Przegląd Geograficzny
2023, 95, 2, s. 149-162
https://doi.org/10.7163/PrzG.2023.2.2

Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania
Polska Akademia Nauk

https://www.igipz.pan.pl/przeglad-geograficzny.html

Zależności *Z-R* dla różnych typów opadów jako narzędzie do radarowego szacowania wielkości opadów

The Z-R relationships for different types of precipitation as a tool for radar-based precipitation estimation

Mariusz Paweł Barszcz[1]* Tomasz Stańczyk[1] Andrzej Brandyk[2]

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie
[1]Instytut Inżynierii Środowiska
ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa
[2]Centrum Wodne
ul. Jana Ciszewskiego 6, 02-776 Warszawa
mariusz_barszcz@sggw.edu.pl *(autor korespondencyjny) • tomasz_stanczyk@sggw.edu.pl • andrzej_brandyk@sggw.edu.pl

Zarys treści. Disdrometr laserowy umożliwia pomiar wielkości odbiciowości (*Z*) i intensywności opadów (*R*) z dużą rozdzielczością czasową. W tych badaniach wykorzystano 95 459 par danych *Z-R* o rozdzielczości czasowej 1 min, które zostały zarejestrowane na terenie Warszawy przez disdrometr laserowy Parsivel1 firmy OTT w latach 2012-2014 oraz 2019-2020 (w okresach od kwietnia do października). Najpierw wyznaczono zależność między wartościami odbiciowości i intensywności opadów na podstawie wszystkich danych pomiarowych. Zasadniczym celem podjętych badań było wyznaczenie zależności *Z-R* odrębnie dla trzech typów opadów: deszczu, deszczu ze śniegiem, śniegu. Przeprowadzone badania wykazały duże różnice między wartościami parametru *a* (mnożnika) zależności *Z-R* typu potęgowego, ustalonymi dla trzech wymienionych typów opadów. Uzyskane wyniki wskazują na potrzebę uwzględnienia relacji *Z-R* dopasowanych do określonych typów opadów w procedurze przetwarzania danych radarowych, co mogłoby poprawić szacunki wielkości opadów z radarów meteorologicznych należących do ogólnopolskiego systemu POLRAD.

Słowa kluczowe: disdrometr laserowy, odbiciowość i intensywność opadów, zależność *Z-R*, radar meteorologiczny, hydrologia.
Keywords*: laser disdrometer, reflectivity and intensity of precipitation, Z-R relationship, meteorological radar, hydrology.*

Wstęp

Współczesne wyzwania związane z projektowaniem systemów odwodnienia i modelowaniem hydrodynamicznym w zlewniach miejskich, jak i zarządzaniem wodami opadowymi w zlewniach niezurbanizowanych, wymuszają konieczność dysponowania danymi opadowymi o dużej rozdzielczości czasowej i przestrzennej (Berne et al., 2004; Bouilloud et al., 2010; He et al., 2013; Thorndahl et al., 2017; Johannsen et al, 2020). Alternatywą dla stosowania deszczomierzy jako źródła danych opadowych jest wykorzystanie disdrometrów laserowych (Krajewski et al., 2006), które umożliwiającą rejestrację wielkości odbiciowości (*Z*) i intensywności opadów (*R*) z rozdzielczością czasową wynoszącą nawet 10 s. Reje-

strowane przez disdrometr wartości odbiciowości i intensywności opadów dają możliwość poszukiwania zależności między nimi (zależności *Z-R*), która może być wykorzystana do kalibracji radarów meteorologicznych. Klasyczny radar mierzy odbiciowość radarową, która na podstawie określonej zależności *Z-R* jest przeliczana na intensywność lub sumę opadów (Moszkowicz i Tuszyńska, 2006). Zależność *Z-R*, wyznaczona na podstawie danych pomierzonych z wykorzystaniem disdrometru, może mieć zasadnicze znaczenie dla kalibracji radarów (Conti et al., 2015), które zapewniają dane o dużej rozdzielczości przestrzennej. Główne ograniczenie w kwestii szacowania opadów przy wykorzystaniu radarów przypisuje się dużej zmienności zależności *Z-R* w czasie i przestrzeni. Jedną z najważniejszych przyczyn takiego zjawiska jest zmienność rozkładu wielkości kropel opadu w czasie i przestrzeni (Chumchean et al., 2003), która z kolei jest zależna od typu opadu atmosferycznego.

W literaturze krajowej można znaleźć jedynie kilka publikacji naukowych, w których przedstawiono wyniki analiz przeprowadzonych na podstawie wielkości opadów pomierzonych przy zastosowaniu disdrometrów laserowych Parsivel (Licznar, 2009; Burszta-Adamiak, 2012) lub innych urządzeń optycznych (Szewrański, 2009; Biniak-Pieróg et al., 2015; Biniak-Pieróg, 2017). Wykazano w nich przydatność tego typu nowoczesnych instrumentów do szacowania wielkości opadów. Według naszej najlepszej wiedzy, dotychczas jedynie Licznar i Siekanowicz-Grochowina (2015) oraz Licznar i Krajewski (2016) badali zależność między wartościami odbiciowości i intensywności opadów dla warunków klimatycznych na terenie kraju, które zostały pomierzone za pomocą disdrometru. Autorzy tych badań, przeprowadzonych na terenie Warszawy, posłużyli się danymi zarejestrowanymi przez disdrometr Parsivel2, odpowiednio w 2013 r. oraz w okresie 13.12.2012-30.11.2014. Ich badania potwierdziły, że dane uzyskiwane z disdrometru laserowego mają wysoki potencjał wykorzystania do kalibracji radarów. Wyniki tych badań poddano dyskusji w dalszej części pracy.

