

Paweł Licznar, Ewa Burszta-Adamiak, Andrzej Kotowski,
Katarzyna Siekanowicz-Grochowina, Michał Oktawiec

Empiryczna weryfikacja modelu Bogdanowicz-Stachy do obliczania wartości natężenia deszczu miarodajnego

Aby zapewnić odpowiedni poziom bezpieczeństwa funkcjonowania systemów odwadniania terenów zurbanizowanych niezbędna jest wiarygodna i aktualna wiedza na temat zdarzeń opadowych [1]. Występowanie w Polsce serii lat mokrych i suchych pociąga za sobą konieczność korzystania z długich ciągów obserwacyjnych. Za niezbędne minimum uznaje się 30 lat ciągłych pomiarów [2]. Dane o opadach są podstawą wyznaczenia natężenia deszczu miarodajnego, branego pod uwagę między innymi na etapie projektowania, rozbudowy czy modernizacji systemów kanalizacji ogólnospławnej i deszczowej, w tym obliczenia objętości zbiorników retencyjnych i innych urządzeń do zagospodarowania wód opadowych w ramach lokalnej infiltracji i retencji [3, 4]. Dotychczas w większości projektów systemów odwadniania miast wyznaczenie wartości natężenia deszczu miarodajnego odbywało się na podstawie krzywych IDF (intensity duration frequency), względnie DDF (depth duration frequency), utworzonych na podstawie statystycznie opracowanych danych o opadach na terenie całego kraju lub regionów [5, 6]. Przykładem takiej formuły był model prof. Waława Błaszczyka z 1954 r. z uwzględnieniem dyskusyjnej teorii Gorbaczewa, opracowany na potrzeby Warszawy, a następnie adaptowany do stosowania na terenie całego kraju. Niedawno opublikowane wyniki badań [7] wykluczają stosowanie formuły Błaszczyka do wymiarowania systemów odwadniania, jako modelu istotnie zaniżającego natężenie deszczu miarodajnego, co stoi w sprzeczności z wymogami bezpieczeństwa projektowanych rozwiązań technicznych. W świadomości wielu inżynierów sanitarnych alternatywą względem przestarzałego modelu Błaszczyka jawi się probabilistyczny model opadów maksymalnych Bogdanowicz-Stachy [8]. Model ten ma rodowód ściśle powiązany z klasyczną hydrologią i zagadnieniem modeli typu opad-odpływ, stosowanych do prognozowania wzebrań powodziowych, w małych niekontrolowanych zlewniach. Jest on zalecany do stosowania między innymi w wytycznych Stowarzyszenia Hydrologów Polskich. Znane są także zastosowania tego modelu do opracowywania scenariuszy opadowych, wykorzystywanych w modelowaniu

hydrodynamicznym systemów kanalizacji deszczowej [4], czy wymiarowania zbiorników infiltracyjnych. Spotyka się też zalecenia jego stosowania do wyznaczenia natężenia opadu obliczeniowego lub kontrolnego przy częstotliwości $C \geq 2$ lata, do projektowania miejskich sieci kanalizacji deszczowej na terenie niektórych miast i gmin.

Model opadów maksymalnych Bogdanowicz-Stachy [8] został opracowany na podstawie zbioru obserwacyjnego z 31 lat (1960–1990), obejmującego pomiary z dwudziestu stacji IMGW-PIB. Dane te dotyczyły serii największych rocznych opadów zarejestrowanych w danym roku, w czasie od kwietnia do października, przez niestosowane już dzisiaj pluwiografy pływakowe. Z zapisów pluwiograficznych wyszukano maksymalne fazowe wysokości deszczów odpowiadające czterem czasom trwania, w przedziale od 5 minut do 72 godzin. Zastosowano przy tym prostą metodę wyznaczania maksimum rocznych AMS (annual maximum series), ustalając po jednym maksimum w każdym roku. Taką analizą objęto zbiór jedynie 20 stacji reprezentujących cztery pasy – nadmorski, pojezierny, nizinny i wyżynny. W efekcie analizy otrzymanych szeregów rozdzielczych maksimum rocznych zdecydowano o arbitralnym wydzieleniu trzech regionów opadowych o odmiennej charakterystyce deszczów, z wyłączeniem obszarów podgórskich i górskich (Sudety i Karpaty), nieobjętych tym modelem (tab. 1, rys. 1).

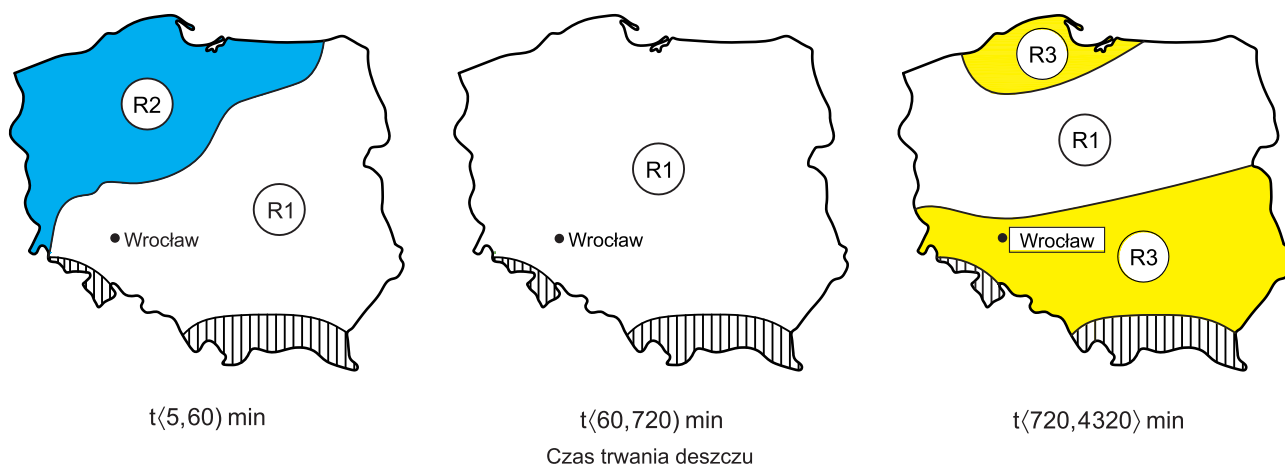
Tabela 1. Regiony największych rocznych opadów w modelu Bogdanowicz-Stachy (opracowanie własne na podstawie [8])

Table 1. Maximum precipitation regions according to Bogdanowicz-Stachy's model (own work based on [8])

