ACTA UNIVERSITATIS LODZIENSIS
Folia Geographica Physica 14, 2015: 5–15, http://dx.doi.org/10.18778/1427-9711.14.01

Adam Bartnik[1], Mateusz Marcinkowski[2]

[1] Katedra Hydrologii i Gospodarki Wodnej, Wydział Nauk Geograficznych, Uniwersytet Łódzki; [2] InfoSys BPO Poland, Łódź

Artykuł wpłynął do redakcji 15.09.2015; po recenzjach zaakceptowany 24.11.2015

Przestrzenne zróżnicowanie opadów atmosferycznych na obszarze Łodzi

Spatial variability of precipitation in the area of Lodz

Zarys treści: Opracowanie jest próbą ustalenia przestrzennej zmienności opadów atmosferycznych na obszarze Łodzi, w jej granicach administracyjnych, a równocześnie częścią większego projektu zmierzającego do opracowania zintegrowanego modelu odpływu rzecznego w warunkach silnej antropopresji. Do realizacji tego zadania, posłużono się danymi zarejestrowanymi w latach 2010–2012 przez różne instytucje działające w obrębie aglomeracji (rys. 1). Pozyskane szeregi cechowała jednak nieciągłość oraz istnienie błędów o różnej genezie i o różnym charakterze. Dlatego pierwszym zadaniem było wykrycie i uzupełnienie braków pomiarów lub ich poprawienie. Ostatecznym celem prezentowanego opracowania było uzyskanie sekwencji map obrazujących przestrzenne zróżnicowanie opadów w poszczególnych latach trzylecia 2010–2012 oraz ich średnich sum rocznych w tym okresie, co ma pozwolić na określenie przestrzennej zmienności dostawy wody do powierzchni terenu. Efektem była sekwencja map przedstawiających przestrzenne zróżnicowanie opadów atmosferycznych na obszarze miasta w poszczególnych latach okresu (rys. 3), średnich sum opadów (rys. 4), maksymalnych dobowych sum opadów (rys. 5), maksymalnych godzinowych sum opadów (rys. 6) oraz liczby dni z opadem >0,1 mm (rys. 7) w badanym okresie.

Słowa kluczowe: opady, obszar zurbanizowany, Łódź, zmienność przestrzenna.

Abstract: This study is an attempt to determine the spatial variability of precipitation in the city of Lodz, within its administrative boundaries, and it's a part of the larger project, which aims to develop an integrated river outflow model under a strong anthropopressure. Therefore, the hydrologic year was taken (from November 1 to October 31). To accomplish this task, the data recorded in 2010–2012 by various institutions operating within the agglomeration were used (fig. 1). Data strings from 24 rain gauges were used. However, the obtained sequences were characterized by discontinuity and the existence of various origin errors and different character. Therefore, the first task was to detect and fill the measurement gaps or to correct them. The ultimate aim of the present study was to obtain a cartographic representation of the spatial variability of precipitation in each year of the period 2010–2012 (fig. 3) and their average annual throughout this period (fig. 4), which made it possible to determine the spatial variability of water flow to the surface. Figs. 5 and 6 represent respectively the maximum daily rainfall and maximum hourly rainfall recorded in the investigated three-year period. Fig. 7 shows the average annual number of days with precipitation in the city area. Despite the very dense measurement network (which continues to be expanded) and a very high resolution of data, it was a difficult task, which required multi-step preparation and verification procedures. Data strings were incomplete or affected by errors of various kinds. One must therefore be aware of the imperfections of data collected automatically. Studies on spatial distribution of precipitation, their duration and intensity can be used to understand the causes and learn the scope of urban flooding. Creation of storm sewers control system which reacts in real-time to readings of automatic stations will avoid future losses related to sudden urban floods.

Key words: precipitations, urban area, Lodz, spatial variability.

1. Wprowadzenie

Opady atmosferyczne są przedmiotem zainteresowania specjalistów z dziedziny meteorologii, klimatologii i hydrologii, inżynierów budownictwa wodnego, urbanistów, rolników oraz ludzi związanych z innymi gałęziami gospodarki. Chociaż pomiary opadów należą do najdłużej obserwowanych charakterystyk otaczającego nas świata, to nadal informacja o nich jest często niepełna i nie wystarcza, aby zaspokoić potrzeby specjalistów. Szczególnie dotyczy to kwestii związanych z modelowaniem dopływu wody opadowej do sieci kanalizacji burzowej na obszarach zurbanizowanych. Nowoczesne metody pomiarów wysokości i natężenia opadu dostarczają olbrzymiej ilości danych. Coraz częściej dokonuje się prób określenia rozkładu opadów atmosferycznych na stosunkowo małych obszarach, m.in. miast, gdzie wcześniej traktowano pole opadu jako jednorodne (Kupczyk 1997).

Dostatecznie dokładna informacja o wielkości natężenia opadu o określonym czasie trwania oraz o jego rozkładzie przestrzennym, umożliwiłaby być może określenie przyczyn i zasięgu powodzi miejskich. W dalszej zaś kolejności opracowanie odpowiednio dokładnych modeli i symulacji, dzięki którym można będzie efektywnie sterować systemami kanalizacji miejskiej w czasie rzeczywistym i unikać strat związanych z przyborem wody (Zawilski 2011). W tym kierunku zmierzają m.in. badania, jakie prowadzili Zawilski i Brzezińska (2014). Ich celem było głównie ustalenie rozkładu natężenia deszczu i jego dopływu do sieci kanalizacyjnej w pojedynczych epizodach opadowych (w latach 2010–2011). Autorzy stworzyli model rozkładu maksymalnych opadów deszczu, uwzględniając kierunek przemieszczania się komórek opadowych, prędkości wiatru i kształt zlewni kanalizacyjnej. Zwrócili też uwagę na znaczne różnice pomiędzy sumami opadów rejestrowanymi w centrum miasta i na jego obrzeżach.

Niniejsze opracowanie jest próbą ustalenia przestrzennej zmienności sum opadów atmosferycznych na obszarze Łodzi, w jej granicach administracyjnych, w trzyleciu 2010–2012 (Marcinkowski 2014), a równocześnie częścią większego projektu zmierzającego do opracowania zintegrowanego modelu odpływu rzecznego w warunkach silnej antropopresji. Z tego też względu za okres bilansowy przyjęto rok hydrologiczny (od 1 listopada do 31 października). Posłużono się danymi zarejestrowanymi w latach 2010–2012 przez różne instytucje działające

w obrębie aglomeracji. Pozyskane szeregi cechowała jednak nieciągłość oraz występowanie błędów o różnej genezie i o różnym charakterze. Dlatego pierwszym zadaniem było wykrycie i uzupełnienie braków pomiarów i ich poprawienie. Ostatecznym celem prezentowanego opracowania było uzyskanie sekwencji map obrazujących przestrzenne zróżnicowanie sum opadów atmosferycznych w poszczególnych latach trzylecia 2010–2012 oraz ich średniej sumy rocznej w tym okresie, co z kolei miało pozwolić na określenie dla celów bilansowych przestrzennej zmienności dostawy wody do powierzchni terenu.

Rozkład przestrzenny opadów atmosferycznych jest zróżnicowany lokalnie. Mają na to wpływ: wyniesienie terenu, obecność zbiorników wodnych oraz ośrodków miejskich (Garnier 1996). Nawet niewielkie wzniesienia modyfikują pole opadu. Jeżeli nie uwzględniać wpływu szerokości i długości geograficznej, wówczas sumy opadów w Polsce zwiększają się średnio o ok. 30 mm na 100 m wzrostu wysokości (Kożuchowski 2011). Biorąc zaś pod uwagę położenie geograficzne, gradient opadu w Polsce wynosi ok. 60 mm na 100 m (Boryczka 1977).

Obecność zbiorników wodnych wpływa pozytywnie na lokalny wzrost sum opadów (Garnier 1996). Kiedy powietrze poruszające się nad lądem nasunie się nad zbiornik wodny, zostanie zasilone wilgocią. Jeżeli napotka ono później na przeszkodę orograficzną zaczną się formować chmury i mogą wystąpić lokalne opady.

Sumy roczne opadów atmosferycznych oraz ich rozkład przestrzenny zmieniają się również wraz ze stopniem zurbanizowania terenu. Z roku na rok coraz więcej ludzi przenosi się ze wsi do miast, co powoduje konieczność wznoszenia coraz wyższych budynków oraz przeznaczania kolejnych powierzchni otaczających miasta pod zabudowę. Obszary zurbanizowane stają się więc coraz rozleglejszymi i wyższymi przeszkodami terenowymi dla mas powietrza przepływających nad nimi. Badania prowadzone m.in. w Stanach Zjednoczonych, Polsce czy w Australii (Huff, Changnon 1973; Bac, Rojek 1981; Crawshaw, Beggs 2004) dowiodły, że na obszarach aglomeracyjnych oraz terenach zawietrznych w stosunku do miast występuje kilku-, a nawet kilkunastoprocentowy wzrost sumy opadów oraz liczby dni z opadem atmosferycznym w ciągu roku. Np. w Chicago wzrost opadów o 17% zanotowano w strefie zawietrznej oddalonej o ok. 50–55 km od miasta, w Baltimore wzrost o 15% wystąpił nad miastem i na północny wschód od jego granic administracyjnych, zaś w Waszyngtonie wzrost o 9% wystąpił w pobliżu centrum miasta (Huff, Changnon 1973).