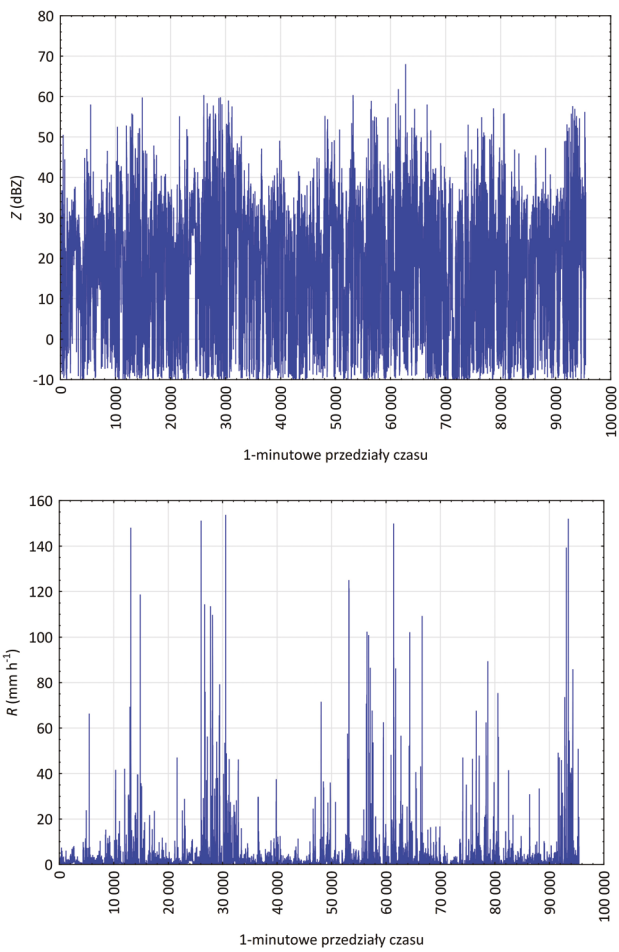
Znacznie więcej badań z wykorzystaniem różnego typu disdrometrów prowadzi się poza krajem. Część z nich jest realizowana przy zastosowaniu disdrometrów laserowych Parsivel (Krajewski et al., 2006; Jaffrain i Berne, 2011; Thurai et al., 2011; Tokay et al., 2013; Jwa et al., 2020; Gualco et al., 2021). Zakres tych badań obejmuje zagadnienia niepewności i błędu pomiarów przy zastosowaniu tego typu instrumentów, rozpoznania rozkładów wielkości kropel w czasie zdarzeń, a także dotyczące zastosowań aplikacyjnych disdrometrów. Podobnie jak w kraju, również za granicą prowadzi się badania zmierzające do wyznaczenia zależności między odbiciowością i intensywnością opadów zarejestrowanych przez disdrometry. Między innymi Hazenberg et al. (2011) oraz Guyot et al. (2019) wykorzystali dane z disdrometrów Parsivel do ustalenia zależności *Z-R*, odpowiednio dla warunków klimatycznych w południowej części Francji i południowo-wschodniej Australii.

Zasadniczym celem podjętych badań było wyznaczenie zależności między wartościami odbiciowości i intensywności opadów (zależności *Z-R*) odrębnie dla trzech typów opadów: deszczu, deszczu ze śniegiem, śniegu. W badaniach wykorzystano dane *Z-R*, które zostały zarejestrowane przez disdrometr laserowy Parsivel1 na terenie Warszawy. Wyniki tych badań stanowią przyczynek do poprawienia możliwości kalibracji radarów meteorologicznych, a tym samym zwiększenia dokładności szacowania wielkości opadów przy wykorzystaniu radarów.

Materiały i metody

Urządzenie i dane pomiarowe

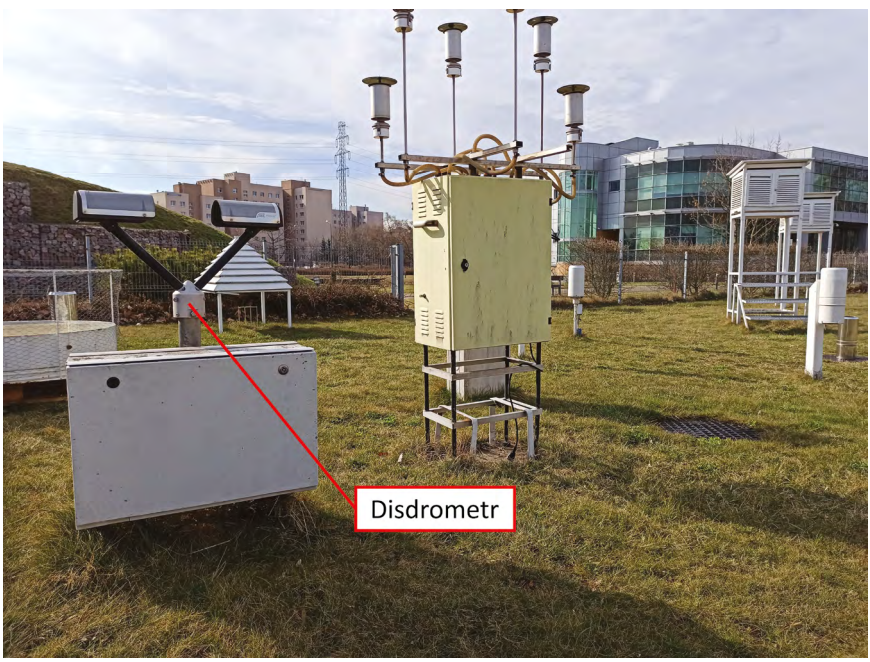
Materiałem wykorzystanym w badaniach były wartości odbiciowości i chwilowych intensywności opadów (95 459 par danych *Z-R* o rozdzielczości czasowej 1 min), zarejestrowane przy wykorzystaniu disdrometru laserowego Parsivel1 firmy OTT HydroMet GmbH zlokalizowanego na stacji meteorologicznej Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego (SGGW) w Warszawie przy ul. Nowoursynowskiej 166 (fot. 1). Dane pomiarowe *Z-R* (ryc. 1) obejmowały miesiące od kwietnia do października (należące do trzech meteorologicznych pór roku: wiosny, lata i jesieni) w latach 2012-2014 oraz 2019-2020 (łącznie 30 miesięcy), które wybrano do badań ze względu na kompletność danych. Mając na uwadze wytyczne



Ryc. 1. Zbiór pomiarowy wartości odbiciowości (*Z*) i chwilowych intensywności opadów (*R*) zarejestrowanych przez disdrometr w rozdzielczości 1 min
Measurement set for (Z) reflectivity and (R) instantaneous intensity values recorded for precipitation on a disdrometer across a 1-min time resolution

Licznara i Siekanowicz-Grochowiny (2015), w badaniach uwzględniono jedynie wartości intensywności opadów większe lub równe niż 0,004 mm h^{-1}.

