

## ANALIZA WYBRANYCH SYTUACJI SYNOPTYCZNYCH ZWIĄZANYCH Z EKSTREMALNYM OPADEM W LATACH 2011–2013 NAD OBSZAREM ŁODZI

WOJCIECH RADZIUN

Katedra Meteorologii i Klimatologii, Uniwersytet Łódzki,  
ul. Narutowicza 88, 90-139 Łódź

**Abstract:** The aim of the study is to analyse the maximum daily rainfall during selected synoptic situations in summer from the period 2011–2013 in Łódź. In this study, data collected from fourteen rain gauges belonging to the Łódź Infrastructure Company were used. The measurement sites were evenly distributed within the city and rainfall was recorded every 5 minutes. The study analysed five synoptic situations during which the observed day totals in the city exceeded 20 mm. The highest rainfall in Łódź occurred during days featuring the passage of weather fronts, mostly cold. The maximum rainfall was observed in the southern or south-western part of the city. In four cases, south-western cyclonic circulation occurred, and in such conditions the highest rainfall was recorded in the southern part of the city and diminished towards the north. This unusual trend may be related to the terrain elevation, as the terrain in Łódź slopes north-east to south-west.

**Keywords:** atmospheric circulation; extreme rainfall; urban climate

### WSTĘP

Opady deszczu to bardzo zmienne i trudno przewidywalne zjawisko. Trudno jest oszacować ich charakter i tendencje rozkładu. Opady zależą od bardzo wielu czynników, m.in. od: pionowej stratyfikacji i kierunku napływu mas powietrza oraz ich cech termiczno-wilgotnościowych, adwekcji frontów atmosferycznych i warunków lokalnych, np. rzeźby terenu, ekspozycji, wysokości n.p.m. (Piotrowski 2009). Istotnym zagadnieniem jest także wpływ cyrkulacji atmosferycznej na charakter i wielkość opadu nad obszarem miejskim. Piotrowski (2009) zauważył tendencję wzrostową ilości opadów w Łodzi podczas południowo-zachodniej cyrkulacji cyklonalnej.

Twardosz i in. (2011) podjęli analizę zmienności rocznej i wieloletniej opadów atmosferycznych w latach 1863–2008, a także sprawdzili uwarunkowania cyrkulacyjne opadów na obszarze Krakowa. Istotną konkluzją przeprowadzonej przez autorów analizy jest to, iż na opady wpływają znacznie bardziej cechy cyrkulacji regionalnej, tj. wskaźniki, które uwzględniają kierunek adwekcji mas powietrza (W – strefowa, S – południkowa oraz C – cykloniczność) niż cechy cyrkulacji makroskalowej (Oscylacja Północnoatlantycka). Z ich analizy

wynika, że prawdopodobieństwo opadów silnych ( $\geq 10$  mm) wynosi od 0,5% zimą do 10% w lecie.

Próbę zbadania zmienności opadów maksymalnych na przykładzie Warszawy podjęła Bogucka (1999). Stwierdziła, że na peryferiach miasta obserwuje się wyższe opady niż w jego centrum, a od strony zawietrznej wyraźnie zaznacza się cień opadowy. Wyniki były zgodne z badaniami przeprowadzonymi w stolicy przez Lorenc (1981).

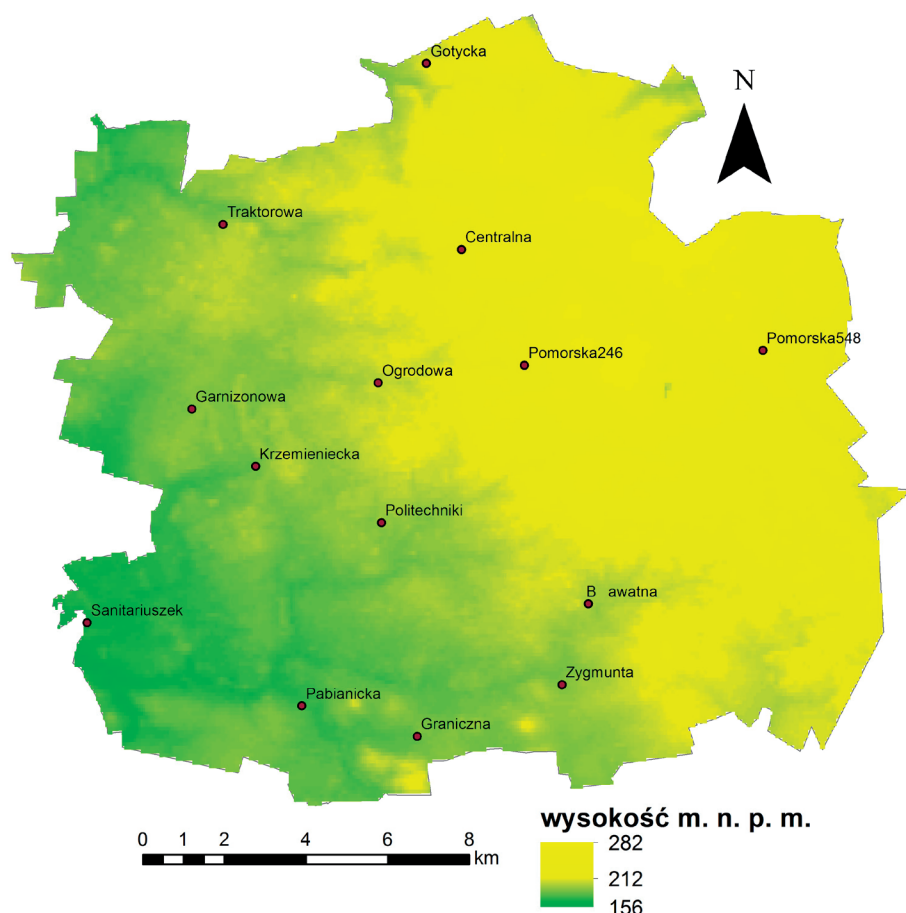
Wszelkie zmiany związane z wielkością i charakterem pola opadu nad miastem mogą mieć przyczynę m.in. w większym stężeniu jąder kondensacji, wroście ilości pary wodnej, a także silniejszej konwekcji, poprzez przegrzanie powierzchni czynnej, i silne generowanie turbulencji, z powodu wzrostu szorstkości podłoża na terenach zurbanizowanych (Fortuniak 2003).

