

Katedra Meteorologii i Klimatologii  
Wydział Nauk Geograficznych, Uniwersytet Łódzki, Łódź  
ul. Narutowicza 88, 90-139 Łódź  
piotr.piotrowski@geo.uni.lodz.pl; mariusz.siedlecki@geo.uni.lodz.pl

PIOTR PIOTROWSKI, MARIUSZ SIEDLECKI

## Weryfikacja pośrednich metod określania stanu fazowego opadu atmosferycznego

---

Verification of indirect methods used to define the precipitation phase

**Słowa kluczowe:** opad atmosferyczny, deszcz, śnieg, rodzaj opadu atmosferycznego

**Keywords:** precipitation, rainfall, snowfall, precipitation type

### WSTĘP

Rodzaj opadu atmosferycznego może determinować wiele istotnych zjawisk i procesów zachodzących w środowisku naturalnym. Z hydrologicznego punktu widzenia reakcja zlewni dla opadu w formie ciekłej jest zupełnie odmienna niż dla opadów stałych. Podczas opadu deszczu woda wsiąka w glebę (jeśli nie jest zamrznięta), zasilając wody gruntowe, a część odpływa w formie spływu powierzchniowego. Z kolei opady w postaci śniegu sprzyjają, przy ujemnej temperaturze, retencjonowaniu wody i przechowywaniu jej w formie stałej do roztopów, które w przypadku nagromadzenia się dużej ilości śniegu i jego szybkiego topnienia śniegu mogą stanowić zagrożenie powodziowe lub też być cennym źródłem wody dla roślin w początkowym stadium ich rozwoju w okresie mniej gwałtownego przebiegu procesu topnienia śniegu. Prawidłowe określanie stanu fazowego opadów jest istotne dla opracowywania modeli prognoz bilansu wodnego lodowców i lądolodów, zagrożeń lawinowych, szacowania zasobów wód roztopowych w okresie wiosennym dla rolnictwa i zmian klimatu (za: Feiccabrino i Lunberg 2009). Prognozy stanu fazowego opadu oraz jego wysokości są bardzo użyteczne również dla służb miejskich zajmujących się usuwaniem śniegu oraz służb kontrolujących sieć kanalizacyjną.

Opady atmosferyczne w umiarkowanych szerokościach mogą występować w formie stałej, ciekłej lub mieszanej we wszystkich porach roku. W Polsce w porach przejściowych często dochodzi do wahań temperatury powietrza w pobliżu 0°C. Wahania temperatury powietrza w okolicach 0°C dość często pojawiają się także podczas ciepłych zim. Tego typu sytuacje utrudniają prognozowanie stanu fazowego opadu atmosferycznego. W profilu pionowym może dochodzić ponadto do zmian stanu fazowego opadu atmosferycznego od momentu wypadnięcia z chmury do chwili dotarcia do powierzchni ziemi.

Numeryczne prognozy stanu fazowego opadu atmosferycznego umożliwiają znacznie bardziej złożoną analizę opartą na większej liczbie danych środowiskowych, które są opisane za pomocą modeli dynamicznych. Prognozowanie rodzaju opadów atmosferycznych w modelach atmosfery (np. WRF) rozwiązywane jest w tzw. module mikrofizyki chmur (Michalakes i in. 2004, Skamarock i in. 2008). Zagadnienie to opiera się na szeregu równań opisujących proces tworzenia się i wzrostu kryształów lodu (proces Bergerona), a także parametryzacji procesów uwzględniających bilans cieplny i wodny chmury, ewaporację kropeł, procesy dynamiczne i termodynamiczne w chmurze (Kessler 1969; Rutledge i in. 1984; Ryan 1984). W przypadku prognozy rodzaju opadu deszcz–śnieg wynik opiera się na prognozie warunków topienia produktów kondensacji w chmurze i na dystansie chmura – podłoże (Lin i in. 1983; Ghosh, Jonas 1998). W starszych metodach prognozowania rodzaju opadu atmosferycznego wykorzystywano metody bazujące głównie na danych empirycznych i ustalonych progach termicznych. Wartości progów termicznych były ustalane w różny sposób. Nie zawsze przyjmowano stałe kryteria termiczne, czasami były one zmieniane dla pojedynczych zdarzeń (Pomeroy i in. 2007). W niektórych opracowaniach starano się również określać stany fazowe opadu atmosferycznego na podstawie temperatury punktu rosy, lecz w zależności od miejsca stosowania uzyskiwano odmienne wyniki w porównaniu z metodą opartą na temperaturze powietrza (Feiccabrinno, Lundberg 2009). Metody oparte na progach termicznych mogą być użyteczne w przypadku braku odpowiednich danych lub niedostatecznej mocy obliczeniowej komputerów.

