



## Wyznaczanie natężenia opadu na podstawie danych z radarów z podwójną polaryzacją fali elektromagnetycznej

KAROL DZWONKOWSKI<sup>1</sup>, IRENEUSZ WINNICKI<sup>2</sup>,  
SŁAWOMIR PIETREK<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Szefostwo Służby Hydrometeorologicznej SZ RP, ul. Leśna, 02-800 Warszawa  
karoldzwonkowski22@gmail.com

<sup>2</sup>Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji,  
Instytut Inżynierii Geoprzestrzennej i Geodezji, ul. gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa,  
ireneusz.winnicki@wat.edu.pl, slawomir.pietrek@wat.edu.pl

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono wyniki pilotażowych badań stref zachmurzenia z opadem gradu na podstawie danych z radaru z podwójną polaryzacją fali elektromagnetycznej pracującego w Rzeszowie-Jasionce, który jest jednym z ośmiu radarów meteorologicznych tworzących nową sieć POLRAD zarządzaną przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej — PIB. Skanowanie atmosfery falą o podwójnej polaryzacji dostarcza znaczną ilość danych radarowych, które dokładnie opisują wykryte obiekty meteorologiczne, w tym rozmiary cząsteczek chmurowych i opadowych. Przeprowadzone badania umożliwiły jakościowy i ilościowy opis stref zachmurzenia z opadem atmosferycznym o zmiennej intensywności oraz ze zmiennym rozkładem przestrzennym i czasowym. Uzyskanie danych o strukturze strefy zachmurzenia wymaga stworzenia nowych niestandardowych zobrażeń przedstawiających horyzontalne i pionowe rozkłady odbiciowości radarowej wyznaczonej na podstawie pomiarów w kanale klasycznym radaru. Dane radarowe przetworzono z wykorzystaniem oprogramowania RAINBOW DART i RAPOK. Wygenerowano całkowicie nowe zbiory danych opadowych dla wybranego rejonu z zachowaniem zgodności miejsca oraz terminu obserwacji, w których uwzględniono natężenie opadu, stan fazowy oraz czynniki środowiskowe. Opracowane pionowe przekroje radioecharakterystyki wzdłuż zadanej trasy dostarczyły informacje o strukturze i aktywności badanej komórki burzowej oraz występującym rdzeniu opadowym. Natężenie opadu atmosferycznego wyznaczono z zależności Marshalla–Palmera, Jossa oraz Muchnika, w których użyto odbiciowości radarowej na wysokościach 1 km, 1,5 km i 2 km nad powierzchnią gruntu z uwzględnieniem poziomu zamarzania. W pracy przedstawiono kompleksową analizę sytuacji wystąpienia opadu gradu na podstawie danych synoptycznych oraz zobrażeń natężenia opadu i prawdopodobieństwa jego wystąpienia. Wykazano, że

dostępne w sieci wymiany danych meteorologicznych standardowe zobrazowanie natężenia opadu generowane każdorazowo na podstawie zależności Marshalla–Palmera dla odbiciowości radarowej na wysokości 1 km nad powierzchnią gruntu może zawierać błędy, których zminimalizowanie wymaga dokonania zmian w algorytmach obliczeniowych. Na tym etapie badań w obliczeniach wykorzystano inne zależności, przy wyborze których uwzględniono rodzaj opadu. Natomiast dane o strukturze badanej komórki burzowej pozwoliły na obliczenia na podstawie wartości odbiciowości radarowej wyznaczonych na różnych poziomach w rdzeniu opadowym. Analizę otrzymanych radarowych danych opadowych prowadzono na podstawie zarówno danych synoptycznych, jak i klimatycznych dla badanego rejonu. W następnym etapie badań wykorzystane zostaną wyniki pomiarów terenowych prowadzonych w rejonach z rozbudowaną siecią bezpośrednich pomiarów opadów atmosferycznych. Wyniki tych badań pozwolą na rekomendowanie zależności empirycznych do wyznaczania natężenia opadu w zależności od rodzaju opadu, budowy chmury opadowej oraz warunków środowiskowych.

**Słowa kluczowe:** inżynieria lądowa, geodezja i transport, teledetekcyjne badanie atmosfery, radar z podwójną polaryzacją fali elektromagnetycznej, odbiciowość radarowa, natężenie opadu, opad gradu

**DOI:** 10.5604/01.3001.0054.2899

## 1. Wprowadzenie

W osłonie hydrometeorologicznej kraju i działań wojsk ważnym elementem jest prognozowanie wystąpienia opadów atmosferycznych, ich intensywności i czasu trwania oraz stanu fazowego. Skuteczność prognoz uwarunkowana jest możliwością wiarygodnej detekcji stref zachmurzenia, w których występują opady atmosferyczne lub spełnione są warunki do ich powstawania.

Współczesny radar meteorologiczny dostarcza dane o zachmurzeniu i opadach występujących na obszarze o powierzchni 100 000 km<sup>2</sup>, które otrzymywane są praktycznie w czasie rzeczywistym z częstością od kilku do kilkunastu minut. Wyniki radarowego badania atmosfery pozwalają na śledzenie zachmurzenia i zjawisk w rejonach o rzadkiej sieci pomiarów meteorologicznych, np. nad morzami. W sytuacjach przemieszczania się aktywnego cyklonu z ekstremalnymi zjawiskami meteorologicznymi pomiary radarowe prowadzone w czasie rzeczywistym są źródłem wiarygodnych informacji, np. dla ośrodków zarządzania kryzysowego [5, 7, 11].

W Polsce działa sieć radarów meteorologicznych POLRAD, którą zarządza Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej — PIB. Obecnie w sieci pracuje osiem radarów, które wykonują pomiary w kanałach klasycznym i dopplerowskim, a swoim zasięgiem obejmują większość obszaru Polski. Radary emitujące falę elektromagnetyczną z pojedynczą polaryzacją (pozioma) wymieniane są sukcesywnie na radary z podwójną polaryzacją fali (pozioma i pionowa). Zastosowane zmiany techniczne i technologiczne spowodowały znaczny wzrost ilości otrzymywanych danych radarowych, które dokładniej opisują wykryte obiekty meteorologiczne, w tym rozmiary cząsteczek chmurowych i opadowych [4, 10].

Skanowanie atmosfery przez radar meteorologiczny dostarcza dane o horyzontalnym i pionowym rozkładzie stref zachmurzenia z opadami atmosferycznymi. Ich strukturę opisują wartości odbiciowości radarowej. W wielu ośrodkach badawczych

przeprowadzono liczne eksperymenty polowe ukierunkowane na opracowanie zależności empirycznych wiążących wyznaczoną odbiciowość radarową z natężeniem opadu atmosferycznego [6, 8, 9]. Pomiaru terenowe prowadzone były w różnych warunkach klimatycznych i środowiskowych. W pracy zastosowano zależności Marshalla–Palmera, Jossa i Muchnika, w których wykorzystano wartości odbiciowości radarowej na wysokościach 1 km, 1,5 km oraz 2 km nad powierzchnią gruntu.

W badaniach korzystano z danych z radaru meteorologicznego o podwójnej polaryzacji fali elektromagnetycznej pracującego w Rzeszowie-Jasionce. Celem prowadzonych badań jest opracowanie metodyki przetwarzania danych radarowych prowadzącej do otrzymania zarówno jakościowego, jak i ilościowego opisu stref zachmurzenia z występującym opadem atmosferycznym. Otrzymane wnioski dotyczą rekomendowania wybranych zależności natężenia opadu od odbiciowości radarowej do stosowania w różnych sytuacjach synoptycznych.

