

Ocena możliwości zastosowania danych opadowych z prywatnych stacji meteorologicznych dla wybranych epizodów deszczowych na terenie Wrocławia

Assessment of the possibility of using rainfall data from private meteorological stations for selected rain episodes in Wrocław

MONIKA NOWAKOWSKA, MACIEJ BELCIK, MAGDALENA JAWOR, MARCIN WADOWIKOWSKI

DOI 10.36119/15.2024.11.4

W artykule oceniono możliwość wykorzystania danych opadowych z prywatnych stacji meteorologicznych (PWS) do monitorowania wybranych epizodów deszczowych na terenie Wrocławia. PWS zyskują na popularności dzięki łatwej dostępności i niskim kosztom zakupu, umożliwiając monitorowanie parametrów atmosferycznych takich jak temperatura, wilgotność, ciśnienie, opady deszczu oraz prędkość i kierunek wiatru. Badania obejmowały analizę danych z 32 PWS zlokalizowanych we Wrocławiu i okolicach, które następnie porównano z danymi z profesjonalnych stacji meteorologicznych IMGW oraz sieci MPWiK we Wrocławiu. Wyniki badań wykazały, że dane z PWS mogą być użyteczne w monitorowaniu intensywnych opadów, które mogą prowadzić do lokalnych podtopień, pod warunkiem prawidłowego umiejscowienia stacji oraz weryfikacji danych. Największym wyzwaniem związanym z PWS jest ryzyko nieprawidłowego umiejscowienia, co może wpływać na dokładność pomiarów. Dlatego konieczna jest systematyczna weryfikacja i interpretacja zebranych danych, aby mogły one być wykorzystane w praktycznych zastosowaniach, takich jak hydrologia miejska.

Słowa kluczowe: Prywatne Stacje Meteorologiczne, intensywne opady, Średnia Ważona Odległością, kriging, hydrologia miejska

The article evaluates the feasibility of using rainfall data from Personal Weather Stations (PWS) to monitor selected rain episodes in Wrocław. PWS are gaining popularity due to their easy accessibility and low cost, enabling the monitoring of atmospheric parameters such as temperature, humidity, pressure, rainfall, and wind speed and direction. The study involved the analysis of data from 32 PWS located in Wrocław and its surroundings, which were then compared with data from professional meteorological stations of IMGW-PIB and the MPWiK network in Wrocław. The results showed that PWS data can be useful in monitoring heavy rainfall, which may lead to local flooding, provided the stations are properly placed and the data are verified. The greatest challenge associated with PWS is the risk of incorrect placement, which can affect measurement accuracy. Therefore, systematic verification and interpretation of the collected data are necessary for their use in practical applications, such as urban hydrology.

Keywords: Personal Weather Station, heavy rainfall, Inverse Distance Weight, kriging, urban hydrology

Wstęp

Analizy meteorologiczne, w tym wysokości opadów i temperatury powietrza pełnią coraz istotniejszą rolę w inżynierii środowiska, a w szczególności w modelowaniu odwodnienia systemów miejskich [15], zagospodarowania wód opadowych [9], czy bezpiecznego wymiarowania systemów wodno-kanalizacyjnych [12].

W ostatnim czasie coraz bardziej popularne stają się Prywatne Stacje Pogodowe (Personal Weather Station – PWS). PWS to urządzenia, które są wykorzystywane przez prywatne osoby do dokonywania pomiarów meteorologicznych. Są one użytkowane na całym świecie. Urządzenia takie są łatwo dostępne, relatywnie tanie w zakupie i przez to popularne. PWS, w zależności od modelu urządzenia, pozwalają na monito-

rowanie stanu atmosfery w zakresie m.in.: temperatury powietrza, wilgotności względnej, ciśnienia atmosferycznego, opadów, prędkości i kierunku wiatru. Urządzenia pomiarowe mogą być wyposażone w dodatkowe czujniki zwiększające ilość mierzonych parametrów atmosfery.