W opracowaniu dokonano weryfikacji trzech metod określania rodzaju opadu atmosferycznego na podstawie danych termicznych (*Podręcznik długoterminowych prognoz ...* 1969; *Meteorologia synoptyczna* 1990, Worobjew 2006). Kryteria zastosowane w wybranych metodach sprawdzono wykorzystując historyczne dane meteorologiczne ze stacji pomiarowych w Legionowie i Warszawie oraz dane z reanaliz. Porównanie wyników weryfikacji metod oparte na dwóch źródłach danych miało na celu sprawdzenie, czy dane z reanaliz mogą być przydatne do tego typu weryfikacji ze względu na łatwą ich dostępność i powszechność

wykorzystywania w opracowaniach klimatologicznych. Dodatkowo, na podstawie porównania wybranych metod starano się uzyskać informację, która z analizowanych metod jest najlepsza do określania poszczególnych rodzajów opadu atmosferycznego w sposób pośredni.

## MATERIAŁY I METODY

Weryfikacji poddano trzy metody określania stanu fazowego opadu atmosferycznego (*Podręcznik długoterminowych prognoz ...* 1969; *Meteorologia synoptyczna* 1990; Worobjew 2006). Weryfikacja wybranych metod określania rodzaju opadu atmosferycznego opiera się na kryteriach termicznych, które zostały ustalone na podstawie danych empirycznych ze stacji meteorologicznej Warszawa-Bielany oraz stacji aerologicznej w Legionowie, a także danych pochodzących z reanaliz. Wybrane do sprawdzenia metody mają charakter empiryczny. Kryteria zastosowane w trzech wybranych metodach są następujące:

– W metodzie bazującej na temperaturze powietrza przy powierzchni ziemi i wysokości izotermy  $0^{\circ}\text{C}$  przyjęto założenie, iż opad atmosferyczny w formie deszczu występuje, gdy wysokość izotermy  $0^{\circ}\text{C}$  jest powyżej 500 m, a temperatura powietrza w warstwie przyziemnej wynosi powyżej  $+3^{\circ}\text{C}$ . W przypadku, gdy wysokość izotermy  $0^{\circ}\text{C}$  jest poniżej 500 m i temperatura powietrza w warstwie przyziemnej wynosi poniżej  $+3^{\circ}\text{C}$  występują wówczas opady śniegu.

– W drugiej z weryfikowanych metod, ze względu na problem określenia w łatwy sposób wysokości położenia izotermy  $0^{\circ}\text{C}$  (*Meteorologia synoptyczna* 1990), opracowano kryterium oparte na wartościach geopotencjału względnego pomiędzy powierzchnią izobaryczną 850 hPa i 1000 hPa (H850/1000), które w sposób pośredni pozwalają określić średnią temperaturę warstwy powietrza pomiędzy wymienionymi powierzchniami izobarycznymi. W metodzie tej przyjęto założenia, iż przy wartościach geopotencjału H850/1000 mniejszych od 128 dkm – opady występują tylko w fazie stałej, a powyżej 132 dkm – w fazie ciekłej, natomiast w przedziale pomiędzy wymienionymi wartościami opad może być w postaci śniegu z deszczem.