Region	Czas trwania opadu	Charakter opadu
Północno-zachodni, pojezierny (R2)	$5 \text{ min} \leq t < 1 \text{ h}$	krótkotrwały, najczęściej pochodzenia burzowego, o stosunkowo małej wysokości
Centralny (R1)	$5 \text{ min} \leq t < 1 \text{ h}$	o zmiennym czasie trwania i zasięgu
	$1 \text{ h} \leq t < 12 \text{ h}$	
	$12 \text{ h} \leq t \leq 72 \text{ h}$	
Południowy, wyżynny i nadmorski (R3)	$12 \text{ h} \leq t \leq 72 \text{ h}$	długotrwały, najczęściej o charakterze rozlewnym, o dużej sumie w półroczu letnim oraz dużej wysokości dobowej

Dr hab. inż. P. Licznar, prof. dr hab. inż. A. Kotowski, mgr inż. K. Siekanowicz-Grochowina, mgr inż. M. Oktawiec: Politechnika Wrocławska, Wydział Inżynierii Środowiska, Katedra Wodociągów i Kanalizacji, Wybrzeże Stanisława Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
pawel.licznar@pwr.edu.pl

Dr hab. inż. E. Burszta-Adamiak: Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Wydział Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji, Zakład Infrastruktury i Techniki Sanitarnej, pl. Grunwaldzki 24, 50-363 Wrocław



Rys. 1. Regiony opadów maksymalnych w Polsce (R1 – centralny, R2 – północno-zachodni, pojezierny, R3 – południowy, wyżynny i nadmorski) [8] (cytowany w pracy [4])

Fig. 1. Maximum precipitation regions (R1 – central, R2 – northwest, lake district, R3 – southern, highland and coastal) [8] (cited in [4])

Po dopasowaniu do empirycznie wyznaczonych szeregów rozdzielczych typu DDF rozkładu prawdopodobieństwa Weibulla, zaproponowano ostatecznie schemat obliczeniowy do wyznaczania maksymalnej wysokości opadu $P_{maks}(t, p)$ o czasie trwania t (min) i o prawdopodobieństwie przewyższenia p (jako ułamek), oparty na ogólnym wzorze [8]:

$$P_{maks}(t, p) = \varepsilon(t) + \alpha(R, t)(-\ln p)^{0,584} \quad (1)$$

w którym:

$\varepsilon(t)$ – parametr położenia (mm), zależny wyłącznie od czasu (t), wyznaczany we wszystkich regionach opadowych ($p=1$) z jednego wzoru:

$$\varepsilon(t) = 1,42t^{0,33} \quad (2)$$

$\alpha(R, t)$ – parametr skali, zależny od regionu Polski i czasu trwania t (w regionie centralnym Polski R1 – rys. 1), w przypadku opadów krótkotrwałych o $t \in \langle 5; 60 \rangle$ min i prawdopodobieństwie przewyższenia $p < 1$, parametr α obliczany jest ze wzoru [8]:

$$\alpha(R, t) = 4,693 \ln(t+1) - 1,249 \quad (3)$$

a w regionie północno-zachodnim (R2), przy $t \in \langle 5; 30 \rangle$ min ze wzoru:

$$\alpha(R, t) = 3,92 \ln(t+1) - 1,662 \quad (4)$$

Przy praktycznym stosowaniu modelu (1) pewne problemy stwarza wyznaczanie parametru skali (α), który jest opisywany różnymi wzorami, zależnie od regionu i analizowanego czasu. Zamieszczone w monografii [8] mapy (rys. 1) z podziałem na regiony opadowe mają jedynie charakter poglądowy. W efekcie na obszarze zlewni zlokalizowanej na przykład na pograniczu dwóch regionów trudno jest ustalić realną wartość parametru α , bowiem na granicy regionów dochodzi do skokowej zmiany wysokości opadu miarodajnego. Bardziej wnikliwe analizy przeprowadzone na podstawie danych ze stacji opadowych we Wrocławiu wykazały także wyraźną tendencję modelu Bogdanowicz-Stachy do zaniżania wartości natężenia deszczu miarodajnego przy częstotliwości $C=1$ rok oraz $C=2$ lata [4].

Wymienione przesłanki skłaniają do kompleksowej oceny modelu Bogdanowicz-Stachy – konieczna staje się odpowiedź na zasadnicze pytanie: na ile stosowanie tego

modelu może być akceptowalne z punktu widzenia bezpieczeństwa projektowania systemów odwadniania terenów zurbanizowanych w Polsce? Mając to na uwadze, celem podjętych badań była empiryczna weryfikacja, czy struktura modelu oparta na idei regionalizacji jest poprawna i czy estymaty wysokości opadów miarodajnych z modelu opracowanego na podstawie obserwacji sprzed ćwierć wieku odpowiadają obecnym warunkom opadowym w kraju.

Materiał i metody

Materiałem wyjściowym wykorzystanym do analiz były szeregi czasowe wysokości opadów z wielolecia 1986–2015 (30 lat obserwacji) o wysokiej rozdzielczości czasowej (1 min), zebrane w cyfrowej bazie danych Rain-Brain, która została opracowana w ramach realizacji projektu pod tytułem „Opracowanie i wdrożenie Polskiego Atlasu Natężeń Deszczów (PANDA)”. Atlas ten ma docelowo stanowić źródło aktualnych i wiarygodnych informacji o natężeniach deszczów miarodajnych do projektowania oraz modelowania systemów odprowadzania i retencjonowania wód opadowych w Polsce. Szeregi opadowe zarejestrowano na sieci 100 deszczomierzy na stacjach meteorologicznych należących do IMGW-PIB na terenie całego kraju, z użyciem deszczomierzy spełniających obowiązujące standardy pomiarowe i lokalizacyjne. Baza PANDA w całości była już wykorzystywana do ogólnopolskiej weryfikacji formuły Błaszczyka [7]. Do bezpośredniej weryfikacji modelu Bogdanowicz-Stachy wykorzystano jedynie część bazy, a mianowicie dane opadowe z 79 stacji, zlokalizowanych w zasięgu trzech regionów opadowych podanych w tabeli 1 i na rysunku 1. Pozostałe 21 stacji znajdowało się na obszarze górskim bądź podgórskim – poza zasięgiem modelu Bogdanowicz-Stachy.