Zagadnieniem opadów na terenach miejskich w większej skali zajmowali się badacze ze Stanów Zjednoczonych, m.in. Changnon i in. (1975, 1986), Van Den Heever i in. (2006) w ramach wspólnego projektu 1971–1974 METROMEX (Metropolitan Meteorological Experiment), którego celem była analiza rozkładu opadów i ich anomalii nad obszarem St. Louis oraz terenów przyległych. Stwierdzono znaczący wzrost opadów w okresie letnim po stronie wschodniej miasta (zawietrznej). Częściej odnotowywano ekstremalny opad ( $> 2,5$  cm), burze i opady gradu.

Shepherd i in. (2002) przeprowadzili analizę rozkładu opadów na obszarze południowo-wschodnich Stanów Zjednoczonych: Atlanty (Georgia), Montgomery (Alabama), Nashville (Tennessee), San Antonio, Waco, Dallas (Texas). Wykazali, że średnia suma miesięczna jest wyższa o 28% po stronie zawietrznej miasta w promieniu 30–60 km od metropolii, a w centrum o około 5,6% w stosunku do strony dowietrznej miasta. Z kolei Sanderson i Gorski (1978) przeprowadzili analizę opadów na przykładzie Detroit. Stwierdzili wzrost opadów po stronie zawietrznej miasta, ale tylko w sezonie letnim. Celem niniejszej pracy jest analiza rozkładu pola maksymalnego opadu nad obszarem Łodzi w powiązaniu z charakterystycznymi sytuacjami synoptycznymi.

## OBSZAR BADAŃ, MATERIAŁY I METODY

Badaniem objęto obszar Łodzi. Miasto jest położone w centralnej części Polski, w prowincji Niżu Środkowoeuropejskiego; podprowincji Niziny Środkowopolskiej; makroregionu Wzniesień Południowomazowieckich; mezoregionu Wzniesień Łódzkich. Obszar Łodzi charakteryzuje się znacznymi wysokościami bezwzględными, które miejscami przekraczają 200 m, a nawet 250 m, w wyniku czego klimat jest tu nieco wilgotniejszy i chłodniejszy niż na terenach sąsiednich (Kondracki 2002). Na obszarze miasta najniżej położona jest Retkinia (156 m n.p.m.) – osiedle mieszkaniowe zlokalizowane w południowo-zachodniej części.

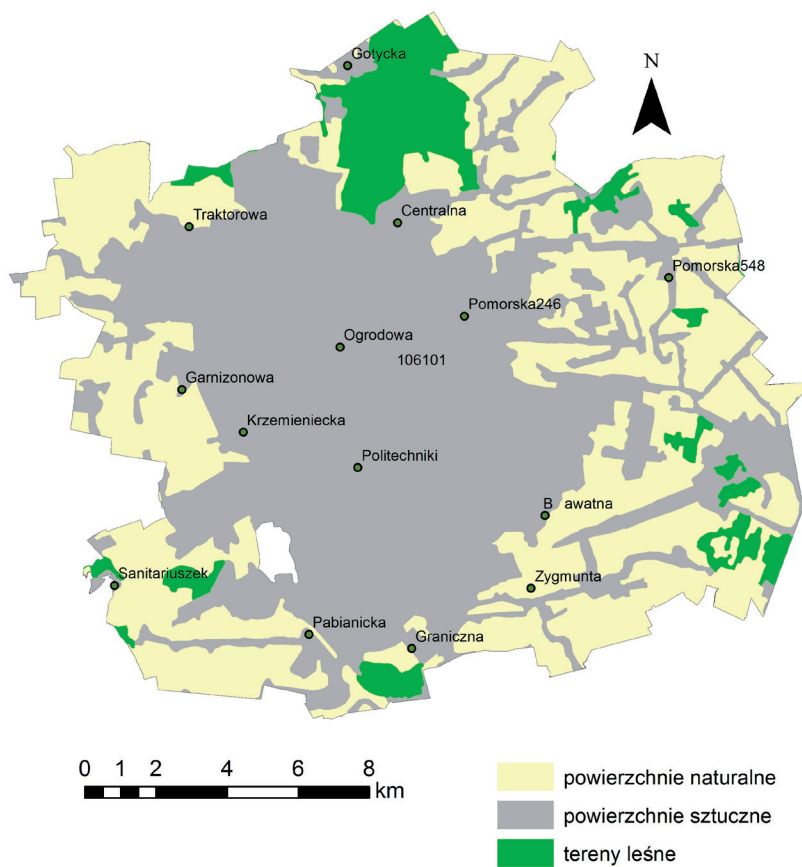


Ryc. 1. Mapa ukształtowania terenem Łodzi

Fig. 1. Terrain elevation of Łódź

Wysokości względne tego obszaru wznoszą się w kierunku północno-wschodnim i na peryferiach Widzewa osiągają 282 m n.p.m. (ryc. 2). Opisywany obszar nie znajduje się w bezpośrednim sąsiedztwie większych zbiorników wodnych oraz innych jednostek fizycznogeograficznych (np. doliny, kotliny), które mogłyby mieć dodatkowe znaczenie dla klimatu lokalnego Łodzi. W wyniku tego wyraźniej zaznacza się wpływ aglomeracji łódzkiej (Fortuniak 2003).