– Kolejną z weryfikowanych metod jest modyfikacją metody opartej na geopotencjale względnym H850/1000. Modyfikacja polega na uwzględnieniu dodatkowo temperatury powietrza na wysokości 2 m n.p.g oprócz ww. kryterium. Opierając się na danych z obserwacji, na wykresie zależności pomiędzy temperaturą powietrza w warstwie przyziemnej a wartościami geopotencjału względnego H850/1000, wykreślono na podstawie pomiarów i obserwacji empirycznych linie oddzielające opady w formie śniegu, deszczu i deszczu ze śniegiem (rys. 2).

W opracowaniu wykorzystano dane meteorologiczne z okresu od listopada do marca z lat 2005–2014. Weryfikację metod określania rodzaju opadu atmosferycznego

rycznego zrealizowano, wykorzystując próbki 200 przypadków z opadem deszczu i 200 z opadem śniegu. Do weryfikacji wykorzystano wszystkie kolejne dane dotyczące rodzaju opadu, podczas którego wystąpił opad atmosferyczny w formie śniegu lub deszczu w ciągu półtorej godziny od rozpoczęcia sondażu aerologicznego, czyli 00:00 i 12:00 GMT. W opracowaniu nie uwzględniono innych rodzajów opadów atmosferycznych ze względu na to, iż nie były one ujęte w weryfikowanych metodach. Mimo iż opady mieszane były uwzględnione, pominięto je w weryfikacji ze względu na małą próbkę statystyczną liczącą tylko 29 przypadków w analizowanym okresie.

Wartości temperatury powietrza na poziomie 2 i 500 m uzyskano z sondaży aerologicznych z Legionowa. Dane te pobrano z serwera Department of Atmospheric Science University Wyoming (<http://weather.uwyo.edu>). W latach powojennych były używane inne sondy pomiarowe do sondaży aerologicznych w porównaniu z sondami wykorzystywanymi do zebrania danych użytych do weryfikacji. Analiza jednorodności danych aerologicznych (Siedlecki 2011) wykazała w wielu wypadkach zerwanie homogeniczności w latach 80., kiedy zaczęto w większości krajów europejskich stosować sondy firmy Vaisala. Ponadto dokładność pomiarów aerologicznych wykonywanych przy użyciu nowoczesnych sond jest o wiele lepsza niż pomiarów wykonywanych 50–60 lat temu. W związku z tym należy liczyć się z pewną niedokładnością ustalonych kryteriów określania stanu fazowego opadu atmosferycznego. Pobrane dane sondażowe z serwera Uniwersytetu Wyoming poddano weryfikacji w dwóch etapach. W pierwszym etapie dla wybranych przypadków prześledzono diagramy aerologiczne, a także porównano wyniki sondażu z wynikami z dnia poprzedniego oraz następnego.

W celu ustalenia temperatury powietrza na poziomie 500 m zastosowano interpolację liniową temperatury powietrza w profilu pionowym. Interpolacji liniowej poddano również wartości wysokości geopotencjału w celu ustalenia wartości geopotencjału na poziomie 850 i 1000 hPa. W opracowaniu wykorzystano również dane dotyczące stanu fazowego opadu atmosferycznego pochodzące z obserwacji naziemnych na stacji meteorologicznej w Warszawie–Bielanach, oddalonej w linii prostej kilkanaście kilometrów od stacji aerologicznej w Legionowie. Dane te pokrywają się z terminami sondaży aerologicznych i pochodzą z rozszyfrowanych depeż METAR, które pobrano z serwera [www.ogimet.com](http://www.ogimet.com). Dane dotyczące temperatury powietrza na poziomie 500 m i 2 m zostały pozyskane także w formie gridowej z bazy danych NCEP/NCAR Reanalysis 1 (<http://www.esrl.noaa.gov>). W celu ustalenia temperatury powietrza na poziomie 500 m wykorzystano dane wysokości powierzchni izobarycznych 1000 hPa, 925 hPa i 850 hPa oraz wartości temperatury powietrza dla wymienionych poziomów izobarycznych. Dane termiczne dla poziomu 500 m uzyskano metodą interpolacji liniowej w pionie. Wszystkie dane gridowe zostały interpolowane dla współ-

rzędnych geograficznych stacji w Legionowie dla terminów pomiarowych 00:00 i 12:00 GMT. Do interpolacji danych wykorzystano metodę interpolacyjną ważonych odległości najbliższych sąsiadów.

