



## Zmienność zależności Z-R w okresach miesięcznych – dla zwiększenia dokładności szacowania wielkości opadów za pomocą radarów meteorologicznych

### *Variability of the Z-R relationship in monthly periods – to increase the accuracy of estimating the amount of precipitation using meteorological radars*

Mariusz Paweł Barszcz 

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Instytut Inżynierii Środowiska

ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa

[mariusz\\_barszcz@sggw.edu.pl](mailto:mariusz_barszcz@sggw.edu.pl)

**Zarys treści.** Pomiar z wykorzystaniem radarów meteorologicznych dostarcza dane opadowe o dużej rozdzielczości przestrzennej, które są szczególnie potrzebne do modelowania hydrodynamicznego w obszarach zurbanizowanych. Głównym ograniczeniem w kwestii szacowania opadów przy wykorzystaniu radarów jest duża zmienność zależności Z-R (tj. między wartościami odbiciowości i intensywności opadów) w czasie i przestrzeni. Pomiar z wykorzystaniem disdrometru laserowego (Parsivel1), zlokalizowanego na stacji meteorologicznej Szkoły Główny Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, zrealizowane w latach 2012-2014 oraz 2019-2020 (w okresach kwiecień-październik), pozwoliły na zgromadzenie danych umożliwiających wyznaczenie zależności Z-R typu potęgowego (parametrów  $a$ ,  $b$ ) w odniesieniu do poszczególnych miesięcy. Przeprowadzone badania wykazały znaczące różnice między wartościami parametru  $a$  (mnożnika w zależności Z-R) dla poszczególnych miesięcy, co wskazuje na potrzebę uwzględnienia w procedurze kalibracji radarów zmiennych zależności Z-R. Ustalono, że istnieje silna korelacja ( $R = 0,70$ ) między parametrem  $a$  zależności Z-R i średnią miesięczną odbiciowością opadów, którego wartości pomierzono za pomocą disdrometru. Wyniki tych badań stanowią przyczynek do zwiększenia dokładności szacowania wielkości opadów przy wykorzystaniu radarów meteorologicznych.

**Słowa kluczowe:** disdrometr laserowy, odbiciowość i intensywność opadów, zależność Z-R, kalibracja radaru meteorologicznego, wielkość opadów, hydrologia.

**Keywords:** laser disdrometer, reflectivity and precipitation intensity, Z-R relationship, meteorological radar calibration, precipitation amount, hydrology.

### Wstęp

Wysokość opadów w zlewni jest podstawową wielkością wykorzystywaną w modelowaniu zjawisk hydrologicznych. Do zasilania modeli hydrodynamicznych, stosowanych na przykład do projektowania systemów odwodnienia w zlewniach zurbanizowanych (miejskich), wymagane są dane opadowe o dużej rozdzielczości czasowej i przestrzennej. Jak dotąd najczęściej dane opadowe pozyskiwane były z deszczomierzy, które umożliwiają pomiar jedynie punktowej wysokości opadów.

Alternatywą dla stosowania deszczomierzy jako źródła danych opadowych jest wykorzystanie disdrometrów laserowych (Krajewski et al., 2006; Barszcz, 2022). Takie zaawansowane technicznie urządzenie umożliwia jednoczesny pomiar i identyfikację kilku różnych parametrów opadów w dużej rozdzielczości czasowej, w tym intensywności i odbiciowości, rozkładu wielkości kropeł opadu i prędkości ich opadania w czasie trwania zdarzenia opadowego, liczebności kropeł, typu opadów atmosferycznych. Disdrometry nie tylko mają duży potencjał w zakresie monitorowania opadów, ale także mają zasadnicze znaczenie dla poprawy kalibracji radarów meteorologicznych (Conti et al., 2015).

Natomiast pomiary z wykorzystaniem radarów meteorologicznych zapewniają dane opadowe o dużej rozdzielczości przestrzennej i ciągłe w czasie (Atencia et al., 2011). Klasyczny radar mierzy odbiciowość  $Z$  opadów (chmur), która na podstawie określonej zależności między tą wielkością a intensywnością  $R$  opadów jest przeliczana na intensywność lub sumę opadów (Moszkowicz i Tuszyńska, 2006). Rejestrowane za pomocą disdrometru wielkości odbiciowości i intensywności opadów umożliwiają wyznaczenie wspomnianej zależności  $Z$ - $R$  (funkcji typu potęgowego), która może być wykorzystana w procedurze szacowania opadów za pomocą radarów (Conti et al., 2015).

Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy do przetwarzania odbiciowości z radarów meteorologicznych w krajowym systemie POLRAD na wielkości opadów wykorzystuje zależność wyznaczoną przez Marshalla-Palmera (Moszkowicz i Tuszyńska, 2006),  $Z = 200R^{1.6}$  (Marshall i Palmer, 1948; Marshall et al., 1955). Należy zwrócić uwagę, że ta zależność  $Z$ - $R$  jest zasadniczo zalecana dla opadów o charakterze warstwowym (Delrieu et al., 2014). W niektórych krajach, w tym USA w ramach systemu NEXRAD – Next-Generation Weather Radar (Wu et al., 2022, za Fulton et al., 1998), radary meteorologiczne korzystają z klasycznej zależności dla opadów deszczu konwekcyjnego  $Z = 300R^{1.4}$ , zaproponowanej przez Huntera (1996).