Suma opadu zmierzonego w różnych punktach na obszarze miasta podczas jednego epizodu opadowego może się różnić nawet kilkukrotnie (Kossowska-Cezak, Bajkiewicz-Grabowska 2008). Ponadto opady na obszarach miejskich są intensywniejsze niż na sąsiadujących z nimi obszarach słabo zurbanizowanych. Można również zauważyć, że maksimum opadowe jest przesunięte w stronę zawietrznych dzielnic aglomeracji (Fortuniak 2003).

W zależności od sytuacji synoptycznej, wystąpienie opadu jest bardziej prawdopodobne w zawietrznej części miasta lub bezpośrednio nad aglomeracją (Garnier 1996). Pierwsza sytuacja występuje częściej, gdy stan atmosfery nad miastem zwiększa szansę na wystąpienie opadu wraz z przesuwaniem się wilgotnych mas powietrza nad jego obszarem. Zaistnienie drugiej sytuacji ma większe prawdopodobieństwo przy pogodzie konwekcyjnej lub burzowej. Wśród przyczyn tych zjawisk można wymienić dużą zawartość w powietrzu jąder kondensacji, generowanych przez transport miejski, przemysł oraz ogrzewanie budynków (Fortuniak 2003). Może być ona nawet 10-krotnie większa w miastach niż na terenach niezurbanizowanych (Gaston 2010). Znaczny udział powierzchni nieprzepuszczalnych na obszarze miast, które ponadto posiadają większą pojemność cieplną niż grunt, przyspiesza proces parowania (Fortuniak 2003). W miastach słabo przewietrzanych, o regularnej i zwartej zabudowie może pojawiać się tzw. wyspa ciepła, czyli kilkustopniowa różnica temperatury wewnątrz miasta w stosunku do terenów zamiejskich. Wyspa ciepła, jak również przegrzanie powierzchni czynnej, wzmagają konwekcję. Obecność budynków zwiększa szorstkość podłoża, co intensyfikuje turbulencję.

2. Obszar badań

W Polsce szczególnie dobrze wykształcony klimat miejski występuje m.in. w Łodzi (Fortuniak 2003). Według regionalizacji fizycznogeograficznej Kondrackiego (2009) Łódź leży na granicy trzech mezoregionów: Wysoczyzny Łaskiej, Wzniesień Łódzkich i Równiny Łowicko-Błońskiej. Miasto położone jest na tzw. Garbie Łódzkim, który choć nie spełnia wszystkich kryteriów odpowiednich dla wyżyn, to jednak w sposób wyraźny wznosi się nad sąsiadującą od zachodu doliną Warty oraz położoną na wschodzie doliną Pilicy (Turkowska 2006). Potwierdzeniem tej odrębności geomorfologicznej jest przebieg przez Garb Łódzki działu wodnego I rzędu miedzy dorzeczami Wisły i Odry.

Miasto zajmuje obszar 293,25 km^2 (Budzyński 2013). Powierzchnia terenu w jego granicach administracyjnych jest nachylona w kierunku południowo-zachodnim. Najniżej położona jest część południowo-zachodnia – rzędna terenu w pobliżu Grupowej Oczyszczalni Ścieków wynosi 163,6 m n.p.m. Najwyższy punkt znajduje się w okolicach ul. Kasprowicza, w północno-wschodniej części Łodzi, na wysokości 284,1 m n.p.m. (lodz.stat.gov.pl 2014). Deniwelacja przekracza więc na obszarze miasta 120 m na odległości ok. 18 km. W ciągu roku nad obszar Łodzi masy powietrza napływają najczęściej z zachodu (20% obserwacji), południowego zachodu (15%) i ze wschodu (14%) (Kożuchowski 2011). Najmniejszy jest udział wiatrów z kierunku północno-wschodniego (5%) i północnego (8%). Z pozostałych stron masy powietrza napływają z podobną częstością rzędu 11–13%.

Na rozkład i sumy opadów atmosferycznych często wpływa obecność pyłów w atmosferze. Zanieczyszczenie powietrza w Łodzi, wyrażone zawartością pyłu zawieszonego PM10, wynosi w skali roku 29 µg/m^3, co nie przekracza średniej obliczonej dla 37 miast Polski: 31,5 µg/m^3 (twojapogoda.pl 2014). Lokalnie, przy niesprzyjających warunkach atmosferycznych, w centrum miasta dochodzi do przekroczenia norm stężenia zanieczyszczeń w powietrzu (Krzemińska 2013). Największymi punktowymi emiterami zanieczyszczeń w mieście są elektrociepłownie zlokalizowane w północno-zachodniej, centralnej i wschodniej części miasta. Najwyższa średnia koncentracja pyłu zawieszonego znajduje się nieco na północ od centrum miasta, w pobliżu elektrociepłowni EC-3. Znaczne ilości zanieczyszczeń emitują do atmosfery piece lokali mieszkalnych.

Położenie i warunki klimatyczne Łodzi, w porównaniu do innych polskich miast, są dość specyficzne. Lokalizacja miasta na południowo-zachodnim stoku Garbu Łódzkiego,

na dziale wodnym I rzędu, brak zbiornika wodnego lokalnie modyfikującego klimat miasta bądź większej rzeki stanowiącej naturalny kanał przewietrzający, zwarta i bardzo regularna zabudowa śródmiejska wraz z wyraźnymi kanionami ulicznymi, a także obecność wyspy ciepła wzmagającej konwekcję pozwalają oczekiwać wyraźnej zmienności pola opadu zarówno w obrębie granic administracyjnych, jak i w stosunku do obszarów pozamiejskich.

3. Materiał badawczy

Opady w latach hydrologicznych 2010–2012 mierzone były przez 24 deszczomierze funkcjonujące w obrębie granic administracyjnych Łodzi oraz 3 zainstalowane w niewielkiej odległości od nich (rys. 1). Podstawą opracowania były zapisy pochodzące z 18 z nich, działających w okresie XI. 2009–X.2012 roku, w ramach sieci „AsterGate" należącej do Łódzkiej Spółki Infrastrukturalnej. Sieć została uruchomiona pod koniec 2009 roku w ramach Projektu Funduszu Spójności „Wodociągi i oczyszczalnia w Łodzi II" (Zawilski 2011). Materiał badawczy uzupełniono o pomiary prowadzone przez Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska (WIOŚ) w Łodzi (4 deszczomierze), Politechnikę Łódzką (PŁ) (3 deszczomierze), Uniwersytet Łódzki (UŁ) (1 deszczomierz) i Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej (IMGW) (1 deszczomierz).

Rejestracja opadów przez deszczomierze sieci „AsterGate" oraz należące do PŁ przebiegała w reżimie 5-minutowym, z dokładnością do 0,1 mm. Urządzenia WIOŚ rejestrowały opady w rozdzielczości godzinowej, z dokładnością 0,2 mm. Na stacji IMGW pomiarów dokonywano co 24 godziny, z dokładnością do 0,1 mm. Zaznaczano również wystąpienie opadu niemierzalnego, czyli takiego, którego suma dobowa nie przekroczyła 0,1 mm. Z kolei deszczomierz nr 23 (UŁ) zapisywał dane w nieregularnych odstępach czasu – za każdym razem, kiedy zebrała się objętość wody odpowiadająca 0,1 mm opadu, wysyłany był impuls.

Do sieci „AsterGate" należały automatyczne deszczomierze korytkowe typu TPG-127-H230 o objętości korytka 0,1 mm i pierścieniu recepcyjnym o powierzchni 200 cm^2. Wyposażono je w nadajnik i podłączono do zewnętrznej sieci zasilania z możliwością przełączenia na baterie. Każde urządzenie wyposażone było w kartę SIM i działało w sieci GPRS, przesyłając dane do serwera (Zawilski 2011). Ponadto nadajniki posiadały własne loggery, dzięki czemu mogły gromadzić dane w okresach braku łączności z serwerem. Po jej przywróceniu wysyłały jednorazowo informację o sumie zarejestrowanego opadu.

Podgrzewacze umieszczone wewnątrz obudowy deszczomierzy sieci „AsterGate" włączane były w okresach chłodnych, co umożliwiało rejestrowanie opadów o charakterze stałym (a-ster.pl 2014). Deszczomierze UŁ i WIOŚ również wyposażone były w podgrzewacze. Jednakże należy pamiętać, iż te ostatnie posiadały znacznie większą powierzchnię recepcyjną niż pozostałe. Ponadto deszczomierze WiOŚ były zainstalowane na dachach kontenerów, więc wyżej niż standardowy metr nad powierzchnią terenu. Urządzenia należące do PŁ (typu SEBA RG50) nie posiadały podgrzewaczy i kiedy temperatura spadała poniżej 0°C były wyłączane (Zawilski 2011).

Sumy opadów mierzone za pomocą urządzeń sieci „AsterGate" w większości obejmowały cały okres badawczy, choć zdarzały się dni (a nawet tygodnie) braku zapisu i to równolegle nawet na wszystkich urządzeniach. Najwięcej luk w pomiarach wystąpiło w przypadku deszczomierza nr 11 (działał przez ok. 72% okresu badawczego, czyli ok. 790 z 1096 dni), a najmniej w przypadku deszczomierza nr 1 (funkcjonował przez ponad 89% okresu badawczego, czyli ok. 975 dni). Najdłuższy okres braku rejestracji danych trwał 41 dni (od 13:00 7.10.2011 roku do 12:00 17.11.2011 roku).