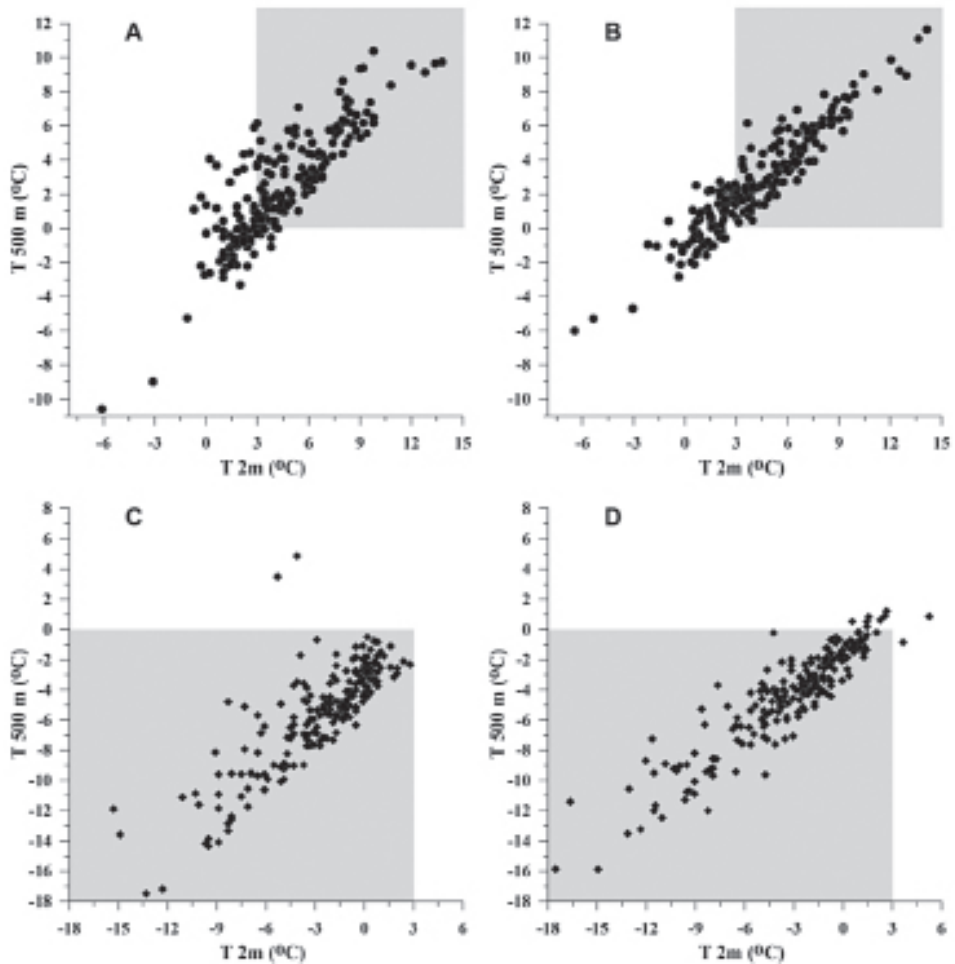
## WYNIKI

Weryfikacja metody określania stanu fazowego opadu atmosferycznego opartej na temperaturze powietrza w warstwie przyziemnej i wysokości izotermy 0°C wykazała znacznie większą zgodność z ustalonymi w tej metodzie kryteriami w przypadku opadów śniegu niż deszczu (rys. 1). W odniesieniu do deszczu zgodność z założonymi kryteriami – uwzględniając zarówno dane sondażowe, jak i dane z reanaliz – sięgała tylko 62,5% przypadków (rys. 1A i 1B). Wyniki weryfikacji wystąpienia opadów śniegu były znacznie lepsze, tak na podstawie danych z sondaży aerologicznych, jak i z reanaliz, odpowiednio 99,0% i 95,5% przypadków (rys. 1C i 1D).