W rzeczywistości zależność  $Z$ - $R$  jest zmienna w czasie i przestrzeni (Chumchean et al., 2003), co jest głównym ograniczeniem w szacowaniu opadów przy wykorzystaniu radarów. Atlas i Chmiela (1957) wykazali, że nie istnieje jedna unikalna zależność  $Z$ - $R$ , a relacja ta jest wynikiem wielu czynników, w tym takich jak położenie geograficzne i typy opadów (Jiang et al., 2022). Villarini i Krajewski (2010) potwierdzili, że wartości empirycznie wyznaczanych parametrów zależności  $Z$ - $R$  (tj. parametrów  $a$ ,  $b$ ) są zmienne względem opadów warstwowych i konwekcyjnych. Zmienność zależności  $Z$ - $R$  w odniesieniu do różnych grup typów opadów (deszczu, deszczu ze śniegiem, śniegu, gradu) badali dla warunków krajowych Licznar i Krajewski (2016) oraz Barszcz et al. (2023). Badacze ci ustalili, że wartości parametru  $a$  zależności  $Z$ - $R$  znacznie różnią w zależności od badanych typów opadów. W pracy Bournasa i Baltasa (2022) podano, że wartości parametrów  $a$  i  $b$  zazwyczaj zawierają się w przedziałach odpowiednio od 1 do 2000 oraz od 1 do 3.

Zakres niniejszych badań obejmował wyznaczenie zależności  $Z$ - $R$  typu potęgowego (parametrów  $a$ ,  $b$ ) w odniesieniu do poszczególnych miesięcy (w okresach kwiecień–październik) w latach 2012-2014 oraz 2019-2020, dla których pomierzono wartości odbiciowości i intensywności opadów za pomocą disdrometru laserowego Parsivel1 zlokalizowanego na terenie Warszawy. Zasadniczym celem tych badań było ustalenie w jakim zakresie zmieniają się wartości parametrów zależności  $Z$ - $R$  dla poszczególnych miesięcy, w kontekście potencjalnej możliwości stosowania zmiennych zależności  $Z$ - $R$  w procedurze kalibracji radarów meteorologicznych.

## Materiały i metody

### Dane pomiarowe z disdrometru

W przedmiotowych badaniach wykorzystano wartości odbiciowości i intensywności opadów (95 459 par danych Z-R o rozdzielczości czasowej 1 min), które pomierzono za pomocą disdrometru laserowego Parsivel1 na stacji meteorologicznej Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie. Zbiór danych pomiarowych Z-R, które przyjęto do badań na podstawie analizy dotyczącej ich kompletności i ciągłości, obejmował łącznie 30 miesięcy (w okresach od kwietnia do października) w latach 2012-2014 oraz 2019-2020. W tabeli 1 zestawiono wartości podstawowych miar statystycznych (w tym wartości maksymalne i średniej arytmetycznej), które obliczono na podstawie chwilowych wartości odbiciowości i intensywności opadów dla okresów miesięcznych i całego zbioru obserwacji. Wartości odbiciowości podano zarówno w logarytmicznej skali decybeli dBZ (w takiej postaci są zapisywane w pamięci rejestratora), jak również w oryginalnych jednostkach  $\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$ . Należy zauważyć, że dane pomiarowe obejmowały różną liczbę miesięcy w poszczególnych latach. Wartości intensywności opadów mniejsze niż  $0,004 \text{ mm h}^{-1}$  i odpowiadające im wartości odbiciowości zostały odrzucone ze zbioru danych.

Disdrometr Parsivel1, opisany szczegółowo m.in. w pracach Jaffrain i Berne`a (2011), Tapiadora et al. (2010), jest urządzeniem optycznym, składającym się z dwóch głowic (emitera i odbiornika) pomiędzy którymi przesyłana jest pozioma wiązka laserowa o długości 650 nm. Urządzenie mierzy średnicę, liczbę i prędkość opadania cząstek opadu (hydrometeorów) z rozdzielczością czasową 10 s, które przechodzą przez próbkę o objętości  $5,4 \text{ cm}^3$  (powierzchnię  $54 \text{ cm}^2$ ). Na podstawie tych danych oprogramowanie disdrometru oblicza wartości odbiciowości i intensywności opadów. Według danych producenta, disdrometr Parsivel1 umożliwia pomiar intensywności opadów w zakresie od  $0,001 \text{ mm h}^{-1}$  do  $1200 \text{ mm h}^{-1}$ .

### Zależność Z-R

Wartości odbiciowości i intensywności opadów, zarejestrowane przez disdrometr na terenie Warszawy, wykorzystano do wyznaczania zależności między nimi w postaci:

$$Z = aR^b \quad (1)$$

gdzie:

Z – odbiciowość opadu ( $\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$ ),

R – intensywność opadu ( $\text{mm h}^{-1}$ ),

a, b – empirycznie wyznaczone parametry.

Wartości parametrów a, b dla podanej funkcji potęgowej wyznaczano na podstawie zlogarytmowanych wartości odbiciowości i intensywności opadów (par danych Z-R) w rozdzielczości czasowej 1 min, stosując analizę regresji prostoliniowej.

