

Paweł Licznar, Katarzyna Siekanowicz-Grochowina

Wykorzystanie disdrometru laserowego do kalibracji obrazów pochodzących z radarów opadowych na przykładzie Warszawy

Doświadczenia praktyczne wynikające z eksploatacji miejskich systemów odwadniania w Polsce wskazują jednoznacznie, że problemy związane z odprowadzaniem wód opadowych dotyczą zwłaszcza największych aglomeracji. Uwarunkowania historyczne sprawiły, że w zdecydowanej większości dużych miast Polski ich centra zostały skanalizowane z wykorzystaniem systemów ogólnospławnych. Współcześnie systemy te są już przeciążone, a pojawiające się coraz częściej ich nadpiętrzenia w sposób wyraźny obniżają komfort życia mieszkańców [1] i, co gorsza, zagrażają wrażliwej infrastrukturze miejskiej, zwłaszcza podziemnej (tunele samochodowe, metro). Problemem, który pojawia się równocześnie jest wzrastająca częstość działania przelewów burzowych, co zagraża jakości wód odbiorników. Uporządkowanie funkcjonowania przelewów burzowych jest obecnie największym wyzwaniem, przed którym stoją eksploatacyjni systemów odwadniania. Czasu do podjęcia skutecznych działań w tym zakresie jest coraz mniej, podczas gdy coraz bardziej przybliża się groźba wysokich kar nakładanych przez Unię Europejską za łamanie zapisów Ramowej Dyrektywy Wodnej, a kary te w przypadku dużych aglomeracji mogą być szczególnie dotkliwe.

Całkowita przebudowa przeciążonych systemów kanalizacji ogólnospławnej w dużych miastach pozostaje (nawet w obliczu wysokich kar finansowych) nierealnym wyzwaniem inwestycyjnym. Podejmuje się co prawda działania inwestycyjne zmierzające do chociaż częściowego rozdzielania systemów ogólnospławnych, jednak nie wpływają one w sposób zasadniczy na poprawę sytuacji. Znacznie większe nadzieje pokłada się w optymalizacji wykorzystania już istniejących systemów, a zwłaszcza ich zdolności retencyjnych. Myśli się przy tym nawet o wdrożeniu docelowo systemów sterowania odpływem wód opadowych w czasie rzeczywistym (RTC – real time control) oraz inwestycjach zwiększających retencję w newralgicznych punktach sieci w postaci dużych zbiorników retencyjnych. Zarówno wprowadzenie systemów RTC, jak i właściwe (probabilistyczne) szacowanie niezbędnej objętości zbiorników retencyjnych pociąga za sobą konieczność wprowadzenia nowego warsztatu opartego na modelowaniu hydrodynamicznym. Konieczne jest także pozyskiwanie coraz bardziej precyzyjnych danych o opadach, aby stanowiły one informację wejściową do systemów RTC oraz samych modeli hydrodynamicznych.

Bez wątplenia – co jest pocieszające – duże miasta w Polsce są liderami we wprowadzaniu do praktyki modelowania hydrodynamicznego oraz lokalnych systemów monitoringu opadów. Dobrymi przykładami są w tym zakresie takie miasta, jak Warszawa i Wrocław, gdzie zostały już zbudowane i skalibrowane modele hydrodynamiczne zasadniczego szkieletu kanałów, a na obszarze miasta działają już rozbudowane sieci nowoczesnych elektronicznych deszczomierzy wagowych, złożone odpowiednio z 25 i 11 przyrządów. Są to bez wątplenia rozwiązania na poziomie europejskim, a podobnej skali sieci monitoringu opadów funkcjonują również w Gdańsku i Łodzi, chociaż autorzy nie dysponują precyzyjną informacją o liczbie deszczomierzy wchodzących w ich skład.

Pomiary z wykorzystaniem sieci deszczomierzowych przyniosły wyraźny postęp w zakresie wiedzy dotyczącej zróżnicowania czasowo-przestrzennego opadów na obszarze dużych miast. Na podstawie danych pomiarowych z terenu Warszawy wykazano, że opady zarejestrowane nawet podczas przejścia pojedynczego frontu opadowego były bardzo zróżnicowane w obrębie analizowanej grupy deszczomierzy. Kształty hietogramów w wielu wypadkach wykazywały duże różnice, nawet w przypadku blisko sąsiadujących deszczomierzy i zwykle nie przystawały do teoretycznego rozkładu deszczu modelowego Eulera typ II. W pracy [3] na podstawie studiów opartych na tym samym zbiorze danych z Warszawy i przy wykorzystaniu techniki analizy generatorów kaskad mikrokanonicznych wykazano ponadto wyraźne zróżnicowanie w dynamice procesów opadowych pomiędzy zasadniczą grupą przyrządów zlokalizowanych w centrum miasta a dwoma deszczomierzami położonymi na jego skraju (lotnisko Okęcie oraz peryferie dzielnicy Wawer). Obserwacje te muszą prowadzić do wniosku, że procesy opadowe na obszarze dużego miasta wykazują dużą dynamikę, nie tylko w skali czasowej, lecz również przestrzennej. Można przy tym postawić tezę, że dynamiki takiej nie da się w przyszłości w pełni zarejestrować w krajowych sieciach deszczomierzowych, nawet zwiększając ich gęstość dwu- lub trzykrotnie.