Zbierane w ten sposób dane pomiarowe służą nie tylko bieżącemu monitorowaniu warunków meteorologicznych

dr inż. Monika Nowakowska: <https://orcid.org/0000-0002-6406-4447>; monika.nowakowska@pwr.edu.pl,

dr inż. Maciej Belcik: <https://orcid.org/0000-0001-7652-6031>; maciej.belcik@pwr.edu.pl,

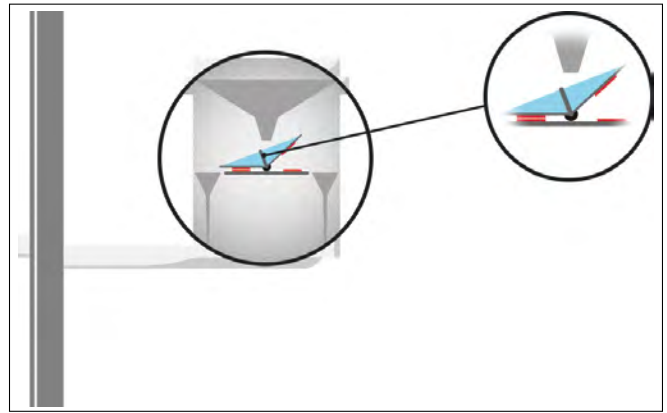
dr inż. Magdalena Jawor: <https://orcid.org/0009-0005-1065-6315>; magdalena.jawor@pwr.edu.pl,

dr inż. Marcin Wdowikowski: <https://orcid.org/0000-0003-2693-0946> – Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Wrocławska, Wrocław.

Adres do korespondencji/ Corresponding author: marcin.wdowikowski@pwr.edu.pl

w najbliższym otoczeniu, ale także w prosty sposób mogą być udostępniane innym osobom. W tym celu powstało wiele portali internetowych udostępniających dane pochodzące z PWS, wśród których wymienić można między innymi: Weather Underground, Weathercloud, PWS Weather, AWEKAS, and CWOP. Portale te zbierają dane oraz pozwalają na dostęp do wizualizacji w postaci tabel i wykresów w czasie rzeczywistym bądź w różnych odstępach czasu (zazwyczaj 5-minutowych). Liczba PWS jest różna w zależności od obszaru, ale ich ilość na całym świecie systematycznie rośnie, a sieć pomiarowa ulega coraz większemu zagęszczeniu. Najpopularniejszym portalem zrzeszającym pasjonatów jest platforma Weather Underground, która "obsługuje" ponad 250 tys. PWS na obszarze całego świata, np. na terenie Wielkiej Brytanii znajduje się przeszło 1700 urządzeń pomiarowych [1]. Według danych na rok 2020, w samym serwisie Weather Underground, aktywnych było 1054 punktów pomiarowych zlokalizowanych na terenie Polski [2]. Na analizowanym obszarze (miasto Wrocław i najbliższa okolica) znajdują się 32 stacje PWS [23], badające stan atmosfery w zakresie przedstawionych wyżej elementów meteorologicznych. Pomiar opadu w tego typu urządzeniach wykonywany jest poprzez samo opróżnianie się mechanizm korytkowo wywrótkowy, powszechnie stosowany w stacjach meteorologicznych na całym świecie. Standaryzowana powierzchnia wlotu do deszczomierza zapewnia minimalną rozdzielczość pomiaru opadów deszczu na poziomie 0,25 mm wysokości opadu. Wartość ta stanowi jednostkę pomiarową zliczaną w czasie pojedynczego opróżnienia korytka deszczomierza umożliwiając tym samym uzyskanie informacji o natężeniu opadów deszczu (Rys. 1). Największą wadą PWS w odniesieniu do pomiarów standaryzowanych jest możliwość nieprawidłowego umiejscowienia urządzenia. Pod względem prawidłowości pomiaru opadów, stacja taka nie powinna być umiejscowiona w pobliżu wysokich obiektów czy drzew, mogących stanowić przeszkody / ograniczenia pomiarowe. Zgodnie z instrukcją użytkowników portalu (wunderground.com) miejsce montażu stacji powinno być oddalone co najmniej o 1,5 m od najbliższej przeszkody której wysokość nie przekracza 3 m wysokości lub odpowiednio dalej przy obiektach o większej wysokości. Mimo opracowanych szczegółowych wytycznych, rzeczywista lokalizacja i sposób montażu PWS nie jest monitorowany

Rys. 1. Schemat działania deszczomierza w stacji PWS [23]
Fig. 1. Operational diagram of the rain gauge at the PWS station [23]



przez portale, co sprawia, że konieczna staje się weryfikacja i interpretacja prawdziwości danych prezentowanych przez poszczególne stacje pomiarowe. Instrukcja dla stacji meteorologicznych państwowej służby meteorologicznej w Polsce pełnioną przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy (IMGW-PIB) zakłada minimalne warunki lokalizacji deszczomierza jako odległość dwukrotności wysokości najwyższej przeszkody [12].