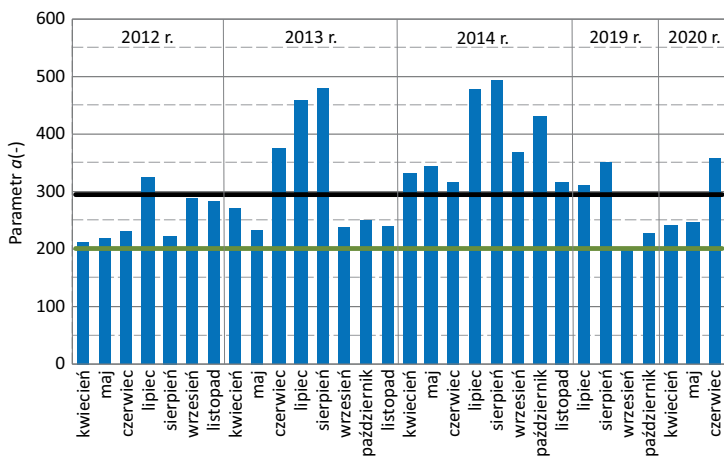
Do oceny siły związku pomiędzy opisywanymi zmiennymi zastosowano współczynniki korelacji R i determinacji  $R^2$ . Na podstawie wartości liczbowej współczynnika wnioskować można o sile związku – im wartość jest bliższa jedności, tym zależność korelacyjna między zmiennymi jest silniejsza. W analizie statystycznej zwykle przyjmuje się, że korelacja jest silna, jeżeli wartość współczynnika R zawiera się w przedziale od 0,7 do 0,9. Natomiast współczynnik  $R^2$ , który może przyjmować wartości od 0 do 1, pozwala na ocenę jakości dopasowania danego modelu do wykorzystanych danych.

## Wyniki i dyskusja

Zarejestrowane przy użyciu disdrometru wartości odbiciowości i intensywności opadów posłużyły do ustalenia zależności między tymi wielkościami. Wartości parametrów  $a$ ,  $b$  zależności Z-R (rów. 1), wyznaczone na podstawie zbiorów danych dla poszczególnych miesięcy (w okresach od kwietnia do października) w latach 2012-2014 i 2019-2020, zestawiono w tabeli 1. Wyznaczone zależności Z-R charakteryzowały się wysokimi wartościami współczynnika determinacji  $R^2$ , w zakresie od 0,91 do 0,97, co świadczy o dobrym dopasowaniu linii regresji do określonych danych. Przeprowadzone badania wykazały, że wartości parametru  $a$  były zróżnicowane dla poszczególnych miesięcy i wynosiły w zakresie od 199 do 493, co ilustruje rycina 1. Te skrajne wartości uzyskano dla danych z września 2019 i sierpnia 2014 r. Średnia wartość parametru  $a$ , obliczona na podstawie jego jednostkowych wartości dla danych w okresach miesięcznych, wynosiła 311. Natomiast wartości parametru  $b$  zawierały się wąskim przedziale, tj. od 1,30 do 1,56, przy wartości średniej 1,45.

Stwierdzono, że wartości parametru  $a$  zmieniały się nie tylko dla poszczególnych miesięcy w latach 2012-2014 i 2019-2020, ale również w odniesieniu do poszczególnych lat (tab. 1, ryc. 1). Największe wartości miesięczne tego parametru występowały w latach 2013 i 2014. Szczególnie wyróżnia się rok 2014, w którym wartości parametru  $a$  dla wszystkich uwzględnionych w nim miesięcy wynosiły powyżej wartości uzyskanej w analizie regresji na podstawie zbioru wszystkich danych pomiarowych ( $a = 294$ ), której wyniki opisano w innych badaniach autora (Barszcz et al., 2023).

W dalszej analizie, wyznaczone wartości parametru  $a$  zależności Z-R dla poszczególnych miesięcy (zestawione w tabeli 1) pogrupowano w zbiorach danych obejmujących



**Ryc. 1.** Wartości parametru  $a$  zależności Z-R dla poszczególnych miesięcy w latach 2012-2014 i 2019-2020; linia pozioma czarna to wartość parametru dla wszystkich danych ( $a = 294$ ), uzyskana w innych badaniach autora (Barszcz et al., 2023); zamieszczona dla odniesienia, linia zielona to wartość parametru uzyskana przez Marshalla i Palmera ( $a = 200$ )

*Values of the parameter  $a$  in the Z-R relationship for particular months in the years 2012-2014 and 2019-2020; the horizontal black line is the value of the parameter for all data ( $a = 294$ ), obtained in other studies by the author (Barszcz et al., 2023); the green line is the parameter obtained by Marshall and Palmer ( $a = 200$ ), included here for reference*

**Tabela 1.** Wielkości miar statystycznych dla danych w okresach miesięcznych i parametry zależności Z-R  
*Quantities of statistics for data in monthly periods and Z-R relationships parameters*