Z cyfrowych szeregów czasowych dokonano wyboru maksymalnych fazowych natężeń deszczów za pomocą metody przewyższeń – POT (peak over threshold), która jest zalecana w hydrologii miejskiej, jako bezpieczniejsza od metody AMS, gdyż prowadzi do uzyskania szeregów rozdzielczych bezwzględnie najwyższych maksimum opadów [9]. Zastosowanie metody POT polegało na wyznaczeniu ciągu 30 maksymalnych opadów (o maksymalnym natężeniu fazowym), przekraczających pewien ustalony

poziom (próg), odpowiadający opadowi o częstości $C=1$ rok ($p=1=100\%$). Szczegółowe wyniki badań nad progowym poziomem wysokości opadów w projekcie PANDa zawiera publikacja [10]. Wyznaczanie maksymalnych fazowych natężeń deszczów metodą POT przeprowadzono przyjmując następującą hierarchię czasów trwania (16 faz deszczu) – 5 min, 10 min, 15 min, 30 min, 45 min, 60 min, 90 min, 120 min, 180 min, 360 min, 720 min, 1080 min, 1440 min, 2160 min, 2880 min oraz 4320 min (3 d). Oprócz wyznaczonych maksymalnych wartości wysokości, względnie natężeń jednostkowych deszczów, w cyfrowej bazie PANDa w aplikacji RainBrain zapisano także terminy ich występowania, co było przydatne na kolejnym etapie ich weryfikacji.

Cechą wyróżniającą projekt PANDa od wcześniejszych analiz natężeń deszczów miarodajnych w Polsce jest silny nacisk położony na weryfikację wyznaczonych maksymalnych fazowych natężeń deszczów. Kompleksowa weryfikacja i kontrola jakości QA (quality assurance) wyznaczonych maksimów w projekcie PANDa została przeprowadzona z wykorzystaniem trzech dodatkowych źródeł danych o opadach atmosferycznych i informacji opisowych o warunkach do ich występowania w Polsce, dostępnych w IMGW-PIB, to jest dobowych sum opadów archiwizowanych w Centralnej Bazie Danych Historycznych (CBDH), zapisów synoptycznych oraz rejestracji z sieci radarowej POLRAD.

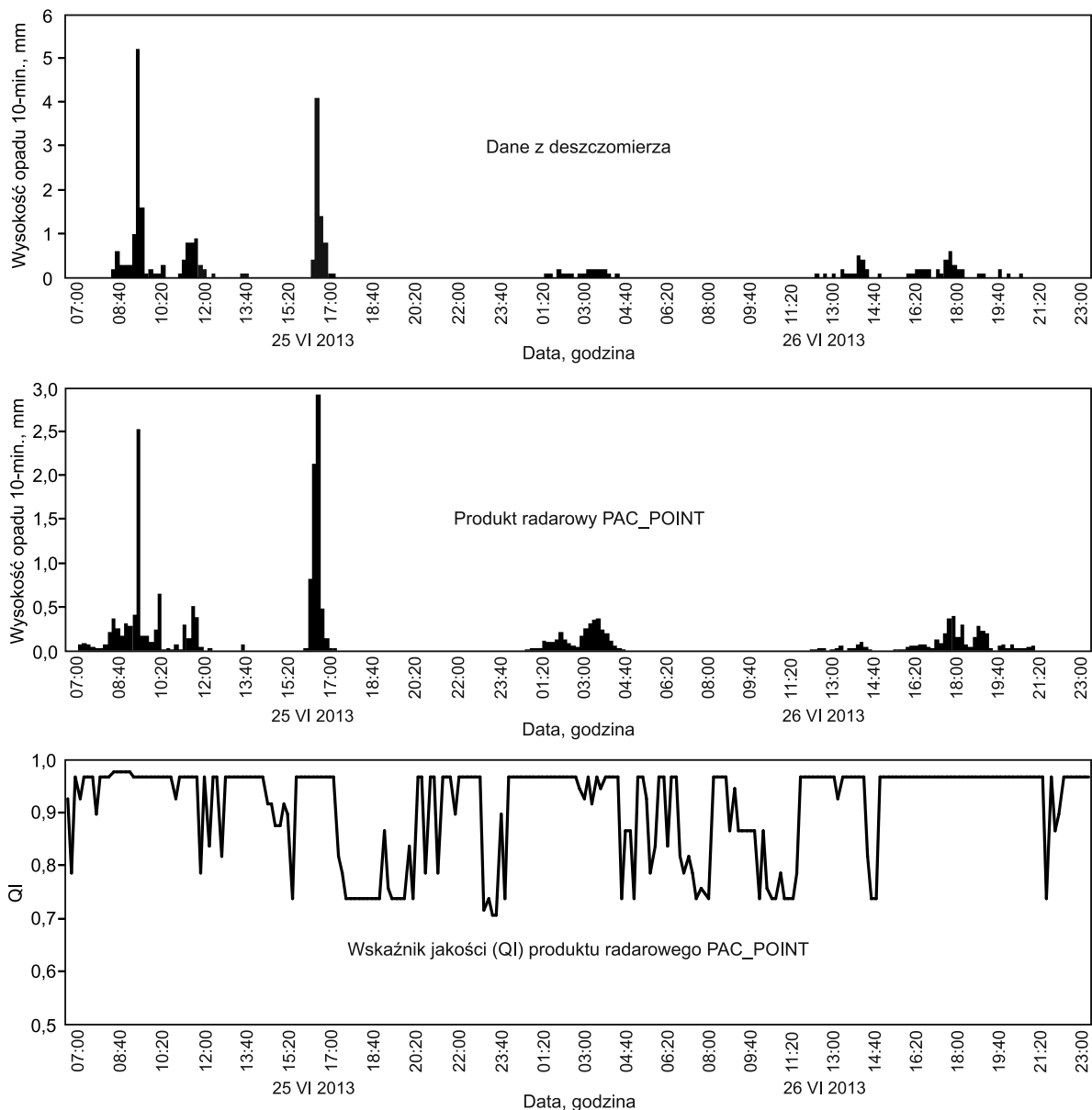
Pierwszy etap weryfikacji maksimów opadowych przeprowadzono z wykorzystaniem dobowych sum opadów (archiwizowanych w CBDH). Sumy dobowe opadów pochodziły z odczytów z niezależnych deszczomierzy Helmana lub z deszczomierzy automatycznych, lecz po wieloetapowej weryfikacji. Fazowe wysokości opadów maksymalnych zostały porównywane z wysokościami opadów dobowych w dniach ich wystąpienia. W ten sposób potwierdzono, czy w analizowanym dniu opady rzeczywiście wystąpiły, a także sprawdzono, czy maksima fazowe opadów nie przewyższyły odpowiadających im sum dobowych wysokości opadów. Drugą – w pełni niezależną – metodą weryfikacji występowania zidentyfikowanych

wysokości maksymalnych opadów krótkotrwałych było skonfrontowanie terminów ich występowania z archiwalnymi zapisami synoptycznymi. Celem tego zabiegu było potwierdzenie możliwości wystąpienia poszczególnych epizodów opadowych na podstawie sytuacji synoptycznej. Z uwagi na bardzo dużą pracochłonność tej metody, weryfikacji poddawano pierwsze sześć wartości maksymalnych wysokości opadów (w przypadku każdej z 16 analizowanych faz) na poszczególnych stacjach. Wartości te określały strukturę modeli opadowych przy małych wartościach prawdopodobieństwa ($p \leq 20\%$), szczególnie istotnych w hydrologii miejskiej. Fragment otrzymanego raportu w ramach weryfikacji synoptycznej przykładowego deszczomierza przedstawiono w tabeli 2.