Do analizy maksymalnych sum dobowych opadu w Łodzi posłużyły wybrane dane meteorologiczne pozyskane z 14 posterunków opadowych. Na każdym posterunku umieszczono deszczomierz automatyczny przekazujący dane drogą internetową (ryc. 3). Posterunki opadowe znajdowały się na ulicach: Traktorowa 208, Gotycka 15, Pomorska 548, Bławatna 19/21, Graniczna 54, Ogródowa 15,



Ryc. 2. Uproszczona mapa zagospodarowania przestrzennego Łodzi  
 Fig. 2. Simplified zoning map of Lodz

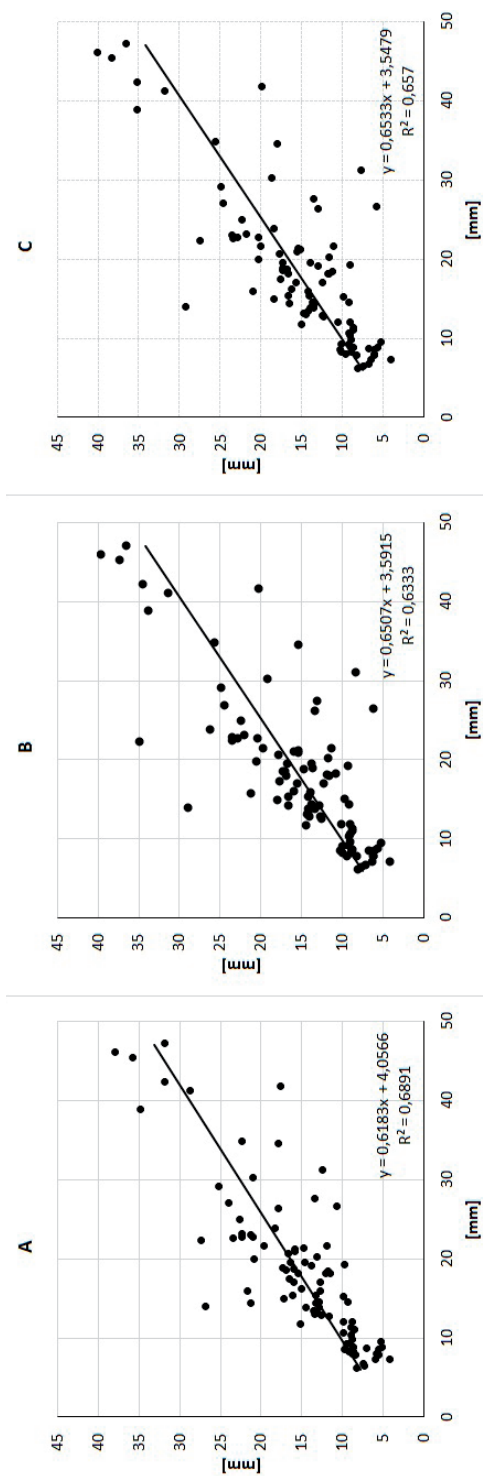


Ryc. 3. Deszczomierz samorejestrujący opad na jednym z posterunków (fot. W. Radziun)  
 Fig. 3. The automatic rain gauge on the one of the measurements site (photo by W. Radziun)

Sanitariuszek 66, Centralna 38, Pabianicka 215, Pomorska 246, Politechniki 6, Krzemieniecka 36/38, Zygmunta 116, Garnizonowa 38 i objęły wszystkie dzielnice Łodzi (ryc. 1, 2). Wszystkie powyższe punkty należą do Łódzkiej Spółki Infrastrukturalnej. W pracy zostały przeanalizowane sumy dobowe opadów z lat 2011–2013. Wybrano pięć dni z najwyższą dobową sumą opadu przekraczającą bądź równą 20 mm. W celu opracowania mapy ekstremalnych sum dobowych opadów w Łodzi w pierwszej kolejności poddano interpolacji dane opadowe z siedmiu punktów pomiarowych znajdujących się na ulicach: Traktorowa 208, Gotycka 15, Pomorska 548, Bławatna 19/21, Graniczna 54, Ogrodowa 15, Sanitariuszek 66. Zastosowano trzy metody interpolacji: Kriging, Inverse Distance to Power oraz Radial Basis Function. Porównano wyniki interpolacji dla pozostałych siedmiu stacji: Centralna 38, Pabianicka 215, Pomorska 246, Politechniki 6, Krzemieniecka 36/38, Zygmunta 116, Garnizonowa 38 z wartościami rzeczywistymi. W celu wybrania najbardziej dokładnej metody interpolacji wyniki poddano analizie poprzez zastosowanie miar błędu, takich jak: średni błąd prognozy (ang. *mean bias error* – MBE), średni bezwzględny błąd (ang. *mean absolute error* – MAE) i średni błąd kwadratowy (ang. *mean squared error* – MSE) oraz pierwiastek błędu średniokwadratowego (ang. *root mean squared error* – RMSE) (Willmott 1982). Utworzono następnie diagram korelacyjny (ang. *Scatter plot*), aby ukazać siłę związku pomiędzy wartościami interpolowanymi a zaobserwowanymi. Najdokładniejszą metodą okazała się Inverse Distance to Power, dla której miary błędu wyniosły odpowiednio: MBE (–2,9), MAE (4,16), MSE (38,45) i RMSE (6,2), a współczynnik determinacji  $R^2$  blisko 0,7 (ryc. 4a). Na koniec, aby uzyskać mapy wybranych sum dobowych dla Łodzi, poddano interpolacji opady na wszystkich 14 stacjach metodą Inverse Distance to Power, która okazała się najdokładniejsza.