Krajowe doświadczenia pozostają w zgodzie z badaniami prowadzonymi w innych częściach Europy. Autorzy pracy [4], na podstawie badań przeprowadzanych w warunkach klimatu śródziemnomorskiego na dużych zlewniach miejskich o powierzchni rzędu 1000 ha wykazali, że do prawidłowego zasilania modeli hydrodynamicznych niezbędne są dane opadowe o rozdzielczości około 5 min (w czasie) i 3 km (w przestrzeni). Ich rekomendacje dotyczące mniejszych zlewni o powierzchni rzędu 100 ha

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

były jeszcze bardziej restrykcyjne i wynosiły odpowiednio 3 min i 2 km. Współcześnie dostęp do tego typu danych jest możliwy jedynie dzięki zastosowaniu radarów opadowych, a zwłaszcza precyzyjnych, lokalnych radarów pracujących w pasmie X. Najnowsze badania przeprowadzone w wybranych zlewniach miejskich w Wielkiej Brytanii i Francji, wyposażonych w operacyjne modele hydrodynamiczne, potwierdziły w pełni zasadność zasilania tych modeli danymi o rozdzielczości przestrzennej rzędu setek metrów [5, 6]. Autorzy pracy [5] wskazali przy tym na fakt, że małoskalowa zmienność opadów (<1 km) miała istotny wpływ na wyniki symulacji hydrodynamicznych i powinna być uwzględniana w modelowaniu w sposób probabilistyczny.

Nie może zatem dziwić dosyć powszechne wykorzystanie danych radarowych jako jednego z głównych źródeł zasilania operacyjnych systemów RTC w różnych miastach Europy, czego dowodzi przegląd zawarty w opracowaniu Thames Tunnel Needs Report (Appendix B) [7]. Jednakże częściej wykorzystywane są nadal dane z radarów opadowych pracujących w pasmie C, gdyż praktycznie radary takie pokrywają już prawie całą Europę, a ich sieci są obsługiwane przez wyspecjalizowane służby meteorologiczne. Także w Polsce takie dane mogą być już dziś potencjalnie pozyskiwane przez eksploatatorów miejskich systemów odwadniania z ogólnopolskiego systemu radarów POLRAD, przy czym niezbędne jest w tym celu zapewnienie skutecznych metod kalibracji obrazów radarowych, a więc budowa wiarygodnego warsztatu służącego konwersji rejestrowanych wartości odbiciowości radarowej na odpowiadające im wartości natężeń chwilowych opadów.

Podając argumenty przemawiające za wprowadzaniem technik radarowych do hydrologii miejskiej w Polsce nie można ograniczać się jedynie do aspektów praktycznych. Poszerzenie dostępu do zbiorów danych o przestrzennym rozkładzie opadów pochodzących z radarów jest warunkiem koniecznym rozwoju warsztatu modelowania przestrzennego i czasowo-przestrzennego opadów w kraju. Dowodem może być pierwszy w kraju model przestrzenny (2D) miejskiego pola opadowego Warszawy [8], który powstał na podstawie danych z sieci 25 deszczomierzy warszawskich, jednak przy przyjęciu założenia o występowaniu skalowania przestrzennego opadów. Weryfikacja tego założenia bez dostępu do danych radarowych jest niemożliwa. Całkowicie niemożliwe, bez dostępu do prawidłowo skalibrowanych danych radarowych, jest tym bardziej myślenie o budowie modeli czasowo-przestrzennych pól opadowych (3D – dwa wymiary przestrzenne i dodatkowy wymiar czasu).

Niestety w porównaniu do potrzeb stan krajowej wiedzy w zakresie kalibracji obrazów radarowych jest bardzo skromny. Jak dotąd jedynie autorzy pracy [9] studiowali występowanie korelacji między odbiciowością radarową a natężeniem opadów rejestrowanym przez deszczomierze warszawskie. Autorzy ci wykazali, że zależności między tymi wielkościami nie mają charakteru ścisłego. Obserwowali natomiast wyraźną zgodność rozkładów statystycznych wartości odbiciowości radarowej i natężenia opadów, zwłaszcza w przypadku dłuższych horyzontów czasowych. Występowanie jedynie statystycznych związków pomiędzy odbiciowością radarową i natężeniem opadów autorzy pracy [9] tłumaczyli naturalnym uśrednianiem małoskalowego zróżnicowania procesu opadowego do rozdzielczości użytych w badaniach danych radarowych (rozdzielczość

przestrzenna 2 km × 2 km i czasowa 15 min), podczas gdy natężenia opadów były rejestrowane punktowo z użyciem deszczomierzy o powierzchni wlotowej 200 cm² z rozdzielczością czasową 1 min.