Disdrometr Parsivel1 jest urządzeniem optycznym, składającym się z emitera i odbiornika, pomiędzy którymi przesyłana jest pozioma wiązka laserowa. Podstawowym wynikiem rejestracji disdrometru jest średnica, prędkość opadania i liczebność kropel opadów (hydrometeorów), które przechodzą przez wiązkę laserową. Na ich podstawie oprogramowanie instrumentu identyfikuje typ opadów, jak również oblicza odbiciowość i intensywność opadów w zdefiniowanej przez użytkownika rozdzielczości czasowej. Disdrometr zainstalowany na stacji meteorologicznej SGGW rejestruje dane w przedziałach 1-minutowych. Zarejestrowane dane są klasyfikowane do jednego z ośmiu typów opadów (charakteryzujących się określonymi przedziałami intensywności opadów): mżawki, mżawki z deszczem, deszczu, deszczu i mżawki ze śniegiem, deszczu marznącego, śniegu, śniegu ziarnistego, gradu, które to z kolei są przypisane do jednej z czterech grup typów opadów: deszczu, deszczu ze śniegiem, śniegu, gradu. Informacje w tym zakresie można znaleźć przykładowo w instrukcji operacyjnej urządzenia lub pracy Licznara i Krajewskiego (2016).



Fot. 1. Disdrometr laserowy Parsivel1 na stacji meteorologicznej SGGW (fot. M. Barszcz)
A Parsivel1 laser disdrometer at the WULS-SGGW Meteorological Station (photo: M. Barszcz)

Zależność *Z-R*

W badaniach wykorzystano wartości odbiciowości i intensywności opadów zarejestrowane przez disdrometr laserowy. Posłużyły one do wyznaczania zależności między nimi (zależności *Z-R*) z wykorzystaniem funkcji potęgowej wyprowadzonej przez Marshalla i Palmera (1948) w postaci:

$$Z = aR^b \tag{1}$$

gdzie:
Z – odbiciowość opadu (mm^6 m^{-3}),
R – intensywność opadu (mm h^{-1}),
a, b – empirycznie wyznaczane parametry.

Z uwagi na to, że wartości odbiciowości są zapisywane przez disdrometr w logarytmicznej skali decybeli (dBZ = 10log$Z$), wykorzystanie tej wielkości do wyznaczania zależności *Z-R* wymagało przeliczenia rejestrowanych wartości odbiciowości, wyrażonych w decybelach, na oryginalne jednostki mm^6 m^{-3}.

Wartości parametrów a, b (mnożnika i wykładnika w równaniu 1) wyznaczano na podstawie zlogarytmowanych wartości odbiciowości Z (mm^6 m^{-3}) i intensywności R (mm h^{-1}) opadów, stosując analizę regresji prostoliniowej.

Miary statystyczne

Do oceny jakościowej wyznaczanych zależności *Z-R* zastosowano następujące statystyczne miary: pierwiastek błędu średniokwadratowego (*RMSE* – Root Mean Square Error), odchylenie standardowe (δ), współczynniki determinacji (R^2) i korelacji (R).

Pierwiastkowy błąd średniokwadratowy obliczano ze wzoru:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(Z_i^{obs} - Z_i^{sim}\right)^2} \tag{2}$$

gdzie:
Z_i^{obs} – i-ta zlogarytmowana wartość obserwowana odbiciowości (mm^6 m^{-3}),
Z_i^{sim} – i-ta wartość estymowana odbiciowości (mm^6 m^{-3}),
N – liczba obserwacji.

Wartości *RMSE* = 0,0 mm^6 m^{-3} oznaczają idealne dopasowanie modelu liniowego do danych *Z-R*, natomiast mniejsze niż połowa odchylenia standardowego δ można uznać za niskie (Moriasi et al., 2007).

Wyniki i dyskusja

Wartości odbiciowości (Z) i intensywności opadów (R), zarejestrowane przez disdrometr laserowy Parsivel1 na terenie Warszawy, zostały zakwalifikowane do jednej z trzech grup typów opadów: deszczu, deszczu ze śniegiem, śniegu. Opady gradu nie występowały w badanym okresie pomiarowym. W tabeli 1 zestawiono wielkości podstawowych parametrów statystycznych dla zbioru wszystkich danych *Z-R* oraz trzech jego podzbiorów dotyczących trzech wymienionych typów opadów. W zbiorze pomiarowym dominowały dane dla opadów deszczu (90 954 par wartości *Z-R*), które stanowiły 93% wielkości sumy opadów dla wszystkich danych. Uwzględnione w badaniach wartości odbiciowości i chwilowych intensywności opadów, zarejestrowane w rozdzielczości czasowej 1 min, zawierały się w przedziałach wynoszących odpowiednio -9,998-67,898 dBZ oraz 0,004-153,519 mm h^{-1} (wartości intensywności opadów mniejsze niż 0,004 mm h^{-1} zostały odrzucone ze zbioru danych).