## CHARAKTERYSTYKA WYBRANYCH EKSTREMALNYCH DOBOWYCH SUM OPADÓW

Analizie poddano sumy dobowe opadu w okresie letnim, kiedy można zaobserwować znaczący wpływ miasta na charakter i wielkość opadów m.in. w wyniku generowania większej konwekcji poprzez przegrzanie powierzchni czynnej (Fortuniak 2003). Jednakże najistotniejszym czynnikiem we wszystkich badanych przypadkach opadów ekstremalnych było przejście frontu. W strefie frontowej, która rozdziela dwie różne masy powietrza, wysokie opady są wynikiem konwekcji dynamicznej (Twardosz i in. 2011). Na podstawie typów cyrkulacji według klasyfikacji obiektywnej Piotrowskiego (2009) dokonano analizy wszystkich przedstawionych map synoptycznych. W większości omawianych sytuacji wystąpiła cyrkulacja cyklonalna południowo-zachodnia (SWc), a w jednym wypadku zachodnia cyklonalna (Wc). Typ SWc charakteryzuje się napływem



Ryc. 4. Zależność między opadem rzeczywistym a interpolowanym za pomocą metod: A) Inverse Distance to Power, B) Radial Basis Function, C) Kriging

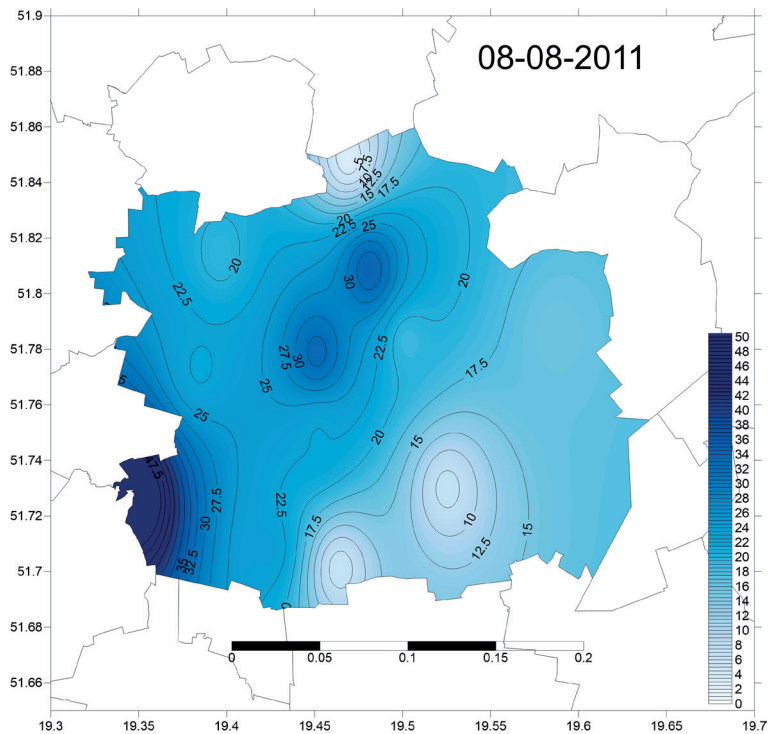
Fig. 4. Relationship between the actual precipitation and modeled with: A) Inverse distance to power, B) Radial basis function, C) Kriging methods



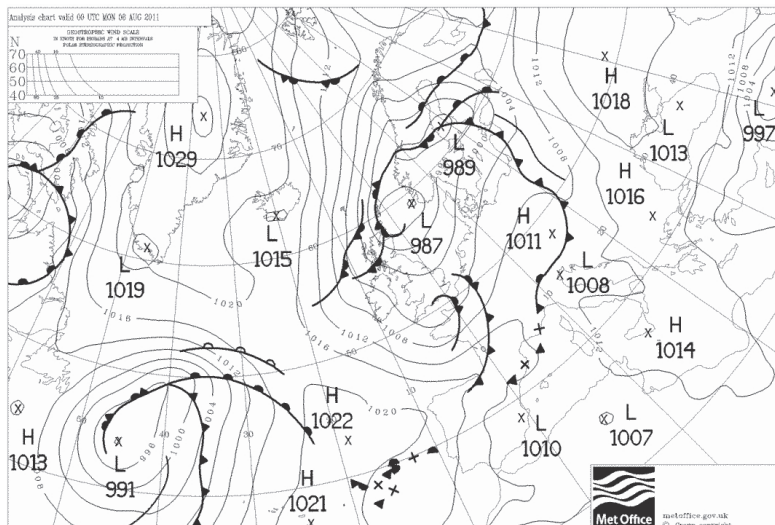
mas powietrza z sektora południowo-zachodniego za sprawą układu niskiego ciśnienia z centrum w rejonie Morza Północnego. W typie Wc układ niskiego ciśnienia jest przesunięty nieco na wschód, nad obszar Skandynawii, w stosunku do położenia w typie SWc. Najważniejszą natomiast różnicą jest układ izobar. W typie Wc w południowej części niżu są one równoległe względem równoleżników, co powoduje napływ mas powietrza z sektora zachodniego (Piotrowski 2009). W celu zachowania pewnej całości i porządku wszystkie prezentowane mapy pochodzą z godziny 0:00 UTC. Należy zauważyć, iż ocena sytuacji synoptycznych jest subiektywną oceną obserwatora. Cyrkulacja atmosferyczna w strefie umiarkowanej jest procesem bardzo dynamicznym, co powoduje, że sytuacja zmienia się z godziny na godzinę. Jej głębsza analiza może mieć duże znaczenie dla poprawy jakości prognoz meteorologicznych (Piotrowski 2009).