Operacyjne wykorzystanie nawet najwyższej klasy deszczomierzy do kalibracji systemów RTC nie jest więc rozwiązaniem optymalnym. Na ograniczenia wynikające z odmienności prowadzenia obserwacji radarowych i rejestracji naziemnych opadów mogą dodatkowo wpływać problemy z zapewnieniem w praktyce pełnej synchronizacji czasowej obydwu technik pomiarowych. Dlatego konieczne jest poszukiwanie rozwiązań alternatywnych, poprawiających możliwości kalibracji obrazów radarowych, zwłaszcza na potrzeby hydrologii miejskiej. Na podstawie tych przesłanek celem podjętych badań była weryfikacja praktycznej możliwości zastosowania disdrometru laserowego do ustalenia związków między odbiciowością radarową a natężeniem opadów na obszarze miejskiego pola opadowego Warszawy.

Materiał i metoda badań

Materiałem badawczym wykorzystanym w badaniach były wartości natężeń opadów oraz odbiciowości radarowej zarejestrowane przez disdrometr laserowy Parsivel2 firmy OTT. Przyrząd ten został zakupiony w ramach realizacji projektu NCN nr 2011/03/B/ST10/06338 i zainstalowany w grudniu 2012 r. na platformie obserwacyjnej Instytutu Geofizyki Uniwersytetu Warszawskiego (dach budynku przy ul. L. Pasteura 7 w Warszawie – rys. 1).



Rys. 1. Widok disdrometru laserowego OTT Parsivel2 na platformie obserwacyjnej w Warszawie

Fig. 1. Laser disdrometer OTT Parsivel2 on the observation deck in Warsaw

Funkcjonowanie disdrometru laserowego Parsivel, jak również potencjał jego praktycznego zastosowania w inżynierii środowiska został przedstawiony w pracy własnej [10]. Podstawowym wynikiem rejestracji instrumentu jest zapis rozkładu wielkości hydrometeorów (DSD – drop size distribution), który jest punktem wyjścia do wyliczenia wielkości pochodnych dzięki wbudowanemu oprogramowaniu disdrometru, w tym między innymi odbiciowości radarowej i natężenia deszczu. Obydwie wielkości są momentami statystycznymi DSD, odpowiednio rzędu 6 i 3, które w przypadku jednostkowej objętości (1 m³) można wyrazić następującymi wzorami [13]:

$$Z = \sum_i N_i D_i^6 = \int_0^{\infty} N(D) D^6 dD \quad (1)$$

$$R = \frac{\pi}{6} \int_0^{\infty} N(D) D^3 V_t(D) dD \quad (2)$$

w których:

Z – odbiciowość radarowa, mm^6/m^3

R – natężenie opadu, mm/h ,

D_i – średnica i -tej kropli (hydrometeoru), mm

N_i – liczba kropli (hydrometeorów) o średnicy pomiędzy D oraz $D+dD$,

V_t – prędkość równowagowa opadania kropli (hydrometeorów), cm/s

Z uwagi na fakt, że wartości odbiciowości radarowej wyliczone ze wzoru (1) zmieniają się w bardzo szerokim zakresie, a w dodatku pomiary radarowe są obciążone błędami i towarzyszą im zakłócenia, w przypadku wartości odbiciowości radarowej (Z) najczęściej stosuje się skalę logarytmiczną (dBZ), zdefiniowaną jako:

$$\text{dBZ} = 10 \log_{10} \left(\frac{Z \left[\frac{\text{mm}^6}{\text{m}^3} \right]}{1 \left[\frac{\text{mm}^6}{\text{m}^3} \right]} \right) \quad (3)$$

Także wartości odbiciowości radarowej, wyznaczone w trakcie pomiarów realizowanych przez disdrometr, były zapisywane w pamięci rejestratora w jednostkach dBZ.