Trzecią niezależną metodą weryfikacji szeregów rozdzielczych obliczonych wysokości maksymalnych opadów krótkotrwałych było wykorzystanie danych radarowych z sieci POLRAD. Inspiracją do praktycznego wykorzystania danych radarowych do weryfikacji danych z sieci przyrządów naziemnych stały się podejmowane w ostatnich latach krajowe badania nad możliwością kalibracji sygnałów radarowych [11] i ich skorelowaniem z zapisami z deszczomierzy w wysokiej rozdzielczości czasowej [12]. Na potrzeby projektu PANDa przetworzono dostępne dane radarowe z wielolecia 2007–2015 do docelowych produktów, takich jak SRI (surface rainfall intensity) oraz PAC (precipitation accumulation), będących estymatami odpowiednio natężeń chwilowych i wysokości sum opadów w 10-minutowych przedziałach czasu. Oba produkty opisano przy tym niezależnym wskaźnikiem jakości QI (quality index), który charakteryzuje jakość bezwymiarowo, w skali od 0 (dane całkowicie błędne) do 1 (dane idealne) [13]. Produkty SRI oraz PAC eksportowano do założonych lokalizacji deszczomierzy, tworząc 10-minutowe szeregi czasowe, dołączane następnie do zasobów bazy RainBrain. Wycinki szeregów czasowych estymat radarowych porównano następnie z odpowiadającymi wycinkami szeregów czasowych rejestracji z deszczomierzy, w odniesieniu do wydzielonych maksimów fazowych (rys. 2).

Tabela 2. Wycinek raportu z weryfikacji synoptycznej deszczomierza w Częstochowie
Table 2. Part of the synoptic verification report for the rain gauge located in Czestochowa, Poland

Data, wysokość i czas trwania deszczu	Sytuacja synoptyczna		Geneza opadu		Źródło danych
	według dolnych map synoptycznych	według górnych map synoptycznych	ze względu na sytuację synoptyczną	ze względu na stratyfikację atmosfery	
29-07-2006 37,10 mm 90 min	obszar obniżonego ciśnienia; stacjonarny front od Pomorza po południowo-wschodnią Polskę; na wschód od niego sucha masa powietrza polarno-kontynentalnego; znad wschodnich Niemiec nasuwająca się nad Polskę strefa konwergencji lub front chłodny, oddzielający masy powietrza polarno-morskiego: cieplejszą nad zachodnią Polską i nieco chłodniejszą, napływającą znad zachodniej Europy	ciśnienie 500 hPa; zatoka rozciągająca się od południowej Skandynawii po Alpy przemieszczała się nad Polskę; nad Polską kilka stref ruchów wstępujących; ciśnienie 300 hPa: przednia część płytkiej zatoki (krótka fala), która mogła powodować adwekcję wirowości cyklonalnej nad Polską i dywergencję	frontalny	konwekcyjny (burza)	Climate Forecast System (CFS) wetter3.de/Archiv; http://www.wetterzentrale.de/reanalysis.php; http://weather.uwo.edu/upperair/sounding.html; dane satelitarne, archiwum IMGW-PIB
13-07-2008 22,20 mm 30 min	pofalowany front chłodny, rozciągający się od północno-zachodniej Rosji przez Polskę po Alpy; zafalowanie przemieszczało się znad Moraw nad Suwalszczyznę; powietrze zwrotnikowe przed frontem; powietrze polarno-morskie za frontem	ciśnienie 500 hPa i 300 hPa; przednia część zatoki rozciąga się od Skandynawii po Francję; nad Czechami i Słowacją płytka zatoka wtórna 500 hPa, wzmagająca ruchy wstępujące w strefie frontu	frontalny	konwekcyjny (burza)	



Rys. 2. Przykładowe szeregi czasowe deszczów w rejonie Gdańsk-Port Północ
 Fig. 2. Exemplary rainfall time series recorded for the Gdansk-Port Północ region

Po zakończonym procesie weryfikacji i kontroli jakości QA przystąpiono do zasadniczego porównania wyznaczonych empirycznie wartości natężeń deszczu miarodajnego z ich estymatami według modelu Bogdanowicz-Stachy. Porównanie to przeprowadzono z uwzględnieniem standardowo stosowanych w projektowaniu systemów kanalizacyjnych wartości prawdopodobieństwa przewyższenia – 10%, 20%, 50% i 100%. Prawdopodobieństwom tym przyporządkowano odpowiednie wartości z obserwacyjnych szeregów rozdzielczych, według zależności [4]:

$$p(m, N) = m/(N+1) \quad (5)$$

w której:

m – miejsce danego wyrazu w ciągu rozdzielczym opadów
 N – liczebność ciągu, odpowiadająca liczbie analizowanych lat ($N=30$)

Zgodność wartości natężeń jednostkowych opadów, wyznaczonych w ramach projektu PANDa (q_p) i ich estymat (q_m) z modelu Bogdanowicz-Stachy, poddano ocenie jakościowej z użyciem względnego błędu resztowego (WBR) w postaci [14]:

$$WBR = \frac{\sqrt{n \left(\sum_{i=1}^n (q_{p,i} - q_{m,i})^2 \right)}}{\sum_{i=1}^n q_{p,i}} \quad (6)$$

Do oceny rozbieżności pomiędzy wyznaczonymi lokalnymi natężeniami deszczu miarodajnego a ich oszacowaniami według formuły Bogdanowicz-Stachy, zastosowano wartości pierwiastka błędu średniokwadratowego (RMSE) oraz błędu względnego (Δq) [15]:

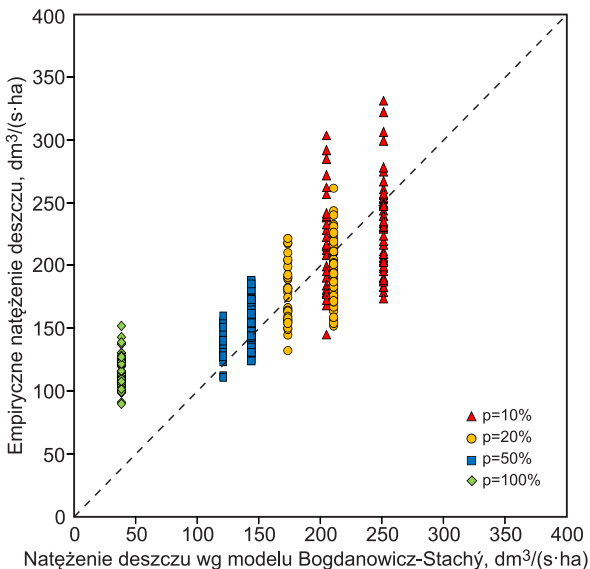
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n (q_{p,i} - q_{m,i})^2 \right)} \quad (7)$$

$$\Delta q = \frac{q_{p,i} - q_{m,i}}{q_{m,i}} 100 \quad (8)$$

We wzorach (6) i (7) n oznacza liczbę danych – porównywanych wzajemnie par wartości.

Dyskusja wyników

Na rysunku 3 przedstawiono porównanie wartości natężenia opadów, przy charakterystycznym czasie trwania 15 min i wartościach prawdopodobieństwa równych 10%, 20%, 50% i 100%, określonych na podstawie obecnych danych opadowych oraz oszacowanych z modelu Bogdanowicz-Stachy z uwzględnieniem 79 analizowanych stacji. Z analizy danych wynika, że występują istotne rozbieżności między rzeczywistymi, wyznaczonymi obecnie, wartościami jednostkowego natężenia deszczu a ich estymatami według modelu historycznego (1).



Rys. 3. Porównanie wyznaczonych wartości natężenia deszczu i oszacowanych modelem Bogdanowicz-Stachy (dane z 79 deszczomierzy, czas trwania deszczu – 15 min)

Fig. 3. Comparison between empirical precipitation intensities and their estimates derived from Bogdanowicz-Stachy's model (79 rain-gauges, rain duration: 15 min)

Występujące na rysunku 3 pogrupowanie danych wynika z przyjętej przez autorów ocenianego modelu (1) arbitralnej regionalizacji opadów. W efekcie przy wartościach prawdopodobieństwa 10%, 20% i 50% natężenia deszczu miarodajnego o czasie trwania 15 min mogą przyjmować tylko dwie dyskretne wartości – wyższe w regionie R1 i niższe w regionie R2, natomiast w przypadku prawdopodobieństwa 100% we wszystkich 79 stacjach pomiarowych jest to tylko jedna wartość. Pozostaje to w sprzeczności z naturalną zmiennością miarodajnych natężeń deszczów 15-minutowych rejestrowanych w poszczególnych stacjach opadowych, znajdującą odbicie w danych empirycznych z bazy PANDa. Obserwacja ta, zilustrowana na rysunku 3 w przypadku czasu równego 15 min, dotyczy także innych czasów trwania opadów. Należy podkreślić, że dyskretne wartości natężenia deszczu miarodajnego według modelu Bogdanowicz-Stachy różniły się znacząco w poszczególnych regionach, budząc poważne wątpliwości co do wiarygodności stosowania tego modelu w zlewniach położonych na pograniczu regionów. Ze szczegółowej analizy danych liczbowych dotyczących czasu trwania opadu 15 min wynika, że wraz ze wzrostem wartości prawdopodobieństwa wzrasta liczba stacji, w których wyznaczone w ramach projektu PANDa obecne natężenia opadów były wyższe od estymowanych z modelu opadów maksymalnych Bogdanowicz-Stachy. W przypadku $p=10\%$ i 20% udział takich stacji stanowił odpowiednio 38% i 37% , przy $p=50\%$ był

prawie dwukrotnie większy – 75% , a przy $p=100\%$ obliczone natężenia opadów z lat 1986–2015 były wyższe we wszystkich stacjach, w porównaniu z wartościami obliczonymi z modelu (1).

Rozszerzając analizę do wszystkich 16 przedziałów czasu (od 5 min do 4320 min) można stwierdzić, że spośród 21 z 79 analizowanych stacji (26%) wartości natężeń deszczu miarodajnego według projektu PANDa były wyższe przy wszystkich wartościach prawdopodobieństwa od wyznaczonych z modelu (1). W uśrednionym zbiorze wszystkich analizowanych stacji, obliczone natężenia opadów z użyciem modelu Bogdanowicz-Stachy uzyskały wartości zbliżone do projektu PANDa w przypadku opadów o prawdopodobieństwie 20% i czasie trwania od 720 min do 3 d, gdzie średni błąd względny (Δq) wynosił $<1\%$, a także w przypadku opadów o prawdopodobieństwie 10% i czasie trwania 30 min, gdzie średni błąd względny był jeszcze mniejszy i wynosił $0,2\%$. Największe rozbieżności między empirycznie wyznaczonymi wartościami natężeń a ich estymatami obliczonymi z modelu Bogdanowicz-Stachy zaobserwowano przy czasie do 180 min i wartościach prawdopodobieństwa 10% i 20% , gdzie estymaty modelu (1) przewyższały rzeczywiste natężenia deszczów. Przy $p=100\%$ i wszystkich wartościach czasu trwania deszczów, wartości natężeń fazowych uzyskane z modelu Bogdanowicz-Stachy, w porównaniu z wartościami empirycznymi na podstawie danych pomiarowych ze zbioru 79 deszczomierzy z lat 1986–2015, były zdecydowanie zaniżone (rys. 4). Stwierdzone duże różnice (sięgające 200%) wartości natężeń deszczów pojawiających się raz w roku ($p=100\%$) były bezpośrednim następstwem błędnych założeń przyjętych w modelu Bogdanowicz-Stachy [8]. Autorzy tej formuły szeregowali bowiem nierosnąco wybrane – po jednym z każdego roku obserwacji (1960–1990) – maksymalne wysokości opadów w przedziałach od 5 min do 4320 min, oddzielnie z każdej z analizowanych 20 stacji pomiarowych i przyjęli *a priori* najmniejsze wartości spośród maksymalnych rocznych za odpowiadające częstotliwości występowania $C=1$ rok ($p=100\%$). Wobec faktu występowania w przyrodzie serii lat suchych i mokrych, taka metoda współcześnie nie może być akceptowana [4].