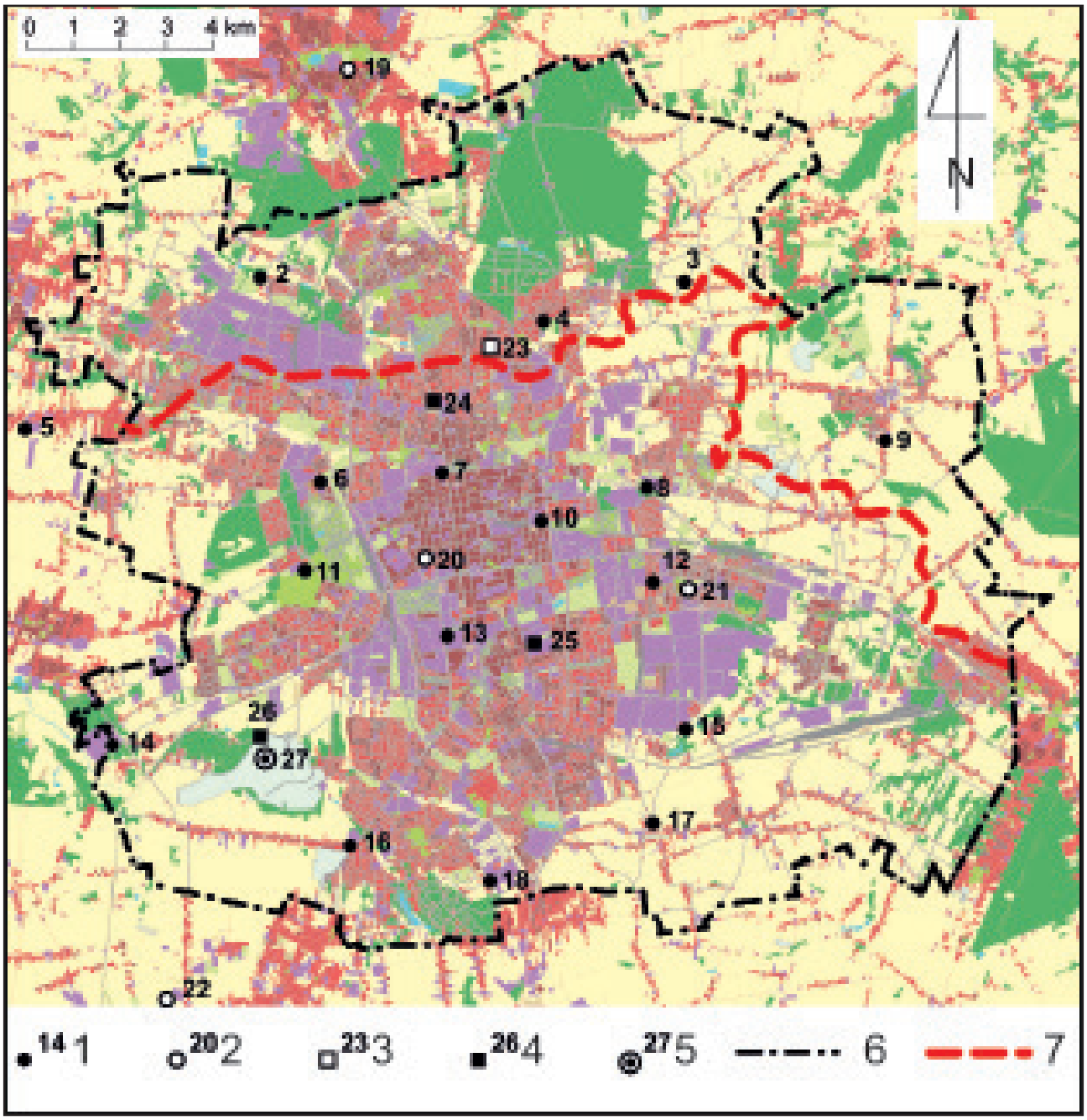
4. Metody opracowania

W pierwszym etapie pracy opracowano bazę danych opadów zarejestrowanych przez wszystkie deszczomierze, w podziale na lata i miesiące. Najmniej braków miały deszczomierze nr 19, 20, 21 i 22 należące do WIOŚ oraz deszczomierze nr 24, 25 i 26 będące własnością PŁ (lecz jedynie w okresach z temperaturą powyżej 0°C). Roczne i wieloletnie sumy opadów zarejestrowanych na pozostałych urządzeniach różniły się w bardzo szerokim zakresie. Jedynie w kilku przypadkach (rejestratory nr 2, 4, 5, 9 i 13) były one zbliżone do sum pochodzących z deszczomierzy nr 19, 20, 21, 22 i 27, które były w pracy traktowane jako referencyjne. Wyniki pomiarów z urządzeń nr 7, 8, 10, 15, 16, 17 i 18 były zaniżone, a z rejestratorów nr 3, 6, 12 i 14 – bardzo zaniżone. Z kolei dane pochodzące z rejestratora nr 1 w 2011 roku oraz nr 11 w 2012 roku były wyraźnie zawyżone na skutek błędów aparatury pomiarowej. Należało więc zweryfikować poprawność danych, opracować metodę poprawiania błędów i uzupełnienia braków w pomiarach.

Szeregi pochodzące z deszczomierzy sieci Aster zawierały różne błędy. Po wstępnym zestawieniu danych dokonano identyfikacji genezy błędów wg klasyfikacji zaproponowanej przez Ozgę-Zielińską i Brzezińskiego (1997). W pierwszej grupie – niejednorodności genetycznych, wyodrębniono błędy eksperymentu i czasowe. Drugą grupę stanowiły błędy statystyczne.

Do grupy błędów powstających w czasie eksperymentu należały m.in. awarie zasilania, wylogowanie się serwera, błędy instalacji, która w 2010 roku była ciągle w trakcie rozruchu. Zdarzały się więc przypadki nieopłacenia kart SIM lub ich awarie oraz braki rejestracji spowodowane niedrożnością lejka deszczomierza. Ponadto z szeregów czasowych należało usunąć sumy opadów zapisane w loggerach i wysłane w momencie przywrócenia łączności z serwerem. Występowały one po niektórych okresach braku łączności. Niestety, w tych przypadkach została utracona informacja o czasowym rozkładzie opadu oraz liczbie epizodów opadowych.

Aby określić, które zdarzenia opadowe zarejestrowane przez urządzenia w rzeczywistości były błędami aparatury pomiarowej, a które przedstawiały naturalną zmienność zjawiska, przeprowadzono dwuetapową procedurę weryfikacyjną. W pierwszej kolejności zastosowano jednostronny test rangowy Wilcoxona-Manna-Whitneya (Domański 1990). Z jego pomocą porównano szeregi zarejestrowane przez deszczomierze nr 19, 20, 21 i 22 w zestawieniu z danymi z posterunku nr 27. Przyjęto dekadową długość odcinków serii poddanych analizie. Dzięki tej procedurze udało się wykryć nieliczne, niewykryte wcześniej okresy niejednorodności związanej z przeprowadzaniem eksperymentu w szeregach zarejestrowanych przez urządzenia WIOŚ. Dotyczyło to sytuacji, w których na skutek zablokowania aparatury pomiarowej opady nie były rejestrowane przez wiele godzin na stacjach



Rys. 1. Rozmieszczenie deszczomierzy objętych opracowaniem. Posterunki opadowe: 1 – sieci „AsterGate", 2 – WIOŚ, 3 – UŁ, 4 – PŁ, 5 – IMiGW, 6 – granice administracyjne Łodzi, 7 – dział wodny I-go rzędu

Źródło: Mapa podkładowa np. Urban Atlas (European Environment Agency 2010)

Fig. 1. Distribution of rain gauges in the area of research. Rain gauges: 1 – „AsterGate" network, 2 – WIOŚ, 3 – UŁ, 4 – PŁ, 5 – IMiGW, 6 – administrative borders of Lodz, 7 – the first order watershed

Source: The background map on the base of the Urban Atlas (European Environment Agency 2010)

testowanych, zaś pojawiały się na posterunku referencyjnym. Innym rodzajem błędów tego typu było podawanie przez deszczomierze nr 19, 20, 21 i 22 zawyżonych sum opadów, podczas gdy urządzenie nr 27 przez dłuższy okres nic nie rejestrowało.

W kolejnym etapie weryfikacji za posterunki referencyjne przyjęto deszczomierze WIOŚ, zaś testowaniu poddano szeregi pochodzące z rejestratorów sieci „AsterGate". Ze względu na większą rozdzielczość czasową danych źródłowych w teście Wilcoxona-Manna-Whitneya przyjęto dwunastogodzinną długość okresów badania niejednorodności. Ponadto każdemu testowanemu deszczomierzowi przyporządkowano deszczomierz referencyjny stosując kryterium najmniejszej odległości. Udało się wykryć wiele okresów, w których dane z deszczomierzy „AsterGate" pochodziły z innej populacji genetycznej niż dane zarejestrowane w tym samym czasie przez posterunki referencyjne.