Wyniki weryfikacji opadu w formie deszczu w drugiej z rozpatrywanych metod, bazującej na wartości geopotencjału względnego 850 hPa względem 1000 hPa, są słabsze w porównaniu z pierwszą ze sprawdzonych metod (rys. 2). Przyjęte dla deszczu kryteria były zgodne tylko dla 24,5% danych pochodzących z sondaży i 26,5% danych z reanaliz. W przypadku śniegu zgodność wyniosła odpowiednio 58,5% i 52,0%. Słaba sprawdzalność tej metody prawdopodobnie przyczyniła się do jej modyfikacji. Uwzględnienie warunków termicznych w warstwie przypowierzchniowej i zmiana wartości kryterium wysokości względnej geopotencjału zwiększyły trafność określania rodzaju opadu atmosferycznego na podstawie wymienionych kryteriów (rys. 3). W metodzie tej dla opadów deszczu zgodność z kryteriami opartymi na danych z sondaży aerologicznych wyniosła 86,0%, a dla opadów śniegu 87,0%. W przypadku wykorzystania danych z reanaliz zgodność była nieco słabsza i wyniosła odpowiednio 72,5% i 85,0%.

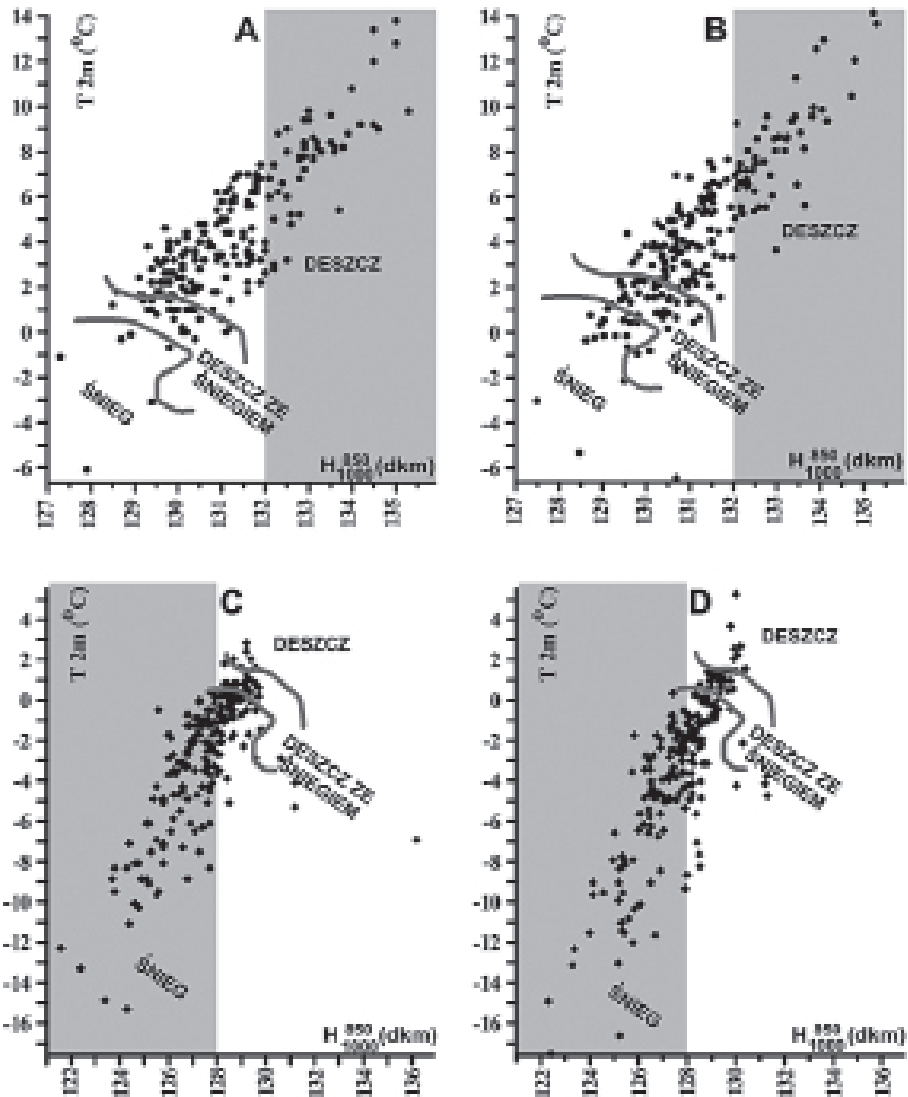
Uzyskane wyniki weryfikacji metod określania rodzaju opadu na bazie danych z reanaliz nie różniły się znacząco w porównaniu z rezultatami uzyskanymi na podstawie danych z sondaży aerologicznych. Nieco większe różnice odnotowano jedynie w przypadku weryfikacji metody określania opadu śniegu opartej na danych wysokości względnej geopotencjału i temperatury powietrza na wysokości 2 m.