Tabela 1. Wielkości podstawowych parametrów statystycznych dla różnych zbiorów danych
Values of the basic statistical parameters for various datasets

Zbiory danych – grupy typów opadów	Liczba par danych Z-R	Intensywność opadu R[1] (mm h^{-1})			Odbiciowość opadu Z[1] (dBZ)		
		$R_{min.}$	$R_{max.}$	$R_{śr.}$	$Z_{min.}$	$Z_{max.}$	$Z_{śr.}$
Wszystkie dane	95 459	0,004	153,519	1,516	-9,998	67,898	17,352
Opady deszczu	90 954	0,004	153,519	1,509	-9,998	60,248	17,620
Opady deszczu ze śniegiem	862	0,018	121,865	7,004	4,076	61,720	27,406
Opady śniegu	3 643	0,004	56,450	0,389	-9,944	67,898	8,286

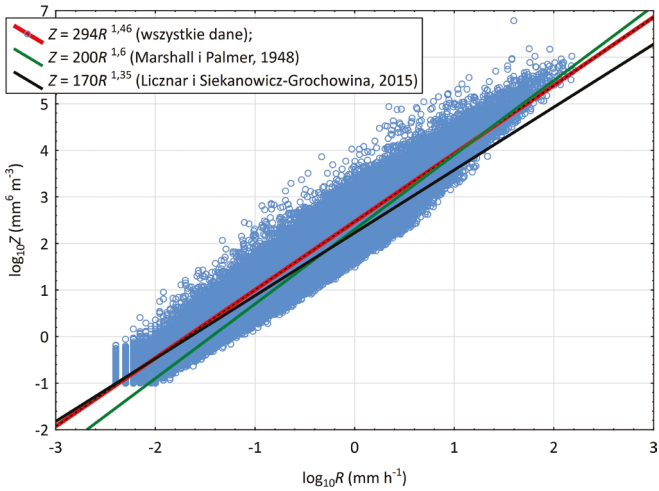
[1] chwilowe wartości danych, zarejestrowane przez disdrometr w 1-minutowych przedziałach czasu

Zlogarytmowane wartości *Z* i *R* posłużyły do ustalenia zależności między nimi przy zastosowaniu analizy regresji liniowej. W tabeli 2 zestawiono wartości oszacowanych parametrów *a*, *b* zależności *Z-R* (funkcji potęgowej wyrażonej równaniem 1) dla różnych zbiorów danych (typów opadów). Opracowane zależności między odbiciowością i intensywnością opadów charakteryzowały się wysokimi wartościami współczynnika korelacji *R*, w zakresie od 0,96 do 0,97, współczynnika determinacji R^2, a także małymi wartościami błędu średniokwadratowego *RMSE*, wynoszącymi od 0,29 do 0,34. Wartości odchylenia standardowego δ dla zbiorów zlogarytmowanych wartości odbiciowości *Z* (mm^6 m^{-3}) wynosiły od 1,25 do 1,33. Uzyskane wartości *RMSE* były w każdym przypadku mniejsze niż połowa odchylenia standardowego, co świadczy o dobrym dopasowaniu linii regresji do określonych danych. Na rycinach 2-5 zamieszczono opracowane zależności *Z-R* (funkcje liniowe) wraz z ich 95% przedziałami ufności (czarne linie przerywane), które są słabo widoczne na rycinach ze względu na ich wąskie zakresy.

Wyznaczone w wyniku badań wartości parametrów zależności *Z-R* dla wszystkich danych wynosiły *a* = 293,76 oraz *b* = 1,46 (tab. 2 i ryc. 2). Zawierają się one w zakresach wartości parametrów *a* i *b* zestawionych w pracy Moszkowicza i Tuszyńskiej (2006), wynoszących odpowiednio 16,6-730 i 1,16-2,87, które uzyskano w ramach 24. badań przeprowadzonych w różnych lokalizacjach na Świecie. Wyznaczone wartości parametrów są również zgodne z uzyskanymi przez Bournasa i Baltasa (2022) na podstawie danych zarejestrowanych w Atenach przy zastosowaniu radaru meteorologicznego w paśmie *X*, wynoszącymi *a* = 321 oraz *b* = 1,53. Jednakże w przypadku parametru *a* stwierdzono znaczną różnicę w stosunku do wartości uzyskanej w badaniach Licznara i Siekanowicz-Grochowiny (2015), *a* = 169,78, które ci autorzy przeprowadzili na podstawie 49 211 par

Tabela 2. Zależności *Z-R* i statystyki opisujące ich dopasowanie do zbiorów danych
Z-R relationships and statistics describing their degree of fit to the datasets

Zbiory danych – grupy typów opadów	Parametry Z-R		RMSE $\log_{10}$ (mm^6 m^{-3})	δ $\log_{10}$ (mm^6 m^{-3})	Współczynniki	
	a	b			R^2 (-)	R (-)
Wszystkie dane	293,76	1,46	0,31	1,26	0,94	0,97
Opady deszczu	285,56	1,47	0,29	1,25	0,94	0,97
Opady deszczu ze śniegiem	776,07	1,47	0,31	1,33	0,95	0,97
Opady śniegu	914,74	1,62	0,34	1,27	0,93	0,96



Ryc. 2. Wykres punktowy wszystkich danych *Z-R*; zależność *Z-R* opracowana dla wszystkich danych jest oznaczona czerwoną linią ciągłą; zamieszczone dla odniesienia, linie zielona i czarna to zależności opracowane w innych badaniach

Scatter plot of all Z-R data, with the Z-R relationship derived for all data using the unbroken red line. The green and black lines are relationships developed in other studies, included here for reference

danych *Z-R* (przy rozdzielczości czasowej 1 min) zarejestrowanych przy zastosowaniu disdrometru laserowego Parsivel2 na obszarze Warszawy w 2013 r. Znaczna różnica między wartościami parametru *a* może wynikać z tego, że wskazane dwa badania przeprowadzono na podstawie znacząco różnej liczby danych, ponadto zarejestrowanych w okresach o różnym czasie trwania.