## 2. Radarowa detekcja opadów atmosferycznych

Na podstawie wyników radarowego skanowania atmosfery określa się położenie stref zachmurzenia, w których mogą występować opady atmosferyczne. Dane te pozwalają na zobrazowanie rozciągłości pionowej oraz horyzontalnej wykrywanych stref zachmurzenia. Do ilościowego opisu opadów atmosferycznych, tzn. wyznaczenia ich natężenia oraz sumy opadu w wybranym obszarze i w zdefiniowanym przedziale czasu, wykorzystuje się zależności empiryczne wiążące odbiciowość radarową z natężeniem opadu [3, 5, 6, 12].

$$Z = A R^b \quad (1)$$

gdzie:  $Z$  — odbiciowość radarowa [ $\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3}$ ];

$R$  — natężenie opadu [ $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ];

$A, b$  — parametry, których wartości wyznaczono w badaniach polowych.

Wartości parametrów liczbowych  $A$  i  $b$  w zależnościach empirycznych zależą nie tylko od intensywności, rodzaju oraz stanu fazowego występującego opadu, lecz także od pory roku i strefy klimatycznej. W eksperymentach polowych prowadzonych przez zespoły z zagranicznych ośrodków badawczych korzystano z wyników bezpośrednich pomiarów opadów (systemy deszczomierzy lub tzw. disdrometrów). Rezultatem tych badań było wyznaczenie wartości parametrów  $A$  i  $b$  występujących w zależności (1). W tabeli 1 przedstawiono wyniki przeprowadzonych eksperymentów polowych [6].

TABELA 1

Wartości parametrów  $A$  i  $b$  wyznaczone w eksperymentach polowych [6]

Wartości parametrów liczbowych		Nazwa zależności	Warunki zastosowania zależności
A	b		
31	1,71	Blancharda	Opad orograficzny
2000	2.0	Marshalla i Gunna	Opad śniegu
350	1,42	Atlasa i Chmela	Opad występujący z chmur warstwowych
380	1,24	Jonesa	Opady przelotne deszczu
500	1,5	Jossa	Opad występujący w strefie burzowej
250	1,5		Opad deszczu
140	1,5		Mżawka
520	1,81	Foote'a	Opady przelotne i burze na szczytach gór
184	1,25	Diema	Opady w porze wiosennej
227	1,31		Opady w porze letniej
178	1,25		Opady w porze jesiennej
150	1,23		Opady w porze zimowej
205	1,48	Fujiwary	Opad jednostajny deszczu
300	1,37		Opad przelotny deszczu
450	1,46		Opad występujący w strefie burzowej
204	1,7	Muchnika	Przelotny i jednostajny opad deszczu
200	1,6	Marshalla–Palmera	Opad jednostajny deszczu

Wygenerowane obrazy radarowe zawierają wartości odbiciowości skutecznej  $Z_e$ , która odpowiada odbiciowości zastępczej chmury złożonej tylko z kropelek wody, co oznacza, że radioecho od niej ma taką samą moc, jaką otrzymuje się od chmury rzeczywistej. Ponieważ dla pojedynczych pomiarów wartości odbiciowości skutecznej  $Z_e$  zmieniają się w bardzo szerokim zakresie (w praktyce od zera do miliona), to stosuje się skalę logarytmiczną i odbiciowość radarową wyraża się w decybelach odbiciowości [dBZ] [6]:

$$Z_e[\text{dBZ}] = 10 \log Z_e[\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3}] \quad (2)$$

W przeprowadzonych badaniach do detekcji stref zachmurzenia oraz występowania opadów atmosferycznych wykorzystano dane z radaru w Rzeszowie-Jasionce, który emituje falę elektromagnetyczną o podwójnej polaryzacji (w płaszczyźnie poziomej i pionowej). Otrzymane dane fotogrametryczne były przetwarzane

w programie RAINBOW DART, który umożliwia sterowanie pracą radaru przez dobór odpowiednich parametrów skanowania atmosfery oraz generowanie obrazów radarowych:

- maksymalna wartość odbiciowości radarowej — MAX;
- pionowy przekrój radioecha wzdłuż zadanej trasy — VCUT;
- prawdopodobieństwo wystąpienia opadu gradu — ZHAIL;
- wysokość wierzchołków echa radarowego — EHT;
- suma opadu w czasie 1 godziny — PAC;
- rozkład odbiciowości radarowej na wybranej wysokości — CAPPI;
- natężenie opadu (z radarów o podwójnej polaryzacji) — DPSRI [1, 2].

W sieci POLRAD w standardowej procedurze generowania obrazu radarowego DPSRI (natężenie opadu na podstawie danych z radaru o podwójnej polaryzacji fali elektromagnetycznej) każdorazowo wykorzystywana jest zależność Marshalla–Palmera oraz wartości odbiciowości radarowej z wysokości 1 km nad powierzchnią gruntu. Oznacza to, że w obliczeniach tylko częściowo uwzględniana jest rzeczywista struktura chmury opadowej oraz rodzaj występującego opadu.

Do opracowania ilościowych opisów stref zachmurzenia i opadów atmosferycznych wykorzystano program RAPOK 5.1.7. Obliczenia natężenia opadu prowadzono na podstawie zależności Marshalla–Palmera, Muchnika oraz Jossa (zaznaczone w tabeli 1), które są rekomendowane dla różnych rodzajów opadów atmosferycznych. Wartości odbiciowości radarowej wyznaczono dla trzech warstw chmur położonych na wysokości 1 km, 1,5 km oraz 2 km nad powierzchnią gruntu. Przy wyborze zastosowanych zależności uwzględniono wnioski z analizy sytuacji synoptycznej, warunki środowiskowe oraz rodzaj opadów występujących w rejonie badań [1, 2, 3].

### **3. Analiza strefy zachmurzenia i opadów atmosferycznych 11.06.2020 w rejonie Rzeszowa**

#### **3.1. Sytuacja synoptyczna w rejonie badań**

Pogoda 11 czerwca 2020 roku w południowej części Polski kształtowana była przez cyklon z centrum nad Morzem Czarnym (1008 hPa) w strefie zbieżności wiatru (rys. 1). Układ przemieszczał się z kierunku południowo-wschodniego na północny zachód. Adwekcja mas powietrza na poziomie 500 hPa z kierunku 120-150° o prędkości 55-65 km·h<sup>-1</sup>. Napływała masa powietrza polarnomorskiego o równowadze chwiejnej (rys. 1 i 2).



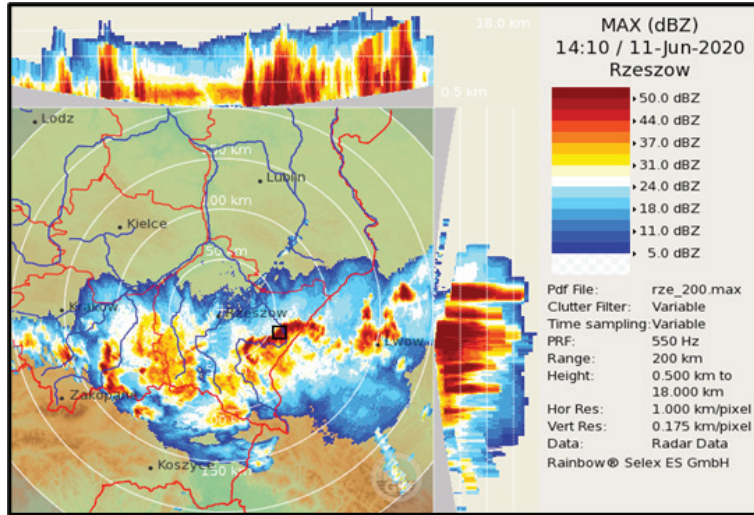
Warunki atmosferyczne występujące 11 czerwca 2020 r. w rejonie Rzeszowa w godzinach 13.20-15.40 UTC:

- wielkość zachmurzenia 8-5/8 przez chmury Ac, Sc, Cu, St oraz lokalnie Cb;
- wysokość względna podstawy najniższej warstwy chmur wynosiła 600-60 m;
- widzialność powyżej 10 km, okresowo ograniczona do 6-3 km przy występujących przelotnych opadach deszczu i gradu;
- wiatr z kierunku 100-160° o prędkości 2-5 m · s<sup>-1</sup>;
- temperatura powietrza 25-23°C;
- temperatura punktu rosy 16-19°C;
- ciśnienie atmosferyczne zredukowane do poziomu morza 1012-1013 hPa;
- wysokość występowania izotermy 0°C — 3800 m;
- wysokość występowania izotermy -12°C — 6000 m;
- wysokość występowania tropopauzy około 12 000 m.