W teoretycznych rozważaniach dotyczących wyznaczania wartości R ze wzoru (2), a następnie poszukiwania zależności łączących parametr R z parametrem Z , prędkość równowagowa opadania hydrometeorów (najczęściej kropli deszczu) jest przyjmowana według funkcji potęgowej w postaci [11]:

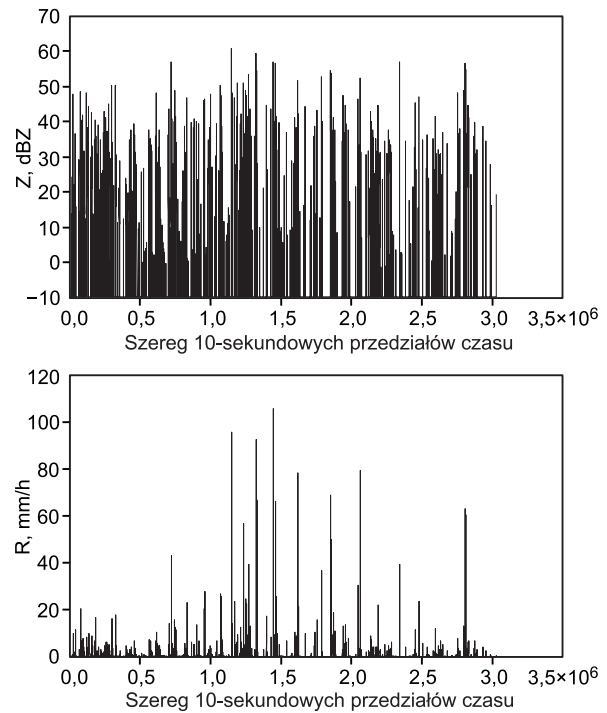
$$V_t = \alpha D^\beta \quad (4)$$

W przypadku pomiarów prowadzonych przy użyciu disdrometru nie ma potrzeby przyjmowania teoretycznej zależności między wielkością hydrometeorów a ich prędkością opadania, gdyż obydwa parametry są rejestrowane przez przyrząd. Rozkład wielkości hydrometeorów (DSD) rejestrowany przez disdrometr jest w rzeczywistości podziałem wszystkich hydrometeorów zarejestrowanych w pojedynczym cyklu pomiarowym na rozkład dwuwymiarowy, z uwagi na ich średnicę i prędkość opadania. Pod względem średnicy hydrometeorów (D) obejmuje on 32 klasy – od średniej średnicy w klasie równej $0,062 \text{ mm}$ do $24,5 \text{ mm}$, a pod względem prędkości równowagowej opadania (V_t) również 32 klasy – od średniej prędkości w klasie równej $0,05 \text{ m}/\text{s}$ do $20,8 \text{ m}/\text{s}$ [12].

W badaniach oparto się na wartościach odbiciowości radarowej (Z) i natężenia opadu (R) zarejestrowanych w 2013 r. z rozdzielczością czasową 10 s , które zaprezentowano na rysunku 2. Na podstawie tych wartości poszukiwano zależności łączących obydwie wielkości, przy czym analizę prowadzono przy czterech rozdzielczościach czasowych – 10 s oraz 1 min , 5 min i 10 min . Rozdzielczość 10 s odpowiadała oryginalnej rozdzielczości pomiarowej przyrządu, podczas gdy rozdzielczość 10 min odpowiada rozdzielczości czasowej dostępnych obrazowań pól radarowych w Polsce, pochodzących z systemu POLRAD. Na podstawie wcześniejszych studiów literaturowych [11, 13–16], jak i wstępnej analizy zbiorów pomiarowych, zależności Z – R opracowywano z wykorzystaniem funkcji potęgowej w postaci:

$$Z = aR^b \quad (5)$$

Estymacji parametrów a i b dokonano wykorzystując zlogarytmowane wartości parametrów Z i R . Pozwoliło to na uzyskanie bardziej równomiernych rozkładów wartości



Rys. 2. Szeregi czasowe wartości odbiciowości radarowej (Z) i natężenia opadu (R), zarejestrowane przez disdrometr laserowy OTT Parsivel2 w 2013 r.

Fig. 2. Time series of radar reflectivity (Z) and precipitation rate (R) recorded by laser disdrometer OTT Parsivel2 in 2013

obserwacyjnych i transformacji wzoru (5) do funkcji liniowej w postaci:

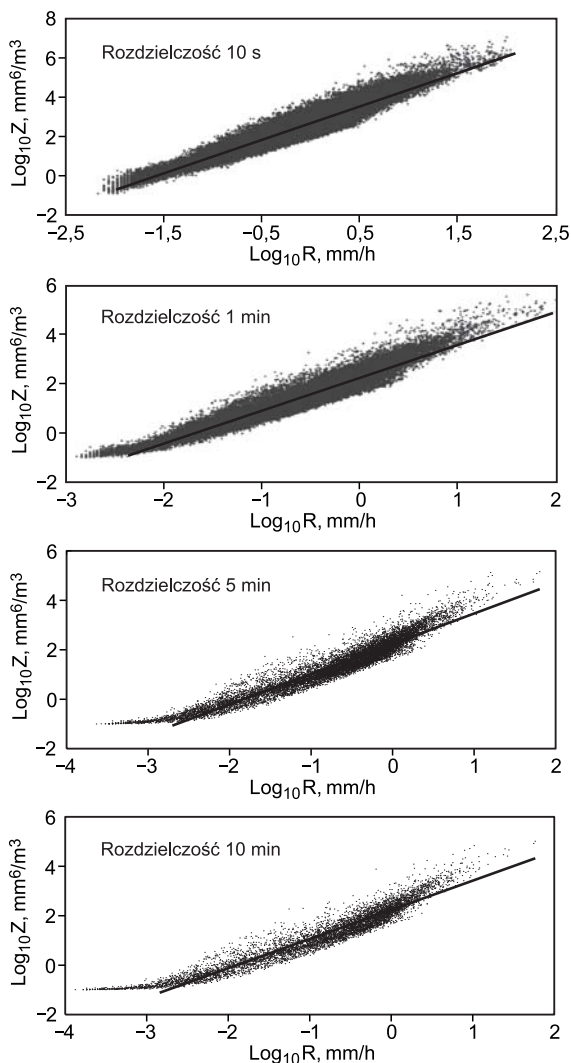
$$\log_{10} Z = b(\log_{10} R) + \log_{10} a \quad (6)$$

