRODKOWEJ POLSKI NA PODSTAWIE DANYCH Z WIELOLECIA 1966–2010

Katarzyna KRĘŻAŁEK¹⁾ ABCDEF, Tomasz SZYMCZAK¹⁾ ABCDEF,
Bogdan BĄK²⁾ B

¹⁾ Instytut Technologiczno-Przyrodniczy w Falentach, Zakład Zasobów Wodnych

²⁾ Instytut Technologiczno-Przyrodniczy, Kujawsko-Pomorski Ośrodek Badawczy w Bydgoszczy

Streszczenie

Celem pracy było określenie wartości wybranych kwantyli rozkładu prawdopodobieństwa maksymalnych rocznych sum dobowych opadu i ich zmienności na obszarze środkowej Polski. Wykorzystano aktualne dane pomiarowe pochodzące z 29 stacji pomiarowych, obejmujące wielolecie 1966–2010. Przyjęto, że własności losowe maksymalnych rocznych dobowych sum opadów mogą być odwzorowane przez cztery typy rozkładów prawdopodobieństwa: Weibulla, log-gamma, gamma i log-normalny. Estymację parametrów rozkładów prawdopodobieństwa przeprowadzono metodą największej wiarygodności. Stosując kryterium Akaike, wybrano – oddzielnie dla każdej stacji – najlepiej dopasowany rozkład. Wyniki przedstawiono w postaci zestawienia tabelarycznego maksymalnych rocznych sum opadów dobowych o prawdopodobieństwie przewyższenia $p = 1\%$, $p = 10\%$, $p = 50\%$ dla analizowanych stacji pluwiometrycznych oraz graficznie – w postaci powierzchni pól opadu i map z izohietami wyznaczonymi dla powyższych prawdopodobieństw. Do opracowania obszarowego rozkładu wysokości opadów zastosowano zmodyfikowaną metodę interpolacyjną Sheparda. Największą obszarową zmiennością charakteryzowały się maksymalne opady dobowe o prawdopodobieństwie przewyższenia $p = 1\%$, których sumy zmieniały się od 60,2 do 106,8 mm.

Słowa kluczowe: izohiety, maksymalne roczne sumy dobowe opadów, prawdopodobieństwo przewyższenia, rozkład prawdopodobieństwa

Do cytowania For citation: Krężałek K., Szymczak T., Bąk B. 2013. Maksymalne roczne sumy dobowe opadów o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia na obszarze środkowej Polski na podstawie danych z wielolecia 1966–2010. Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie. T. 13. Z. 4(44) s. 77–90.

WSTĘP

Maksymalne roczne sumy dobowe opadów o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia są bardzo istotną charakterystyką klimatyczną stosowaną w hydrologii inżynierskiej. Są podstawowym parametrem meteorologicznym wykorzystywanym do obliczania przepływów maksymalnych metodami pośrednimi, m.in. formułą opadową [RYBAK (koord.) 1998; STACHY, FAL 1986].

Błąd oceny kwantyli maksymalnych rocznych sum dobowych opadów, zwłaszcza kwantyli wyższych rzędów (projektowych), jest spowodowany wieloma czynnikami: nieadekwatnością modelu (błąd specyfikacji), własnościami użytej metody estymacji parametrów, liczebnością próby, liczbą parametrów modelu oraz niedokładnością danych, która – towarzysząc każdemu pomiarowi – rzadko bywa uwzględniana w teorii i praktyce opracowań statystycznych.

Ze względu na zmiany klimatyczne, których skutkiem jest zwiększenie częstości opadów nawalnych i ulewnych, należałoby wdrożyć niestacjonarne metody estymacji parametrów rozkładów prawdopodobieństwa ich występowania. W obliczu krótkich serii pomiarowych, jakimi dysponujemy i dużej niepewności związanej z utrzymaniem się tendencji zmian klimatu jest to zadanie bardzo trudne i ryzykowne w praktycznych zastosowaniach inżynierskich.

W pracy przyjęto, że najlepsze oszacowania projektowych wartości opadów maksymalnych otrzymamy wykorzystując aktualne dane obserwacyjne. Większość dotychczasowych oszacowań projektowych wartości opadów maksymalnych w Polsce powstało na podstawie ciągów danych z ubiegłego stulecia. Na przykład w „Atlasie hydrologicznym Polski” z 1987 r. [STACHY (red.) 1987] znajdują się mapy sporządzone na podstawie danych z lat 1951–1975, w „Atlasie klimatu Polski” z 2005 r. [LORENC (red.) 2005] w ogóle pominięto maksymalne sumy dobowe opadów, z kolei opracowanie STACHY^{EGO} [2009], dotyczące tego zagadnienia, bazuje na danych z lat 1956–1980. Coraz częściej widoczne są skutki przyjmowania zbyt oszczędnego wymiarowania urządzeń wodnych. Występujące ostatnio ekstremalne zjawiska hydrologiczne pokazały, że urządzenia te nie są w stanie przyjąć aktualnych ilości wody opadowej lub przeprowadzić jej strumieni o aktualnym natężeniu, ponieważ zostały zaprojektowane na podstawie wartości dużo mniejszych, właściwych dla ubiegłych dziesięcioleci. Dlatego też podjęto próbę opracowania charakterystyk opartych na najnowszych danych. Ze względu na ograniczoną dostępność danych przeprowadzone na obecnym etapie analizy dotyczą jedynie obszarów w pasie środkowej Polski.

MATERIAŁ I METODY BADAŃ

MATERIAŁ

Podstawą opracowania były dane pomiarowe w postaci wieloletnich ciągów maksymalnych rocznych sum dobowych opadu z lat 1966–2010 ($n = 45$), obser-

wowanych na stacjach meteorologicznych IMGW, IUNG, ITP (dawniej IMUZ) i na posterunkach opadowych ITP. W sumie wykorzystano dane z 29 punktów pomiarowych na obszarze środkowej Polski (tab. 1). Punktem najbardziej wysunię-

Tabela 1. Współrzędne geograficzne wybranych stacji meteorologicznych oraz podstawowe statystyki maksymalnych rocznych sum dobowych opadów w wieloletniu 1966–2010.