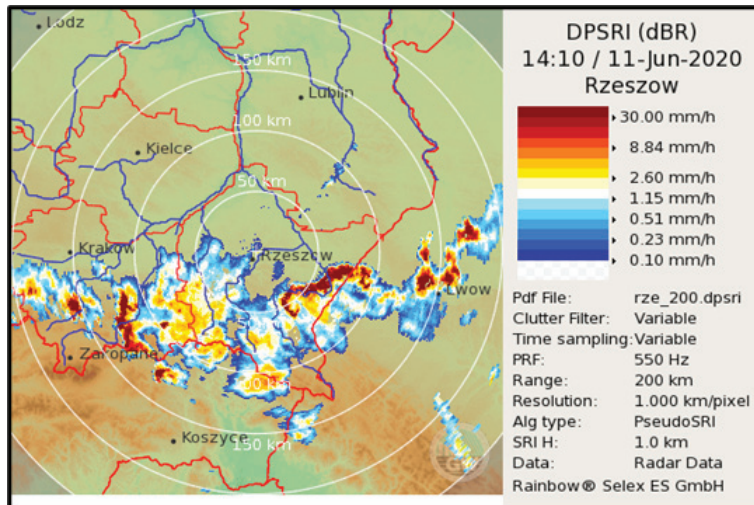
### 3.2. Analiza danych radarowych w rejonie badań

Rejon, w którym prowadzono badania, położony był w odległości około 50 km na południowy wschód od radaru w Rzeszowie-Jasionce (rys. 3). Dane radarowe pochodzą z terminów 13.20-15.40 UTC. Parametry radarowe wyznaczone przy skanowaniu obiektów meteorologicznych są przyporządkowywane ich poszczególnym elementom, których rozmiary przestrzenne zależą od parametrów technicznych radaru (m.in. szerokość kątowna wiązki antenowej, czas trwania impulsu) oraz odległości obiektu od radaru. Biorąc pod uwagę także inne ograniczenia radarowego badania atmosfery, zdecydowano, że do dalszych obliczeń wykorzystywane będą wartości średnie parametrów radarowych wyznaczonych dla wybranych 25 punktów pomiarowych w rejonie badań, których rozmiar w terenie to 1 × 1 km. Na obecnym etapie badań przyjęte rozwiązanie pozwala na ograniczenie wpływu możliwych błędów pomiarów radarowych.

Wstępną analizę radioech od obiektów meteorologicznych zarejestrowanych przez radar w Rzeszowie-Jasionce przeprowadzono na podstawie wygenerowanych z częstością 10 minut obrazów radarowych: MAX (rys. 3), DPSRI (rys. 4), ZHAIL (rys. 5), EHT, PAC oraz CAPPI.



Rys. 3. Maksymalne wartości odbiciowości radarowej (MAX) 11 czerwca 2020 r. (14.00 UTC) z radaru w Rzeszowie-Jasionce. Wybrany rejon badań oznaczono kwadratem



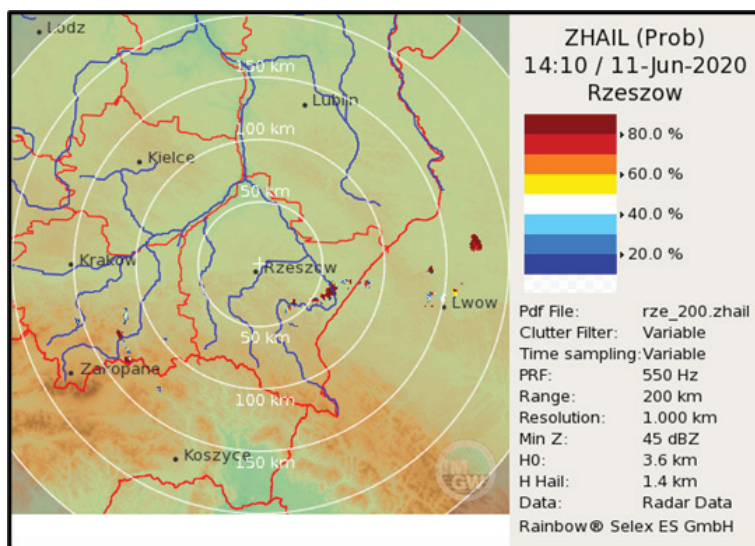
Rys. 4. Natężenia opadu (DPSRI) 11 czerwca 2020 r. (14.10 UTC) z radaru w Rzeszowie-Jasionce

W tabeli 2 zestawiono średnie wartości parametrów wyznaczonych w rejonie badań w terminach 13.20-15.40 UTC. Analiza zmian ich wartości w funkcji czasu pozwala na formułowanie wniosków dotyczących poszczególnych stadiów rozwoju zachmurzenia występującego w rejonie badań.

Maksymalny rozwój chmur i zjawisk wystąpił o godzinie 14.10 UTC. W tym czasie wartość maksymalnej odbiciowości wynosiła ponad 54 dBZ, wysokość echa



radarowego przekraczała 12 km, a prawdopodobieństwo wystąpienia gradu było ponad 99%. Wartości tych parametrów wskazują na występowanie silnie rozbudowanej chmury cumulonimbus (Cb) z opadem gradu (tabela 2).



Rys. 5. Prawdopodobieństwo wystąpienia opadu gradu (ZHAIL) 11 czerwca 2020 r. (14.10 UTC) z radaru w Rzeszowie-Jasionce

TABELA 2

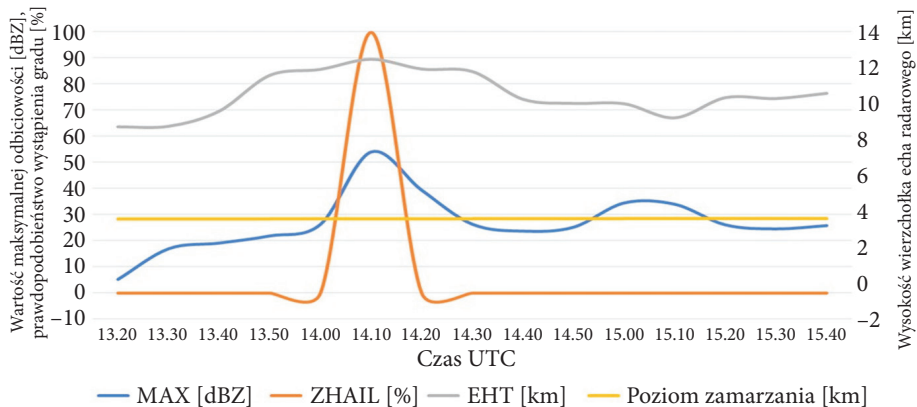
Wartości średnie parametrów radarowych z 11 czerwca 2020 r. (13.20-15.40 UTC)