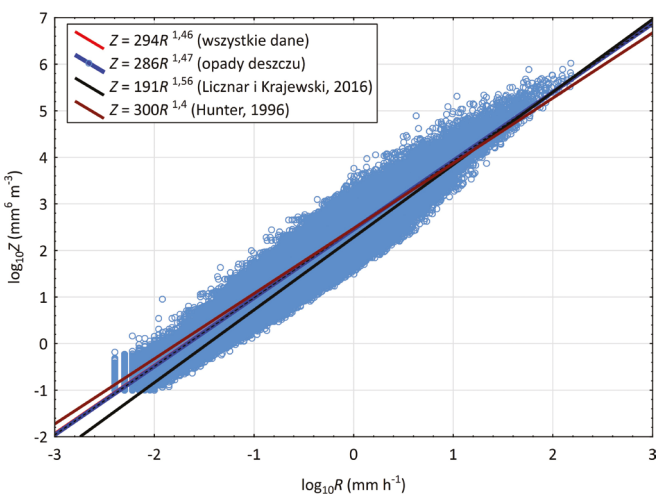
Zależność *Z-R* dla wszystkich danych, $Z = 293{,}76R^{1{,}46}$, porównano również z zależnością wyznaczoną przez Marshalla-Palmera, $Z = 200R^{1{,}6}$ (Marshall i Palmer, 1948; Marshall et al., 1955), która jest wykorzystywana przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy (IMGW-PIB) w procesie przetwarzania odbiciowości z radarów meteorologicznych w systemie POLRAD na wielkości opadów. Wartość parametru *a*, uzyskana w bieżących badaniach, była znacznie większa niż w równaniu Marshalla i Palmera. Natomiast wartości parametru *b*, były zbliżone do siebie. Należy również wspomnieć, że zależność Marshalla-Palmera jest zalecana dla opadów o charakterze warstwowym (Delrieu et al., 2014). Licznar i Siekanowicz-Grochowina (2015) w swojej pracy powołali się na wyniki badań Villariniego i Krajewskiego (2010), którzy wykazali, że mniejsze wartości parametru *a* były obserwowane w przypadku opadów o charakterze warstwowym (frontalnym) i wzrastały wraz ze wzmaganiem się procesów konwekcyjnych, natomiast parametr *b* wykazywał przeciwny kierunek zmian. W przypadku badań na terenie Warszawy uwzględniono zarówno opady warstwowe, jak i konwekcyjne. Zatem może to być jedna z przyczyn tego, że uzyskano w bieżących badaniach relatywnie większą wartość parametru *a* niż we wzorze Marshalla-Palmera. Wskazana rozbieżność między wartościami parametru *a* zależności *Z-R* może również wynikać z faktu, że były one wyprowadzone na podstawie danych zarejestrowanych w różnych lokalizacjach i warunkach klimatycznych, jak również w odległych od siebie okresach. Już we wczesnych badaniach meteorologii radarowej, Atlas i Chmiela (1957) wskazali, że nie istnieje jedna unikalna relacja *Z-R*,

a relacja ta zależy od wielu czynników, takich jak położenie geograficzne i typy opadów (Jiang et al., 2022).

Wyznaczone w wyniku badań na terenie Warszawy wartości parametrów zależności *Z-R* dla opadów deszczu wynosiły a = 285,56 oraz b = 1,47, zatem były bardzo zbliżone do uzyskanych dla wszystkich danych (tab. 2 i ryc. 3). Występujące niewielkie różnice mogą wynikać z dominacji w zbiorze pomiarowym opadów typu deszczowego. W adekwatnych badaniach, które przeprowadzili Licznar i Krajewski (2016) na podstawie danych z disdrometru Parsivel2 o rozdzielczości czasowej 10 s, zarejestrowanych na obszarze Warszawy w okresie około dwóch lat, uzyskali oni wartości parametrów a = 191,41 oraz b = 1,56 (ryc. 3). Wartość pierwszego z nich znacznie różniła się od wartości uzyskanej w bieżących badaniach, natomiast wartości parametru b były zbliżone do siebie. Opisana różnica między wartościami parametru a mogła być spowodowana wykorzystaniem przez Autorów bieżących badań danych zarejestrowanych w dłuższym okresie i innej rozdzielczości czasowej w porównaniu do cytowanych badań Licznara i Krajewskiego. Wpływ wydłużania przedziałów czasowych rejestracji danych na wartości parametrów *Z-R* opisano w pracy Licznara i Siekanowicz-Grochowiny (2015).

W niektórych krajach radary meteorologiczne korzystają z klasycznej zależności dla opadów deszczu konwekcyjnego $Z = 300R^{1,4}$ (Delrieu et al., 2014; Amengual, 2022; Jiang et al., 2022), zaproponowanej przez Huntera (1996). Trochę inną postać tej funkcji potęgowej podał Jakubiak et al. (2014, za Josse i Waldvogel, 1970), $Z = 300R^{1,5}$. Zatem zależność $Z = 285{,}56R^{1,47}$, uzyskana dla opadów deszczu zarejestrowanych przez disdrometr laserowy na stacji meteorologicznej SGGW, była zbliżona do wyznaczonej przez Huntera (ryc. 3).

W przypadku badań przeprowadzonych na podstawie dwóch zbiorów danych dotyczących opadów deszczu ze śniegiem oraz opadów śniegu, wartości parametru a zależ-

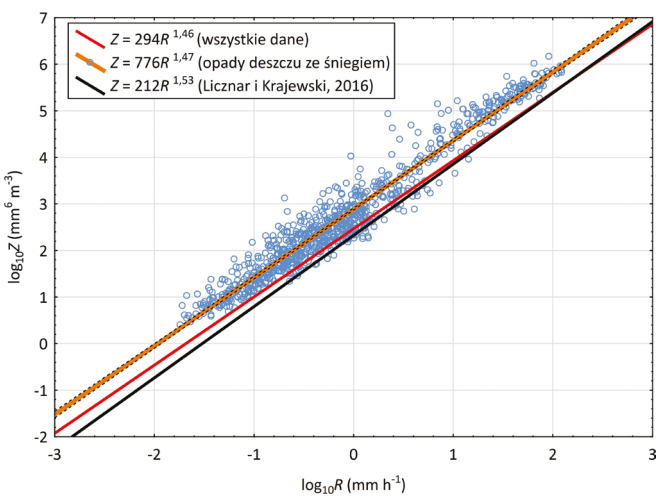


Ryc. 3. Wykres punktowy danych *Z-R* dla opadów deszczu; zależność *Z-R* opracowana dla opadów deszczu jest oznaczona granatową linią ciągłą; na rycinie pokrywa się ona z zależnością dla wszystkich danych; zamieszczone dla odniesienia, linie czarna i bordowa to zależności ustalone w innych badaniach