Table 1. Geographic coordinates of selected meteorological stations and basic statistics of annual maximum daily rainfall from the multiannual period 1966–2010

Stacja Station	Instytucja Institution	Współrzędne geograficzne Geographic coordinates		Maksymalne roczne sumy dobowe opadów, mm Annual maximum daily rainfall, mm		
		szerokość ϕ latitude ϕ	długość λ longitude λ	min.	max.	średnio mean
Słubice	IMGW	52°21'	14°36'	15,0	132,5	38,5
Gorzów Wlkp.	IMGW	52°45'	15°17'	16,0	77,4	33,1
Zielona Góra	IMGW	51°56'	15°32'	12,0	78,0	34,5
Legnica	IMGW	51°13'	16°10'	19,9	85,9	41,4
Leszno	IMGW	51°50'	16°32'	17,0	79,0	34,2
Piła	IMGW	53°08'	16°43'	16,0	76,0	33,8
Poznań	IMGW	52°25'	16°50'	11,0	76,0	31,9
Wrocław	IMGW	51°06'	17°01'	17,2	74,4	38,3
Bydgoszcz	ITP	53°07'	18°00'	9,0	92,6	35,7
Kalisz	IMGW	51°44'	18°05'	14,0	87,0	33,2
Wieluń	IMGW	51°13'	18°34'	19,2	78,7	37,4
Toruń	IMGW	53°03'	18°35'	17,0	101,6	37,7
Koło	IMGW	52°12'	18°40'	16,3	63,3	33,7
Łódź	IMGW	51°44'	19°24'	14,0	99,8	36,3
Płock	IMGW	52°32'	19°40'	14,0	74,0	36,3
Sulejów	IMGW	51°21'	19°52'	19,0	72,3	37,1
Mławka	ITP	53°08'	20°19'	18,9	155,8	42,5
Mława	IMGW	53°06'	20°21'	16,7	78,5	35,4
Chrzanówek	ITP	52°52'	20°39'	16,8	97,9	40,1
Nasierowo	ITP	52°50'	20°43'	16,8	68,8	38,4
Falenty	ITP	52°08'	20°55'	20,0	67,0	35,6
Łaziska	IMGW	51°20'	20°55'	18,1	74,8	36,5
Warszawa	IMGW	52°10'	20°59'	17,0	70,0	33,8
Strachówka	ITP	52°26'	21°39'	17,9	70,3	38,9
Puławy	IUNG	51°25'	21°58'	16,7	63,5	36,8
Siedlce	IMGW	52°11'	22°16'	15,0	81,0	37,3
Białystok	IMGW	53°07'	23°10'	16,6	91,0	36,3
Włodawa	IMGW	51°33'	23°32'	15,0	88,9	35,1
Terespol	IMGW	52°04'	23°37'	14,0	81,9	35,4

Źródło: opracowanie własne. Source: own elaboration.

tym na zachód jest stacja Słubice (52°21'N; 14°36'E), na wschód – Terespol (52°04'N; 23°37'E), na północ – Mławka (53°08'N; 20°19'E) i Piła (53°08'N; 16°43'E), a na południe – Wrocław (51°06'N; 17°01'E).

OBLICZENIA MAKSYMALNYCH ROCZNYCH SUM DOBOWYCH OPADÓW O OKREŚLONYM PRAWDOPODOBIENSTWIE PRZEWYŻSZENIA

Założono, że rozkłady prawdopodobieństwa przewyższenia maksymalnych rocznych sum dobowych opadów są zgodne z jednym z rozkładów teoretycznych stosowanych do opisu zjawisk ekstremalnych: gamma, Weibulla, log-normalnym, log-gamma. Stosując kryterium Akaike określono, które z nich są najbardziej zgodne z rozkładami empirycznymi. Estymację parametrów przeprowadzono metodą największej wiarygodności, wykorzystując oprogramowanie FLOODS ANALYSIS [IMGW 2005; OZGA-ZIELIŃSKA i in. 1999].

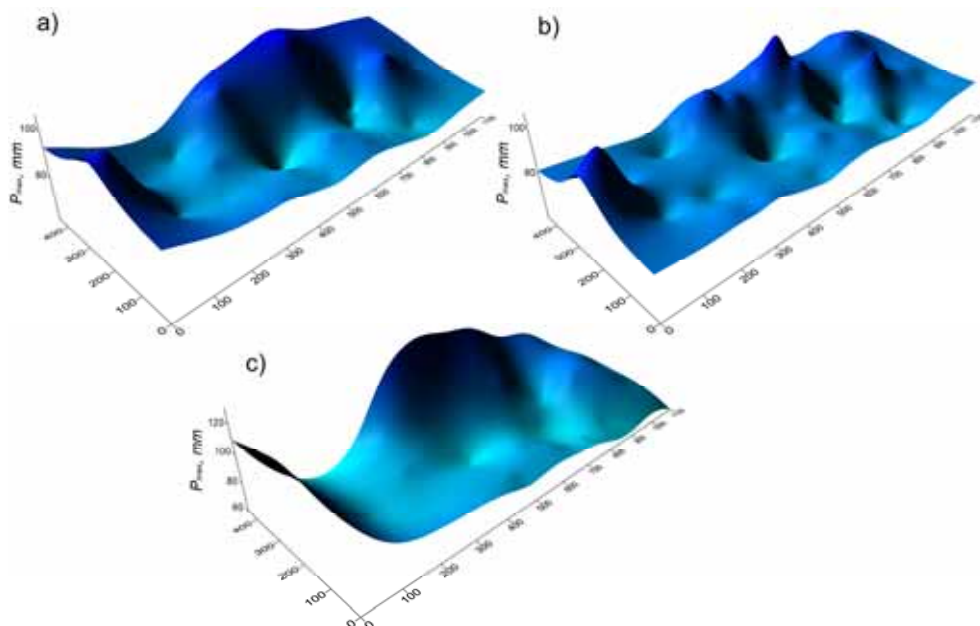
Dla każdej z analizowanych stacji opadowych obliczono wartości maksymalnych rocznych sum dobowych opadów P_{\max} dla 24 poziomów prawdopodobieństwa przewyższenia, od $p = 0,01\%$ do $p = 99,9\%$, oraz ich wartości zwiększone o błąd oszacowania kwantyla – $P_{\max\alpha}$, wyznaczone przez podanie górnej granicy jednostronnego przedziału ufności ($\alpha = 84\%$). W niniejszej pracy zestawiono wyniki obejmujące wybrane prawdopodobieństwa przewyższenia: $p = 1\%$, $p = 10\%$, $p = 50\%$.