Duże rozbieżności pomiędzy empirycznie wyznaczonymi wartościami natężenia deszczów a obliczonymi z modelu (1) potwierdzają wartości błędów względnego (WBR) i pierwiastka błędu średniokwadratowego (RMSE) (tab. 3). Średnia wartość WBR określona w całym zakresie czasu trwania opadów wynosiła $19,4\%$ w przypadku opadów o $p=10\%$, $17,3\%$ przy $p=20\%$ oraz $13,5\%$ przy $p=50\%$. W skali oceny jakości dopasowania modeli przedstawionej w monografii [16], obliczone wartości WBR odpowiadały przeciętnemu poziomowi dopasowania modelu (1) do wartości empirycznych. Największe wartości błędów WBR (średnio $60,9\%$) stwierdzono w przypadku prawdopodobieństwa 100% i wówczas poziom dopasowania modelu (1) był już niezadowalający. Podobnie w przypadku opadów o $p=100\%$ i wszystkich wartości czasu trwania opadów stwierdzono największe wartości błędów RMSE, wskazujące na znaczne różnice pomiędzy lokalnymi natężeniami opadów miarodajnych a ich estymatami według modelu Bogdanowicz-Stachy (tab. 3).

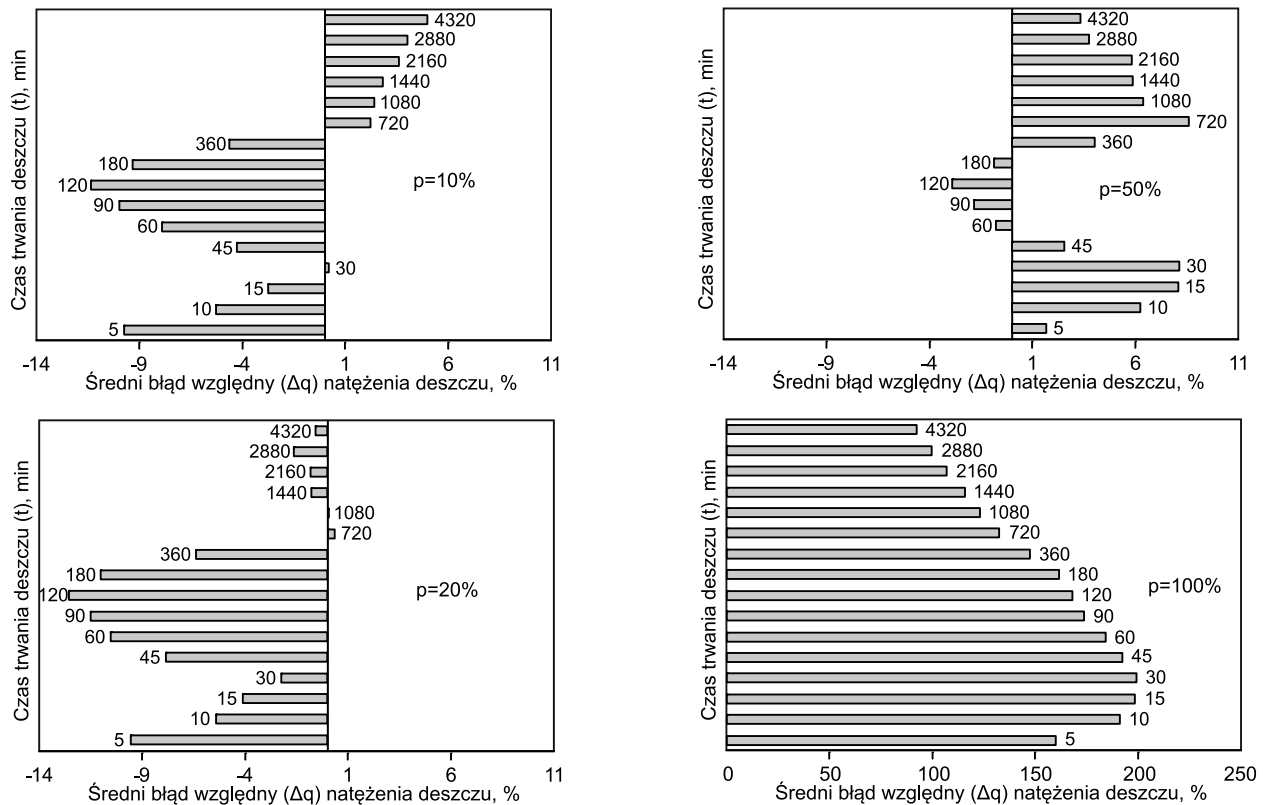
Wartości błędów względnego (Δq) wartości natężenia deszczów wyznaczonych empirycznie i z modelu (1) wynosiły średnio około $3,6\%$ ($p=50\%$) i aż 152% ($p=100\%$) w przypadku wszystkich czasów trwania (od 5 min do 3 d). W przypadku $p=10\%$ i $p=20\%$ średnie wartości tego błęd

Tabela 3. Wartości względnego błędzi resztowego (WBR) oraz pierwiastka błędzi średniokwadratowego (RMSE) empirycznie wyznaczonego wartości natężenia deszczu i ich oszacowań modelem Bogdanowicz-Stachy (zbiór 79 deszczomierzy)
 Table 3. Relative residual error (WBR) and root-mean-square error (RMSE) values for empirical rainfall intensities and their estimates based on Bogdanowicz-Stachy's model (79 rain gauges)

Czas trwania deszczu (t), min	WBR, %				RMSE, dm ³ /(s·ha)			
	p=10%	p=20%	p=50%	p=100%	p=10%	p=20%	p=50%	p=100%
5	26,6	22,4	15,9	62,5	102,9	73,8	40,9	130,9
10	20,2	17,0	12,4	66,4	56,8	40,4	22,9	97,9
15	18,5	14,7	12,5	67,3	41,9	27,6	18,2	77,5
30	16,6	14,5	12,7	67,4	24,5	17,7	11,8	48,9
45	16,6	16,2	11,3	66,7	18,5	14,7	7,8	36,0
60	18,1	18,4	11,4	65,8	16,1	13,4	6,3	28,5
90	19,3	19,4	11,5	64,4	12,5	10,4	4,7	20,5
120	19,9	19,2	11,9	63,5	10,2	8,2	3,9	16,3
180	19,0	17,7	10,7	62,6	7,0	5,4	2,5	11,9
360	16,6	14,9	13,2	60,7	3,5	2,7	1,8	6,9
720	16,7	16,0	16,2	58,4	2,1	1,7	1,3	3,9
1080	17,0	17,1	15,0	56,9	1,6	1,4	0,9	2,8
1440	19,4	17,4	15,2	55,4	1,5	1,1	0,7	2,2
2160	21,0	17,4	15,5	53,7	1,2	0,8	0,6	1,5
2880	22,8	16,6	15,1	52,0	1,1	0,6	0,4	1,2
4320	22,6	17,7	15,0	50,0	0,8	0,5	0,3	0,8