Termin [UTC]	MAX [dBZ]	ZHAIL [%]	EHT [km]	PAC [mm]	CAPPI [dBZ]	DPSRI [mm·h <sup>-1</sup> ]
13.20	5,31	0	8,71	0,03	0,12	0,04
13.30	17,03	0	8,74	0,03	0	0
13.40	19,2	0	9,58	0,03	0,05	0,04
13.50	21,93	0	11,57	0,02	0	0
14.00	26,35	0	11,90	0,01	3,16	0,08
<b>14.10</b>	<b>54,02</b>	<b>99,61</b>	<b>12,46</b>	<b>3,43</b>	<b>50,34</b>	<b>66,41</b>
14.20	39,42	0	11,92	8,73	28,64	4,03
14.30	26,41	0	11,78	9,05	19,6	0,68
14.40	23,76	0	10,24	9,12	14,88	0,38
14.50	25,26	0	10,01	9,21	20,95	0,85
15.00	34,54	0	9,99	<b>9,53</b>	30,00	2,93

cd. tab. 2

15.10	34,04	0	9,21	6,65	30,06	3,06
15.20	26,17	0	10,33	1,68	22,86	1,05
15.30	24,62	0	10,28	1,5	17,74	0,64
15.40	25,87	0	10,57	1,52	19,48	0,67

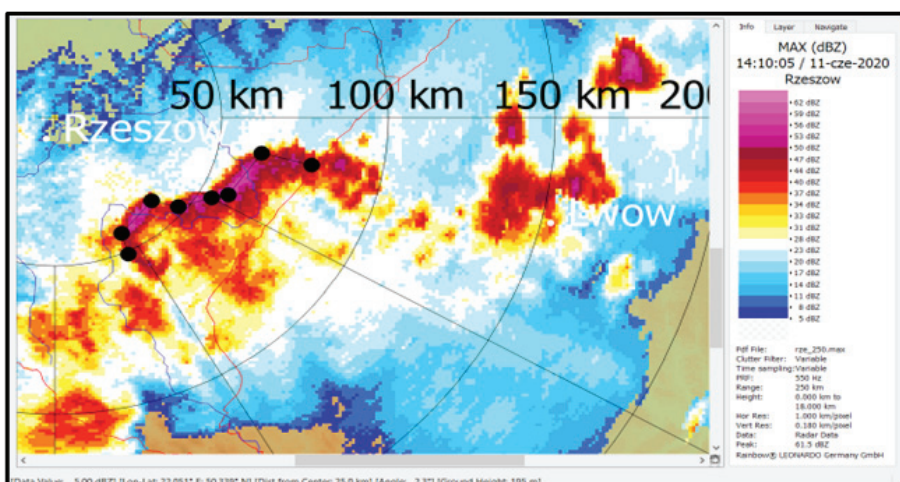
Na rysunku 6 przedstawiono przebiegi czasowe zmian wybranych parametrów radarowych wyznaczonych dla rejonu badań. W przedziale 13.20-14.10 UTC następował dynamiczny rozwój chmury (odbiciowość wzrosła od 5 do 54 dBZ, a górna granica radioecha od 8 do ponad 12 km). Natomiast po terminie maksymalnego rozwoju chmury wartości parametrów radarowych zmniejszały się, przy czym do końca terminu badań nie były niższe niż 25 dBZ dla odbiciowości radarowej oraz 10 km dla górnej granicy radioecha. Oznaczało to, że wprawdzie aktywność chmury malała, jednak nadal stwarzała ona zagrożenie np. dla działań lotnictwa. Po uwzględnieniu wysokości izotermy 0°C (poziom zamarzania) wynoszącej 4 km można stwierdzić, że w chmurze spełnione były warunki do występowania intensywnego oblodzenia statków powietrznych.



Rys. 6. Przebiegi czasowe zmian wartości maksymalnej odbiciowości radarowej (MAX), prawdopodobieństwa wystąpienia opadu gradu (ZHAIL) i wysokości wierzchołków echa radarowego (EHT) 11 czerwca 2020 r. w rejonie badań. Na wykresie zaznaczono położenie poziomu zamarzania

Do zbadania wewnętrznej struktury wykrytego systemu zachmurzenia wykorzystano jedną z funkcjonalności oprogramowania narzędziowego do przetwarzania danych radarowych RAINBOW DART, która umożliwia wykonanie pionowego przekroju atmosfery wzdłuż zadanej trasy (produkt VCUT).

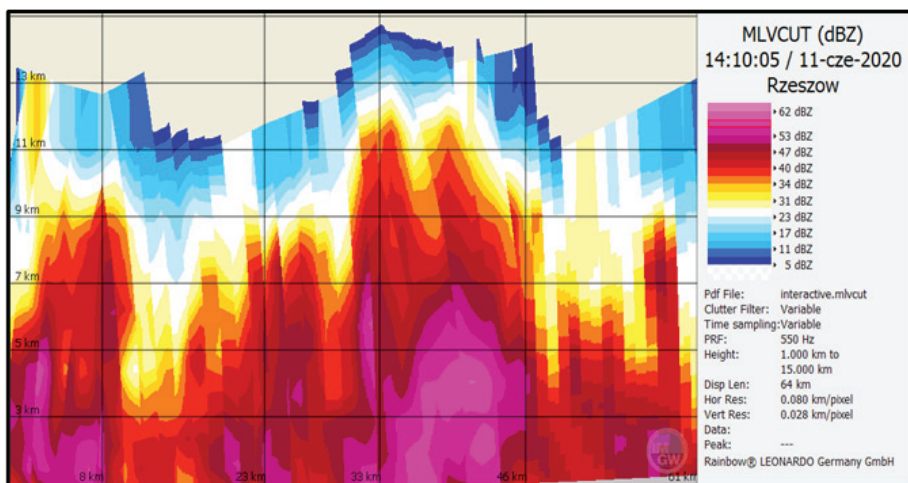
Pionowe przekroje atmosfery obrazują rozkład maksymalnej odbiciowości radarowej w badanej strefie zachmurzenia w wybranym terminie pomiarowym. W aktywnej i rozległej strefie zachmurzenia możliwe jest zlokalizowanie wbudowanych chmur cumulonimbus (Cb) oraz wykrycie rdzeni opadowych. Wnioski z analizy pionowego rozkładu wartości odbiciowości radarowej oraz wysokości położenia rdzenia opadowego umożliwiają wskazanie, którą zależność natężenia opadu od odbiciowości radarowej należy zastosować w danej sytuacji. Do obliczeń natężenia opadu wartości odbiciowości radarowej wyznacza się na wysokości odpowiadającej położeniu rdzenia opadowego.



Rys. 7. Trasa, wzdłuż której wygenerowano pionowy przekrój atmosfery

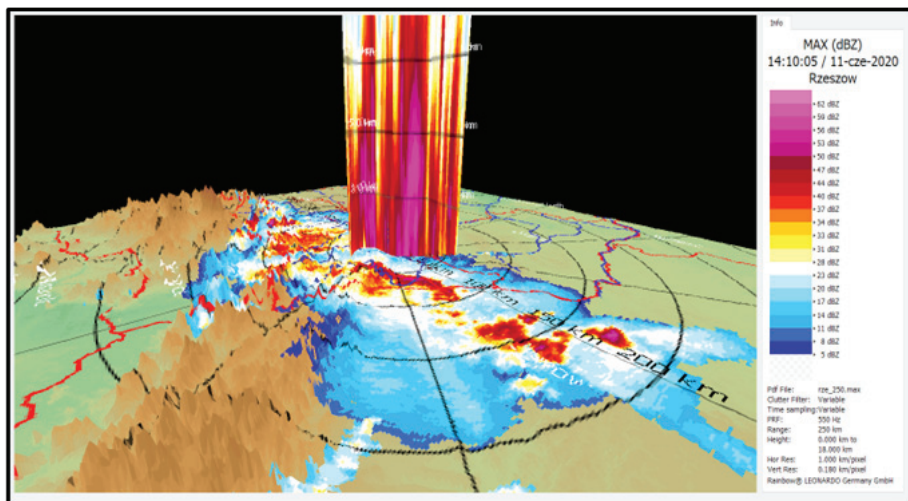
W celu poznania struktury zachmurzenia występującego w terminie i rejonie badań wygenerowano szereg pionowych przekroi atmosfery wzdłuż trasy o długości 60 km położonej w strefie najwyższych wartości odbiciowości radarowej (rys. 7).