Liniowa postać zależności (5) pozwalała na wiarygodne ustalenie wartości parametrów a i b oraz ich 95% zakresów ufności. Ostatecznie wyznaczone parametry poddano dyskusji, porównując ich wartości przy poszczególnych rozdzielczościach czasowych i odnosząc je do wartości podanych w literaturze.

Dyskusja wyników badań

Opracowane w wyniku badań zależności funkcyjne Z – R przedstawiono na rysunku 3. Zlogarytmowane wartości natężenia deszczów oraz odbiciowości radarowej wykazują zależność liniową, zgodnie ze wzorem (6). Odstępstwo od tej zależności obserwowano jedynie w przypadku bardzo małych wartości natężenia opadów, które nie były rejestrowane poprawnie z uwagi na ograniczenia pomiarowe disdrometru. Deklarowana przez producenta disdrometru dokładność pomiarów natężeń opadów wynosi $0,001 \text{ mm}/\text{h}$. Niemniej na podstawie analizy wartości natężenia opadów przy rozdzielczości 10 s , wartość tę przyjęto jako większą o jeden rząd i wynoszącą $R_{\min} = 0,01 \text{ mm}/\text{h}$. Stąd też przy estymacji parametrów funkcji (6) przy tej wyjściowej rozdzielczości czasowej przyjęto odcięcie na poziomie $\log_{10} R_{\min} = -2$. W przypadku pozostałych rozdzielczości czasowych minimalne wartości natężenia opadów (R_{\min}) ustalano na podstawie wzoru wynikającego z podstaw rachunku błędów, w którym n oznacza liczbę uśrednianych przedziałów 10 -sekundowych:

$$R_{\min} = \frac{0,01 \sqrt{n}}{n} \quad (7)$$



Rys. 3. Zależności funkcyjne Z–R uzyskane w przypadku Warszawy, opracowane na podstawie zapisów disdrometru laserowego
Fig. 3. Z–R functional relationships for Warsaw received on the basis of laser disdrometer records

Obliczone z wykorzystaniem wzoru (7) wartości R_{\min} oraz $\log_{10} R_{\min}$ zestawiono w tabeli 1. Zawarto w niej także maksymalne wartości natężenia opadów R_{\max} i $\log_{10} R_{\max}$ oraz odbiciowości radarowej Z_{\max} i $\log_{10} Z_{\max}$ analizowanych zbiorów pomiarowych przy poszczególnych rozdzielczościach czasowych. Te ostatnie wartości jasno pokazują, w jaki sposób wydłużanie czasu obserwacji wpływa na zmniejszenie maksymalnych wartości zarówno natężenia opadów, jak i odbiciowości radarowej. Przy przejściu od rozdzielczości czasowej 10 s do rozdzielczości czasowej 10 min wartość maksymalnego natężenia deszczu uległa zmniejszeniu o blisko 50%, a w przypadku odbiciowości radarowej wartość maksymalna zmniejszyła się o rząd wielkości.

Po odcięciu najmniejszych wartości natężenia deszczów, mniejszych od wartości R_{\min} zestawionych w tabeli 1, dopasowano modele liniowe, których parametry zawiera tabela 2. Modele zależności liniowych na rysunku 3 zaznaczono z 95% zakresem ich ufności, niemniej były one na tyle wąskie, że pozostały niewidoczne w skali wykresów. Same zależności liniowe były także mocno maskowane z uwagi na bardzo duże wartości N , czyli licznosc wyświetlanych par wartości Z – R . Liczba tych par wynosiła aż 243 167 przy najwyższej rozdzielczości czasowej 10 s i nawet po agregacji do 10 min nadal pozostała duża (6438). O dobrym dopasowaniu modelu (6) świadczyły nie tylko wąskie zakresy przedziałów ufności, ale przede wszystkim wysokie wartości współczynników determinacji (R^2), każdorazowo większe od 0,9 i stosunkowo niewielkie wartości pierwiastka błędu średniokwadratowego (RMSE), nieznacznie przekraczające wartość 0,3 jedynie przy rozdzielczości 10 min (tab. 1).