Tabela 4. Minimalne i maksymalne wartości błędzi względnego (Δq) empirycznie wyznaczonego wartości natężenia deszczu i ich oszacowań modelem Bogdanowicz-Stachy (zbiór 79 deszczomierzy)
 Table 4. Minimum and maximum values of relative error (Δq) for empirical rainfall intensities and their estimates based on Bogdanowicz-Stachy's model (79 rain gauges)

Czas trwania deszczu (t), min	Δq , %							
	p=10%		p=20%		p=50%		p=100%	
	minimum	maksimum	minimum	maksimum	minimum	maksimum	minimum	maksimum
5	-47,72	45,74	-41,87	52,51	-29,83	64,08	105,16	226,63
10	-32,19	54,84	-32,90	39,48	-15,72	40,96	127,28	279,60
15	-30,57	48,47	-27,90	27,99	-13,84	32,07	133,39	294,09
30	-29,97	48,49	-31,04	27,37	-14,90	36,88	133,39	312,60
45	-29,96	34,91	-30,38	25,26	-23,24	27,67	130,66	292,41
60	-36,53	28,12	-36,39	21,81	-28,14	28,15	125,73	273,83
90	-42,77	30,28	-38,60	19,73	-25,28	29,91	120,13	252,04
120	-38,44	23,49	-37,12	13,51	-26,11	30,35	117,61	252,52
180	-31,87	37,26	-28,27	16,67	-24,98	25,97	113,19	233,75
360	-33,03	32,68	-26,13	34,12	-23,50	44,93	95,61	240,36
720	-32,62	42,53	-23,61	49,10	-14,46	58,47	87,70	229,43
1080	-30,26	46,25	-24,67	47,46	-12,87	59,99	74,97	215,42
1440	-30,67	69,89	-29,67	53,09	-15,07	59,28	64,51	218,06
2160	-29,37	60,03	-28,22	58,25	-20,32	52,41	56,70	218,11
2880	-34,70	65,61	-33,57	60,27	-20,69	54,87	50,93	205,51
4320	-35,91	73,56	-31,80	50,09	-26,43	65,30	47,71	197,53



Rys. 4. Średnie wartości błędu względnego (Δq) empirycznie wyznaczonych natężeń deszczów i ich oszacowań modelem Bogdanowicz-Stachy (dane z 79 deszczomierzy)

Fig. 4. Average values of relative error (Δq) for empirical rainfall intensities and their estimates derived from Bogdanowicz-Stachy's model (79 rain gauges)

mieściły się w zakresie od $-11,3\%$ do $5,0\%$ ($p=10\%$) oraz od $-12,5\%$ do $0,3\%$ ($p=20\%$), przy czym maksymalna wartość błędu względnego sięgała aż $312,6\%$ ($t=30$ min, $p=100\%$). Wszystkie obliczone wartości błędu względnego zestawiono w tabeli 4.

Podsumowanie

Sporządzenie w ramach projektu PANDa cyfrowej bazy opadów w wysokiej rozdzielczości (1 min), dotyczącej 100 stacji pomiarowych w Polsce z 30-lecia 1986–2015, pozwala na odwzorowanie zmienności wartości natężenia deszczu miarodajnego na obszarze całego kraju. Empirycznie wyznaczone metodą POT wartości natężenia deszczu miarodajnego, przy czasie trwania w przedziale od 5 min do 4320 min, zostały poddane kompleksowej weryfikacji i kontroli jakości QA, z wykorzystaniem niezależnych źródeł danych o opadach atmosferycznych i informacji opisowych o warunkach ich występowania w Polsce, to jest dobowych sum opadów z CBDH, zapisów synoptycznych oraz rejestracji z sieci radarowej POLRAD. Pozytywnie zweryfikowane empiryczne wartości natężenia deszczu miarodajnego przy czterech charakterystycznych wartościach prawdopodobieństwa (10%, 20%, 50% i 100%), stosowanych w projektowaniu i modelowaniu systemów odwadniania terenów zurbanizowanych, zostały wykorzystane do weryfikacji poprawności modelu opadów maksymalnych Bogdanowicz-Stachy. Z uwagi na ograniczenia zasięgu tego modelu, do jego weryfikacji wykorzystano 79 stacji zlokalizowanych poza obszarami podgóorskimi i górskimi Polski. Na podstawie przeprowadzonej kompleksowej analizy można sformułować następujące uogólnienia:

- ♦ struktura modelu opadów maksymalnych Bogdanowicz-Stachy, oparta na arbitralnej regionalizacji obszaru kraju na trzy regiony opadowe o stałych wartościach natężenia deszczu miarodajnego, jest sprzeczna z dużym, naturalnym zróżnicowaniem rzeczywistych wartości natężenia deszczu miarodajnego na obszarze całego kraju,

- ♦ oczywistym mankamentem modelu Bogdanowicz-Stachy pozostaje jego ograniczony zasięg terytorialny – z pominięciem obszarów górskich i podgóorskich Sudetów i Karpat, przy czym skokowe zmiany estymat opadów maksymalnych według tego modelu na mało precyzyjnie zdefiniowanej granicy regionów opadowych stawia pod znakiem zapytania wiarygodność jego stosowania na wielu obszarach kraju,

- ♦ ze względu na regionalizację przyjętą w modelu Bogdanowicz-Stachy, przekładającą się bezpośrednio na dyskretyzację estymat natężenia deszczów, nie można mówić o ich korelacji z rzeczywistymi empirycznymi wartościami natężenia deszczów z projektu PANDa; w zbiorze 79 analizowanych stacji opadowych, przy wartościach prawdopodobieństwa równych 10% i 20% i czasie trwania mniejszym bądź równym od 4h, model Bogdanowicz-Stachy wykazywał tendencję do zawyżania rzeczywistych wartości natężenia deszczu miarodajnego, natomiast przy $p=50\%$ i $p=100\%$ model ten wykazywał zdecydowanie odwrotną tendencję – do zaniżania wartości rzeczywistych, zaś przy $p=100\%$ skrajnie je zaniżał ($\Delta q=90\div 200\%$).

Wynika stąd brak możliwości korekty regionalnego modelu opadów maksymalnych Bogdanowicz-Stachy, w związku z czym należy go zastąpić przez lokalne probabilistyczne modele opadowe wykorzystujące nowoczesny warsztat statystyczny, takie jak opracowane na przykład w ramach projektu PANDa.