Na rysunku 8 przedstawiono przekrój atmosfery wygenerowany w terminie maksymalnego rozwoju zachmurzenia. Górne granice radioecha wynosiły od 11 do 15 km, co wskazuje na występowanie silnie rozbudowanych chmur cumulonimbus (Cb) o wierzchołkach osiagających tropopauzę, a na odcinku trasy od 30 do 46 km wierzchołki chmur przebiły tropopauzę. Przy intensywnych opadach deszczu i gradu maksymalne wartości odbiciowości radarowej (powyżej 50 dBZ) występowały w chmurach od powierzchni gruntu do wysokości 5-7 km. Wnioski z analizy pionowego rozkładu odbiciowości radarowej w rdzeniach opadowych chmur wykorzystano do wyznaczenia natężenia opadów.



Rys. 8. Pionowy przekrój atmosfery wzdłuż zadanej trasy (MLVCUT) 11 czerwca 2020 r. (14.10 UTC) na podstawie danych z radaru w Rzeszowie-Jasionce

Do opisu przebiegu procesów konwekcyjnych prowadzących do rozwoju chmur wykorzystuje się funkcję oprogramowania RAINBOW DART, która umożliwia przedstawienie pionowego przekroju atmosfery w formacie 3D z uwzględnieniem rzeźby terenu (rys. 9).



Rys. 9. Pionowy przekrój atmosfery 3D 11 czerwca 2020 r. (14.10 UTC) na podstawie danych z radaru w Rzeszowie-Jasionce

### 3.2.1. Wyznaczenie natężenia opadów na podstawie danych radarowych z wysokości 1 km nad powierzchnią gruntu

Dla rejonu badań wykonano obliczenia wartości natężenia opadu na podstawie danych radarowych z wysokości 1 km nad powierzchnią gruntu, w których wykorzystano zależności Marshalla–Palmera, Muchnika oraz Jossa (tabela 3). Otrzymane wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 3.

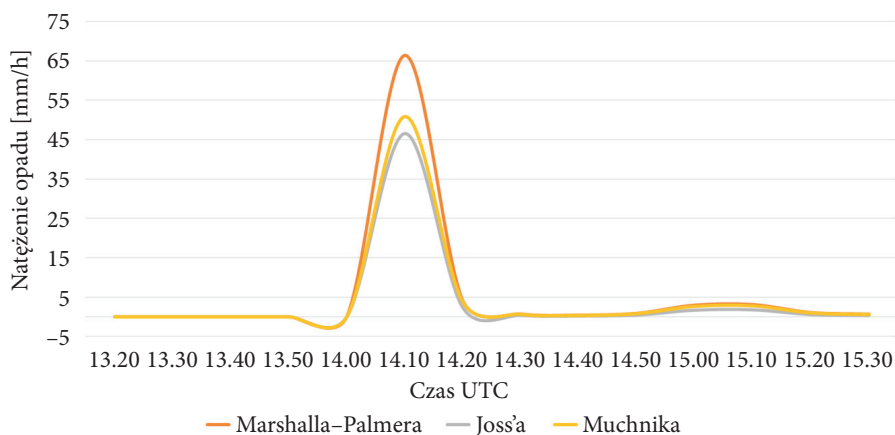
TABELA 3

Wartości średnie natężenia opadu wyznaczone w rejonie badań 11 czerwca 2020 r. (13.20-15.30 UTC) na podstawie wartości odbiciowości radarowej na wysokości 1 km nad powierzchnią gruntu

Termin [UTC]	Odbiciowość radarowa [dBZ]	Zależności		
		Marshalla–Palmera [mm · h <sup>-1</sup> ]	Jossa [mm · h <sup>-1</sup> ]	Muchnika [mm · h <sup>-1</sup> ]
13.20	0	0	0	0
13.30	0	0	0	0
13.40	0	0	0	0
13.50	0	0	0	0
14.00	3,16	0,07	0,03	0,08
<b>14.10</b>	<b>50,34</b>	<b>66,41</b>	<b>46,48</b>	<b>50,79</b>
14.20	28,64	4,03	2,32	3,81
14.30	19,6	0,68	0,36	0,68
14.40	14,88	0,38	0,19	0,39
14.50	20,95	0,85	0,45	0,85
15.00	30,00	2,93	1,69	2,7
15.10	30,06	3,06	1,77	2,82
15.20	22,86	1,05	0,57	1,03
15.30	17,74	0,64	0,33	0,64

Kolorem czerwonym zaznaczono maksymalne wartości natężenia opadu, które wystąpiły w badanym rejonie o godzinie 14.10 UTC. Na podstawie wartości podanych w tabeli 3 opracowano przebiegi czasowe wartości natężenia opadu (rys. 10).

Na podstawie danych synoptycznych ustalono, że w rejonie badań występowały opady deszczu z gradem. W tej sytuacji wyznaczone wartości odbiciowości radarowej obarczone są błędem, który powodowany jest znaczącą różnicą pomiędzy rozmiarami gradzin i kropeł deszczu (gradziny mogą mieć średnicę do kilku centymetrów, a duże krople deszczu do kilkunastu milimetrów) oraz zmieniającym się stanem fazowym wody.



Rys. 10. Przebiegi czasowe zmian wartości natężenia opadu 11 czerwca 2020 r. w rejonie badań wyznaczone z zależności Marshalla–Palmera, Jossa oraz Muchnika dla odbiciowości radarowej na wysokości 1 km nad powierzchnią gruntu

Wartości natężenia opadu wyznaczone na podstawie wybranych zależności znacząco się różnią. Największe wartości otrzymano dla zależności Marshalla–Palmera, a najmniejsze dla zależności Jossa (różnica natężenia opadu wynosiła  $19,93 \text{ mm h}^{-1}$ ). Z obrazu radarowego ZHAIL wynika, że w analizowanym terminie prawdopodobieństwo wystąpienia opadu gradu wynosiło 99,61%.

### 3.2.2. Wyznaczenie natężenia opadów na podstawie danych radarowych z wysokości 1,5 km nad powierzchnią gruntu

Na podstawie wygenerowanych obrazów radarowych wyznaczono odbiciowość radarową na wysokości 1,5 km nad powierzchnią gruntu, a następnie obliczono natężenie opadu, wykorzystując zależności Marshalla–Palmera, Muchnika oraz Jossa. W tabeli 4 podano wyznaczone wartości natężenia opadu w rejonie badań w terminach 13.20-15.40 UTC.

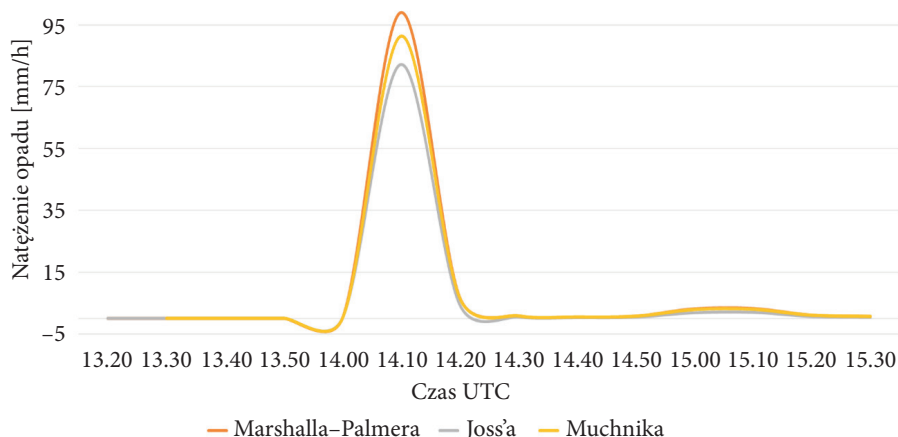
Kolorem czerwonym zaznaczono maksymalne wartości natężenia opadu, które wystąpiły w badanym rejonie o godzinie 14.10 UTC. Na podstawie wartości podanych w tabeli 4 opracowano przebiegi czasowe wartości natężenia opadu (rys. 11).