Ostatecznie zdecydowano się na usunięcie takich danych na posterunkach sieci „AsterGate" i PŁ. Powstałe braki oraz wcześniej istniejące luki w szeregach, spowodowane przerwami w rejestrowaniu danych, uzupełniono metodą odwrotnych odległości (Urbański 2010). Aby właściwie

ustalić sąsiedztwo zastosowano teorię grafów (Tamulewicz 1993). Tworząc graf sieci deszczomierzy, kierowano się następującymi założeniami:

a) obszar badań podzielono na trójkątne pola elementarne; w ich wierzchołkach znajdowały się posterunki pomiarowe, a krawędzie stanowiły połączenia pomiędzy sąsiadującymi stacjami;

b) trójkątne pola elementarne zostały zbudowane z możliwie najkrótszych krawędzi, a kąty wewnętrzne trójkątów nie mogły być mniejsze od 30°;

c) powstała sieć połączeń była grafem planarnym, czyli takim, w którym żadne z jego krawędzi nie przecinają się.

Zastosowanie drugiego warunku pozwoliłoby ekstrapolować relacje zachodzące pomiędzy sąsiednimi węzłami grafu na umowną strefę pola rozciągniętą wzdłuż danej krawędzi (Tamulewicz 1993). W niektórych przypadkach trzeba było jednak uchylić ten warunek, aby zachować względnie dużą liczbę posterunków. W dalszych analizach zrezygnowano z szeregu pochodzącego z deszczomierza nr 12. Odrzucono również dane zarejestrowane przez urządzenie nr 26, ponieważ okres jego synchronicznej pracy wraz z pozostałymi dwoma deszczomierzami PŁ był rozbieżny. Wykorzystanie danych pochodzących z tego przyrządu wymagałoby przygotowania dodatkowych dwóch grafów sąsiedztwa. Ich struktura w południowo-zachodniej części Łodzi nie spełniałaby warunku kątów (b). Wreszcie, okres funkcjonowania deszczomierza nr 26 był dość krótki. W grafie sąsiedztwa nie uwzględniono również deszczomierza nr 27, z którego dane były dostępne wyłącznie w rozdzielczości dobowej. Uwzględniając wszystkie niezbędne ograniczenia, stworzono cztery grafy sąsiedztwa. Pierwszy obejmował okres wspólnej pracy deszczomierzy sieci Aster i rejestratora UŁ, w drugim dodatkowo pracowały urządzenia PŁ, w trzecim wyłączony został deszczomierz UŁ, a w ostatnim funkcjonowały wyłącznie deszczomierze sieci Aster.

Po ustaleniu grafów sąsiedztwa przystąpiono do uzupełniania brakujących danych. Zastosowano zagnieżdżoną funkcję warunkową, którą można przedstawić wzorami:

$$f(x)=\begin{cases}\varphi(x);\ \varphi(x)\geq 0{,}1\\ 0{,}1;\ \varphi(x)\in(0{,}05;\ 0{,}1)\\ 0;\ \varphi(x)\leq 0{,}05\end{cases}$$

$$\varphi(x)=\begin{cases}\dfrac{\sum_{i=1}^{n}\frac{x_i}{d_i}}{\sum_{i=1}^{n}\xi(x_i)};\ \sum_{i=1}^{n}\xi(x_i)\neq 0\\ \varnothing;\ \sum_{i=1}^{n}\xi(x_i)\neq 0\end{cases}$$

$$\xi(x_i)=\begin{cases}\dfrac{1}{d_i};\ d_i\neq\varnothing\\ 0;\ d_i=\varnothing\end{cases}$$

gdzie:

x_i – suma opadu zarejestrowana przez *i*-ty deszczomierz w ciągu godziny w [mm],

d_i – odległość między *i*-tym deszczomierzem, sąsiadującym z posterunkiem, którego szereg był uzupełniany, wyrażona w [km],

$\varnothing$ – zbiór pusty; brakujące dane nie były uzupełniane, jeśli w pierwszym etapie weryfikacji wszystkie deszczomierze sąsiadujące z badanym posterunkiem miały w tym samym czasie lukę w szeregu pomiarowym.

Ponieważ występowały takie okresy, w których żaden z deszczomierzy sąsiadujących z uzupełnianym nie zarejestrował opadu, dlatego najpierw uzupełniono wszystkie możliwe braki w pomiarach dla pozostałych szeregów, a następnie całą procedurę wykonano ponownie. Autor zdaje sobie sprawę z niedoskonałości tej metody. Wykorzystując ją, uzupełniono luki w szeregach pomiarowych danymi wtórnymi. Sytuacja taka dotyczyła jednak tylko nielicznych zdarzeń opadowych. Dlatego też zrezygnowano z tworzenia grafów sąsiedztwa o wierzchołkach znajdujących się w tym samym kierunku, co deszczomierze nierejestrujące, lecz położonych dalej. Ich wykorzystanie byłoby z pewnością bardziej właściwe, jednak nie wpłynęłoby na wzrost dokładności i szczegółowość badanego pola opadów, ponadto jeszcze bardziej skomplikowało procedurę obliczeniową.

5. Struktura i reżim opadów w latach 2010–2012

Średnia wysokość opadów w Łodzi w latach 1931–1995 wyniosła 560 mm, była więc mniejsza zarówno od średniej sumy opadów w całej Polsce (616 mm), jak również średniej dla obszarów kraju położonych poniżej 300 m n.p.m. (592 mm) (Wibig 1998; Woś 2010). Najwyższą sumę roczną opadów – 781 mm zarejestrowano w 1931 roku, zaś najniższą – 364 mm – w 1959 roku (tab. 1). Odchylenie standardowe średnich rocznych opadów nie przekraczało 100 mm, zaś dzielnik opadowy przyjmował wartość 0,73, co wskazuje na dość dużą stabilność opadów.

W przebiegu rocznym najwilgotniejszym miesiącem jest lipiec, w czasie którego spada średnio 84 mm deszczu (Wibig 1998). W kolejnych miesiącach opady zmniejszają się. W listopadzie zaznacza się niewielki wzrost opadów, po którym znów następuje spadek. Średnie minimum roczne występuje w lutym (29 mm), a następnie opady rosną aż do osiągnięcia letniego maksimum. Średnia roczna amplituda opadów wynosi 55 mm, co stanowi ok. 10% sumy rocznej. Zmienność opadów w poszczególnych miesiącach jest największa latem, osiągając maksimum w lipcu, zaś najmniejsza w lutym i marcu. Najwyższe, w danym roku, dobowe sumy opadów przeważnie nie przekraczają 10% sumy rocznej.

Do porównania wysokości opadów atmosferycznych w okresie 2010–2012 z wieloleciem 1931–1995 wykorzystano dane z tego samego posterunku opadowego – Łódź-Lublinek. Zastosowano klasyfikację opadową zaproponowaną przez Kaczorowską (1962). Na tle 65-letnich charakterystyk opadowych, trzylecie badawcze można uznać za normalne pod względem średniej sumy opadów (tab. 1). W latach 2010–2012 przeciętnie spadło 595 mm, co nieznacznie (o ok. 6%) przekracza średnią wieloletnią. Również przeciętne sumy opadów w poszczególnych miesiącach można uznać za normalne, z kilkoma wyjątkami (styczeń i maj – bardzo wilgotne, sierpień – wilgotny, październik – suchy).

Reżim opadowy w poszczególnych latach był różny. Rok 2010 był wilgotny. Spadło wówczas 674 mm wody, co stanowi ponad 120% średniej wieloletniej. Najwilgotniejszymi w całym trzyleciu były miesiące maj i sierpień, bardzo wilgotny był również marzec. Z drugiej strony bardzo suchy był czerwiec, a skrajnie suchy – październik.

Rok 2011 był normalny wilgotnościowo, spadło wówczas niemal tyle samo wody, co przeciętnie w całym trzyleciu. Miesięczny rozkład opadów był już jednak odmienny. Skrajnie wilgotnym miesiącem był listopad, podczas którego zarejestrowano 107 mm opadu. Szczególna była również wybitnie sucha jesień 2011, z najbardziej suchym listopadem, kiedy spadło zaledwie 0,3 mm deszczu – najmniej w stosunku do całego trzylecia i 65-lecia porównawczego.

Sucha była również wiosna 2012 roku, po której nastąpił bardzo wilgotny czerwiec i suchy lipiec. Pozostała część roku była normalna pod względem wilgotnościowym, ogólnie jednak w roku 2012 spadło ok. 8% mniej wody niż przeciętnie dla 65-lecia.

Strukturę wysokości sum dobowych opadów atmosferycznych, odnotowanych w XX wieku oraz w okresie badawczym 2010–2012, prezentuje tab. 2, zaś na rys. 2 przedstawiono udział dni z opadem o określonej wysokości w poszczególnych miesiącach. Aby możliwe było porównanie analizowanego okresu z wieloleciem 1904–2000, zastosowano 5-klasową strukturę wysokości opadów, wykorzystaną wcześniej przez Podstawczyńską (2007): 0 mm – bez opadu; 0,1–0,9 mm – opad słaby; 1–4,9 mm – opad umiarkowany; 5–9,9 mm – opad umiarkowanie silny; ≥10 mm – opad silny.