Pracę zrealizowano w ramach projektu „Opracowanie i wdrożenie Polskiego Atlasu Natężeń Deszczów (PANDa)” – POIR.01.01.01-00-1428/15, dofinansowanego z Funduszy Europejskich w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014–2020, a także w ramach działalności statutowej Wydziału Inżynierii Środowiska Politechniki Wrocławskiej, sfinansowanej ze środków MNiSW.

LITERATURA

1. M. ABDELLATIF, W. ATHERTON, R. M. ALKHADDAR, Y.Z. OSMAN: Quantitative assessment of sewer overflow performance with climate change in northwest England. *Hydrological Sciences Journal* 2015, Vol. 60, No. 4, pp. 636–650.
2. P. LICZNAR: Wymiarowanie zbiorników retencyjnych ścieków deszczowych na podstawie syntetycznych szeregów czasowych opadów deszczu (Stormwater reservoir dimensioning based on synthetic rainfall time series). *Ochrona Środowiska* 2013, vol. 35, nr 2, ss. 27–32.
3. M.-E. JEAN, S. DUCHESNE, G. PELLETIER, M. PLEAU: Selection of rainfall information as input data for the design of combined sewer overflow solutions. *Journal of Hydrology* 2018, Vol. 565, pp. 559–569.
4. A. KOTOWSKI: Podstawy bezpiecznego wymiarowania odwodnień terenów. Sieci kanalizacyjne (t. I). Obiekty specjalne (t. II). Wydawnictwo Seidel-Przywecki, wyd. II, Warszawa 2015.
5. A. BEN-ZVI: Rainfall intensity-duration-frequency relationships derived from large partial duration series. *Journal of Hydrology* 2009, Vol. 367, pp. 104–114.
6. S. C. LIEW, S. V. RAGHAVAN, S.-Y. LIONG: Development of intensity-duration-frequency curves at ungauged sites: Risk management under changing climate. *Geoscience Letters* 2014, Vol. 1, No. 8.
7. P. LICZNAR, K. SIEKANOWICZ-GROCHOWINA, M. OKTAWIEC, A. KOTOWSKI, E. BURSZTA-ADAMIAK: Empiryczna weryfikacja formuły Błaszczyka do obliczania wartości natężenia deszczu miarodajnego (Empirical verification of Błaszczyk's formula for design rainfall intensity calculations). *Ochrona Środowiska* 2018, vol. 40, nr 2, ss. 17–22.
8. E. BOGDANOWICZ, J. STACHY: Maksymalne opady deszczu w Polsce – charakterystyki projektowe. Materiały Badawcze, Seria: Hydrologia i Oceanologia nr 23, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa 1998.
9. A. MAILHOT, S. LACHANCE-CLOUTIER, G. TALBOT, A.C. FAVRE: Regional estimates of intense rainfall based on the Peak-Over-Threshold (POT) approach. *Journal of Hydrology* 2013, Vol. 476, pp. 188–199.
10. E. BURSZTA-ADAMIAK, P. LICZNAR, J. ZALESKI: Criteria for identifying maximum rainfalls determined by the peaks-over-threshold (POT) method under the Polish Atlas of Rainfalls Intensities (PANDa) project. *Meteorology Hydrology and Water Management* 2019, Vol. 7, No. 1, pp. 3–13.
11. P. LICZNAR, W. F. KRAJEWSKI: Precipitation type specific radar reflectivity-rain rate relationships for Warsaw, Poland. *Acta Geophysica* 2016, Vol. 64, No. 5, pp. 1840–1857.
12. B. JAKUBIAK, P. LICZNAR, S.P. MALINOWSKI: Rainfall estimates from radar vs. raingauge measurements. Warsaw case study. *Environment Protection Engineering* 2014, Vol. 40, No. 2, pp. 162–170.
13. T. EINFALT, J. SZTURC, K. OSRÓDKA: The quality index for radar precipitation data: A tower of Babel? *Atmospheric Science Letters* 2010, No. 11, pp. 139–144.
14. A.-G. DOSNE, M. BERGSTRAND, M.O. KARLSSON: A strategy for residual error modeling incorporating scedasticity of variance and distribution shape. *Journal of Pharmacokinetics and Pharmacodynamics* 2016, Vol. 43, No. 2, pp. 137–151.
15. M.A. ALAM, K. EMURA, C. FARNHAM, J. YUAN: Best-fit probability distributions and return periods for maximum monthly rainfall in Bangladesh. *Climate* 2018, Vol. 6, No. 9.
16. M. NOWAKOWSKA, A. KOTOWSKI: Metodyka i zasady modelowania odwodnień terenów zurbanizowanych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2017.

Licznar, P., Burszta-Adamiak, E., Kotowski, A., Siekanowicz-Grochowina, K., Oktawiec, M. Empirical Verification of Bogdanowicz-Stachy's Formula for Design Rainfall Intensity Calculations. *Ochrona Środowiska* 2018, Vol. 40, No. 3, pp. 21–28.

Abstract: Accurate dimensioning of drainage systems requires assumption of reliable design rainfall intensities as a function of its duration and probability of exceeding according to PN-EN 752:2017. Design rainfall intensities are determined by application of an adequate rainfall model that is based on statistical analysis of local precipitation time series recorded at high time resolution and covering a period of last 30 years minimum. Beside application of the obsolete Błaszczyk's formula, the Bogdanowicz-Stachy's probabilistic maximum precipitation model based on 1960–1990 rainfall records from 20 rain gauges (Institute of Meteorology and Water Management) becomes increasingly popular in Poland. However, this model does not support full coverage of the country and is based on the discontinuous regionalization. Evolving climate conditions demand

validation of the model for use throughout the country. This paper presents results of verification of the actual values of rainfall intensities derived from 30-year time series from the period of 1986–2015 for given probabilities of exceeding, in comparison to the estimates delivered by the Bogdanowicz-Stachy's model. The conducted analysis undermines legitimacy of the simple regionalization concept for precipitation in Poland. Moreover, rainfall intensity values calculated by Bogdanowicz-Stachy's model for probabilities of $p=100\%$ and $p=50\%$ are mostly understated and for $p=20\%$ and $p=10\%$ are overstated in comparison to actuals (1986–2015). The results of the research confirm the need to replace Bogdanowicz-Stachy's model with “new generation” local maximum precipitation models developed as part of the PANDa (the Polish Atlas of Rainfall Intensity) atlas, not only to obtain full coverage of the country, but also to make the values of rainfall intensities reliable for design of drainage systems.

Keywords: Meteorological data, precipitation model, Bogdanowicz-Stachy's model, rainfall intensity, IDF and DDF curves, drainage systems, PANDa atlas.