W pierwszym przypadku w dniu 08-08-2011 maksymalny (50 mm) opad wystąpił w południowo-zachodniej części Łodzi. Drugim godnym zauważenia obszarem było centrum miasta z opadem powyżej 30 mm. W kierunku północnym i południowym opad stopniowo malał. Jego brak odnotowano w północnej części w Łagiewnikach (ryc. 5). W tym dniu nad Europą panowała południowo-zachodnia cyrkulacja cyklonalna, która przyniosła morskie ciepłe i wilgotne powietrze zwrotnikowe (ryc. 6). Można zauważyć również wyraźnie ukształtowane układy niskiego ciśnienia nad Islandią oraz Półwyspem Skandynawskim od północy, którym towarzyszyły fronty. Od południa układy wysokiego ciśnienia w rejonie Azorów na Atlantyku i nad obszarem Ukrainy generowały adwekcję mas powietrza z zachodu i południowego zachodu (ryc. 6). Powietrze to przemieszczając się nad akwenami morskimi (Ocean Atlantycki i Morze Śródziemne), zaopatrywane było w parę wodną, która nad obszarem Polski została skondensowana w postaci obfitego opadu. W strefie umiarkowanej wzrost wilgotności względnej często występuje na skutek wychłodzenia wilgotnego ciepłego powietrza w kontakcie z chłodniejszą powierzchnią gruntu.

W kolejnym przypadku, w dniu 15-06-2012, maksymalny opad wystąpił w południowej części Łodzi (45 mm). Opady malały w kierunku północnym miasta, w Łagiewnikach odnotowano ich brak (ryc. 7). W tym dniu wystąpiła cyrkulacja południowo-zachodnia cyklonalna z adwekcją wilgotnych, zwrotnikowych mas powietrza z sektora południowo-zachodniego (ryc. 8). Nad Europą wystąpiły dwa układy niskiego ciśnienia z centrum w pobliżu Wysp Brytyjskich oraz w południowej Skandynawii, a także układ wysokiego ciśnienia na południe od Polski (ryc. 8). Rozbudowany niż nad Wyspami Brytyjskimi przemieszczał się w kierunku wschodnim. Po kilku godzinach jego wschodni kraniec osiągnął centralną Polskę. Przyniósł chłodny front rozdzielający powietrze polarnomorskie od północy oraz powietrze zwrotnikowe od południa i był przyczyną intensywnych opadów. Należy przypomnieć, że prezentowane mapy synoptyczne pochodzą z godziny 0:00 UTC i przedstawione sytuacje należą do szybko zmieniających się w czasie.

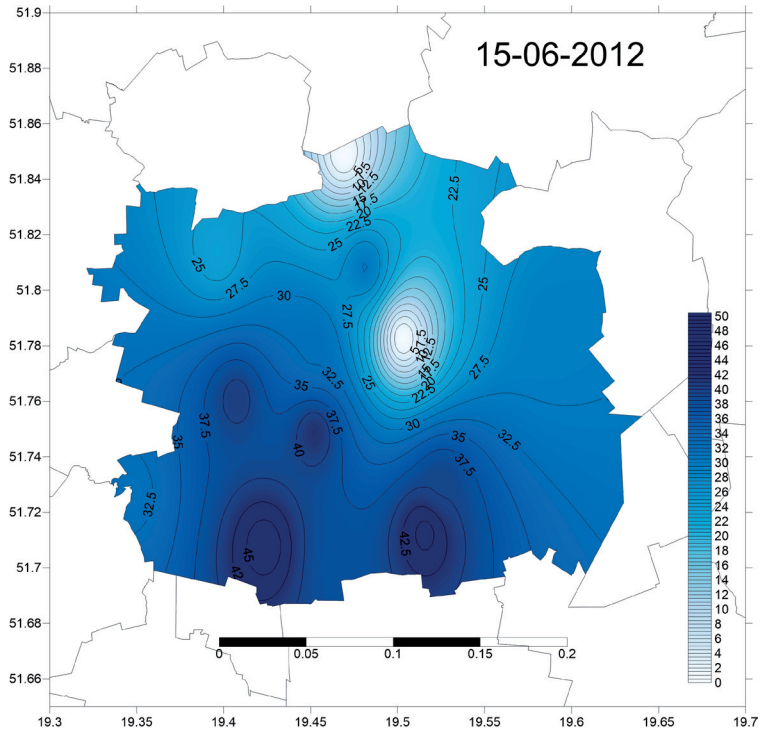


Ryc. 5. Suma dobowa opadu [mm] w dniu 08-08-2011  
 Fig. 5. The sum of daily precipitation [mm] on 08-08-2011