Struktura opadów w okresie 2010–2012 była zbliżona do wielolecia. W badanym okresie najwilgotniejszy był rok 2010. Kolejny był nieco wilgotniejszy od przeciętnej dla wielolecia, zaś rok 2012 – wyraźnie suchszy. W stosunku do lat 1904–2000 w trzyleciu wystąpiło mniej dni bezopadowych i dni z opadem silnym, zwiększyła się zaś liczba dni z opadem słabym i umiarkowanie silnym. Opady umiarkowane w obu okresach występowały z podobną częstotliwością. W poszczególnych miesiącach najwięcej dni bezopadowych było jesienią i wczesną wiosną. Opady najczęściej występowały zimą i były słabe lub umiarkowane. Najintensywniejsze miały miejsce w maju, lipcu i sierpniu, co było spowodowane najsilniejszą w tych miesiącach konwekcją.

Tab. 1. Miesięczne i roczne sumy opadów atmosferycznych [mm] na posterunku Łódź-Lublinek w latach hydrologicznych 2010–2012 na tle charakterystyk zanotowanych w okresie 1931–1995

Tab. 1. Monthly and annual precipitation [mm] at the Lodz-Lublinek station in the hydrological years 2010–2012 compared to characteristics recorded in the period 1931–1995

Okres	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	Rok
2012[a]	0	48	58	32	16	33	33	101	47	55	55	39	**516**
2011[a]	107	52	38	26	22	34	71	33	105	66	11	29	**594**
2010[a]	42	39	32	24	50	31	141	28	84	132	63	7	**674**
Średnia 2010–2012	50	46	43	27	29	33	82	54	79	84	43	25	**595**
Średnia 1931–1995[b]	46	39	30	29	31	36	50	67	84	67	48	37	**560**
Odch. standardowe 1931–1995[b]	28	20	16	15	15	17	25	35	43	33	29	30	**99**
Maks. 1931–1995[b]	193	81	72	63	60	102	157	230	258	190	126	141	**781**
Min. 1931–1995[b]	6	4	5	1	6	4	6	16	14	14	3	0	**364**

– skrajnie wilgotny; – bardzo wilgotny; – wilgotny; – skrajnie suchy; – bardzo suchy; – suchy

Źródło (Source): [a] – IMGW, [b] – Wibig (1998).

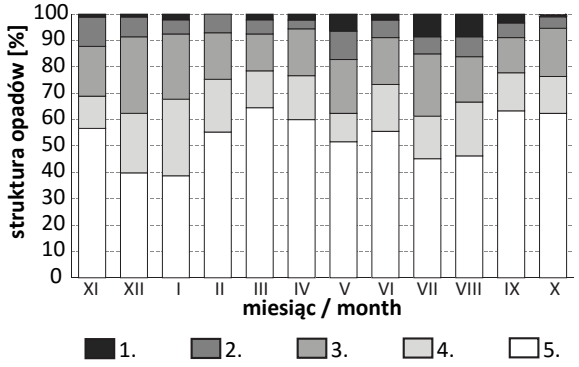
Tab. 2. Udział dni z opadem w klasach wysokości w Łodzi w latach 2010–2012 na tle wielolecia 1904–2000 [%]

Tab. 2. The days with precipitation in classes in Lodz in 2010–2012 in comparison with the multi-year background [%]

Klasa wysokości opadów	Średnia z lat 1904–2000[a]	2010[b]	2011[b]	2012[b]	Średnia z lat 2010–2012[b]
Bez opadu	54,2	50,1	51,5	57,9	53,2
Słaby	16,8	17,5	18,6	15,8	17,3
Umiarkowany	19,3	21,6	19,7	16,9	19,4
Umiarkowanie silny	6,0	6,8	6,3	7,1	6,8
Silny	3,6	3,8	3,8	2,2	3,3

Źródło: [a] – Podstawczyńska (2007), [b] – badania własne.

Source: [a] – Podstawczyńska (2007), [b] – own compilation.



Rys. 2. Miesięczna struktura dni z opadem o określonej klasie wysokości w wieloleciu 2010–2012
Opad: 1 – silny, 2 – miarkowanie silny, 3 – umiarkowany, 4 – słaby, 5 – bez opadu

Fig. 2. The monthly structure of the days with the specified class of precipitation in the multi-year 2010–2012
Precipitation: 1 – strong, 2 – moderately strong, 3 – moderate, 4 – weak, 5 – without precipitation

6. Przestrzenny rozkład opadów na obszarze Łodzi

Baza danych o opadach w Łodzi w latach 2010–2012 posłużyła do stworzenia sekwencji map, przedstawiających przestrzenne zróżnicowanie opadów atmosferycznych na obszarze miasta. Mapy wykonano przy pomocy programów: ArcGIS 10.1 (interpolacja) oraz Adobe Ilustrator (obróbka graficzna). Na wstępnym etapie prac porównano efekty zastosowania różnych deterministycznych i geostatystycznych metod prezentacji danych opadowych. Do dalszych analiz zdecydowano się wykorzystać metodę odwrotnych odległości oraz kriging zwyczajny. Przeanalizowano implementacje krigingu, wykorzystujące różne równania (sferyczne, kołowe, wykładnicze i gaussowskie) do opisania przebiegu semiwariogramu teoretycznego. Ostatecznie, wybór padł na metodę bazującą na tzw. semiwariogramie sferycznym i zmiennej odległości poszukiwań 12 punktów pomiarowych. O wyborze zadecydowała stosunkowo najlepsza jakość dopasowania tego modelu. Powyższa procedura pozwoliła na utworzenie map przestrzennego zróżnicowania rocznych sum opadów (rys. 3), średnich sum opadów (rys. 4), maksymalnych dobowych sum opadów (rys. 5), maksymalnych godzinowych sum opadów (rys. 6) oraz liczby dni z opadem >0,1 mm (rys. 7) w badanym okresie.

Rozkład przestrzenny opadów atmosferycznych w Łodzi w roku 2010 przedstawia rys. 3A. Był to rok stosunkowo wilgotny. Najwięcej wody spadło w północno-zachodniej części Łodzi oraz w rejonie Spłaszczenia Rogowskiego. Średnia suma opadów na obszarze miasta wyniosła 616,4 mm przy odchyleniu standardowym 17,8 mm. Współczynnik zmienności był więc równy 2,9%. Najwyższa suma roczna wyniosła 656,1 mm, a najniższa – 573,1 mm. Rozpiętość sumy opadów na obszarze miasta osiągnęła zatem 83 mm. Wysokie opady, jakie otrzymały w 2010 roku dzielnice centralne, najprawdopodobniej spowodowane były czynnikami typowymi dla dużego miasta. Strefa wysokich opadów była przesunięta nieco na wschód od centrum – po stronie zawietrznej w stosunku do głównych, wieloletnich kierunków napływu mas powietrza. Zanieczyszczenie powietrza i silniejsza konwekcja nad centrum mogły powodować, że chmury traciły najwięcej wody już w niewielkiej od niego odległości, zaś w dzielnicach północno-wschodnich nie dawały już tak wysokich opadów, pomimo rosnącej rzędnej terenu.

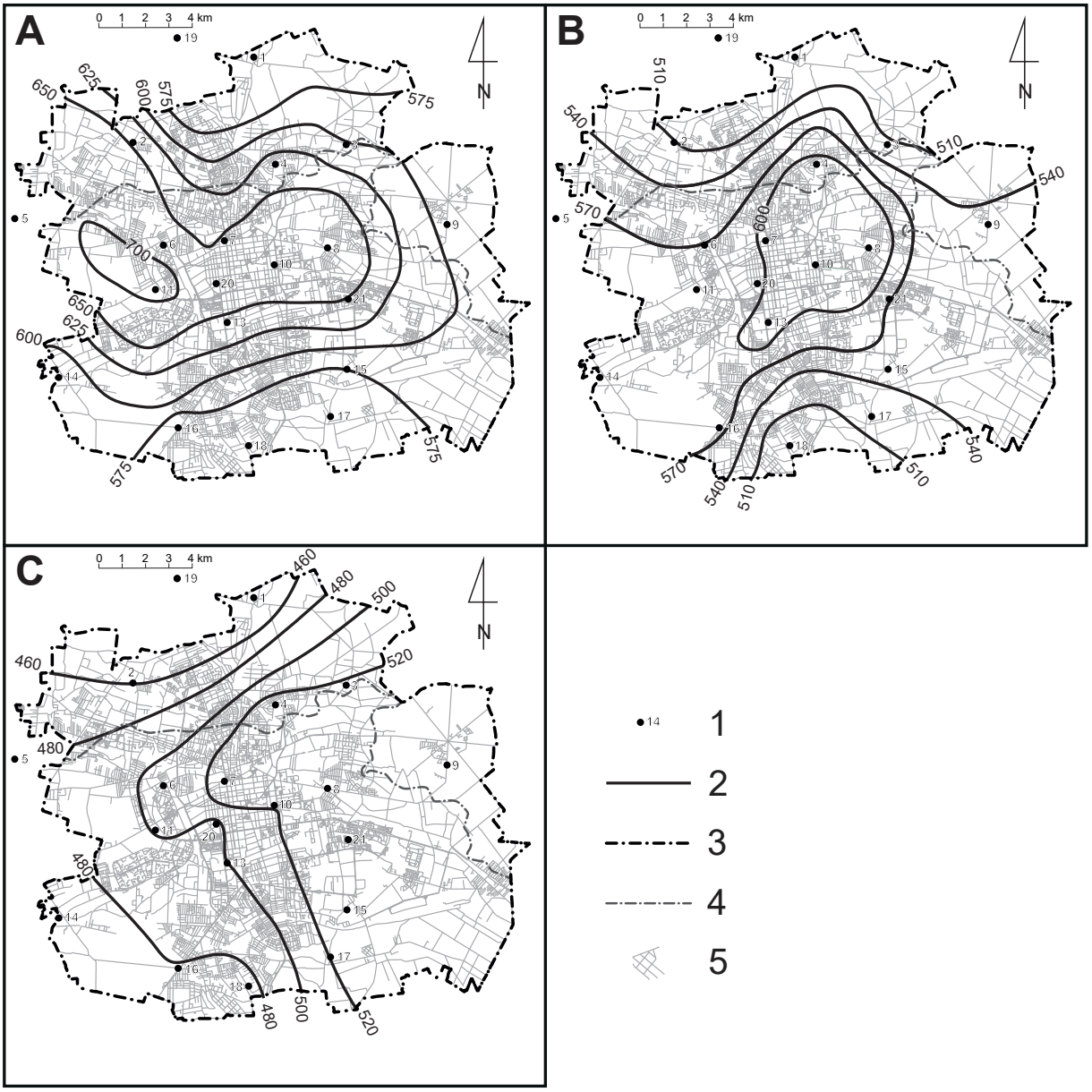
Nieco trudniejsze do interpretacji są wysokie opady w zachodnich i północno-zachodnich dzielnicach miasta. Trudno przypuszczać, że oddziaływanie klimatu miejskiego znacznie mniejszego od Łodzi Aleksandrowa Łódzkiego wywoła silniejszy efekt opadowy po jego zawietrznej stronie. Być może na wzrost opadów nad tym obszarem ma wpływ współczynnik szorstkości aerodynamicznej, znacznie zwiększający się w rejonach bloków mieszkalnych. Jednakże centralna część pola maksimum opadowego w zachodnich dzielnicach wystąpiła nad dużym obszarem zielonym o stosunkowo małej wartości tego współczynnika. Podobnie trudne do wyjaśnienia były bardzo niskie opady na północy Łodzi, w strefie zawietrznej sąsiadującego z nią Zgierza. Możliwe, że w niewielkiej odległości od centrum tego miasta wystąpił wzrost opadów, a dalej – szybki spadek. Północne i południowe dzielnice Łodzi położone są niżej niż centrum i wschodnia część miasta, które stanowią większą przeszkodę dla napływających mas powietrza. Dla uzyskania przekonujących argumentów niezbędne będzie dalsze prowadzenie pomiarów opadów oraz porównanie ich z innymi czynnikami klimatycznymi.