W ujęciu ogólnym w strukturze czasowo-przestrzennej opadów atmosferycznych występujących w Polsce wyróżnia się 3 typy genetyczne [16, 20]:

- opady konwekcyjne – krótkotrwałe (do ok. 2 godzin) o małym zasięgu terytorialnym,
- opady frontalne – wielogodzinne (najczęściej od 2 do 13 godzin) o dużym zasięgu,
- opady niżowe – długotrwałe (najczęściej ponad 13 godzin) o regionalnym zasięgu.

Obserwowanym efektem zmian klimatu jest zjawisko wzrostu temperatury powietrza w mieście w stosunku do terenów otaczających – miejska wyspa ciepła (MWC) [3]. MWC jest wynikiem uwalniania się ciepła – m.in. z procesów przemysłowych i komunalnych w zurbanizowanym środowisku, które wywołują szereg zmian lokalnych warunków meteorologicznych, tj. wilgotność powietrza, ciśnienie atmosferyczne oraz prędkość i kierunek wiatru. Intensywność oddziaływania MWC wzrasta liniowo wraz ze wzrostem wielkości miasta, od wartości niewiele przekraczających 1,0°C – w małych miastach do 2,5°C – w dużych miastach. Jednakże, w ekstremalnych warunkach termicznych, gdy temperatura osiąga wartości ponad 35°C, w miastach o liczbie mieszkańców około 600 000, intensywność MWC sięgać może nawet 7°C. We Wrocławiu, biorąc pod uwagę jego wielkość, strukturę i uprzemysłowienie, MWC [4, 17-19] jest zjawiskiem częstym i potęguje przestrzenne zróżnicowanie

warunków klimatycznych i bioklimatycznych. Zjawisko MWC nasila się zwłaszcza nocą podczas bezchmurnej i bezwietrznej pogody i wyraża się wzrostem temperatury, postępującym w kierunku centralnych części miast. Pole temperatury w takich przypadkach przyjmuje na ogół kształt koncentryczny, zaburzony przez lokalne obniżenia i podwyższenia temperatury, związane z rodzajem pokrycia i użytkowania terenu [4].

Obszar badań

Lokalizacja

Oceny możliwości wykorzystania prywatnych stacji meteorologicznych dokonano dla obszaru miasta Wrocław znajdującego się w Polsce w centralno-wschodniej części Europy. Wrocław leży u podnóża Sudetów, w samym centrum bardzo rozległej Niziny Śląskiej. Przez miasto przepływa siedem rzek, z których największą jest Odra. Wrocław jest miastem bardzo rozległym, w kierunku północ-południe odległość między końcowymi punktami wynosi 19,4 kilometra (współrzędne geograficzne od 51.042N do 51.212N), a od zachodu na wschód jest to 26,3 kilometra (współrzędne geograficzne od 16.807 do 17,176E). Wrocław zaliczany jest do miast nizinnych, Najwyżej położony punkt na terenie miasta ma 155 m npm, a najniżej 105 metrów. Miasto Wrocław jest także stolicą regionu dolnośląskiego, zamieszkałym przez 674 tys. mieszkańców, o powierzchni 293 km² [6]. Klimat Wrocławia zaliczany jest do umiarkowanych z przewagą wpływów oceanicznych. Średnioroczny opad z wielolecia 1991–2020 dla miasta wynosi 541 mm, a średnioroczna temperatura to 9,7 st. C [13]

Punkty pomiarowe

Zjawiska opadowe rejestrowane są na terenie Wrocławia przez deszczomierze zlokalizowane na stacjach pomiarowych znajdujących się na terenie całego miasta. Wśród punktów pomiarowych

znajduje się jedna stacja meteorologiczna, Wrocław-Strachowice, należąca do IMGW-PIB, czyli instytucji odpowiedzialnej w Polsce za prowadzenie pomiarów i obserwacji meteorologicznych. Ponadto na obszarze miasta zlokalizowanych zostało 11 stacji pomiarowych należących do Miejskiego Przedsiębiorstwa Wodociągów i Kanalizacji we Wrocławiu (MPWiK Wrocław) – spółki odpowiedzialnej między innymi za budowę i utrzy-