Rozrzut różnic wartości pomiędzy danymi z reanaliz a danymi z sondaży aerologicznych jest bardzo podobny zarówno co do wysokości geopotencjału 850 hPa, jak i 1000 hPa (rys. 3). Zmienność różnic danych termicznych pomiędzy percentylem 25% a percentylem 75% (rys. 3) jest bardzo zbliżona do siebie i waha się w granicach od 3,32°C w przypadku temperatury powietrza na wyso-



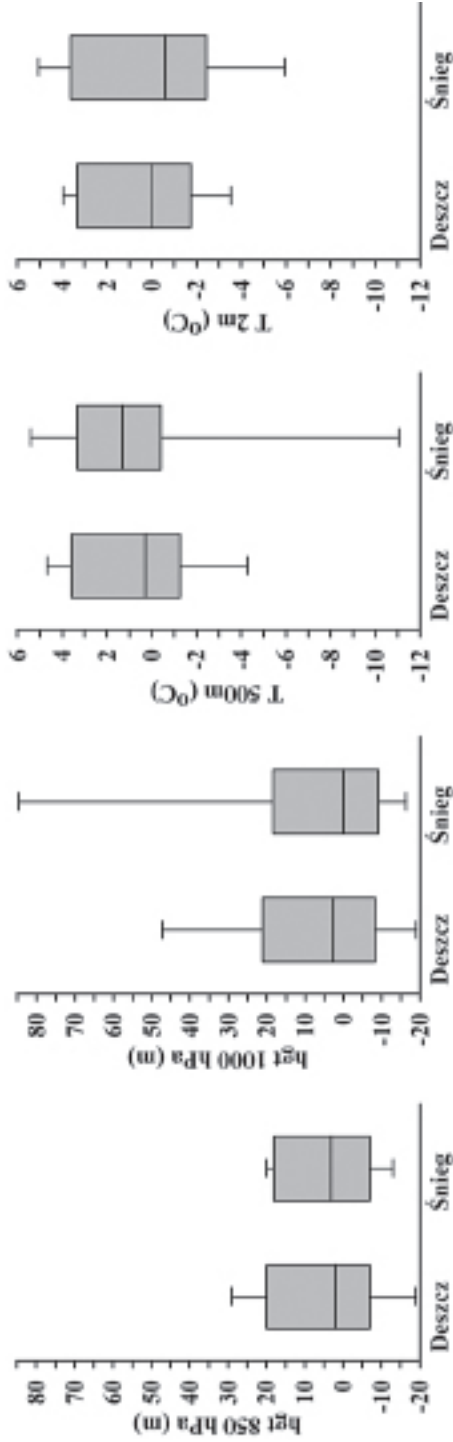
Rys. 1. Zależność pomiędzy temperaturą powietrza na 2 m n.p.g. a temperaturą powietrza na wysokości 500 m n.p.g. w przypadku deszczu (wykresy A i B, odpowiednio dla danych z sondaży aerologicznych i danych z reanaliz) i w przypadku śniegu (wykresy C i D, odpowiednio dla danych z sondaży aerologicznych i danych z reanaliz). Szare prostokąty obejmują przypadki, gdy stwierdzono zgodność rodzaju opadu z przyjętymi do jego określania kryteriami termicznymi