Kolejny rok (2011) cechowały nieco niższe opady, zbliżone do średniej trzyletniej i wielolecia. Ich rozkład przestrzenny przedstawia rys. 3B. Maksymalne sumy odnotowano na północny-wschód od geometrycznego centrum miasta oraz w samym centrum. Dużo opadów otrzymała również zachodnia i południowo-zachodnia część Łodzi, zaś minima ponownie wystąpiły na północy i południu. Maksimum opadów wyniosło 676,0 mm, a minimum – 441,1. Przeciętna suma opadów na obszarze miasta wyniosła 558,7 mm, przy odchyleniu standardowym ponad dwukrotnie większym (38,6 mm) niż w poprzednim roku. Współczynnik zmienności był równy 6,9%, co świadczy o większym zróżnicowaniu opadów w poszczególnych częściach miasta. Potwierdza to również wyższa, niż w 2010 roku, amplituda opadów (234,9 mm).

Ogólnie rzecz biorąc, rozkład przestrzenny opadów w 2011 roku był podobny do rozkładu opadów w roku poprzednim. W roku 2011 większe znaczenie odgrywała hipsometria terenu – maksima opadowe wystąpiły na dowietrznych stokach Wzgórz Łagiewnickich. Deniwelacje terenu są tam stosunkowo wysokie, w porównaniu do części miasta położonych na południowy wschód od nich. Opad zmniejszał się jeszcze przed osiągnięciem kulminacji tych wzgórz, prawdopodobnie ze względu na dominujący wpływ samego centrum i utratę wodności chmur nad tym najcieplejszym, najbardziej zapylonym i stawiającym najwyższy opór aerodynamiczny obszarem miasta. Duże sumy opadów w dzielnicach zachodnich są być może związane ze zwiększonym na tym obszarze współczynnikiem szorstkości aerodynamicznej. Dzielnice północno-zachodnie otrzymały w roku 2011 mniej opadów niż w roku poprzednim. Sumy ponownie były najniższe w południowej i północnej części miasta.

Rys. 3C przedstawia rozkład przestrzenny opadów atmosferycznych w Łodzi w roku 2012. Był on najsuchszy w badanym okresie, lecz o sumie opadów niewiele mniejszej niż średnia wieloletnia. Najwięcej opadów otrzymała wschodnia część miasta oraz obszar położony w niewielkiej odległości na północ od centrum, zaś najmniej dzielnice północno-zachodnie, południowo-zachodnie oraz okolice posterunku nr 20. Średnia suma opadów na obszarze miasta wyniosła 503,4 mm, przy odchyleniu standardowym 29,3 mm. Różnica pomiędzy maksymalną (546,8 mm)

a minimalną (414,8 mm) sumą opadów wyniosła 132,0 mm i podobnie jak współczynnik zmienności (5,9%) była niższa niż w poprzednim roku, lecz wyższa niż w roku 2010. Świadczy to o umiarkowanym zróżnicowaniu opadów w poszczególnych częściach miasta w porównaniu do poprzednich lat.

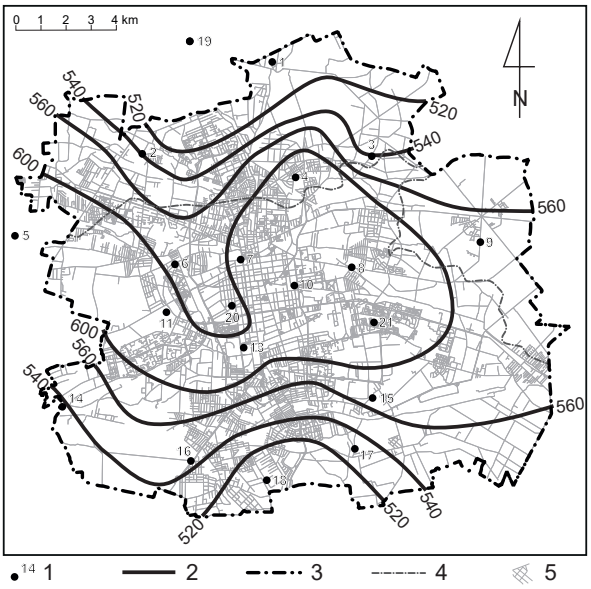


Rys. 3. Średnie sumy opadów atmosferycznych [mm] na obszarze Łodzi w latach hydrologicznych: A – 2010, B – 2011, C – 2012
1 – posterunki opadowe, 2 – izohiety, 3 – granice administracyjne Łodzi, 4 – dział wodny I-go rzędu, 5 – siatka ulic

Fig. 3. The average precipitation [mm] in the area of Lodz in the hydrological years: A – 2010, B – 2011, C – 2012
1 – rain gauges, 2 – isohyets, 3 – administrative borders of Lodz, 4 – the first order watershed, 5 – roads

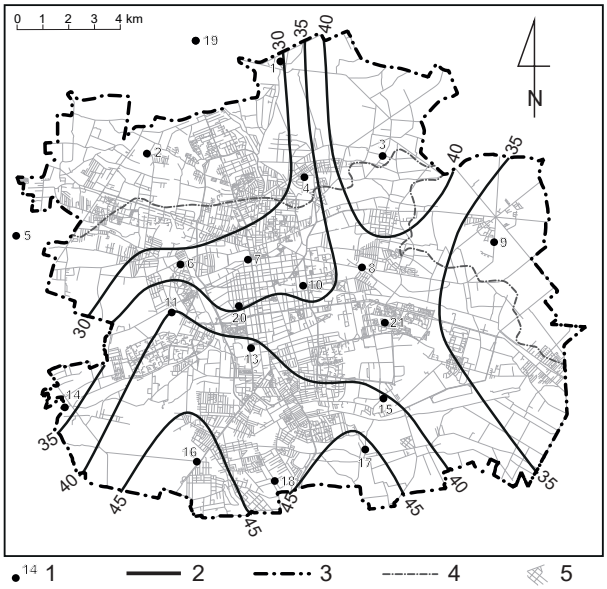
Można przypuszczać, że rozkład przestrzenny opadów atmosferycznych w roku 2012 kształtowały inne czynniki niż w latach poprzednich. Wysokie sumy opadów zanotowane na północ od geometrycznego centrum miasta mogły być spowodowane silnym zanieczyszczeniem powietrza, występującym często w tej części Łodzi. Duże opady w wyżej położonych dzielnicach wschodnich i północno-wschodnich oraz niskie sumy opadów w północno-zachodniej i południowo-zachodniej części miasta nawiązywały do ukształtowania terenu. Być może miejska wyspa ciepła nie rozwinęła się w tym roku tak bardzo jak w latach poprzednich i miała mniejszy wpływ na rozkład pola opadów, jednakże potwierdzenie tej tezy wymaga dalszych badań.