Dyskusję uzyskanych parametrów a i b zależności Z – R należy rozpocząć od stwierdzenia, że parametry ustalone przy pierwotnej rozdzielczości czasowej były bliskie najczęściej spotykanych wartości w literaturze, a ustalonych jeszcze w latach czterdziestych XX wieku [14, 15]. W przypadku opadów deszczu zaproponowano już wówczas współczynniki wynoszące $a=200$ i $b=1,6$. Występujące niewielkie odstępstwa można tłumaczyć faktem, że

Tabela 1. Wielkości charakteryzujące zbiory pomiarowe przy analizowanych rozdzielczościach czasowych
Table 1. Values characteristic of observational sets at the analyzed temporal resolutions

Rozdzielczość czasowa	n	R_{\min} mm/h	$\log_{10}[R_{\min}/(1 \text{ mm/h})]$	R_{\max} mm/h	$\log_{10}[R_{\max}/(1 \text{ mm/h})]$	Z_{\max} mm ⁶ /m ³	$\log_{10}[Z_{\max}/(1 \text{ mm}^6/\text{m}^3)]$
10 s	1	0,010	–2,0000	105,3600	2,0227	$1,2142 \cdot 10^6$	6,0843
1 min	6	0,004	–2,3891	95,2197	1,9787	$3,6597 \cdot 10^5$	5,5634
5 min	30	0,002	–2,7386	63,9442	1,8058	$1,4441 \cdot 10^5$	5,1596
10 min	60	0,001	–2,8891	58,5052	1,7672	$1,0769 \cdot 10^5$	5,0322

Tabela 2. Wielkości opisujące dopasowanie modeli i parametry zależności Z – R
Table 2. Values describing model fits and parameters of Z – R relationships

Rozdzielczość czasowa	N	R^2	RMSE	$\log_{10} a$	a	b
10 s	243 167	0,9064	0,2495	2,191 (2,189, 2,192)	155,067 (154,645, 155,491)	1,528 (1,526, 1,530)
1 min	49 211	0,9102	0,2775	2,230 (2,227, 2,233)	169,781 (168,560, 171,011)	1,351 (1,347, 1,355)
5 min	11 692	0,9170	0,3029	2,242 (2,234, 2,249)	174,454 (171,521, 177,437)	1,224 (1,217, 1,231)
10 min	6 438	0,9177	0,3150	2,251 (2,241, 2,262)	178,364 (174,065, 182,769)	1,182 (1,174, 1,191)

analizowany zbiór pomiarowy nie składał się tylko z rejestracji opadów deszczów, ale także innych opadów stałych, np. śniegu, krup śniegowych, a nawet gradu. Należy także zauważyć, że zmiana rozdzielczości czasowej i przyjmowanie coraz dłuższych okresów uśredniania w czasie wyników pozyskanych z disdrometru prowadziło do systematycznych zmian w wartościach parametrów zależności $Z-R$. W przypadku parametru a obserwowano niewielki, ale systematyczny przyrost jego wartości od około 155 do 178, przechodząc od rozdzielczości 10s do rozdzielczości 10min. Temu przyrostowi wartości parametru a towarzyszyło znacznie bardziej wyraźne zmniejszenie wartości parametru b od około 1,53 do 1,18.

Niestety nadanie fizycznej interpretacji obserwowanym zmianom wartości a i b jest bardzo trudne. Dzieje się tak, chociaż znane są liczne próby podejmowania tej tematyki w badaniach mikrofizyki atmosfery. Przykładowo autorzy pracy [16], na podstawie obliczeń teoretycznych przeprowadzonych z użyciem różnego typu rozkładów hydrometeorów, a co najważniejsze, przyjmując różne założenia co do wartości prędkości opadania hydrometeorów wykazali, że nachylenie zależności $Z-R$ w układzie logarytmicznym według wzoru (6), a więc wartość parametru b , może się wahać w bardzo szerokim zakresie od $b=7/4$ do $b=7/5$, a w skrajnych przypadkach nawet do $b=1$. Autorzy ci wartość $b=7/4$ utożsamili z wystąpieniem hydrometeorów opadających ze stałą prędkością, niezależną od ich średnicy, natomiast przypadek $b=7/5$ odpowiadał w ich analizie prędkości opadania hydrometeorów liniowo zależnej od ich średnicy. Oczywiście badacze ci uwzględniali także najczęściej opisywany w literaturze przypadek spektrum opadowego zdominowanego przez opad deszczu, kiedy to prędkość opadania kropel zależała od pierwiastka kwadratowego ich średnicy, a więc wykładnik β we wzorze (4) przyjmował wartość 0,5. W tym przypadku wartości parametru b wynosiła około $1,55 \pm 0,05$, a więc dobrze korespondowała z wartością ustaloną w przypadku Warszawy i rozdzielczości czasowej 10s. Autorzy pracy [11] wykazali, że mniejsze wartości parametru a były obserwowane w przypadku opadów o charakterze frontalnym i wzrastały wraz ze wzmaganiami procesów konwekcyjnych, natomiast parametr b wykazywał przeciwny kierunek zmian wartości (był mniejszy w przypadku opadów konwekcyjnych i większy podczas zjawisk frontalnych). Również autorzy pracy [13] podjęli próbę wyjaśnienia zależności $Z-R$ z punktu widzenia mikrofizyki opadów, wskazując na bardzo dużą niepewność w interpretacji parametrów tej zależności. Jako przykład podano błąd w granicach $15 \div 20\%$ pojawiający się przy próbie szacowania średniej wagowej średnicy hydrometeorów. Autorzy pracy [13] zwrócili także uwagę na kwestię mającą podstawowe znaczenie w interpretacji wyników dotyczących dłuższych skal czasowych w Warszawie. Otóż przy dopasowywaniu zależności potęgowej typu $Z-R$, takich jak np. w klasycznych pracach [14, 15], musi dochodzić do mieszania różnego typu opadów, co skutkuje uśrednianiem wartości parametrów zależności $Z-R$, które nie ujawniają już swojego wyrazistego obrazu mikrofizycznego.