Zbiory danych		Intensywność opadu $R^1$ (mm h <sup>-1</sup> )		Odbiciowość opadu $Z^1$ (dBZ)		Odbiciowość opadu $Z^1$ 10 <sup>3</sup> (mm <sup>6</sup> m <sup>-3</sup> )		Parametry zależności Z-R (-)		Współczynnik (-)
Rok	Miesiąc	$R_{max}$	$R_{sr}$	$Z_{max}$	$Z_{sr}$	$Z_{max}$	$Z_{sr}$	$a$	$b$	$R^2$
2012	kwiecień	23,6	0,8	46,9	15,4	48,9	0,3	213	1,39	0,93
	maj	66,2	1,0	57,9	18,7	616,3	0,8	220	1,40	0,91
	czerwiec	41,9	1,4	52,7	16,7	185,9	1,0	232	1,45	0,94
	lipiec	147,9	2,3	55,7	20,2	370,3	3,8	325	1,45	0,95
	sierpień	118,5	1,4	59,7	16,0	927,9	1,7	223	1,40	0,92
	wrzesień	5,5	0,6	36,5	15,3	4,5	0,2	288	1,40	0,95
	listopad	11,6	0,8	40,7	15,7	11,8	0,4	283	1,46	0,95
2013	kwiecień	46,9	0,7	55,0	14,2	316,5	1,0	270	1,43	0,95
	maj	151,0	1,8	60,2	20,2	1058,8	1,9	232	1,51	0,94
	czerwiec	114,2	3,6	58,2	21,8	667,1	7,8	375	1,50	0,96
	lipiec	79,1	2,3	59,7	13,2	938,2	6,1	458	1,52	0,95
	sierpień	153,5	5,1	58,9	27,6	775,2	11,0	480	1,49	0,96
	wrzesień	46,0	1,2	50,1	17,4	103,0	0,7	238	1,46	0,94
	październik	37,3	1,8	48,9	19,1	78,2	1,4	250	1,45	0,94
listopad	12,3	0,6	41,4	13,3	13,8	0,3	239	1,49	0,94	
2014	kwiecień	71,4	1,5	55,1	18,8	323,4	2,0	330	1,52	0,95
	maj	124,8	1,5	60,2	17,8	1057,3	2,8	343	1,44	0,96
	czerwiec	102,1	1,9	58,8	17,6	767,0	3,2	316	1,45	0,95
	lipiec	149,7	1,9	67,9	18,6	6163,1	6,1	477	1,50	0,96
	sierpień	109,1	2,2	57,9	23,2	619,7	3,9	493	1,48	0,95
	wrzesień	16,1	0,6	51,5	12,4	142,1	0,5	369	1,46	0,93
	październik	16,4	0,6	48,4	14,6	68,8	0,4	432	1,53	0,93
listopad	16,5	0,6	46,3	10,7	42,5	0,5	316	1,56	0,95	
2019	lipiec	67,4	1,0	54,8	14,4	299,6	1,3	311	1,44	0,95
	sierpień	89,2	2,4	57,0	18,8	495,6	4,2	350	1,46	0,94
	wrzesień	75,2	1,3	55,7	16,3	375,1	1,3	199	1,43	0,93
	październik	21,6	0,6	45,8	13,4	38,1	0,3	228	1,39	0,95
2020	kwiecień	4,3	0,7	35,3	12,7	3,4	0,2	241	1,30	0,97
	maj	33,2	1,1	47,2	18,7	52,1	0,6	245	1,37	0,95
	czerwiec	151,8	2,7	57,5	20,6	566,9	5,2	359	1,46	0,95
Minimum		4,3	0,6	35,3	10,7	3,4	0,2	199	1,30	0,91
Maksimum		153,5	5,1	67,9	27,6	6163,1	11,0	493	1,56	0,97
Średnia		70,1	1,5	52,7	17,1	571,0	2,4	311	1,45	0,94
Mediana		66,8	1,3	55,1	17,0	320,0	1,3	299	1,45	0,95

<sup>1</sup> wartości maksymalne i średnie w okresach miesięcznych, obliczone na podstawie chwilowych wartości danych Z-R, zarejestrowanych przez disdrometr w 1-minutowych przedziałach czasu

jego wartości dla analogicznych miesięcy w latach 2012-2014 oraz 2019-2020, a następnie obliczono dla tych danych podstawowe miary statystyczne (tab. 2). Utworzone w ten sposób zbiory danych pokazano na rycinie 2. Dyskusję tego materiału można rozpocząć od spostrzeżenia, że wartości parametru  $a$ , które wyznaczono dla analogicznych miesięcy w różnych latach, przeważnie znacząco się różniły. Na przykład zbiór czterech danych dla sierpnia obejmował wartości tego parametru w zakresie od 223 do 493, przy średniej arytmetycznej i odchyleniu standardowym wynoszącymi odpowiednio 387 i 127. Największe jednostkowe wartości parametru  $a$  odnotowano w lipcu, sierpniu i październiku. Stwierdzono również, że zbiory parametru  $a$  dla czerwca, lipca i sierpnia charakteryzowały się największymi wartościami średniej arytmetycznej. Występowanie największych wartości opisywanego parametru w miesiącach letnich jest zgodne z oczekiwaniami, ponieważ w tym właśnie okresie często występują opady konwekcyjne. Różne obserwacje empiryczne wykazały, że wartości parametru  $a$  zwiększają się, natomiast parametru  $b$  zmniejszają w przypadku opadów konwekcyjnych (Uijlenhoet et al., 2003; Uijlenhoet i Sempere Torres, 2006; Villarini i Krajewski, 2010). Według Bournasa i Baltasa (2022) można przyjąć w dużym uogólnieniu, że wartości parametru  $a$  powyżej 400 występują w zdarzeniach opadowych typu konwekcyjnego.

Wyniki niniejszych badań, przeprowadzonych na terenie Warszawy, są zgodne z uzyskanymi przez Conti`ego et al. (2015) na obszarze miejskim Palermo (Włochy), którzy najpierw wyznaczyli rozkłady parametrów  $a$ ,  $b$  zależności  $Z-R$  dla pojedynczych zdarzeń opadowych zarejestrowanych za pomocą disdrometru Parsivel2, a następnie analizowali wartości średnie oraz zakres zmienności tych parametrów dla każdego miesiąca.