Zróżnicowanie przestrzenne średnich sum opadów w badanym trzyleciu prezentuje rys. 4. Obszary o najwyższej sumie opadów rozciągają się równoleżnikowym pasem biegnącym od zachodu, przez centrum, w kierunku południowo-wschodnich stoków Wzgórz Łagiewnickich oraz zachodnich części miasta. Lokalne minimum znajduje się ok. 2 km na zachód od geometrycznego centrum miasta. Najmniej opadów wystąpiło w północnych i południowych częściach Łodzi. Średnia suma opadów na obszarze miasta wyniosła 561,2 mm, przy odchyleniu standardowym 29,3 mm i współczynniku zmienności – 5,2%. Przeciętne maksimum opadów było równe 637,6 mm, zaś minimum – 450,1 mm. Amplituda osiągnęła więc 187,5 mm.



Rys. 4. Średnie sumy opadów atmosferycznych [mm] w latach hydrologicznych 2010–2012 na obszarze Łodzi
1 – posterunki opadowe, 2 – izohiety, 3 – granice administracyjne Łodzi, 4 – dział wodny I-go rzędu, 5 – siatka ulic

Fig. 4. The average precipitation [mm] in the area of Lodz in the hydrological years 2010–2012
1 – rain gauges, 2 – isohyets, 3 – administrative borders of Lodz city, 4 – the first order watershed, 5 – roads



Rys. 5. Maksymalna dobowa suma opadów atmosferycznych [mm] na obszarze Łodzi w latach 2010–2012 zarejestrowana 14.06.2012 r.
1 – posterunki opadowe, 2 – izohiety, 3 – granice administracyjne Łodzi, 4 – dział wodny I-go rzędu, 5 – siatka ulic

Fig. 5. The maximum daily precipitation [mm] in the area of Lodz in 2010–2012 recorded 14 Jun 2012
1 – rain gauges, 2 – isohyets, 3 – administrative borders of Lodz city, 4 – the first order watershed, 5 – roads

Powyższy obraz jest z pewnością wypadkową ukształtowania powierzchni miasta oraz głównych kierunków napływów mas powietrza. Na Spłaszczeniu Rogowskim i południowo-zachodnich stokach Wzgórz Łagiewnickich, gdzie spadki terenu są większe niż w zachodniej i południowej części miasta, występują najwyższe średnie sumy opadów. Obniżenie opadów rejestrowane w północno-wschodniej części miasta (posterunki nr 3 i 9) prawdopodobnie ma związek z występowaniem cienia opadowego Wzgórz Łagiewnickich. Stosunkowo duże opady, jakie otrzymała północna część Stopnia Retkińskiego, można tłumaczyć jej ekspozycją na główne kierunki napływu mas powietrza. Być może mają one również związek ze wzrostem współczynnika szorstkości aerodynamicznej. Zachodnie maksimum pola opadów występuje nad dość dużym obszarem parku na Zdrowiu.

Najmniejsze średnie sumy opadów zanotowano w północnej części miasta oraz południowo-zachodnich i połu-dniowych jego obszarach. Niskie opady, zarejestrowane w okolicach posterunku nr 1, są trudne do wyjaśnienia. Być może mają związek z cieniem opadowym Zgierza. Relatywnie niskie opady rejestrowane przez posterunki nr 14, 16, 17 i 18 wystąpiły w najniżej położonej części miasta.

Maksymalną dobową sumę opadów w badanym okresie na obszarze Łodzi zarejestrowano 14.06.2012 roku (rys. 5). Przeciętna wyniosła tego dnia 35,9 mm, przy odchyleniu standardowym 7,3 mm. Maksimum osiągnęło 53,7 mm, a minimum 14,7 mm. Amplituda wynosiła zatem prawie 40 mm. Zróżnicowanie opadów na poszczególnych stacjach było duże, współczynnik zmienności wyniósł 20,3%. Najwięcej deszczu spadło w południowej oraz w północno-wschodniej, najbardziej wyniesionej części miasta. Najmniejsze opady zanotowano w północno-zachodnich dzielnicach miasta.

Maksymalny opad godzinowy w badanym trzyleciu zarejestrowano 7.08.2011 roku, od godziny 17:00 do 18:00 (rys. 6). Średnia suma opadów na obszarze miasta wyniosła tego dnia 12,7 mm, przy odchyleniu standardowym 6,8 mm i współczynniku zmienności równym 53,5%. Tak duża zmienność opadu wyniknęła z faktu, że oprócz dzielnic południowo-zachodnich, zachodnich oraz centralnych objętych silnym opadem, we wschodniej części miasta w ogóle nie padało. Maksimum wyniosło 30,6 mm, minimum – 0,5 mm, amplituda przekroczyła więc 30 mm.

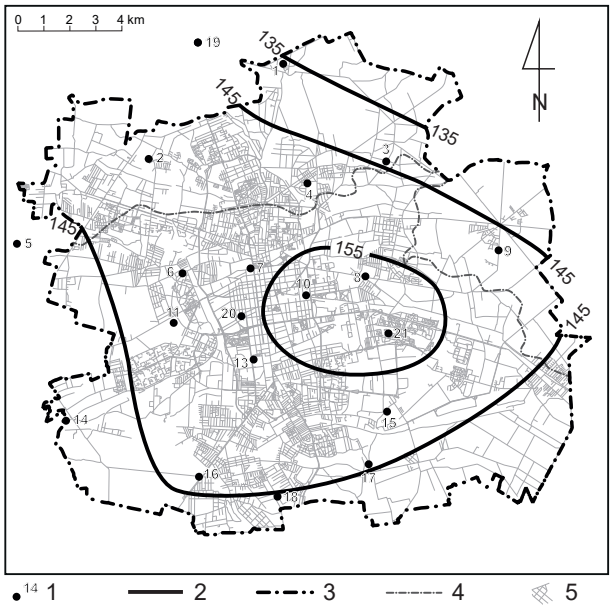
Był to opad konwekcyjny. O godzinie 7 rano temperatura powietrza osiągnęła 20°C i w ciągu dnia wzrosła do ponad 28°C około godziny 15:00. Wraz ze wzrostem temperatury rosła również wilgotność powietrza. Późnym popołudniem temperatura zaczęła spadać. Gdy wilgotność osiągnęła 70–80%, między godziną 17:00 a 18:00 wystąpił opad atmosferyczny o bardzo dużym natężeniu, podczas którego temperatura spadła o 5–6°C. Prędkość wiatru w ciągu dnia zmniejszała się, natomiast w godzinie najintensywniejszego opadu gwałtownie wzrosła. Po 18:00 deszcz padał jeszcze przez 2 godziny i cechowała go malejąca intensywność. Opad ustał na wszystkich posterunkach przed godziną 21:00.

Rys. 7 prezentuje przeciętną liczbę dni z opadem powyżej 0,1 mm zarejestrowaną w badanym okresie. W opracowaniu nie uwzględniono dni, podczas których deszczomierze zarejestrowały jedynie osady atmosferyczne. Opady na obszarze miasta występowały najczęściej (przez ponad 155 dni w roku) kilka kilometrów na wschód od geometrycznego centrum, a więc po jego stronie zawietrznej w stosunku do dominującego kierunku napływu mas powietrza. Często rejestrowano je również na obszarze najbardziej zurbanizowanym. Rzadziej występowały nad północno-wschodnią częścią Łodzi, o dużym udziale terenów

leśnych (poniżej 135 dni w roku) oraz w jej zachodnich i południowo-wschodnich dzielnicach, gdzie dominuje budownictwo jednorodzinne. Wzrost częstości dni z opadem w centrum i w zawietrznych dzielnicach miasta był już opisywany w literaturze (Huff, Changnon 1973). Przyczynami tego zjawiska w Łodzi, podobnie jak w przypadku innych dużych miast, są: wzrost zanieczyszczenia powietrza, szczególnie nad najgęściej zabudowanymi dzielnicami w jego centralnej części, zwiększona szorstkość aerodynamiczna spowodowana występowaniem wysokich budynków i obecność miejskiej wyspy ciepła. W przypadku Łodzi niebagatelne znaczenie odgrywa z pewnością także orografia terenu.

Rys. 6. Maksymalna godzinowa suma opadów atmosferycznych [mm] na obszarze Łodzi w latach 2010–2012 zarejestrowana 7.08.2011 roku w godzinach 17–18
1 – posterunki opadowe, 2 – izohiety, 3 – granice administracyjne Łodzi, 4 – dział wodny I-go rzędu, 5 – siatka ulic

Fig. 6. The maximum hourly precipitation [mm] in the area of Lodz in 2010–2012, recorded 07 Aug 2011 between 5 and 6 p.m.
1 – rain gauges, 2 – isohyets, 3 – administrative borders of Lodz city, 4 – the first order watershed, 5 – roads



Rys. 7. Średnia roczna liczba dni z opadem na obszarze Łodzi w latach 2010–2012
1 – posterunki opadowe, 2 – linie jednakowej liczby dni z opadem, 3 – granice administracyjne Łodzi, 4 – dział wodny I-go rzędu, 5 – siatka ulic

Fig. 7. The annual average number of days with precipitation in the area of Lodz in 2010–2012
1 – rain gauges, 2 – the lines of the same number of precipitation days, 3 – administrative borders of Lodz, 4 – the first order watershed, 5 – roads

7. Podsumowanie

W opracowaniu zaprezentowano zróżnicowanie przestrzenne opadów na obszarze zamkniętym granicami administracyjnymi Łodzi. Wykorzystano dane pochodzące z 24 posterunków opadowych z lat hydrologicznych 2010–2012 (z pierwotnych 27 odrzucono 3 posterunki w trakcie procedury weryfikacyjnej). Przeprowadzone obliczenia i analiza wyników umożliwiają sformułowanie kilku wniosków podsumowujących.