Podsumowanie

Prowadzone w Warszawie od końca 2012 r. pomiary opadów atmosferycznych z wykorzystaniem disdrometru laserowego pozwoliły na zdobycie doświadczeń praktycznych wskazujących na wysoki potencjał operacyjnego

wykorzystania tego nowoczesnego przyrządu do kalibracji obrazów radarowych oraz na zgromadzenie materiału analitycznego umożliwiającego wiarygodną ocenę zależności między odbiciowością radarową a natężeniem opadów. Przeprowadzone analizy zbiorów pomiarowych z 2013 r. pozwoliły na następujące uogólnienia:

- wartości odbiciowości radarowej (Z) wykazały bardzo dobre skorelowanie z wartościami natężenia opadów (R) przy wszystkich czterech analizowanych rozdzielczościach czasowych od 10s do 10min; zależności obydwu wielkości mogą być bardzo dobrze opisane funkcjami o postaci potęgowej, których parametry powinny być estymowane w układzie zlogarytmowanych wartości Z i R ,

- wartości parametrów a i b zależności $Z-R$, uzyskane w przypadku Warszawy podczas całorocznych obserwacji w podstawowej rozdzielczości 10s ($a=155$ i $b=1,53$), były bliskie wartościom spotykanym w literaturze w przypadku opadów atmosferycznych o dominującej przewadze deszczów,

- stwierdzono wyraźny wpływ agregacji czasowej wartości Z i R , obserwowanych w podstawowej rozdzielczości 10s, na zmniejszenie wartości maksimum obydwu wielkości i zmiany parametrów łączących ich związków potęgowych; wraz z wydłużaniem analizowanych przedziałów czasowych obserwowano zwiększanie wartości parametru a oraz zmniejszanie wartości parametru b , co można tłumaczyć uśrednianiem wartości Z i R w przypadku wzrastających przedziałów czasu od 10s do 10min,

- prezentowane, zgodnie z najlepszą wiedzą autorów, pierwsze w kraju wyniki badań nad zastosowaniem disdrometru laserowego Parsivel2 do kalibracji obrazów radarowych skłaniają do sformułowania dwóch zasadniczych kierunków badań w tym mało poznanym segmencie hydrologii miejskiej w kraju – po pierwsze istnieje potrzeba skonfrontowania uzyskanych wyników, a konkretnie zależności $Z-R$, z analogicznymi zależnościami wynikającymi z porównania sygnałów rejestrowanych przez deszczomierze i radar meteorologiczny, oraz po drugie – zasadne jest podjęcie poszerzonej analizy materiału badawczego gromadzonego przy użyciu disdrometru, ukierunkowanej na wypracowanie szczegółowych zależności $Z-R$ dotyczących różnego typu opadów atmosferycznych, np. deszczu, śniegu lub gradu.

Badania zrealizowano w ramach projektu badawczego pt. „Przestrzenno-czasowa analiza i modelowanie miejskiego pola opadowego”, sfinansowanego ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji nr 2011/03/B/ST10/06338.