Obserwowane letnie zdarzenia opadowe wykazały wyższe wartości średnie parametru  $a$ , w porównaniu do zdarzeń występujących w pozostałych porach roku. Z kolei wartości dla zdarzeń jesiennych były trochę wyższe niż te z okresu zimowego, kiedy prawdopodobnie rejestruje się więcej zdarzeń warstwowych. Natomiast rozkłady wartości parametru  $b$  nie wykazały wyraźnego trendu w ciągu roku, zarówno pod względem wielkości średnich, jak i rozrzutu. Należy zauważyć, że disdrometr Parsivel2 zawiera pewne modyfikacje w stosunku do poprzedniej generacji Parsivel1. Na przykład, oba disdrometry różnią się czułością na wielkość kropli opadów w dolnym i górnym zakresie pomiarowym. Tokay

**Tabela 2.** Wartości miar statystycznych dla zbiorów danych obejmujących wartości parametru  $a$  dla analogicznych miesięcy w latach 2012-2014 oraz 2019-2020

*Statistical measures for datasets containing the values of the parameter for corresponding months in years 2012-2014 and 2019-2020*

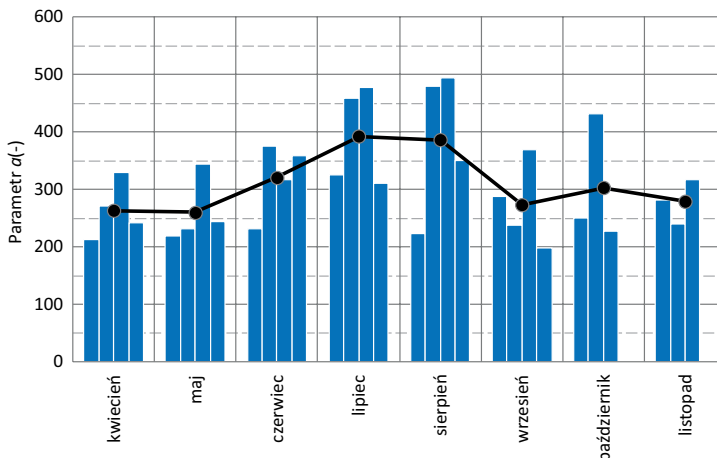
Zbiory danych	Min	Max	Średnia	$\delta^1$	Mediana
kwiecień	213	330	264	50	256
maj	220	343	260	56	239
czerwiec	232	375	321	64	338
lipiec	311	477	393	87	392
sierpień	223	493	387	127	415
wrzesień	199	369	273	73	263
październik	228	432	303	112	250
listopad	239	316	279	39	283

<sup>1</sup> odchylenie standardowe wartości parametru  $a$  od jej średniej arytmetycznej

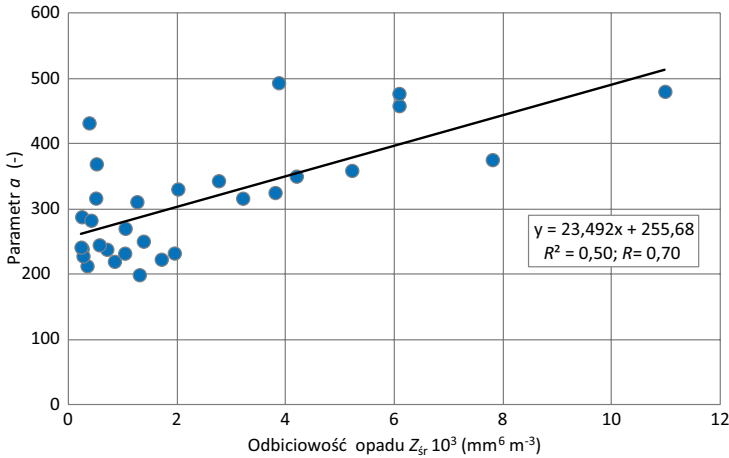
et al. (2014) ustalili, że Parsivel2 rejestruje większą liczbę kropeł o małych rozmiarach (średnicach) i mniej dużych kropeł w porównaniu z disdrometrem Parsivel1, co ma potencjalny wpływ na obliczenia wielkości natężenia opadu i odbiciowości.

W literaturze zagranicznej stosunkowo dobrze udokumentowana jest zmienność zależności Z-R (parametrów  $a$  i  $b$ ) między kolejnymi zdarzeniami opadowymi. Baltas et al. (2015) w badaniach przeprowadzonych na podstawie danych dla jedenastu pojedynczych zdarzeń opadowych, zarejestrowanych za pomocą disdrometru zlokalizowanego na terenie Aten (Grecja), uzyskali wartości parametru  $a$  w zakresie od 217 do 455, a parametru  $b$  od 1,36 do 1,52. Wyniki te pokazują, że przedziały zmienności tych parametrów są bardzo zbliżone do uzyskanych w tym badaniu i zamieszczonych w tabeli 1.