W rejonie badań wartość odbiciowości radarowej na wysokości 1,5 km wynosiła 55,75 dBZ, co oznacza, że w porównaniu z wartością na 1 km wzrosła o 5,41 dBZ. Wartości natężenia opadu wyznaczone na podstawie wybranych zależności znacząco się różnią. Największe wartości otrzymano dla zależności Marshalla–Palmera, a najmniejsze dla zależności Jossa (różnica wynosiła  $16,79 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ). Przy interpretacji otrzymanych wartości natężenia opadu należy uwzględnić, że rozmiary kropel deszczu i gradzin mogły być większe niż na wysokości 1 km.

TABELA 4

Wartości średnie natężenia opadu wyznaczone 11 czerwca 2020 r. w godzinach 13.20-15.30 UTC na podstawie wartości odbiciowości radarowej na wysokości 1,5 km nad powierzchnią gruntu w rejonie badań

Termin [UTC]	Odbiciowość radarowa [dBZ]	Zależności		
		Marshalla-Palmera [ $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ]	Jossa [ $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ]	Muchnika [ $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ]
13.20	0	0	0	0
13.30	0	0	0	0
13.40	0	0	0	0
13.50	0	0	0	0
14.00	5,38	0,08	0,04	0,09
14.10	55,75	98,92	82,13	91,27
14.20	36,65	6,80	4,39	6,52
14.30	21,44	0,80	0,43	0,80
14.40	17,21	0,44	0,24	0,45
14.50	20,59	0,71	0,39	0,71
15.00	30,87	3,10	1,81	2,86
15.10	31,09	3,20	1,93	2,95
15.20	23,33	1,05	0,57	1,03
15.30	19,90	0,64	0,31	0,64



Rys. 11. Przebiegi czasowe zmian wartości natężenia opadu 11 czerwca 2020 r. w rejonie badań wyznaczone z zależności Marshalla-Palmera, Jossa oraz Muchnika dla odbiciowości radarowej na wysokości 1,5 km nad powierzchnią gruntu

### 3.2.3. Wyznaczenie natężenia opadów na podstawie danych radarowych z wysokości 2 km nad powierzchnią gruntu

Na podstawie wygenerowanych obrazów radarowych wyznaczono odbiciowość radarową na wysokości 2 km nad powierzchnią gruntu, a następnie obliczono natężenie opadu, wykorzystując zależności Marshalla–Palmera, Muchnika oraz Jossa. W tabeli 5 podano wyznaczone wartości natężenia opadu w rejonie badań w terminach 13.20-15.40 UTC.

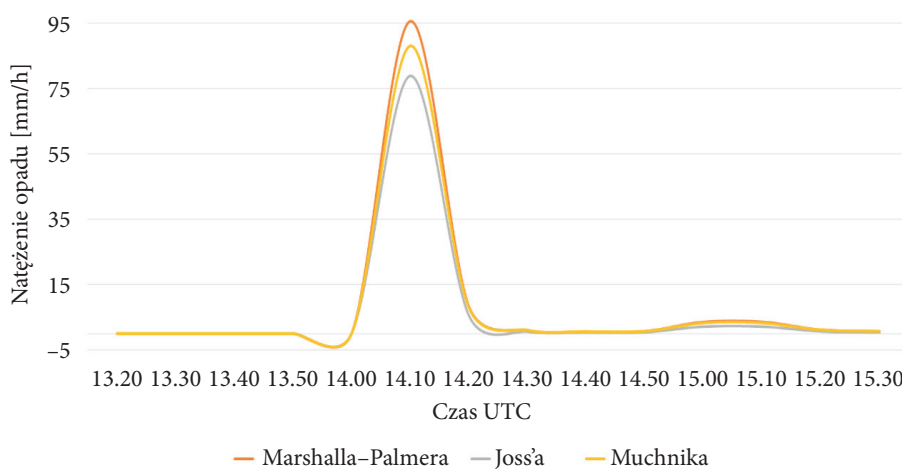
TABELA 5

Wartości natężenia opadu wyznaczone 11 czerwca 2020 r. w godzinach 13.20-15.30 UTC na podstawie wartości odbiciowości radarowej na wysokości 2 km nad powierzchnią gruntu w rejonie badań

Termin [UTC]	Odbiciowość radarowa [dBZ]	Zależności		
		Marshalla–Palmera [mm · h <sup>-1</sup> ]	Jossa [mm · h <sup>-1</sup> ]	Muchnika [mm · h <sup>-1</sup> ]
13.20	0	0	0	0
13.30	0	0	0	0
13.40	0	0	0	0
13.50	0	0	0	0
14.00	9,85	0,15	0,07	0,16
14.10	55,5	95,55	78,88	88,01
14.20	37,98	8,22	5,40	7,85
14.30	23,13	1,02	0,58	1,00
14.40	19,31	0,59	0,31	0,6
14.50	21,01	0,75	0,40	0,75
15.00	31,86	3,57	2,11	3,28
15.10	31,89	3,59	2,11	3,28
15.20	24,14	1,18	0,64	1,15
15.30	20,85	0,73	0,38	0,74

Kolorem czerwonym zaznaczono maksymalne wartości natężenia opadu, które wystąpiły w badanym rejonie o godzinie 14.10 UTC. Na podstawie wartości podanych w tabeli 5 opracowano przebiegi czasowe wartości natężenia opadu (rys. 12).





Rys. 12. Przebiegi czasowe zmian wartości natężenia opadu 11 czerwca 2020 r. w rejonie badań wyznaczone z zależności Marshalla–Palmera, Jossa oraz Muchnika dla odbiciowości radarowej na wysokości 2 km nad powierzchnią gruntu

W rejonie badań wartość odbiciowości radarowej na wysokości 2 km wynosiła 55,5 dBZ, co oznacza, że w porównaniu z wartością na 1 km wzrosła o 5,16 dBZ. Natomiast w warstwie chmur od 1,5 do 2 km wartości odbiciowości radarowej były praktycznie równe, co może oznaczać, że rozmiary kropeł deszczu i gradzin w tej warstwie się nie zmieniły. Wartości natężenia opadu wyznaczone na podstawie wybranych zależności znacząco się różnią: największe otrzymano dla zależności Marshalla–Palmera, a najmniejsze dla zależności Jossa (różnica wynosiła  $16,62 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ).

#### 3.2.4. Analiza porównawcza otrzymanych danych radarowych i wartości natężenia opadu

W tabeli 6 zestawiono wyznaczone na podstawie wybranych zależności empirycznych wartości natężenia opadu dla odbiciowości radarowych na trzech wysokościach nad powierzchnią gruntu w rejonie badań.

Dane wyróżnione kolorem czerwonym oznaczają największe wartości natężenia opadu, który wystąpił w badanym rejonie. Otrzymano je w terminie 14.10 UTC dla każdej z zastosowanych zależności empirycznych. Na podstawie danych z tabeli 6 opracowano histogram, który zobrazowuje otrzymane wartości w terminie 14.10 UTC (rys. 13).