WYZNACZENIE OBSZAROWEGO ROZKŁADU KWANTYLI MAKSYMALNYCH ROCZNYCH SUM DOBOWYCH OPADÓW

Wartości kwantyli maksymalnych rocznych sum dobowych opadu o prawdopodobieństwie przewyższenia $p = 1\%$, 10% i 50% , obliczone na podstawie teoretycznych rozkładów prawdopodobieństwa określonych dla danych z analizowanych stacji, wykorzystano do wygenerowania powierzchni pól opadowych i do sporządzenia map przedstawiających rozkład tych opadów na obszarze środkowej Polski.

Bardzo istotnym zagadnieniem, ze względu na właściwe odwzorowanie ciągłego pola opadu na podstawie danych z punktów pomiarowych o współrzędnych odpowiadających lokalizacji stacji opadowych, jest wybór odpowiedniej metody interpolacyjnej. W zależności od przyjętej metody otrzymujemy różne kształty powierzchni pola opadu (rys. 1).

Obecnie, kiedy do określania obszarowego rozkładu opadu na podstawie danych punktowych powszechnie są wykorzystywane techniki numeryczne, najczęściej stosowana jest metoda odwrotnych odległości [GADEK 2002]. Umożliwia ona tworzenie ciągłych funkcji rozkładu parametrów dzięki założeniu, że wpływ wartości parametru w punkcie pomiarowym na jego wartość w dowolnym punkcie zlew-



Rys. 1. Pola maksymalnych rocznych sum dobowych opadów P_{\max} wygenerowane na podstawie danych z analizowanych stacji dla prawdopodobieństwa przewyższenia $p = 1\%$, z zastosowaniem różnych metod interpolacji: a) kriging, b) metoda odwrotnych odległości, c) zmodyfikowana metoda Sheparda; źródło: wyniki własne

Fig. 1. Spatial distribution of annual maximum daily rainfall P_{\max} based on data from analyzed weather stations for the probability of exceedance $p = 1\%$, using different interpolation methods: a) kriging, b) a method of inverse distance, c) and modified Shepard method; source: own study

ni jest odwrotnie proporcjonalny do odległości między nimi. Punkty pomiarowe położone dalej od punktu obliczeniowego mają mniejszy wpływ od tych, które znajdują się w jego najbliższym sąsiedztwie. Współczynnik wagowy wpływu wartości parametru w poszczególnych punktach pomiarowych na jego wartości interpolowane przestrzennie jest odwrotnie proporcjonalny do odległości między tymi punktami.

Wadą metody odwrotnych odległości jest występowanie dużych gradientów wyznaczonego pola w okolicach punktów pomiarowych. Po przeanalizowaniu wyników wielu prób generowania pól przestrzennego rozkładu opadów maksymalnych z zastosowaniem programu SURFER v.8.0, biorąc pod uwagę przedstawione niżej zalety, do dalszych obliczeń wybrano zmodyfikowaną metodę Sheparda.

Metoda Sheparda jest uogólnieniem metody odwrotnych odległości. Umożliwia wygładzanie generowanych konturów przestrzennego rozkładu parametru. Uwzględnia się w niej zarówno funkcje interpolacyjne wierne, jak i wygładzające. W przypadku tych pierwszych, w punkcie estymacji pokrywającym się z punktem pomiaru, pozostawiana jest zmierzona wartość parametru. Wszystkie dane wej-

ściowe znajdują się dokładnie na interpolowanej powierzchni. W przypadku funkcji wygładzających wartości wejściowa i estymowana w punkcie pomiarowym mogą się różnić. Dane wejściowe nie są precyzyjnie uwzględniane na generowanej powierzchni interpolacji. Jeżeli dane pomiarowe są niepewne lub obciążone istotnym błędem, zalecane jest stosowanie metod wygładzających. W niniejszym przypadku zastosowano współczynnik wygładzający na poziomie 0,1, co oznacza tolerancję na poziomie 10% zmierzonej wartości. Jest to powszechnie przyjmowany błąd określania wielu charakterystyk hydrologicznych, w tym opadów.

Podstawowa metoda Sheparda [SHEPARD 1968] ma charakter globalny, ponieważ interpolowana wartość w dowolnym punkcie zależy od całego zbioru danych, natomiast jej modyfikacja [FRANKE, NIELSON 1980; RENKA 1998a, b,] nabiera charakteru lokalnego dzięki współczynnikiem wagowym odpowiednio dobranym do każdego punktu. Bazuje ona głównie na wyznaczaniu odległości pomiędzy punktem, w którym dokonuje się interpolacji a stacjami pomiarowymi, dla których określono odpowiednie kwantyle. Interpolacja punktu odbywa się za pomocą dwóch równoległych algorytmów obliczeniowych: obliczania lokalnych najmniejszych kwadratów odpowiadających kwadratowej powierzchni wokół każdej obserwacji (sąsiedztwo kwadratowe), a następnie odwrotnej odległości ważonej na podstawie punktów uprzednio wyznaczonych metodą najmniejszych kwadratów (sąsiedztwo ważne). W obu przypadkach są wyznaczane okręgi, zawierające odpowiednią liczbę (N_q – sąsiedztwo kwadratowe, N_w – sąsiedztwo ważne) punktów sąsiadujących z danymi wejściowymi. Promienie okręgów, odpowiednio R_q i R_w , są ustalane na podstawie zadanej liczby punktów sąsiadujących. Największa wartość wagi przypada w środku okręgu i maleje wraz z oddalaniem się od niego. Punkty położone najbliżej mają zatem największy wpływ na interpolowaną wartość [BENTLEY, FRIEDMAN 1979]. W rezultacie zmodyfikowana metoda Sheparda umożliwia tworzenie gładkich funkcji, które interpolują zestawy danych, zawierających określoną liczbę (N_q , N_w) rozproszonych punktów. Powstała powierzchnia jest ciągła i ma ciągłe pierwsze pochodne cząstkowe. W analizowanym przypadku, zgodnie z zaleceniami podanymi przez RENKA [1988b], przyjęto $N_q = 13$ oraz $N_w = 19$. Promienie R_q i R_w ustalono automatycznie za pomocą algorytmu programu SURFER, na podstawie zadanych wartości N_q i N_w . Zwiększenie tych wartości sprawia, że metoda staje się mniej lokalna. Zmodyfikowana metoda Sheparda jest uważana za mało wrażliwą na zmiany wartości parametrów.