Istnieje wiele czynników, które mają wpływ na parametry zależności Z-R. Wielu badaczy próbowało podać parametry zależności Z-R jako funkcje rozkładu wielkości kropeł opadów, warunków meteorologicznych i typu opadów (Chumchean et al., 2003; Lee i Zawadzki, 2006; Adirosi et al., 2018; Guyot et al., 2019; Bournas i Baltas, 2021). Jednak nadanie fizycznej interpretacji obserwowanym zmianom wartości  $a$  i  $b$  jest bardzo trudne (Licznar i Siekanowicz-Grochowina, 2015). W niniejszych badaniach podjęto próbę powiązania wartości parametru  $a$  dla poszczególnych miesięcy (wyznaczonych odrębnie dla 30 miesięcy) z wielkościami podstawowych miar statystycznych (w tym maksymalnymi i średnią arytmetyczną), które obliczono na podstawie chwilowych wartości odbiciowości i intensywności opadów dla adekwatnych miesięcy. Analiza ta nie dotyczyła parametru  $b$ , ponieważ jego wartości zawierały się w wąskim przedziale zmienności. Stwierdzono, że istnieje silna korelacja jedynie między parametrem  $a$  zależności Z-R i średnią miesięczną odbiciowością  $Z_{sr}$  (wyrażoną w jednostkach  $\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$ ). Uzyskane wartości współczynników determinacji i korelacji wynosiły  $R^2 = 0,50$ ,  $R = 0,70$ . Model zależności liniowej między tymi wielkościami pokazano na rycinie 3.



**Ryc. 2.** Wartości parametru  $a$  dla 30. miesięcy w latach 2012-2014 oraz 2019-2020 pogrupowane w zbiorach danych dla adekwatnych miesięcy; punkty czarne to wartości średnie parametru  $a$  dla zbiorów danych  
*Values of the  $a$  parameter for 30. months in years 2012-2014 and 2019-2020 grouped in datasets for relevant months; the black points are the mean values of the  $a$  parameter for the datasets*



**Ryc. 3.** Zależność między parametrem  $a$  i średnią miesięczną odbiciowością opadu  $Z_{sr}$ .  
*The relationship between the  $a$  parameter and the mean monthly reflectivity of precipitation  $Z_{sr}$ .*

### Podsumowanie i wnioski

Prowadzone na obszarze Warszawy pomiary odbiciowości i intensywności opadów z wykorzystaniem disdrometru laserowego Parsivel1 stanowiły podstawę do wyznaczenia zależności między tymi wielkościami (parametrów  $a$ ,  $b$  zależności  $Z$ - $R$ ) odrębnie dla poszczególnych miesięcy (w okresach od kwietnia do października) w latach 2012-2014 oraz 2019-2020. Zrealizowane badania umożliwiły przedstawienie następujących stwierdzeń i wniosków:

1. Wartości parametru  $a$  zależności  $Z$ - $R$  znacząco różniły się dla poszczególnych miesięcy, przy średniej wartości 311, wahając się w zakresie od 199 do 493. Ponadto, wartości parametru  $a$  znacząco różniły się dla analogicznych miesięcy w różnych latach. Natomiast wartości parametru  $b$  zawierały się w wąskim przedziale, tj. od 1,30 do 1,56, przy wartości średniej 1,45. Wyznaczone wartości parametrów  $a$ ,  $b$  były zgodne z danymi dostępnymi w literaturze. Zakres zmienności parametru  $b$  był na tyle mały, że jego niepewność można postrzegać jako mało istotną. Na tej podstawie można stwierdzić, że uzasadnione jest przyjęcie stałej wartości parametru  $b$ , co powoduje, że zmienność zależności  $Z$ - $R$  może być uwzględniana tylko przez zmianę parametru  $a$ . Upraszcza to wdrożenie zależności  $Z$ - $R$  w pracy operacyjnej radaru meteorologicznego. Wyniki tych badań wskazują na potrzebę uwzględnienia zmiennych w odniesieniu do różnych miesięcy wartości parametru  $a$  zależności  $Z$ - $R$  w procedurze przetwarzania danych radarowych. Jednak konieczne jest przeprowadzenie analiz, które pozwolą ocenić wpływ takich działań na zwiększenie dokładności szacowania wielkości opadów z wykorzystaniem radarów meteorologicznych.
2. Maksymalne jednostkowe wartości parametru  $a$  odnotowano w miesiącach lipiec, sierpień i październik. Natomiast największe średnie wartości parametru  $a$ , obliczone na podstawie jego wartości dla analogicznych miesięcy w latach 2012-2014 oraz 2019-2020, uzyskano dla zbiorów danych z czerwca, lipca i sierpnia. Oznacza to, że największe wartości tego parametru występowały zasadniczo w okresach, w których



często występują opady konwekcyjne. W związku z tym zasadne staje się przeprowadzenie analiz, które potwierdzą występowanie jakiegoś związku między opisywanym parametrem i typem opadów, które mogą mieć charakter warstwowy, przejściowy lub konwekcyjny.

3. Istnieje silna korelacja między wartościami parametru  $a$  zależności Z-R dla poszczególnych miesięcy i średnią miesięczną odbiciowością (wyrażoną w jednostkach  $\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$ ) – współczynnik korelacji wynosi  $R = 0,70$ . Uzyskana zależność między tymi wielkościami wymaga weryfikacji w aspekcie jej przydatności do kalibracji obrazów radarowych.

Ryciny i tabele, pod którymi nie zamieszczono źródeł, są opracowaniami własnymi autora artykułu.

W pracy wykorzystano dane z disdrometru laserowego, będącego na wyposażeniu Centrum Wodnego SGGW w Warszawie.