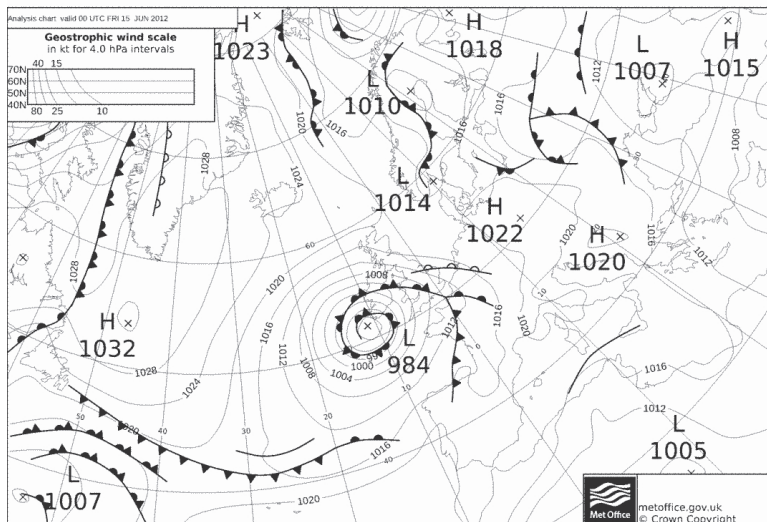
Ryc. 6. Mapa synoptyczna z dnia 08-08-2011 <Wetterzentrale.de>  
 Fig. 6. The synoptic map of 08-08-2011 <Wetterzentrale.de>





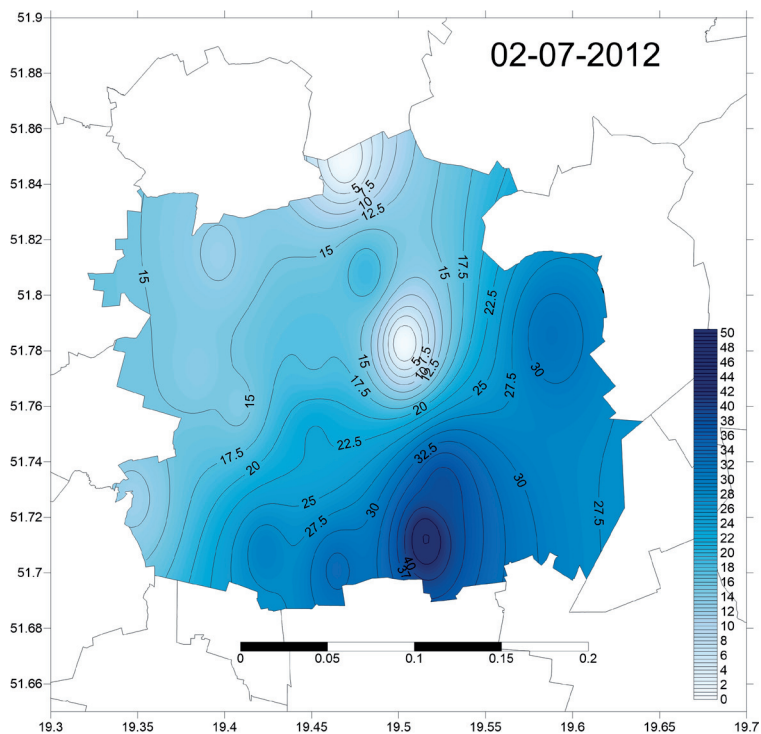
Ryc. 7. Suma dobowa opadu [mm] w dniu 15-06-2012

Fig. 7. The sum of daily precipitation [mm] on 15-06-2012

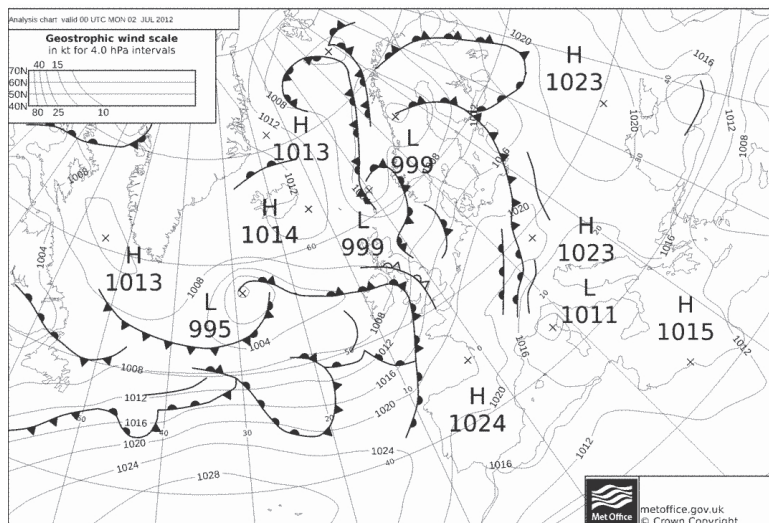


Ryc. 8. Mapa synoptyczna z dnia 15-06-2012 &lt;Wetterzentrale.de&gt;

Fig. 8. The synoptic map of 15-06-2012 &lt;Wetterzentrale.de&gt;



Ryc. 9. Suma dobowa opadu [mm] w dniu 02-07-2012  
 Fig. 9. The sum of daily precipitation [mm] on 02-07-2012