Pola kwantyli opadów maksymalnych i przebieg odpowiadających im izohiet wyznaczono z zastosowaniem programu SURFER v.8.0, który ma wbudowaną procedurę interpolacji przestrzennej zgodną ze zmodyfikowaną metodą Sheparda. Wzięto pod uwagę jedynie odległości między punktami, ze względu na to, że na terenie będącym w zasięgu badań brak jest istotnych wzniesień, mogących zasadniczo modyfikować pole. W podobnych badaniach prowadzonych na terenach górskich [GADEK 2002] uwzględnia się zmienność wysokości terenu.

Sporządzając mapy pominięto stacje Mława, Nasierowo i Warszawa ze względu na bardzo bliskie sąsiedztwo ze stacjami Mławka, Chrzanówek i Falenty oraz, w przypadku stacji meteorologicznej w Mławie, ze względu na wyraźnie mniejsze wartości mierzonych opadów maksymalnych, wynikające z lokalnej anomalii stwierdzonej na podstawie porównania z wynikami wieloletnich pomiarów prowadzonych w pobliskiej gęstej sieci ombrometrycznej ITP zlokalizowanej na terenie zlewni górnej Mławki [SZYMCZAK 2000; 2001].

WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA

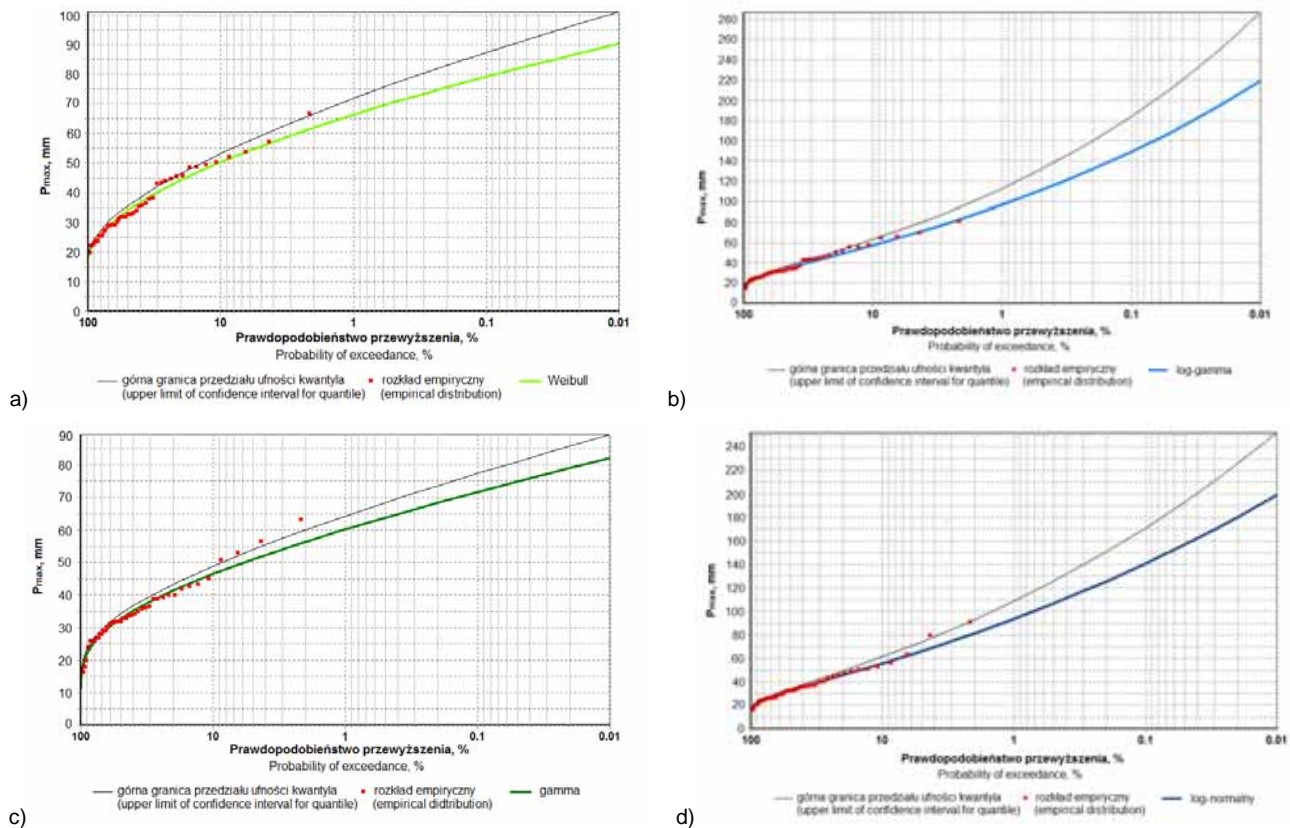
Uzyskane wyniki wskazują, że rozkłady Weibulla i log-gamma najlepiej odwzorowują rozkłady prawdopodobieństwa przewyższenia maksymalnych rocznych sum dobowych opadów. Rozkład Weibulla okazał się najlepszy w przypadku prób losowych o niedużej zmienności opadów maksymalnych (np. stacja meteorologiczna w Falentach), a rozkład log-gamma najlepiej odwzorowywał próby o dużej zmienności wartości ich elementów.

W dwunastu przypadkach najlepszą zgodność uzyskano dla rozkładu Weibulla, w dziewięciu – dla rozkładu log-gamma, w sześciu – dla rozkładu gamma, a w dwu – log-normalnego (rys. 2).