1. Opady atmosferyczne na obszarze Łodzi charakteryzują się dużą zmiennością przestrzenną. Najwyższe opady w badanym wieloleciu zanotowano w centralnej części miasta (ponad 600 mm). Podwyższonymi sumami cechował się niemal cały, równoleżnikowo przebiegający pas.

2. Głównymi czynnikami decydującymi o takim zróżnicowaniu średnich wieloletnich sum opadów wydają się być: orografia terenu, główny kierunek napływu wilgotnych mas powietrza oraz „szorstkość" powierzchni miasta i zapylenie. Pewne znaczenie odgrywać też może, zwłaszcza w okresach zimowych, miejska wyspa ciepła, zwiększająca możliwości konwekcyjnego unoszenia się mas powietrza w strefach zurbanizowanych.

3. Średnio na obszar miasta spada 561,2 mm wody rocznie. Najmniejsze sumy opadów, nie przekraczające 520 mm, zanotowano w obszarach północnych (stosunkowo niskich) i południowych (płaskich). W badanym okresie niektóre czynniki determinujące klimat miejski wpływały silniej, a inne słabiej na kształtowanie się pola opadu. Wyjaśnienie przyczyn zmiennego oddziaływania tych czynników jest trudne i wymaga dalszych studiów.

4. W rozpatrywanym okresie najwilgotniejszy był rok 2010, w czasie którego na obszar miasta spadło 616,4 mm wody. Zmienność opadu w Łodzi (poza kilkoma wyjątkami) nie była wówczas duża. Najwięcej opadów wystąpiło w centrum oraz w zachodniej części miasta, a najmniej na północy i południu. W tym roku na rozkład opadów najprawdopodobniej największe znaczenia miało zapylenie powietrza, „szorstkość" podłoża i ruchy konwekcyjne intensyfikowane przez miejską wyspę ciepła. Występowanie wysokich opadów w zachodniej części miasta jest trudniejsze do wyjaśnienia i wymaga dalszych badań.

5. Sumy opadów w roku 2011 były zbliżone do średniej z wielolecia. W tym okresie na obszar miasta spadło przeciętnie 558,7 mm wody. Zmienność opadu była ponad dwukrotnie większa niż w roku 2010. Maksymalne

opady ponownie wystąpiły w centrum, jak również nieco dalej na północny wschód – na stokach dowietrznych Wzgórz Łagiewnickich. Wysokie sumy pojawiły się również w zachodniej części miasta, a niskie ponownie w dzielnicach północnych i południowych.

6. Rok 2012 był najsuchszy w badanym trzyleciu. Średnia ilość wody, jaka spadła na obszar Łodzi, wyniosła 503,4 mm. Zróżnicowanie opadów było nieco mniejsze niż w 2011 roku, lecz większe niż w roku 2010. Najwięcej wody spadło na północ od centrum oraz we wschodniej (najwyżej położonej) części miasta, zaś najmniej – w północno-zachodnich i południowo-zachodnich dzielnicach, które z kolei są położone na stosunkowo niskim i płaskim terenie. Dominujący wpływ na rozkład opadów miały więc najprawdopodobniej czynniki orograficzne i zanieczyszczenie powietrza.

7. Maksymalne dobowe natężenie opadów atmosferycznych może na obszarze Łodzi przekraczać 1,9 mm/h, zaś maksymalne godzinowe natężenie, jakie zanotowano w badanym trzyleciu, było większe niż 30 mm/h.

8. Liczba dni z opadem na obszarze Łodzi zmienia się od 135 w dzielnicach peryferyjnych do ponad 155 dni po zawietrznej stronie centrum, gdzie wpływ zanieczyszczenia powietrza, miejskiej wyspy ciepła i podwyższonej „szorstkości" terenu na opady atmosferyczne jest najsilniejszy. Opady rzadziej występują nad większymi obszarami leśnymi (na północy miasta) i terenami z przewagą zabudowy jednorodzinnej (w dzielnicach zachodnich i południowo-wschodnich).

Przeprowadzenie analizy przestrzennej zmienności opadów atmosferycznych w Łodzi było możliwe dzięki bardzo gęstej sieci pomiarowej, która nadal jest rozbudowywana. Dane pozyskiwano w bardzo wysokiej rozdzielczości czasowej. Pomimo tego ich opracowanie było zadaniem trudnym, wymagającym wieloetapowych przygotowań i procedur weryfikacyjnych. Ciągi pomiarowe były niekompletne lub obciążone błędami różnego rodzaju. Chociaż wiele z nich udało się znaleźć i poprawić, część z pewnością nie została wykryta i w rezultacie zaburzyła ostateczny obraz rozkładu opadów atmosferycznych. Należy zatem mieć świadomość niedoskonałości danych pozyskiwanych w sposób automatyczny.

8. Literatura

Bac, S., Rojek, M., 1981. Meteorologia i klimatologia. Warszawa, 1–250.

Boryczka, J., 1977. Empiryczne równania klimatu Polski. Rozprawy UW 86. Wydawnictwo UW, Warszawa, 1–287.

Budzyński, I., 2013. Powierzchnia i ludność w przekroju terytorialnym w 2013 roku. GUS, Warszawa, 1–177.

Crawshaw, J.A., Beggs, P.J., 2004. Impacts of urbanisation on rainfall in Sydney, Australia. Macquarie University, Sydney, 217–224.

Domański, Cz., 1990. Testy statystyczne. Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa, 1–336.

Fortuniak, K., 2003. Miejska wyspa ciepła. Podstawy energetyczne, studia eksperymentalne, modele numeryczne i statystyczne. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź, 1–233.

Garnier, B.J., 1996. Podstawy klimatologii. Warszawa, 1–210.

Gaston, K., 2010. Urban Ecology. Ecological Reviews. Cambridge University Press, Cambridge, 1–327.

Huff, F.A., Changnon, S.A., 1973. Precipitation modification by major urban areas. Bulletin of the American Meteorological Society 54, 1220–1232.

Kaczorowska, Z., 1962. Opady w Polsce w przebiegu wieloletnim. Prace Geograficzne PAN 33. Warszawa, 1–112.

Kondracki, J., 2009. Geografia regionalna Polski. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1–440.

Kossowska-Cezak, U., Bajkiewicz-Grabowska, E., 2008. Podstawy hydrometeorologii. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1–252.

Kożuchowski, K., 2011. Klimat Polski: nowe spojrzenie. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1–292.

Krzemińska, M., 2013. Powietrze, [w:] Raport o stanie środowiska w województwie łódzkim w 2012 roku. Oficyna Wydawniczo-Reklamowa „Sagalara", Łódź, 89–149.

Kupczyk, E., 1997. Opad na powierzchni ziemi, [w:] Soczyńska U. (red.), Hydrologia dynamiczna. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1–409.

Marcinkowski, M., 2014. Przestrzenne zróżnicowanie opadów atmosferycznych na obszarze Łodzi. Praca magisterska napisana w KHiGW UŁ pod kier. dra A. Bartnika (maszynopis).

Ozga-Zielińska, M., Brzeziński, J., 1997. Hydrologia stosowana. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1–323.

Podstawczyńska, A., 2007. Okresy suche i wilgotne w Łodzi w XX wieku. Acta Universitatis Lodziensis, Folia Geographica Physica 8, UŁ, Łódź, 9–25.

Tamulewicz, J., 1993. Struktura pola opadów atmosferycznych w Polsce w okresie 1951–1980. UAM, Poznań, 1–181.

Turkowska, K., 2006. Geomorfologia regionu łódzkiego. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź, 1–237.

Urbański, J., 2010. GIS w badaniach przyrodniczych. Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk, 1–25.

Wibig, J., 1998. Precipitation in Łódź in the period 1931–1995. Acta Universitatis Lodziensis, Folia Geographica Physica, Łódź, 433–442.

Woś, A., 2010. Klimat Polski w drugiej połowie XX wieku. Wydawnictwo Naukowe UAM, Poznań, 1–489.

Zawilski, M., 2011. Wstępne rezultaty monitoringu przestrzennego rozkładu opadów w Łodzi w 2010 roku, [w:] Łomotowski J. (red.), Wody opadowe a zjawiska ekstremalne. Wydawnictwo Seidel-Przywecki Sp. z o.o., Lublin, 31–40.

Zawilski, M., Brzezińska, A., 2014. Areal rainfall intensity distribution over an urban area and its effect on a combined sewerage system. Urban Water Journal 11(7), 532–542. DOI: 10.1080/1573062X.2013.831909.

Źródła internetowe

„A-STER" Zakład Elektroniki i Automatyki Przemysłowej, https://a-ster.pl/category/oferta/meteorologia/deszczomierze/ (dostęp: 29.10.2014).

Pogodynka, serwis pogodowy IMGW-PIB, deszczomierz, http://www.pogodynka.pl/dlaciebie/encyklopedia/4d/deszczomierz (dostęp: 29.10.2014).

TwojaPogoda.pl; http://www.twojapogoda.pl/wiadomosci/109524,najbardziej-skazone-miasta-w-polsce (dostęp: 29.10.2014).

Urząd Statystyczny w Łodzi; lodz.stat.gov.pl (dostęp: 29.10.2014).