Ryc. 10. Mapa synoptyczna z dnia 02-07-2012 <Wetterzentrale.de>  
 Fig. 10. The synoptic map of 02-07-2012 <Wetterzentrale.de>

Następna wybrana sytuacja wystąpiła 02-07-2012, z maksimum opadu wynoszącym 42,5 mm w południowej części miasta. Wysokość opadu stopniowo malała w kierunku północnym, z minimum na północnych krańcach Łodzi w Łagiewnikach (ryc. 9). Powyższemu rozkładowi opadu sprzyjały dwa układy niskiego ciśnienia przy Wyspach Brytyjskich oraz nad Skandynawią. Ten ostatni przyniósł front chłodny (ryc. 10). Na południu Europy ukształtowały się układy wysokiego ciśnienia w rejonie Azorów, Półwyspu Iberyjskiego oraz Bałkanów (ryc. 10). Sytuacja synoptyczna była bardzo zbliżona do tej z dnia 08-08-2011 (ryc. 6). Nastąpiła adwekcja wilgotnych mas powietrza z sektora zachodniego i południowo-zachodniego znad Atlantyku.

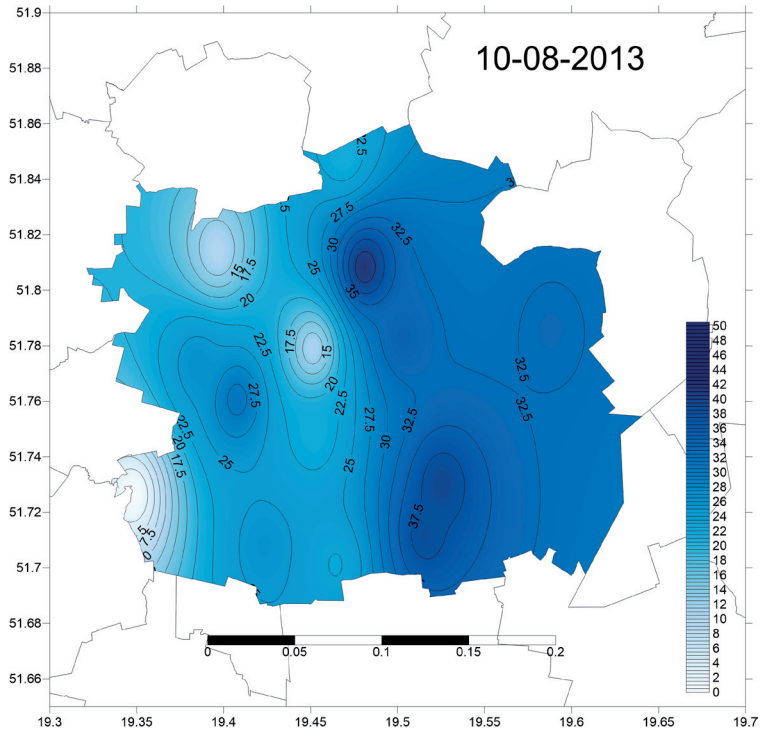
Czwarty przypadek wystąpił 07-08-2012 (ryc. 11). Maksymalny opad o wysokości 20 mm zaobserwowano w trzech obszarach: w południowej części miasta (Górna-Chojny), a także w Śródmieściu oraz na Starych Bałutach (ryc. 11). Opad malał w kierunku północnym, w Łagiewnikach nie wystąpił (ryc. 11). Sytuacja synoptyczna była zbliżona do pozostałych. Dwa układy niskiego ciśnienia zalegały nad Skandynawią oraz Morzem Północnym, a układy wysokiego ciśnienia były rozlokowane w linii południowy zachód–północny wschód w rejonie Azorów, Półwyspu Iberyjskiego oraz Bałkanów (ryc. 12). Panowała cyrkulacja południowo-zachodnia z napływem powietrza zwrotnikowo-morskiego. Szczególnie aktywny niż znad Skandynawii przyniósł front chłodny nad obszar centralnej Polski (ryc. 12).

Ostatnim analizowanym dniem był 10-08-2013. Najwyższą sumę odnotowano na południu miasta (37,5 mm, Górna-Chojny) oraz na północy Łodzi (Bałuty-Julianów) (ryc. 13). Opad malał w kierunku zachodnim i nie wystąpił w południowo-zachodniej części miasta Górna (Pienista) (ryc. 13). W tym dniu miała miejsce zachodnia cyrkulacja cyklonalna z układem niskiego ciśnienia nad Islandią oraz układem wysokiego ciśnienia w rejonie Azorów (ryc. 14). Sytuacja ta sprzyjała adwekcji powietrza polarno-morskiego. W tym dniu nie wystąpiły układy wysokiego ciśnienia w południowej Europie, które by kierowały masy powietrza z południa i z południowego zachodu. Ten stan rzeczy dał „wolną drogę” wędrowkom niżów znad Atlantyku, kierując powietrze polarnomorskie z sektora zachodniego. Należy zauważyć wypełniające się w tym czasie układy niskiego ciśnienia znad Skandynawii, którym towarzyszyły fronty. Jednym z nich był front chłodny zasięgiem obejmujący centralną część Polski (ryc. 14).