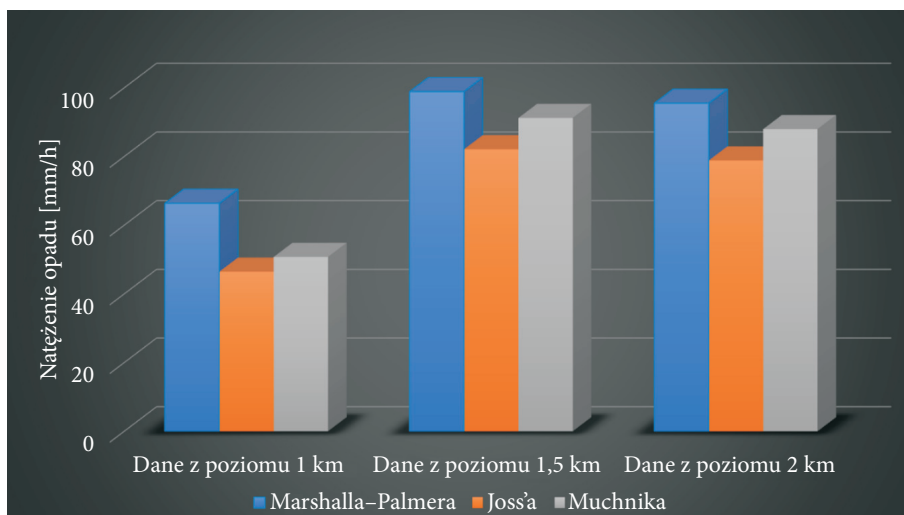
TABELA 6

Wartości średnie natężenia opadu wyznaczone 11.06.2020 r. w godzinach 13.20-15.30 UTC na podstawie wybranych zależności dla wartości odbiciowości radarowej na wysokości 1 km, 1,5 km oraz 2 km nad powierzchnią gruntu

Termin [UTC]	Zależności								
	Marshalla-Palmera			Jossa			Muchnika		
	Wysokość nad powierzchnią gruntu								
	1 km	1,5 km	2 km	1 km	1,5 km	2 km	1 km	1,5 km	2 km
	Natężenie opadu [ $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ]								
13.20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13.30	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13.40	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13.50	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14.00	0,07	0,08	0,15	0,03	0,04	0,07	0,08	0,09	0,16
14.10	66,41	98,92	95,55	46,48	82,13	78,88	50,79	91,27	88,01
14.20	4,03	6,80	8,22	2,32	4,39	5,40	3,81	6,52	7,85
14.30	0,68	0,80	1,02	0,36	0,43	0,58	0,68	0,80	1,00
14.40	0,38	0,44	0,59	0,19	0,24	0,31	0,39	0,45	0,60
14.50	0,85	0,71	0,75	0,45	0,39	0,40	0,85	0,71	0,75
15.00	2,93	3,10	3,57	1,69	1,81	2,11	2,70	2,86	3,28
15.10	3,06	3,20	3,59	1,77	1,93	2,11	2,82	2,95	3,28
15.20	1,05	1,05	1,18	0,57	0,57	0,64	1,03	1,03	1,15
15.30	0,64	0,64	0,73	0,33	0,31	0,38	0,64	0,64	0,74

Wyniki obliczeń na podstawie zależności Marshalla-Palmera wskazują, że dla odbiciowości radarowych na każdej z badanych wysokości otrzymano największe wartości natężenia opadu spośród trzech stosowanych zależności. Przy czym wartości natężenia opadu  $66-99 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  zazwyczaj występują w przypadku opadów nawalnych, które mogą powodować zagrożenie dla ludzi i infrastruktury. Zależność Marshalla-Palmera jest rekomendowana do stosowania dla opadów jednostajnych z chmur warstwowo-deszczowych, a w terminie badań występowały opady przelotne z chmur cumulonimbus (Cb).

Obliczenia wykonane na podstawie zależności Jossa miały najniższe wartości natężenia opadu z trzech stosowanych zależności, ale różnica pomiędzy wartościami otrzymanymi dla odbiciowości radarowych na trzech wysokościach wynosiła  $35,65 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ . Wyznaczone wartości natężenia opadu  $46-82 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  także zazwyczaj występują w przypadku opadów nawalnych. Zależność Jossa jest rekomendowana do stosowania dla opadów występujących w strefie burzowej.



Rys. 13. Zestawienie wartości natężenia opadu wyznaczonego z zależności Marshalla-Palmera, Jossa oraz Muchnika dla odbiciowości radarowej na wysokości 1 km, 1,5 km oraz 2 km nad powierzchnią gruntu (11 czerwca 2020 r., 14.10 UTC)

Natężenia opadu wyznaczone na podstawie zależności Muchnika, która jest rekomendowana do stosowania w przypadku przelotnych i jednostajnych opadów deszczu, znajdują się pomiędzy wartościami uzyskanymi przy stosowaniu pozostałych dwóch zależności. Przy czym różnica pomiędzy wartościami natężenia opadu otrzymanymi dla odbiciowości radarowych na trzech wysokościach wynosiła  $40,48 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  i była najwyższa w porównaniu do pozostałych zależności.

W badanych chmurach wyznaczono odbiciowość radarową na trzech wysokościach nad poziomem gruntu, przy czym najwyższa wartość była na wysokości 1,5 km i wynosiła 55,75 dBZ, co powodowało, że dla każdej zależności empirycznej obliczone natężenie opadu było najwyższe.

#### 4. Wnioski

W sieci radarowej POLRAD standardowo dostępne są zobrazowania natężenia opadu SRI lub DPSRI (pomiar z wykorzystaniem fali podwójnie spolaryzowanej) oraz prawdopodobieństwo wystąpienia opadu gradu ZHAIL. Dane o natężeniu opadu wyznaczone są każdorazowo na podstawie zależności Marshalla-Palmera dla odbiciowości radarowej na wysokości 1 km nad powierzchnią gruntu.

W celu przeprowadzenia niestandardowej analizy danych radarowych, tzn. otrzymania zarówno jakościowej, jak i ilościowej charakterystyki strefy zachmurzenia z występującym opadem, należy przetworzyć je z wykorzystaniem oprogramowania

RAINBOW DART i RAPOK. Otrzymano zbiory danych opadowych dla zdefiniowanego rejonu z zachowaniem zgodności miejsca oraz terminu obserwacji, w których uwzględniono natężenie opadu, stan fazowy oraz czynniki środowiskowe. Opracowane pionowe przekroje atmosfery wzdłuż zadanej trasy dostarczyły informacje o strukturze i aktywności badanej komórki burzowej, a następnie pozwoliły na przeprowadzenie analizy występującego rdzenia opadowego.

W badaniach natężenie opadu wyznaczano dla odbiciowości z wysokości 1 km, 1,5 km i 2 km nad powierzchnią gruntu z wykorzystaniem trzech zależności empirycznych:

- Marshalla–Palmera — zalecanej dla opadów jednostajnych;
- Jossa — zalecanej dla opadów w strefie burzowej;
- Muchnika — zalecanej dla opadów jednostajnych i przelotnych.

W wybranym rejonie w analizowanym terminie wystąpiły intensywne przelotne opady deszczu z gradem. Dla wszystkich zależności empirycznych różnice pomiędzy maksymalnymi wartościami natężenia opadu wyznaczonymi dla odbiciowości na wysokości 1,5 km i 2 km są dwukrotnie mniejsze niż w przypadku różnic w odniesieniu do danych z wysokości 1 km. Największe wartości natężenia opadu otrzymano dla odbiciowości na wysokości 1,5 km, co wskazuje, że w przypadku opadów przelotnych zasadne jest generowanie zobrazowań SRI lub DPSRI na podstawie danych z tej wysokości.

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że w przypadku zależności Jossa występuje najmniejsza różnica pomiędzy wartościami maksymalnego natężenia opadu wyznaczonego na trzech wysokościach. Można sformułować roboczą tezę, że ta zależność jest rekomendowana do wyznaczania natężenia opadu w sytuacjach występowania opadów przelotnych.