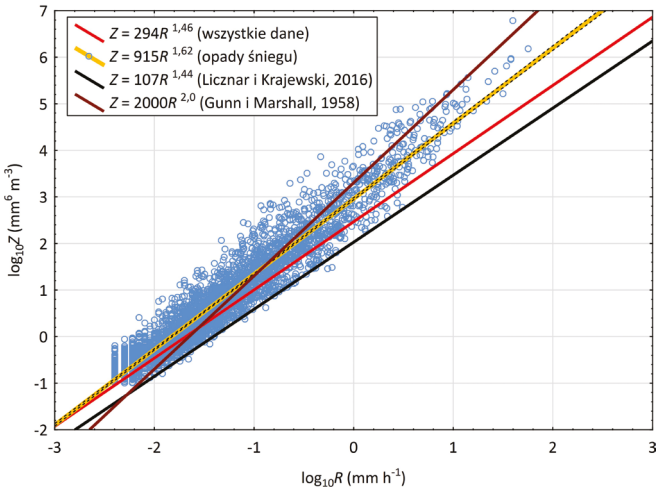
Scatter plot of Z-R data for rainfall, with the relationship developed for rainfall indicated by the dark blue solid line. In the figure it coincides with the relationship for all data; while included for reference are the black and maroon lines showing relationships developed in other studies

ności *Z-R*, wynoszące odpowiednio 776,07 i 914,74, były dużo większe niż wartości tego parametru wyznaczone dla wszystkich danych (ryc. 4 i 5) i opadów typu deszczowego. Natomiast wartości parametru *b* zależności *Z-R*, wynoszące odpowiednio 1,47 i 1,62, wykazały podobieństwo do wartości ustalonych dla dwóch pozostałych zbiorów danych. W podobnych badaniach, które przeprowadzili Licznar i Krajewski (2016) przy wykorzystaniu danych dla opadów deszczu ze śniegiem oraz opadów śniegu, uzyskano zależności między odbiciowością i intensywnością opadów odpowiednio w postaci $Z = 212{,}05R^{1{,}53}$ oraz $Z = 106{,}64R^{1{,}44}$ (funkcje liniowe zamieszczono dla odniesienia na ryc. 4 i 5). Wartości parametru *a* tych zależności *Z-R* były dużo mniejsze niż wartości, które ustalono w bieżących badaniach dla adekwatnych typów opadów (tab. 2). Należy zauważyć, że w badaniach Licznara i Krajewskiego (2016) wartość parametru *a* zależności *Z-R* dla śniegu była mniejsza niż uzyskana dla opadów deszczu (*a* = 191,41).

Jak podali Moszkowicz i Tuszyńska (2006), w procesie tworzenia obrazów radarowych dla opadów śniegu dość powszechnie stosowana jest zależność *Z-R* z parametrami wyznaczonymi przez Gunna i Marshalla (1958), wynoszącymi *a* = 2000, *b* = 2,0 (ryc. 5). Gunn i Marshall w swojej pracy zwrócili uwagę na istotną kwestię, że wcześniej podane przez nich wartości parametrów *a* = 200, *b* = 1,6 dla śniegu są błędne ze względu na metodę rejestracji danych stosowanych w tamtym czasie. Uzyskane w bieżących badaniach na terenie Warszawy wartości parametrów *a*, *b* dla opadów śniegu były znacząco mniejsze niż wartości podane przez powyższych autorów, ale jednocześnie dużo bardziej im bliższe niż wyznaczone przez Licznara i Krajewskiego (2016). Mając na uwadze takie rozbieżności między wartościami adekwatnych parametrów (w szczególności parametru *a*), wskazane są dalsze badania zależności *Z-R* dla opadów śniegu.



Ryc. 4. Wykres punktowy danych *Z-R* dla opadów deszczu ze śniegiem; zależność *Z-R* opracowana dla opadów deszczu ze śniegiem jest oznaczona pomarańczową linią ciągłą; zamieszczone dla odniesienia, czerwona linia to zależność *Z-R* dla wszystkich danych, czarna linia to zależność ustalona w innym badaniu
Scatter plot of Z-R data for sleet (rainfall with snow), with the relationship developed indicated by the solid orange line. Included for reference are the red line showing the Z-R relationship for all data, and the black line showing a relationship established in another study



Ryc. 5. Wykres punktowy danych *Z-R* dla opadów śniegu; zależność *Z-R* opracowana dla opadów śniegu jest oznaczona żółtą linią ciągłą; zamieszczone dla odniesienia, czerwona linia to zależność *Z-R* dla wszystkich danych, linie czarna i bordowa to zależności ustalone w innych badaniach
Scatter plot of Z-R data for snowfall, with the relationship developed indicated by the solid yellow line. Included for reference, the red line shows the Z-R relationship for all data, while the black and burgundy lines present relationships developed in other studies

Podsumowanie i wnioski

Wartości odbiciowości (*Z*) i intensywności opadów (*R*), zarejestrowane przez disdrometr laserowy Parsivel1 na terenie Warszawy w latach 2012-2014 oraz 2019-2020, wykorzystano do wyznaczenia zależności między tymi wielkościami (parametrów *a*, *b* zależności *Z-R*) dla wszystkich danych pomiarowych (95 459 par wartości *Z-R* o rozdzielczości czasowej 1 min) oraz trzech zbiorów danych dotyczących różnego typu opadów: deszczu, deszczu ze śniegiem, śniegu. Przeprowadzone badania umożliwiły sformułowanie następujących wniosków:

1. Zależności *Z-R*, uzyskane dla zbiorów pomiarowych, charakteryzowały się wysokimi wartościami współczynników korelacji *R* (w zakresie od 0,96 do 0,97) i determinacji R^2, jak również małymi wartościami błędu średniokwadratowego *RMSE* (od 0,29 do 0,34). Wyznaczone statystyki świadczą o dobrym dopasowaniu zależności *Z-R* (linii regresji) do określonych zbiorów danych.
2. Wartości parametru *a* (mnożnika) zależności *Z-R* typu potęgowego, wyznaczone dla trzech różnych grup typów opadów, znacząco różniły się względem siebie; wynosiły 285,56, 776,07 i 914,74, odpowiednio dla opadów deszczu, deszczu ze śniegiem i śniegu. Natomiast wartości parametru *b* (wykładnika) zawierały się w wąskim przedziale od 1,47 do 1,62. Uzyskane w wyniku badań wartości parametru *a*, wskazują na potrzebę uwzględnienia relacji *Z-R* dopasowanych do określonych typów opadów w procedurze przetwarzania danych radarowych, co mogłoby zwiększyć dokładność szacowania wielkości opadów przy wykorzystaniu radarów należących do ogólnopolskiego systemu POLRAD. Zasadne są dalsze badania zależności między

wartościami odbiciowości i intensywności opadów, oparte na obszerniejszych zbiorach pomiarowych dla różnego typu opadów.

3. Zależności $Z = 285{,}56R^{1{,}47}$ dla opadów deszczu (stanowiących dominujący typ opadów w zbiorze danych) oraz $Z = 293{,}76R^{1{,}46}$ dla wszystkich danych, wykazały duże podobieństwo do klasycznej zależności dla opadów deszczu konwekcyjnego $Z = 300R^{1{,}4}$, zaproponowanej przez Huntera (1996). Natomiast wartości parametru *a* zależności *Z-R* dla tych dwóch zbiorów danych były znacznie większe niż w modelu Marshalla i Palmera (1948), w postaci $Z = 200R^{1{,}6}$ – zależności *Z-R* wykorzystywanej przez IMGW-PIB w procesie tworzenia obrazów radarowych. Prezentowane wyniki badań skłaniają do przeprowadzenia weryfikacji zależności *Z-R* ustalonych przez Marshalla i Palmera na terenie Ottawy oraz w bieżących badaniach na terenie Warszawy, pod kątem porównania ich przydatności do szacowania wielkości opadów z wykorzystaniem radarów w systemie POLRAD. Dodatkowe badania powinny być ukierunkowane na wyznaczenie specyficznych zależności *Z-R* dla opadów o charakterze warstwowym i konwekcyjnym.

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

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

Piśmiennictwo

Atlas, D. & Chmela, A.C. (1957). Physical-synoptic variations of drop-size parameters. W: *Preprints, sixth weather radar conference* (s. 21-19). Boston, MA: American Meteorological Society.

Amengual, A. (2022). Hydrometeorological analysis of the 12 and 13 September 2019 widespread flash flooding in eastern Spain. *Natural Hazard and Earth System Sciences*, *22*, 1159-1179. https://doi/org/10.5194/nhess-22-1159-2022

Berne, A., Delrieu, G., Creutin, J.-D., & Obled, C. (2004). Temporal and spatial resolution of rainfall measurements required for urban hydrology. *Journal of Hydrology*, *299*(3-4), 166-179.

Biniak-Pieróg, M., Biel, G., Szulczewski, W., & Żyromski, A. (2015). Evaluation of methods of comparative analysis of sums of atmospheric precipitation measured with the classical method and with a contact-less laser rain gauge. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW Land Reclamation*, *47*, 371-382. https://doi/org/10.1515/sggw-2015-0038

Biniak-Pieróg, M. (2017). *Monitoring of atmospheric precipitation and soil moisture as basis for the estimation of effective supply of soil profile with water*. Monografie 207. Wrocław: Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego.

Bouilloud, L., Delrieu, G., Boudevillain, B., & Kirstetter, P.-E. (2010). Radar rainfall estimation in the context of post-event analysis of flash-flood events. *Journal of Hydrology*, *394*(1-2), 17-27. https://doi/org/10.1016/j.jhydrol.2010.02.035

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

Burszta-Adamiak, E. (2012). Analysis of Stormwater Retention on Green Roofs/Badania Retencji Wód Opadowych Na Dachach Zielonych. *Archives of Environmental Protection, 38*, 3-13. https://doi/org/10.2478/v10265-012-0035-3

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

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.

Dotzek, N. & Beheng, K.D. (2001). The influence of deep convective motions on the variability of Z-R relations. *Atmospheric Research*, *59*, 15-39. https://doi/org/10.1016/S0169-8095(01)00107-7

Gualco, L.F, Campozano, L., Maisincho, L., Robaina, L., Muñoz, L., Ruiz-Hernández, J.C., Villacís, M., & Condom, T. (2021). Corrections of Precipitation Particle Size Distribution Measured by a Parsivel OTT^2 Disdrometer under Windy Conditions in the Antisana Massif, Ecuador. *Water*, *13*, 2576. https://doi.org/10.3390/w13182576

Gunn, K.L.S. & Marshall, J.S. (1958). The distribution with size of aggregate snowflakes. *Journal of Meteorology*, *15*, 452-461.