## PODSUMOWANIE

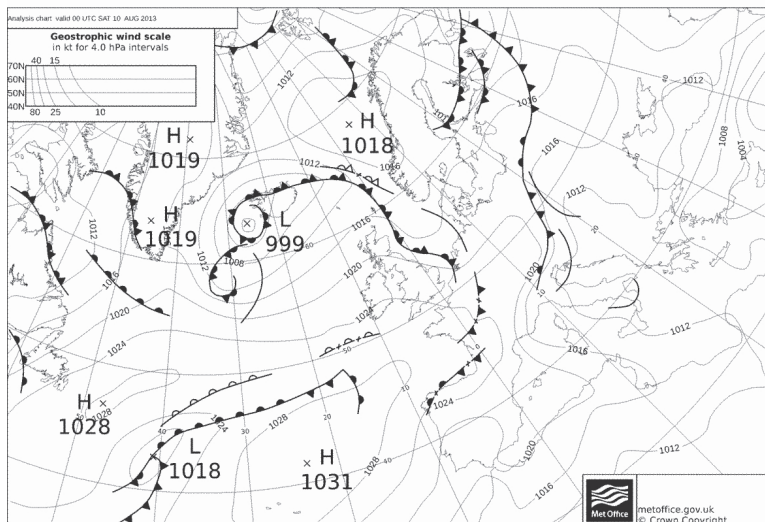
Analizowanym przypadkiem wysokich opadów o sumach przewyższających 20 mm towarzyszyły sytuacje synoptyczne związane z przejściem frontu. W czterech spośród pięciu opisanych sytuacji wystąpiła cyrkulacja południowo-zachodnia cyklonalna. Podczas tego typu cyrkulacji zaobserwowano najwyższy





Ryc. 13. Suma dobowa opadu [mm] w dniu 10-08-2013

Fig. 13. The sum of daily precipitation [mm] on 10-08-2013



Ryc. 14. Mapa synoptyczna z dnia 10-08-2013 &lt;Wetterzentrale.de&gt;

Fig. 14. The synoptic map of 10-08-2013 &lt;Wetterzentrale.de&gt;



opad w południowej części miasta, który malał w kierunku północnym, zazwyczaj nie padało w Łagiewnikach. Wysokie opady w południowej części miasta mogą mieć związek z ukształtowaniem powierzchni terenu Łodzi. Masa powietrza napływająca z sektora południowo-zachodniego musi pokonać nad Łodzią deniwelacje terenu rzędu 120 m (ryc. 1). Należy również zwrócić uwagę na zagospodarowanie powierzchni na obszarze Łodzi. Występuje tu znaczna przewaga powierzchni sztucznych w dzielnicach południowych oraz centrum w stosunku do obszarów północnych i północno-wschodnich, gdzie zlokalizowany jest Las Łagiewnicki, największy kompleks leśny w granicach administracyjnych miasta w Europie (ryc. 2). Południowa część Łodzi, szczególnie w okresie letnim, jest narażona na przegrzanie powierzchni czynnej (dotyczy powierzchni o ciemnym kolorze, takich jak: dachy budynków, ulice, chodniki), które powoduje konwekcję termiczną. Z kolei zwarta zabudowa jest przyczyną wzrostu szorstkości podłoża, który generuje turbulencje. Procesy te mogą prowadzić do rozwoju chmur o budowie pionowej *Cumulus*, a następnie *Cumulonimbus*, które mogą intensyfikować opady deszczu w południowej części miasta.

Realizacja celów prac badawczych odbywa się w ramach grantu Narodowego Centrum Nauki nr rej. 2012/05/B/ST10/00945. Specjalne podziękowania dla Łódzkiej Spółki Infrastrukturalnej.

## LITERATURA

- Changnon S.A. Jr, Huff F.A., 1986: *The Urban- related Nocturnal Rainfall Anomaly at St. Louis, Climate and Meteorological Section*, Illinois State Water Survey Bull. 25, 1985–1995.
- Changnon S.A. Jr, Semonin R.G., Huff F.A., 1975: *A Hypothesis for Rainfall Anomalies*, Journ. Appl. Meteor. 15, 544–560.
- Bogucka M., 1998: *Niektóre aspekty zmienności opadów maksymalnych dobowych w Warszawie i okolic*, Act. Univ. Lodz. Fol. Geogr. Phys. 3.
- Fortuniak K., 2003: *Miejska wyspa ciepła. Podstawy energetyczne, studia eksperymentalne, modele numeryczne i statystyczne*, Wyd. UŁ, Łódź.
- Kondracki J., 2002: *Geografia regionalna Polski*, Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.
- Lorenc H., 1981: *Struktura czasowego rozkładu natężenia opadów w Warszawie o jak największym prawdopodobieństwie występowania*, Wiad. IMGW t. 7(28), z. 1–2, 141–151.
- Piotrowski P., 2009: *Obiektywna metoda klasyfikacji cyrkulacji atmosferycznej dla Polski*, Act. Univ. Lodz. Fol. Geogr. Phys. 10.
- Sanderson M., Gorski R., 1978: *The Effect of Metropolitan Detroit-Windsor on Precipitation*, Journ. Appl. Meteor. 17, 423–427.
- Shepherd J.M., Pierce H., Negri A.J. , 2002: *Rainfall Modification by Major Urban Areas: Observations from Spaceborn Rain Radar on the TRMM Satellite*, Journ. Appl. Meteor. 41, 689–701.
- Twardosz R., Łupikasza E., Niedźwiedz T., 2011: *Zmienność i uwarunkowania cyrkulacyjne występowania postaci i typów opadów atmosferycznych na przykładzie Krakowa*, Wyd. UJ, Kraków.
- Van Den Heever S.C., Cotton W.R., 2006: *Urban Aerosol Impacts on Downwind Convective Storms*, Journ. Appl. Meteor. 46, 828–850.