W przypadku stacji opadowej w miejscowości Mławka, na której w 1999 r. zarejestrowano rekordową sumę dobową opadu 155,8 mm oraz stacji w Słubicach, gdzie w latach 1978 i 2009 zanotowano dobowe opady o wysokościach odpowiednio 132,5 oraz 121,5 mm stwierdzono zbyt duże i nienaturalne oddziaływanie elementów odstających na kształt krzywej prawdopodobieństwa w strefie małych prawdopodobieństw (rys. 3). Z tego powodu w przypadku tych stacji do dalszych obliczeń zastosowano rozkład gamma.

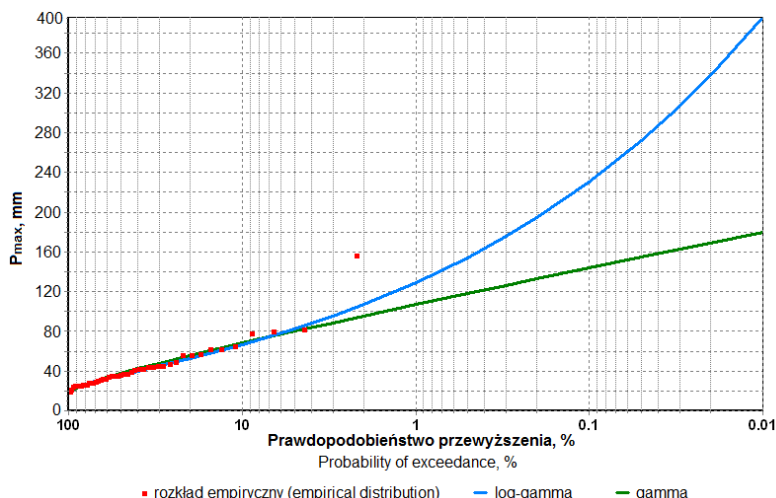
Maksymalne roczne sumy dobowe opadu o prawdopodobieństwie przewyższenia $p = 1\%$ zmieniały się w granicach analizowanego obszaru od 60,2 mm w Kole do 106,8 mm w Mławce (tab. 2, rys. 4). Jeśli uwzględni się górny przedział ufności, zakres zmienności powyższej charakterystyki opadu wyniesie od 64,3 do 119,7 mm. W przypadku prawdopodobieństwa $p = 10\%$ wartość minimalną, równą 46,5 mm, otrzymano – tak jak poprzednio – w Kole, a wartość maksymalną (68,1 mm) – w Mławce. Miejscowością cechującą się największą szacowaną sumą dobową opadu o prawdopodobieństwie przewyższenia $p = 50\%$, równą 39,8 mm, okazała się Legnica, a miejscowością o najmniejszej wartości tej charakterystyki (29,0 mm) – Poznań.

Największą obszarową względną zmiennością charakteryzują się maksymalne roczne sumy dobowe opadu o prawdopodobieństwie przewyższenia $p = 1\%$ (tab. 3, rys. 5). Wartość współczynnika zmienności w ich przypadku wyniosła 14,52% (tab. 3). Najmniej zmienną obszarowo charakterystyką okazały się maksymalne roczne sumy dobowe opadu o prawdopodobieństwie przewyższenia $p = 50\%$, dla których wartość współczynnika zmienności wyniosła 7,37%.



Rys. 2. Przykłady funkcji prawdopodobieństwa maksymalnych rocznych sum dobowych opadu P_{max} dla różnych rozkładów prawdopodobieństwa przewyższenia: a) Falenty – Weibulla, b) Siedlce – log-gamma, c) Koło – gamma, d) Białystok – log-normalny; źródło: wyniki własne

Fig. 2. Examples of the probability functions of annual maximum daily rainfall P_{max} for different probability distributions of exceedance: a) Falenty – Weibull, b) Siedlce – log-gamma, c) Koło – gamma, d) Białystok – log-normal; source: own study



Rys. 3. Porównanie funkcji prawdopodobieństwa przewyższenia maksymalnej rocznej sumy dobowej opadu P_{\max} dla stacji Słubice: a) rozkład log-gamma, b) rozkład gamma; źródło: wyniki własne

Fig. 3. Comparison of the probability functions of annual maximum daily rainfall P_{\max} for Słubice weather station: a) log-gamma distribution, b) gamma distribution; source: own study

Tabela 2. Maksymalne roczne sumy dobowe opadów (w mm) o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia P_{\max} oraz ich wartości po uwzględnieniu błędu oszacowania kwantyla $P_{\max\alpha}$

Table 2. Annual maximum daily rainfall (in mm) for a specific exceedance probability P_{\max} and their values taking into account the error in estimation of quantile $P_{\max\alpha}$

Stacja Station	P_{\max}	$P_{\max\alpha}$	P_{\max}	$P_{\max\alpha}$	P_{\max}	$P_{\max\alpha}$	Rozkład Distribution
	$p = 1\%$		$p = 10\%$		$p = 50\%$		
1	2		3		4		5
Słubice	104,8	118,3	64,6	71,0	33,5	36,0	gamma ¹⁾
Gorzów Wlkp.	76,8	85,4	50,9	55,1	30,0	31,8	gamma
Zielona Góra	73,6	80,6	53,1	56,9	32,3	34,4	Weibull
Legnica	80,9	87,1	60,1	63,7	39,8	41,9	gamma
Leszno	73,4	80,8	52,2	56,0	31,8	33,8	Weibull
Piła	71,1	78,2	50,9	54,5	31,6	33,4	Weibull
Poznań	78,6	89,8	49,3	53,8	29,0	30,8	log-gamma
Wrocław	81,4	89,6	58,0	62,1	35,6	37,8	Weibull
Bydgoszcz	94,7	109,0	57,4	63,0	32,1	34,3	log-gamma
Kalisz	75,3	85,0	49,3	53,3	30,6	32,3	log-gamma
Wieluń	74,1	81,4	52,8	56,3	35,5	37,1	log-gamma
Toruń	89,7	99,8	59,0	64,0	34,1	36,2	gamma
Koło	60,2	64,3	46,5	49,0	32,8	34,2	gamma
Łódź	80,2	89,7	53,8	58,0	33,7	35,5	log-gamma
Płock	78,6	86,6	55,8	59,9	33,6	35,7	Weibull
Sulejów	78,8	87,2	55,3	59,4	34,2	36,1	Weibull