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 Southeastern Australia. Hydrol. Earth Syst. Sci., *23*, 4737-4761. https://doi/org/10.5194/hess-23-4737-2019

Hazenberg, P., Yu, N., Boudevillain, B., Delrieu, G., & Uijlenhoet, R. (2011). Scaling of raindrop size distributions and classification of radar reflectivity- rain rate relations in intense Mediterranean precipitation. *Journal of Hydrology*, *402*, 179-192. https://doi/org/10.1016/j.jhydrol.2011.01.015

He, X., Sonnenborg, T.O., Refsgaard, J.C., Vejen, F., & Jensen, K.H. (2013). Evaluation of the value of radar QPE data and rain gauge data for hydrological modeling. *Water Resources Research*, *49*(9), 5989-6005. https://doi/org/10.1002/wrcr.20471

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

Jakubiak, B., Licznar, P., & Malinowski, Sz.P. (2014). Rainfall estimates from radar vs. raingauge measurements. Warsaw case study. *Environment Protection Engineering*, *40*(2), 159-170. https://doi/org/10.5277/epel140212

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

Johannsen, L.L., Zambon, N., Strauss, P., Dostal, T., Neumann, M., Zumr, D., Cochrane, T.A., Blöschl, G., & Klik, A. (2020). Comparison of three types of laser optical disdrometers under natural rainfall conditions. *Hydrological Sciences Journal*, *65*(4), 524-535. https://doi/org/10.1080/02626667.2019.1709641

Joss, J. & Waldvogel, A. (1970). A method to improve the accuracy of radar-measured amounts of precipitation, In: *Preprints, 14th Radar Meteorology Conference* (s. 237-238). Tucson, AZ: American Meteorological Society.

Jwa, M., Jin, H-G., Lee, J., Moon, S., & Baik, J-J. (2020). Characteristics of Raindrop Size Distribution in Seoul, South Korea According to Rain and Weather Types. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, *57*(3), 605-617. https://doi/org/10.1007/s13143-020-00219-w

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

Licznar, P. (2009). Wstępne wyniki porównawczych testów polowych elektronicznego deszczomierza wagowego OTT Pluvio2 i disdrometru laserowego Parsivel. *Instal*, *7/8*, 43-50.

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. http://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

Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., & Veith, T.L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, *50*(3), 885-900. https://doi/org/10.13031/2013.23153

Moszkowicz, S., & Tuszyńska, I. (2006). *Meteorologia radarowa. Podręcznik użytkownika informacji radarowej IMGW*. Warszawa: Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej.

Szewrański, S. (2009). *Rozbryzg jako forma erozji wodnej gleb lessowych*. Monografie 78. Wrocław: Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu.

Thorndahl, S., Einfalt, T., Willems, P., Nielsen, J.E., Veldhuis, M.-C., Arnbjerg-Nielsce, K., Rasmussen, M.R., & Molnar, P. (2017). Weather radar rainfall data in urban hydrology. *Hydrology and Earth System Sciences*, *21*, 1359-1380.

Thurai, M., Petersen, W.A., Tokay, A., Schultz, C., & Gatlin, P. (2011). Drop size distribution comparisons between Parsivel and 2-D video disdrometers. *Advances in Geosciences*, *30*, 3-9. https://doi/org/10.5194/adgeo-30-3-2011

Tokay, A., Peterson, W.A., Gatlin, P., & Wingo, M. (2013). Comparison of raindrop size distribution measurements by collocated disdrometers. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, *30*(8), 1672-1690. https://doi/org/10.1175/JTECH-D-12-00163.1

Tokay, A., Wolff, D.B., & Petersen, W.A. (2014). Evaluation of the new version of the laser-optical disdrometer, OTT Parsivel^2. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, *31*, 1276-1288. https://doi/org/10.1175/JTECH-D-13-00174.1

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

Summary

An alternative to the use of rain gauges as sources of precipitation data is provided by laser disdrometers, which *inter alia* allow for high-temporal-resolution measurement of the reflectivity (*Z*) and intensity (*R*) of precipitation. In the study detailed here, an OTT Parsivel1 laser disdrometer located at the Meteorological Station of Warsaw University of Life Sciences (SGGW) generated the 95,459 *Z-R* data pairs recorded across 1-min time intervals that were subject to further study. Included values for the reflectivity and instantaneous intensity of precipitation were found to be in the respective ranges of -9.998-67.898 dBZ and 0.004-153.519 mm h^{-1} (given that values for precipitation intensity below 0.004 mm h^{-1} were excluded from further consideration). The material obtained covered the months from April to October in the years 2012-2014 and 2019-2020 (30 months in total), which were selected for the study due to the completeness of data.

The measured reflectivity and intensity data for precipitation were used to establish the relationship pertaining between the two (by reference to descriptive parameters *a* and *b*), with such results considered to contribute to the improved calibration of meteorological radars, and hence to more-accurate radar-based estimates of amounts of precipitation.

The *Z-R* relationship as determined for all measurement data offered a first step in the research process, whose core objective was nevertheless to determine separate *Z-R* relationships for datasets on rain, rain with snow (sleet), and snow (given that precipitation in the form of hail did not occur during the surveyed measurement periods).

That said, it is important to note that only a few Polish studies have in any way involved disdrometer-based measurement of precipitation reflectivity and intensity, as well as the relationships between these aspects. In the event, the *Z-R* relationships obtained for the measurement sets were characterised by high values for coefficients of correlation (in the range 0.96-0.97) and determination, as well as low values for the root mean-square error (ranging from 0.29 to 0.34). Statistics point to a good fit of the *Z-R* relationships (regression lines) to the specified datasets.

Values noted for parameter *a* (the multiplier in the power-type *Z-R* relationship) were seen to differ significantly in relation to rain, rain with snow, and snow, being of 285.56, 776.07 and 914.74 respectively. In contrast, values noted for parameter *b* (the exponent) varied only across the narrow range of 1.47-1.62.

The obtained research results for parameter a indicate the need to consider Z-R relationships matched to specific types of precipitation in the data processing procedure of radar data. This could increase the accuracy of estimating precipitation amounts using radars belonging to the nationwide POLRAD system. The relationships $Z = 285.56R^{1.47}$ for rainfall (as the dataset's dominant type of precipitation), as well as $Z = 293.76R^{1.46}$ for all data, proved highly similar to the classic relationship obtained for convective rainfall by Hunter (1996), as given by $Z = 300R^{1.4}$. On the other hand, the values of the *a* parameter in the *Z-R* relationships fond for the two datasets proved to be much larger than those in the model developed by Marshall and Palmer (1948), which took the form $Z = 200R^{1,6}$ and has been the relationship used in Poland as radar images are created.

[Wpłynęło: luty 2023; poprawiono: czerwiec 2023]