LITERATURA

1. A. KOTOWSKI: Podstawy bezpiecznego wymiarowania odwodnień terenów. Wydawnictwo Seidel-Przywecki, Warszawa 2011.
2. P. LICZMAR, B. SZELĄG: Analiza zmienności czasowej opadów atmosferycznych w Warszawie (Temporal variability analysis of atmospheric precipitation in Warsaw (Poland). *Ochrona Środowiska* 2014, vol. 36, nr 3, ss. 23–28.
3. P. LICZMAR, C. de MICHELE, W. ADAMOWSKI: Precipitation variability within an urban monitoring network via microcanonical cascade generators. *Hydrology and Earth System Sciences* 2015, Vol. 19, No. 1, pp. 485–506.
4. A. BERNE, G. DELRIEU, J.D. CREUTIN, C. OBLED: Temporal and spatial resolution of rainfall measurements required for urban hydrology. *Journal of Hydrology* 2004, Vol. 299, pp. 166–179.

5. A. GIRES, C. ONOF, C. MAKSIMOVIC, D. SCHERTZER, I. TCHIGUIRINSKAIA, N. SIMOES: Quantifying the impact of small scale unmeasured rainfall variability on urban hydrology through multifractal downscaling: A case study. *Journal of Hydrology* 2012, Vol. 442–443, No. 6, pp. 117–128.
6. A. GIRES, I. TCHIGUIRINSKAIA, D. SCHERTZER, S. LOVEJOY: Multifractal analysis of an urban hydrological model on a Seine-Saint-Denis study case. *Urban Water Journal* 2013, Vol. 10, pp. 195–208.
7. Thames Tideway Tunnel (TTT): Needs Report, Appendix B, Report on Approaches to UWWTD Compliance in Relation to CSO's in major cities across the EU, 2010 (<http://aim.prepared-fp7.eu/viewer/doc.aspx?id=28>).
8. D.E. RUPP, P. LICZNAR, W. ADAMOWSKI, M. LEŚNIEWSKI: Multiplicative cascade models for fine spatial downscaling of rainfall: Parameterization with rain gauge data. *Hydrology and Earth System Sciences* 2012, Vol. 16, pp. 671–684.
9. 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.
10. P. LICZNAR: Disdrometr laserowy – nowe narzędzie pomiarowe opadów atmosferycznych dla potrzeb inżynierii środowiska. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 2007, nr 4, ss. 10–12.
11. G. VILLARINI, W.F. KRAJEWSKI: Review of the different sources of uncertainty in single polarization radar-based estimates of rainfall. *Surveys in Geophysics* 2010, Vol. 31, No. 1, pp 107–129.
12. Present Weather Sensor OTT Parsivel2. Operating instructions, document 70.210.001.B.E OTT Hydromet GmbH, 2015 (http://www.tecnologiayambiente.com.ar/wp-content/uploads/Manual_Parsivel2.pdf).
13. M. STEINER, J.A. SMITH, R. UIJLENHOET: A microphysical interpretation of radar reflectivity–rain rate relationships. *Journal of the Atmospheric Sciences* 2004, Vol. 61, pp. 1114–1131.
14. J.S. MARSHALL, W. Mc K. PALMER: The distribution of raindrops with size. *Journal of Meteorology* 1948, Vol. 5, pp. 165–166.
15. J.S. MARSHALL, R.C. LANGILLE, W. Mc K. PALMER: Measurement of rainfall by radar. *Journal of Meteorology* 1947, Vol. 4, pp. 186–192.
16. N. DOTZEK, K.D. BEHENG: The influence of deep convective motions on the variability of Z–R relations. *Atmospheric Research* 2001, Vol. 59–60, pp 15–39.

Licznar, P., Siekanowicz-Grochowina, K. Application of Laser Disdrometer to Weather Radar Image Calibration in the Example of Warsaw. *Ochrona Srodowiska* 2015, Vol. 37, No. 2, pp. 11–16.

Abstract: Exploitation problems with overloaded combined drainage systems in the biggest cities of Poland prompt development of the Real Time Control (RTC) systems as well as encourage progress in hydrodynamic modelling of urban drainage systems. Practical implementation of these activities in big agglomerations requires access to a new source of information about spatio-temporal structure of rainfall fields. Currently, this could be only achieved by implementation of weather radar techniques. A prerequisite here, however, is the development of effective radar signal calibration techniques. With this in mind, a possibility of laser disdrometer OTT Parsivel2 application to conversion of radar reflectivity (Z) into

precipitation rate (R) was explored. The observational sets from year 2013 recorded by the disdrometer installed in Warsaw, Poland were analyzed. Z–R relationships were determined at various time resolutions in the range from 10 s to 10 min. A typical power-law relationship was found to describe them, while their parameters ($a=155$ and $b=1.53$), obtained at the initial time resolution of 10s, were at the level of those most often published for rainfall-dominated precipitations. Moreover, a significant shift in Z–R parameters was noticed with changing temporal resolution of the analysis. An increase in the parameter a with simultaneous decrease in the parameter b was observed when extending the time of temporal study resolution. The phenomenon could be explained by averaging of Z and R values when extending temporal windows of resolution.

Keywords: Radar reflectivity, Z–R relationship, urban hydrology, precipitation field modelling.