cd. tab. 2

1	2		3		4		5
Mławka	106,8	119,7	68,1	74,3	37,8	40,2	gamma ¹⁾
Mława	83,5	93,6	55,8	60,5	32,0	34,1	Weibull
Chrzanówek	95,8	109,0	60,8	66,2	36,7	38,7	log-normalny
Nasierowo	69,8	74,4	53,5	56,2	37,2	38,8	gamma
Falenty	66,4	71,9	50,3	53,3	34,1	35,7	Weibull
Łaziska	72,8	79,6	53,4	56,9	34,3	36,2	Weibull
Warszawa	68,6	75,4	49,5	52,9	31,5	33,2	Weibull
Strachówka	67,5	72,0	52,4	55,0	37,7	39,2	gamma
Puławy	68,4	73,7	52,6	55,6	35,5	37,3	Weibull
Siedlce	96,8	112,9	57,6	63,1	33,6	35,6	log-gamma
Białystok	93,6	108,8	55,8	61,4	32,4	34,3	log-normalny
Włodawa	76,8	85,9	51,7	55,7	32,6	34,3	log-gamma
Terespol	81,6	90,5	56,4	60,8	32,5	34,8	Weibull

¹⁾ Najbardziej prawdopodobna funkcja rozkładu log-gamma – zmieniona na gamma ze względu na nadmierne oddziaływanie elementów odstających.

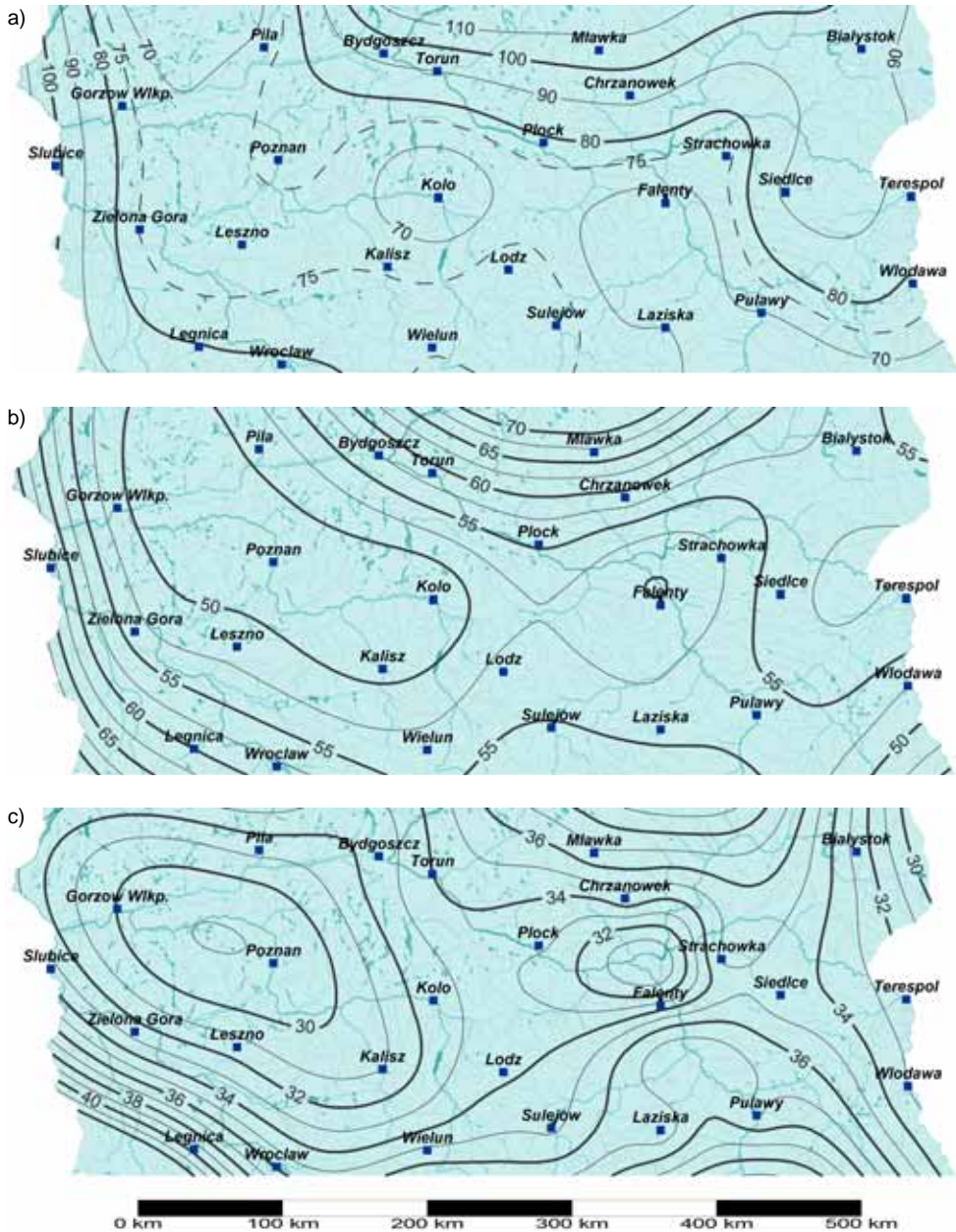
¹⁾ Best fitting distribution function log-gamma changed for gamma because of excessive interference from outlier.

Źródło: opracowanie własne. Source: own elaboration.

Zestawione wartości różnią się od dotychczas publikowanych [FAL 1987] dla rozpatrywanych regionów, co wynika między innymi z wykorzystania w niniejszej pracy najnowszych danych oraz uwzględnienia, oprócz posterunków IMGW, również stacji opadowych IMUZ (ITP) i IUNG. Na przykład maksymalna roczna suma dobową opadu o prawdopodobieństwie przewyższenia 1% dla stacji opadowej w miejscowości Mławka jest o ok. 40% większa od wartości, którą dla tego rejonu można określić na podstawie wcześniejszych opracowań [FAL 1987]. Odwrotna sytuacja występuje w przypadku Płocka. Aktualnie określona suma jest o ok. 24% mniejsza niż w cytowanych wyżej materiałach. W pozostałych przypadkach wartości są porównywalne, jednak dzięki wykorzystaniu do sporządzenia map aktualnych danych, otrzymane wartości powinny być bardziej wiarygodne.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Dla większości analizowanych stacji opadowych rozkład prawdopodobieństwa maksymalnych rocznych sum dobowych opadu najlepiej opisywał rozkład Weibulla. Występowanie w próbie losowej elementów odstających powodowało najlepsze dopasowanie rozkładu log-gamma, co jednak skutkowało gwałtownym zwiększeniem ekstrapolowanych wartości opadów w strefie małych prawdopodobieństw. W takich przypadkach proponuje się stosowanie rozkładu gamma, który umożliwia wyeliminowanie tego efektu i jednocześnie zachowanie porównywalnych błędów oszacowania kwantyli.