Głównym celem badań jest opracowanie metodyki przetwarzania danych radarowych, która pozwoli na otrzymanie zarówno jakościowego, jak i ilościowego opisu stref zachmurzenia z występującym opadem atmosferycznym, w szczególności gradem. Wprowadzone w kilku ostatnich latach do sieci POLRAD nowoczesne radary z podwójną polaryzacją fali elektromagnetycznej dostarczają nieosiągalne dotychczas dane o strukturze chmur. Jak się okazuje, rozwój techniki pomiarowej wymusza również zmiany w dotychczas stosowanych procedurach obliczeniowych.

Na obecnym etapie badań wykazano, że standardowe radarowe zobrazowania natężenia opadu otrzymane na podstawie empirycznej zależności Marshalla–Palmera nie są źródłem wiarygodnych danych o opadach, zwłaszcza przelotnych. Oczywiście w analizie radarowych danych opadowych korzystano z danych synoptycznych i klimatycznych dla badanego rejonu. Wyniki badań zostaną przekazane do Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej — PIB z wnioskiem o dokonanie korekt w algorytmach wyznaczania natężenia opadu.

W kolejnym etapie badań planowane są pomiary polowe wysokości opadu w wybranym rejonie. Przygotowanie własnej gęstej sieci pomiarowej ze względów organizacyjnych i finansowych nie jest możliwe. Dlatego wykorzystane zostaną posterunki pomiarów hydrometeorologicznych, które położone są w odległości do 100 km od radaru, tzn. w odległości zapewniającej dużą wiarygodność danych radarowych. Poszczególnym punktom bezpośrednich pomiarów przyporządkowany będzie rejon, dla którego wyniki pomiarów będzie można przyjąć za reprezentatywne. Przy ustalaniu wielkości rejonu zostaną uwzględnione warunki środowiskowe i mikroklimatyczne.

W każdym rejonie badań wyznaczone zostaną wartości parametrów radarowych — w punktach, których liczba będzie związana z wielkością rejonu. Na ich podstawie zostaną wskazane wartości średnie parametrów radarowych, później wykorzystane do dalszych obliczeń.

Założonym wynikiem kompleksowych badań będzie wskazanie zależności empirycznych rekomendowanych do wyznaczenia natężenia opadu — w zależności od rodzaju opadu, budowy chmury opadowej oraz warunków środowiskowych.

Źródło finansowania pracy — praca zrealizowana w ramach UGB 22-816 nr 48668.

Artykuł wpłynął do redakcji 20.06.2023. Zatwierdzono do publikacji 27.06.2023.

Karol Dzwonkowski <http://orcid.org/0009-0006-1671-558X>

Ireneusz Winnicki <http://orcid.org/0000-0001-9170-422X>

Sławomir Pietrek <http://orcid.org/0000-0001-9890-8487>

#### LITERATURA

- [1] AREERACHAKUL N., PRONGNUCH S., LONGSOMBOON P., KANDASAMY J., *Quantitative Precipitation Estimation (QPE) Rainfall from Meteorology Radar over Chi Basin*, Hydrology, 9, 10, 2022, <https://doi.org/10.3390/hydrology9100178>
- [2] BRINGI V.N., THURAI M., HANNSEN R., *Dual Polarization. Weather Radar handbook*, 2007.
- [3] FABRY F., *Radar Meteorology: Principles and Practice*, Cambridge University Press, 2015.
- [4] KURCZYŃSKI Z., *Fotogrametria*, PWN, Warszawa 2014.
- [5] MCCARTHY N., MCGOWAN H., GUYOT A., DOWDY A., *Mobile X-Pol Radar. A New Tool for Investigating Pyroconvection and Associated Wildfire Meteorology*, Bulletin of the American Meteorological Society, 99, 6, 2018, 1177-1195, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0118.1>.
- [6] MOSZKOWICZ S., TUSZYŃSKA I., *Meteorologia radarowa*, IMGW, Warszawa 2006.
- [7] PIETREK S.A., JASINSKI J.M., WINNICKI I.A., *Analysis of a storm situation over the southern Baltic Sea using direct hydrometeorological and remote sensing measurements results*, Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin, 38,110, 2014, 81-88.
- [8] RAGHAVAN S., *Radar Meteorology*, Springer 2013.
- [9] TUSZYŃSKA I., *Charakterystyka produktów radarowych*, IMGW, Warszawa 2011.
- [10] TUSZYŃSKA I., *Rozwój meteorologii radarowej w Polsce*, IMGW, Warszawa 2015.
- [11] World Meteorological Organization, *Instruments and observing methods report No. 88*, WMO 2006.

- [12] ZHANG G., MAHALE V.N., PUTNAM B.J., QI Y., CAO Q., BYRD A., BUKOVIC P., ZRNIC D.S., GAO J., *Current Status and Future Challenges of Weather Radar Polarimetry: Bridging the Gap between Radar Meteorology/Hydrology/Engineering and Numerical Weather Prediction*, *Advances in Atmospheric Sciences*, 36, 6, 2019, 571-588, <https://doi.org/10.1007/s00376-019-8172-4>.
- [13] Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, [www.imgw.pl](http://www.imgw.pl) [dostęp: 19.06.2023].
- [14] Die ganze Welt in Wetterkarten, [www.wetter3.de](http://www.wetter3.de) [dostęp: 19.06.2023].

K. DZWONKOWSKI, I. WINNICKI, S. PIETREK

### **Determination of precipitation intensity based on data from dual polarisation radar**

**Abstract.** The paper presents the results of a preliminary study of cloudiness area with hail precipitation based on data from a dual-polarisation electromagnetic wave radar operating in Rzeszów-Jasionka which is one of eight meteorological radars belonging to the POLRAD managed by the Institute of Meteorology and Water Management – National Research Institute. Atmospheric dual-polarisation wave scanning provides a significant radar data that accurately describes detected meteorological objects, including the sizes of cloud and precipitation particles. The conducted research enabled us a qualitative and quantitative description of cloudy zones with precipitation of variable intensity and variable spatial and temporal distribution. Obtaining data on the structure of the cloud cover zone requires the creation of new and non-standard imagery showing horizontal and vertical distributions of radar reflectivity determined on the basis of measurements in the classic radar channel. Radar data were processed using RAINBOW DART and RAPOK software. Completely new rainfall datasets were generated for the selected region with consistency of location and observation date, in which precipitation intensity, phase state, and environmental factors were taken into account. Developed vertical cross-sections of the atmosphere along the set route provided information on the structure and activity of the studied storm cell and the precipitation core present. Precipitation intensity was determined from the Marshall-Palmer, Joss and Muchnik correlations, which used radar reflectivity at heights of 1 km, 1.5 km, and 2 km above the ground surface, taking into account the freezing level. The paper presents a comprehensive analysis of the hail situation based on synoptic data and images of hail intensity and hail probability. It was shown that, available in the meteorological data exchange network, the standard images of precipitation intensity generated in each case based on the Marshall-Palmer correlation for radar reflectivity at a height of 1 km above the ground surface may contain errors, which require changes in calculation algorithms to be minimised. At this stage of the research, other dependencies were used in the calculations, which took into account the type of precipitation. On the other hand, data on the structure of the studied storm cell allowed us calculations based on the values of radar reflectivity determined at different levels in the rain core. The analysis of the obtained radar precipitation data was carried out on the basis of both syn-optic and climatic data for the studied region. In the next stage of research, the results of field measurements carried out in regions with an extensive network of direct precipitation measurements will be used. The results of these studies will allow us to recommend empirical relationships for determining precipitation intensity depending on the type of precipitation, the structure of the precipitation cloud and environmental conditions.

**Keywords:** civil engineering, geodesy and transport, remote sensing of the atmosphere, dual polarisation radar, radar reflectivity, rainfall intensity, hail

**DOI:** 10.5604/01.3001.0054.2899