*Fig. 1. Relation between air temperature at 2 m and 500 m AGL in the case of rainfall (plots A and B respectively for atmospheric sounding data and data from reanalysis) and snowfall (plots C and D respectively for atmospheric sounding data and data from reanalysis). Grey rectangles include cases when the compatibility of precipitation forms with the criteria used for their determination was found*



Rys. 2. Zależność pomiędzy temperaturą powietrza na 2 m n.p.g. a wysokością względną geopotencjału 850/1000 hPa w przypadku deszczu (wykresy A i B, odpowiednio dla danych z sondażu i danych z reanaliz) i w przypadku śniegu (wykresy C i D, odpowiednio dla danych z sondażu i danych z reanaliz). Szare prostokąty obejmują przypadki, podczas których stwierdzono zgodność rodzaju opadu z przyjętymi do jego określania kryteriami. Szare linie oddzielają poszczególne rodzaje opadu atmosferycznego

Fig. 2. Relation between air temperature at 2 m AGL and relative geopotential height 850/1000 hPa in the case of rainfall (plots A and B respectively for atmospheric sounding data and data from reanalysis) and snowfall (plots C and D respectively for atmospheric sounding data and data from reanalysis). Grey rectangles include the cases when the compatibility of precipitation forms with the criteria used for their determination was found. Grey lines separate precipitation forms



Rys. 3. Statystyczny rozkład różnic pomiędzy danymi z reanaliz a danymi z sondaży aerologicznych wykorzystanymi w wybranych metodach określania stanu fazowego opadu atmosferycznego. Na wykresach podano wartości percentyli 25%, 50%, 75% i wartości maksymalne i minimalne

Fig. 3. Statistical distribution of differences between data from reanalysis and soundings data used in the selected methods of a phases precipitation determination. Plots show values of 25%, 50%, 75% percentiles and minimum and maximum values



kości 2 m, wykorzystanej do weryfikacji opadu deszczu, do 3,62°C na podstawie tych samych danych, tylko użytych do weryfikacji opadu śniegu.

## WNIOSKI

Najlepszą zgodność stanu fazowego opadu atmosferycznego z przyjętymi do jego określania kryteriami uzyskano, spośród wszystkich trzech weryfikowanych metod, w przypadku kryteriów opartych na wysokości izotermy 0°C i temperaturze powietrza w warstwie przyziemnej, które zastosowano do określania opadu w postaci śniegu. W odniesieniu do opadów deszczu największą zgodność osiągnięto przy wykorzystaniu metody opartej na temperaturze powietrza na wysokości 2 m i wysokości względnej geopotencjału 850 hPa względem 1000 hPa. Metoda oparta tylko na ostatnim z wymienionych kryteriów jest w zasadzie bezużyteczna w wypadku zastosowania jej do określania rodzaju opadu atmosferycznego, zarówno w formie ciekłej, jak i stałej. Pozostałe z pośrednich metod dają całkiem zadowalające wyniki. Zbliżoną zgodność faktycznego stanu fazowego opadu z określonym na bazie kryteriów zastosowanych w analizowanych metodach uzyskano zarówno przy wykorzystaniu danych z sondaży aerologicznych, jak i z reanaliz. Interesujące wyniki mogą dać próby przeprowadzenia podobnych weryfikacji oparte na danych opadowych ze stacji bardziej odległych od miejsca wykonywania sondaży aerologicznych.

W celu poprawy weryfikowanych metod warto by było zastanowić się nad uwzględnieniem dodatkowych czynników istotnych dla formowania się określonego stanu fazowego opadów atmosferycznych, jak np. temperatura punktu rosy. Bardzo istotnym zagadnieniem, na które zwracał uwagę Feiccabrino i in. (2012) jest uwzględnienie wymiany energii pomiędzy spadającym opadem a powietrzem w dolnych częściach troposfery. W przypadku inwersji termicznej może często dochodzić do zmian stanu fazowego opadów atmosferycznych przed ich dotarciem do powierzchni ziemi.