Rys. 4. Maksymalny opad dobowy P_{\max} (mm) o prawdopodobieństwie przewyższenia: a) $p = 1\%$, b) $p = 10\%$, c) $p = 50\%$ (okres obserwacyjny 1966–2010 r.); źródło: opracowanie własne

Fig. 4. The annual maximum daily rainfall P_{\max} (mm) of probability of exceedance: a) $p = 1\%$, b) $p = 10\%$, c) $p = 50\%$ (multiannual period 1966–2010); source: own elaboration

Tabela 3. Podstawowe statystyki obliczonych maksymalnych rocznych sum dobowych opadów P_{\max} o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia, sum odpowiadających górnemu przedziałowi ufności $P_{\max\alpha}$ oraz ich błędów oszacowania $\delta = P_{\max\alpha} - P_{\max}$ ¹⁾

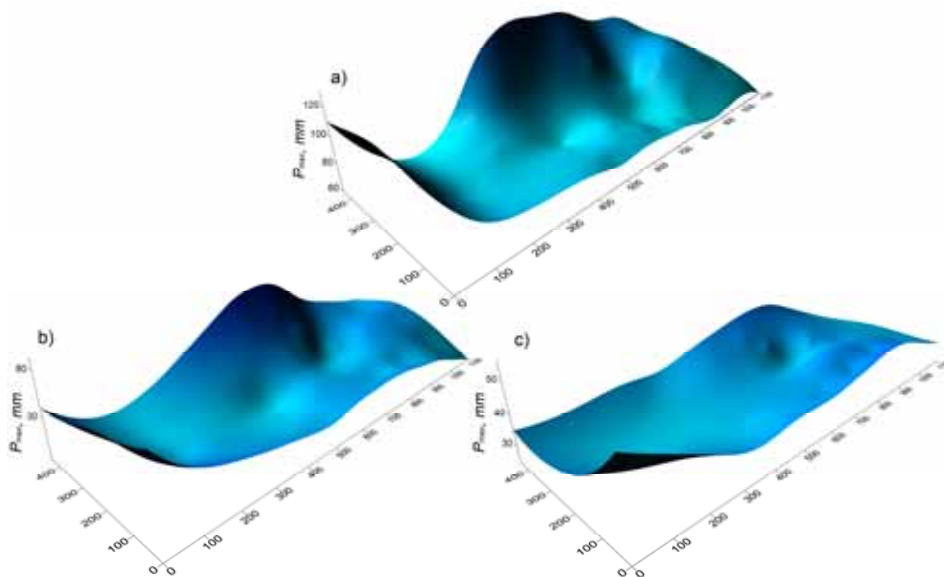
Table 3. Basic statistics of calculated annual maximum daily rainfall P_{\max} for a specific probability of exceedance, sum corresponding upper confidence interval $P_{\max\alpha}$ and estimation errors and their $\delta = P_{\max\alpha} - P_{\max}$ ¹⁾

Wartość Value	P_{\max}	$P_{\max\alpha}$	δ	P_{\max}	$P_{\max\alpha}$	δ	P_{\max}	$P_{\max\alpha}$	δ
	$p = 1\%$			$p = 10\%$			$p = 50\%$		
Max., mm	106,8	119,7	16,1	68,1	74,3	6,5	39,8	41,9	2,5
Min., mm	60,2	64,3	4,1	46,5	49,0	2,5	29,0	30,8	1,4
Średnia, mm Mean, mm	80,0	89,0	9,0	54,7	58,9	4,2	33,7	35,6	1,9
Odchylenie standardowe, mm Standard deviation, mm	11,6	14,6	–	4,8	5,6	–	2,5	2,5	–
Współczynnik zmienności, % Coefficient of variation, %	14,5	16,4	–	8,7	9,5	–	7,4	7,1	–

¹⁾ Podane w jednym wierszu wartości P_{\max} , $P_{\max\alpha}$ i δ odnoszą się do różnych stacji, stąd ich niezgodność z podanym worem wyznaczania błędu.

¹⁾ Given in one row of P_{\max} , $P_{\max\alpha}$ and δ refer to different stations hence their non-compliance with the specified formula for estimation error.

Źródło: wyniki własne. Source: own study.



Rys. 5. Pola maksymalnych rocznych sum dobowych opadów P_{\max} wygenerowane z zastosowaniem zmodyfikowanej metody Sheparda dla prawdopodobieństw przewyższenia: a) $p = 1\%$, b) $p = 10\%$, c) $p = 50\%$; źródło: wyniki własne

Fig. 5. Spatial distributions of the annual maximum daily rainfall P_{\max} generated using a modified Shepard method; the probability of exceedance: a) $p = 1\%$, b) $p = 10\%$, c) $p = 50\%$; source: own study

W pracy wykazano przydatność zmodyfikowanej metody Sheparda do aproksymacji i interpolacji przestrzennej pól opadów maksymalnych.

Na analizowanym obszarze środkowej Polski, stanowiącym pas zawarty między 50°56' a 53°30' szerokości geograficznej północnej, średnia wysokość dobowej sumy opadu o prawdopodobieństwie przewyższenia 1%, z uwzględnieniem błędu oszacowania, wynosi 89,0 mm i charakteryzuje się średnią względną zmiennością obszarową o wartości $\pm 16,4\%$.

Przedstawione w postaci tabelarycznej i na mapach maksymalne roczne sumy dobowe opadów o prawdopodobieństwach przewyższenia $p = 1\%$ obliczone na podstawie danych pomiarowych z lat 1966–2010 stanowią wiarygodny materiał do obliczeń hydrologicznych, zwłaszcza w przypadku szacowania przepływów miarodajnych i kontrolnych w zlewniach niekontrolowanych (formuła opadowa, obszarowe równanie regresji).