## Piśmiennictwo

- Adirosi, E., Roberto, N., Montopoli, M., Gorgucci, E., & Baldini, L. (2018). Influence of Disdrometer Type on Weather Radar Algorithms from Measured DSD: Application to Italian Climatology, *Atmosphere*, 9, 360. <https://doi.org/10.3390/atmos9090360>
- Atencia, A., Mediero, L., Llasat, M.C., & Garrote, L. (2011). Effect of radar rainfall time resolution on the predictive capability of distributed hydrologic model. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, 3809-3827.
- Atlas, D. & Chmela, A.C. (1957). Physical-synoptic variations of drop-size parameters. W: *Preprints, sixth weather radar conference*, 21-19. Boston, MA: American Meteorological Society.
- Baltas, E.A., Panagos, D.S., & Mimikou, M.A. (2015). An approach for the Estimation of Hydrometeorological Variables Towards the Determination of Z-R Coefficients. *Environ. Process.*, 2, 751-759. <https://doi.org/10.1007/s40710-015-0119-x>
- Barszcz, M. (2022). Ocena przydatności disdrometru laserowego i radaru meteorologicznego do szacowania wielkości opadów deszczu. *Przegląd Geograficzny*, 94(4), 451-470. <https://doi.org/10.7163/PrzG.2022.4.3>
- Barszcz, M., Stańczyk, T., & Brandyk, A. (2023). Zależności między wartościami odbiciowości i intensywności opadów z disdrometru laserowego – dla radarowego szacowania wielkości opadów. *Przegląd Geograficzny*, 95(2), 149-162. <https://doi.org/10.7163/PrzG.2023.2.2>
- Bournas, A. & Baltas, E. (2021). Comparative Analysis of Rain Gauge and Radar Precipitation Estimates towards Rainfall-Runoff Modelling in a Peri-Urban Basin in Attica, Greece. *Hydrology*, 8, 29. <https://doi.org/10.3390/hydrology8010029>
- Bournas, A. & Baltas, E. (2022). Determination of the Z-R Relationship through Spatial Analysis of X-Band Weather Radar and Rain Gauge Data. *Hydrology*, 9, 137. <https://doi.org/10.3390/hydrology9080137>
- Chumchean, S., Sharma, A., & Seed, A. (2003). Radar rainfall error variance and its impact on radar rainfall calibration. *Physics and Chemistry of the Earth*, 28 (1-3), 27-39. [https://doi.org/10.1016/S1474-7065\(03\)00005-6](https://doi.org/10.1016/S1474-7065(03)00005-6)

- Conti, F.L., Francipane, A., Pumo, D., & Noto, L.V. (2015). Exploring single polarization X-band weather radar potentials for local meteorological and hydrological applications. *Journal of Hydrology*, 531, 508-522. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.10.071>
- Delrieu, G., Bonnifait, L., Kirstetter, P.-E., & Boudevillain, B. (2014). Dependence of radar quantitative precipitation estimation error on the rain intensity in the Cévennes region, France. *Hydrological Sciences Journal*, 59(7), 1308-1319.
- Fulton, R.A., Breidenbach, J.P., Seo, D.J., Miller, D.A., & O' Bannon, T. (1998). The WSR-88D rainfall algorithm. *Weather Forecast.*, 13, 37-395.
- Guyot, A., Pudashine, J., Protat, A., Uijlenhoet, R., Pauwels, V.R.N., Seed, A., & Walker, J.P. (2019). Effect of disdrometer type on rain drop size distribution characterization: a new dataset for south-eastern Australia. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 23, 4737-4761. <https://doi.org/10.5194/hess-23-4737-2019>
- Hunter, S. (1996). WSR-88D radar rainfall estimation: capabilities, limitations and potential improvements. *National Weather Digest*, 20(4), 26-36.
- Jaffrain, J. & Berne, A. (2011). Experimental quantification of the sampling uncertainty associated with measurements from PARSIVEL disdrometers. *Journal of Hydrometeorology*, 12, 352-370. <https://doi.org/10.1175/2010JHM1244.1>
- Jiang, Y., Yang, L., Zeng, Y., Tong, Z., Li, J., Liu, F., Zhang, J., & Liu, J. (2022). Comparison of summer raindrop size distribution characteristics in the western and central Tianshan Mountains of China. *Meteorological Applications*, 29(3), e2067. <https://doi.org/10.1002/met.2067>
- Krajewski, W.F., Kruger, A., Caracciolo, C., Golé, P., Barthes, L., Creutin, J.-D., Delahaye, J.-Y., Nikolopoulos, E.I., Ogden, F., & Vinson, J.-P. (2006). DEVEX-Disdrometer Evaluation Experiment: Basic results and implications for hydrologic studies. *Advances in Water Resources*, 29, 311-325. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2005.03.018>
- Lee, G.W. & Zawadzki, I. (2006). Radar calibration by gauge, disdrometer, and polarimetry: Theoretical limit caused by the variability of drop size distribution and application to fast scanning operational radar data. *J. Hydrol.*, 328, 83-97. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.11.046>
- Licznar, P. & Krajewski, W.F. (2016). Precipitation Type Specific Radar Reflectivity-rain Rate Relationship for Warsaw, Poland. *Acta Geophysica*, 64(5), 1840-1857.
- Licznar, P. & Siekanowicz-Grochowina, K. (2015). Wykorzystanie disdrometru laserowego do kalibracji obrazów pochodzących z radarów opadowych na przykładzie Warszawy. *Ochrona Środowiska*, 37(2), 11-16.
- Marshall, J.S. & Palmer, W.McK. (1948). The distribution of raindrops with size. *Journal of Meteorology*, 5, 165-166. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1948\)005<0165:TDORWS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1948)005<0165:TDORWS>2.0.CO;2)
- Marshall, J.S., Hitschfeld, W., & Gunn, K.L.S. (1955). Advances in radar weather. *Advances in Geophysics*, 2, 1-56. [https://doi.org/10.1016/S0065-2687\(08\)60310-6](https://doi.org/10.1016/S0065-2687(08)60310-6)
- Moszkowicz, S. & Tuszyńska, I. (2006). *Meteorologia radarowa. Podręcznik użytkownika informacji radarowej IMGW*. Warszawa: Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej.
- Tapiador, F.J., Checa, R., & de Castro, M. (2010). An experiment to measure the spatial variability of Rain Drop size distribution using sixteen laser disdrometers, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L16803. <https://doi.org/10.1029/2010GL044120>
- Tokay, A., Wolff, D.B., & Peterson, W.A. (2014). Evaluation of the new version of the laser-optical disdrometer, OTT Parsivel<sup>2</sup>. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 31, 1276-1288. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-13-00174.1>
- Uijlenhoet, R., Smith, J.A., & Steiner, M. (2003). The microphysical structure of extreme precipitation as inferred from ground-based raindrop spectra. *J. Atmos. Sci.*, 60, 1220-1238. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2003\)60<1220:TMSOEP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2003)60<1220:TMSOEP>2.0.CO;2)