## LITERATURA

- Feiccabrino J., Lundberg A., 2009: *Precipitation phase discrimination in Sweden*, [w:] Eastern Snow Conference, Proceedings of the 65th Eastern Snow Conference, 239–254.
- Feiccabrino J., Lundberg A., Gustafsson D., 2012: *Improving surface-based precipitation phase determination through air mass boundary identification*, Hydrol Res, 43, 179–191.
- Ghosh S., Jonas P.R., 1998: *On the application of the Kessler and Barry schemes in Large Eddy Simulation models with a particular emphasis on cloud autoconversion, the onset time and droplet evaporation*, Ann. Geophysicae, 16, 628–637.
- Kessler, E., 1969: *On the distribution and continuity of water substance in atmospheric circulation*, Meteor. Monogr., 32, Amer. Meteor. Soc., 84 pp.

- Lin Y-L., Farley R.D., Orville A.D., 1983: *Bulk parametrization, of the snow field in a Cloud model*, Journal of Climate and Applied Meteorology, 22, 1065–1091.
- Meteorologia synoptyczna*, 1990: t. 2. Dowództwo Wojsk Obrony Powietrznej Kraju.
- Michalakes J., Dudhia J., Gill D., Henderson T., Klemp J., Skamarock W., Wang W., 2004: *The Weather Research and Forecast Model: Software Architecture and Performance*, to appear in Proceedings of the 11th ECMWF Workshop on the Use of High Performance Computing in Meteorology, 25–29.
- Podręcznik krótkoterminowych prognoz pogody*, 1969: cz. II, WKiŁ, Warszawa, 527.
- Pomeroy J.W., Gray D.M., Brown T., Hedstrom N.R., Quinton W.L., Granger R.J., Carey S.K., 2007: *The cold regions hydrological model: a platform for basing process representation and model structure on physical evidence*, Hydrological Processes 21, 2650–2667.
- Rutledge, S.A., Hobbs P.V., 1984: *The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones. XII: A diagnostic modeling study of precipitation development in narrow cloud-frontal rainbands*, J. Atmos. Sci., 20, 2949–2972.
- Ryan, B.F., 1996: *On the global variation of precipitating layer clouds*, Bull. Amer. Meteor. Soc., 77, 53–70.
- Siedlecki M., 2011: *Charakterystyka klimatologiczna chwiejności atmosfery nad Europą*, Acta Universitatis Lodzianensis. Folia Geographica Physica, 11.
- Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D.M., Duda M.G., Huang X-Y., Wang W., Powers J.G., 2008: *A description of the advanced research WRF version 3*. NCAR/TN-475+STR, NCAR TECHNICAL NOTE.
- Worobjew W.I., 2006: *Praktikum po sinoptycznej meteorologii. Rukowództwo k laboratoryjnym robotom po sinoptycznej meteorologii i atlas uczytelnych sinoptycznych materiałów*. Izd. RGTMU, Sankt Petersburg, 304.

### Źródła internetowe

<http://www.esrl.noaa.gov>

[www.ogimet.com](http://www.ogimet.com)

<http://weather.uwyo.edu>

### SUMMARY

The purpose of study is verification of three indirect methods used to define of the phase precipitation. There methods are based on empirical data of thermal conditions in the vertical profile and surface layer of troposphere. Three methods can be used to forecast of precipitation phase. Verification of selected methods was based on statistic attempt counting the 400 data. To define the precipitation phase in the methods there were used data from aerological station Legionowo and meteorological station Warszawa–Bielany. The same control was executed on the basis of data coming from reanalysis. Consistency of precipitation phase with criteria used in the selected methods is slightly weaker in case of data that come from reanalysis than in case of using data from aerological soundings. The consistency of indirect methods reached in case of rainfall up to 86% of cases, and in case of snow up to 99%.