Podane wartości maksymalnych rocznych sum dobowych opadów o prawdopodobieństwie przewyższenia $p = 10\%$ i 50% można stosować, jako wartości miarodajne do obliczania ilości ścieków opadowych, powstających na terenach zabudowanych i do wymiarowania zbiorników retencjonujących te ścieki w przypadku braku kanalizacji deszczowej.

LITERATURA

- BENTLEY J.L., FRIEDMAN J.H. 1979. Data structures for range searching. *ACM Computing Surveys*. Vol. 11 s. 397–409.
- FAL B. 1987. Maksymalne sumy dobowe opadów o prawdopodobieństwie wystąpienia 1%, 10% i 50%. W: *Atlas hydrologiczny Polski*. T. 1. Pr. zbior. Red. J. Stachy. Warszawa. IMGW, Wydaw. Geol.
- FRANKE R., NIELSON G. 1980. Smooth interpolation of large sets of scattered data *Internat. International Journal for Numerical Methods in Engineering*. Vol. 15. Iss. 11 s. 1691–1704.
- GAEK W. 2002. Matematyczny model odpływu ze zlewni z zastosowaniem zdekomponowanej przestrzennej siatki obliczeniowej. Kraków. Wydaw. PKrak. ISBN 013713632002 ss. 134.
- IMGW 2005. Guidelines for flood frequency analysis. Long measurement series of river discharge. ISBN 83-88897-49-7 ss. 44.
- LORENC H. (red.) 2005. *Atlas klimatu Polski*. Warszawa. IMGW.
- OZGA-ZIELIŃSKA M., BRZEZIŃSKI J., OZGA-ZIELIŃSKI B. 1999. Zasady obliczania największych przepływów rocznych o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia przy projektowaniu obiektów budownictwa hydrotechnicznego. Długie ciągi pomiarowe przepływów. *Materiały Badawcze IMGW*. Nr 27. Ser. Hydrologia i Oceanologia. ISSN 0239-6297 ss. 45.
- RENKA R.J. 1988a. Algorithm 660: QSHEP2D: Quadratic Shepard method for bivariate interpolation of scattered data. *ACM Transactions on Mathematical Software*. Vol. 14 s.149–150.
- RENKA R.J. 1988b. Multivariate interpolation of large sets of scattered data. *ACM Transactions on Mathematical Software*. Vol. 14 s. 139–148.
- RYBAK M. (koord.) 1998. Wytyczne obliczania światła mostów i przepustów. *Materiały do dyskusji. Konferencja Naukowo-Techniczna Powódź'97: koleje-drogi-mosty*. Wisła, 21–23 października 1998. Gliwice. Wydaw. „Eurex” ss. 164.

- SHEPARD D. 1968. A two-dimensional interpolation function for irregularly spaced data. ACM '68 Proceedings of the 1968 23rd ACM national conference. New York. ACM s. 517–524.
- STACH A. 2009. Analiza struktury przestrzennej i czasoprzestrzennej maksymalnych opadów dobowych w Polsce w latach 1956–1980. Ser. Geografia. Nr 85. Poznań. Wydaw. Nauk. UAM. ISBN 978-83-232-1988-0 ss. 323.
- STACHY J. (red.) 1987. Atlas hydrologiczny Polski. T. 1. Warszawa. IMGW, Wydaw. Geol.
- STACHY J., FAL B. 1986. Zasady obliczania maksymalnych przepływów prawdopodobnych. Prace Instytutu Badawczego Dróg i Mostów. Nr 3–4 s. 91–147.
- SZYMCZAK T. 2000. Zmienność obszarowa opadów atmosferycznych a modelowanie procesów hydrologicznych. W: Modelowanie matematyczne w strategii gospodarowania środowiskiem. III Forum Inżynierii Ekologicznej. Pr. zbior. Red. I. Wiatr, H. Marczak. Nałęczów. Wydaw. Ekoinżynieria s. 176–182.
- SZYMCZAK T. 2001. Analiza struktury opadów o dużej wydajności na podstawie wyników badań w małych zlewniach nizinnych. W: Dynamika obiegu wody w zlewniach rzecznych. Pr. zbior. Red. J. Jaworski, J. Szkutnicki. Warszawa. IMGW s. 93–100.

Katarzyna KRĘŻAŁEK, Tomasz SZYMCZAK, Bogdan BĄK

**THE ANNUAL MAXIMUM DAILY RAINFALL
WITH DIFFERENT PROBABILITIES OF EXCEEDANCE IN CENTRAL POLAND
BASED ON DATA FROM THE MULTIANNUAL PERIOD 1966–2010**

Key words: *annual maximum daily rainfall, isohyets, probability distribution, probability of exceedance*

S u m m a r y

The aim of the study was to determine the values of selected quantiles of probability distribution of annual maximum daily rainfall in the area of central Poland, and their variability. The material for the study consists of measurement data from the multiannual period 1966–2010 gathered by 29 weather stations. Four types of probability distribution functions have been selected to be possibly used as mathematical models of random properties of annual maximum daily rainfall: Weibull, log-gamma, gamma and log-normal. The parameters of probability distributions were estimated using the maximum likelihood method, and the best fitting probability distribution was selected for each station separately using the Akaike criterion. The results are presented in the form of a table of annual maximum daily rainfall with probabilities of exceedance $p = 1\%$, $p = 10\%$, $p = 50\%$ for the analyzed weather stations, and graphically in the form of precipitation fields and isohyetal maps drawn for the above probabilities. A modified Shepard interpolation method was used for the development of zonal distribution of precipitation amounts. The biggest zonal variability characterized the maximum daily rainfall with probability of exceedance $p = 1\%$, whose totals varied from 60.2 mm to 106.8 mm.

Adres do korespondencji: mgr inż. K. Krężałek, Instytut Technologiczno-Przyrodniczy w Falentach, Zakład Zasobów Wodnych, al. Hrabka 3, 05-090 Raszyn; tel. + 48 22 73-57-557, e-mail: K.Krezalek@itp.edu.pl