- Uijlenhoet, R. & Sempere Torres, D. (2006). Measurement and parameterization of rainfall microstructure. *J. Hydrol.*, 328, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.11.038>
- Villarini, G. & Krajewski, W.F. (2010). Review of the different sources of uncertainty in single polarization radar-based estimates of rainfall. *Surveys in Geophysics*, 31(1), 107-129. <https://doi.org/10.1007/s10712-009-9079-x>
- Wu, Z., Zhang, Y., Zhang, L., Zheng, H., & Huang, X. (2022). A Comparison of Convective and Stratiform Precipitation Microphysics of the Record-breaking Typhoon In-Fa (2021). *Remote Sens.*, 14, 344. <https://doi.org/10.3390/rs14020344>

## Summary

The amount of precipitation in a catchment is the basic quantity used in modeling hydrological phenomena. So far, precipitation data has been most often obtained from rain gauges, which enable the measurement of only point amount of precipitation. An alternative to the use of rain gauges as a source of precipitation data is provided by meteorological radars, which provide data with high-spatial resolution. However, radar measurement of precipitation are not accurate enough because it is an indirect measurement. Radars measure reflectivity, which, based on a specific Z-R relationship (i.e. between the values for reflectivity and intensity of precipitation), is converted into the amount of precipitation. The main limitation in the estimation of precipitation using radars is attributed to the high variability of the Z-R relationship in time and space. Disdrometers, which enable the determination of the Z-R relationship on the basis of the reflectivity and intensity of precipitation, are of fundamental importance to the improved calibration of meteorological radars.

Measurements of reflectivity and precipitation intensity, carried out at the Meteorological Station of Warsaw University of Life Sciences using the Parsivel1 laser disdrometer, were the basis for the determination of the relationships between these quantities (parameters  $a$  and  $b$  for the Z-R relationship) for each individual month (in the April-October periods) in the years 2012-2014 and 2019-2020.

The values of the  $a$  parameter for the Z-R relationship determined as a result of the research significantly differed for individual months. They ranged from 199 to 493, and their arithmetic mean was 311. Moreover, the values of the  $a$  parameter varied considerably for corresponding months in different years. On the other hand, the values of the  $b$  parameter were within a narrow range, i.e. from 1.30 to 1.56, with the mean value of 1.45. The determined values of the  $a$  and  $b$  parameters were consistent with those found in the literature. The range of the variability of the  $b$  parameter was so small that its uncertainty can be perceived as insignificant. These results suggest that assuming a constant value for parameter  $b$  is justified, meaning the variability of the Z-R relationship can be accounted for solely by changes in parameter  $a$ . This simplifies the implementation of the Z-R relationship in the operational work of a meteorological radar. The results of these studies indicate the need to take into account the variable values of the  $a$  parameter for the Z-R relationship in relation to various monthly periods in the radar data processing procedure. However, it is necessary to carry out analyses that will allow to assess the impact of such activities on increasing the accuracy of estimating the amount of precipitation using meteorological radars.

The maximum individual values of the  $a$  parameter were recorded in July, August and October. Whereas, the highest mean values of the  $a$  parameter, calculated on the basis of its values for the corresponding months in the years 2012-2014 and 2019-2020, were obtained for data sets from June, July and August. This means that the highest values of this parameter generally occurred in periods with frequent convective precipitation.

In the current research, an attempt was made to link the values of the  $a$  parameter for individual months (determined separately for 30 months) with the values of basic statistical measures (including the maximum and arithmetic mean), which were calculated on the basis of instantaneous values of reflectivity and intensity of precipitation for the relevant months. It was found that there is a strong correlation between the values of the  $a$  parameter for  $Z$ - $R$  relationship for individual months and the mean monthly reflectivity (expressed in  $\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$  units) – the correlation coefficient is  $R = 0.70$ . The obtained relationship between these quantities requires verification in terms of its suitability for the calibration of radar images.