Tabela 1. Stacje IMGW-PIB i MPWiK na obszarze badań

Table 1. IMGW-PIB and MPWiK stations in the research area

ID stacji	Nazwa ulicy
IMGW-PIB	Wrocław-Strachowice
D01	Bogusławskiego
D02	Bystrzycka
D03	Dobra
D04	Gitarowa
D05	Na Grobli
D06	Jagniątkowska
D07	Milicka
D08	Powstańców Śl.
D09	Ślázowa
D10	Terenowa
D11	Wędkarzy

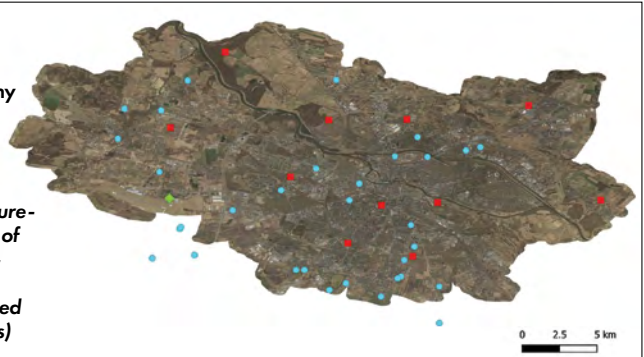
Tabela 2. Stacje PWS na obszarze badań

Table 2. PWS stations in the research area

Numer stacji	ID stacji	Miejscowość	Nazwa ulicy	Latitude	Longitude
1	ISMOLE18	Smolec	Cynamonowa	51.069N	16.890E
2	IWROCAW52	Wrocław	Kącka	51.141N	16.869E
3	IWROCA52	Wrocław	Osiniecka	51.121N	16.894E
4	IWROCAW66	Wrocław	Piekarska	51.176N	16.911E
5	IWROCA67	Wrocław	Postępowa / Rakielowa	51.098N	16.938E
6	IMOKRO3	Makronos Górny	Spacerowa	51.071N	16.915E
7	IWROCA96	Wrocław	M. Wolfkego	51.159N	16.873E
8	IWYSOK6	Wysoka	Jaworowa	51.050N	16.996E
9	IWROCA81	Wrocław	Irlandzka / Klecińska	51.110N	16.967E
10	IWROCA74	Wrocław	Hubska	51.089N	17.045E
11	IDOLNYU03	Smolec	Czereśniowa 1	51.087N	16.906E
12	ISMOLE6	Smolec	Czereśniowa 9	51.088N	16.907E
13	IWROCAW54	Wrocław	Szałwiowa 15	51.176N	17.000E
14	IWROCAW62	Wrocław	Jaskółcza 27	51.136N	17.087E
15	IWROCA84	Wrocław	Giżycka 72a	51.134N	17.078E
16	IWROCA82	Wrocław	Jedności Narodowej 238	51.130N	17.055E
17	IWROCA47	Wrocław	A. Oppmana 3	51.142N	17.049E
18	IWROCA73	Wrocław	wyb. J. Conrada-Korzeniowskiego 6	51.130N	17.035E
19	IWROCA37	Wrocław	A. Vivaldiego 44	51.052N	17.062E
20	IWYSOK4	Wysoka	Trzmielowa 8	51.054N	17.006E
21	IWROCA64	Wrocław	Marcepanowa 2 / Czekoladowa	51.062N	16.976E
22	IWROCA46	Wrocław	Cukrowa 18	51.062N	16.981E
23	IDOLNOU016	Wrocław	Brylantowa 51	51.046N	17.027E
24	IDSOLTAS9	Wrocław	Oboźna	51.058N	17.039E
25	IWROCA100	Wrocław	Oboźna	51.057N	17.037E
26	IERNIK1	Żerniki Wrocławskie	Miodowa 2	51.030N	17.062E
27	IWROCA35	Wrocław	Granitowa 7 / Pawia	51.068N	17.041E
28	IWROCA27	Wrocław	Pieszycza 15	51.076N	17.047E
29	IWROCA93	Wrocław	Wysoka 78 (Tęczowa)	51.104N	17.008E
30	IWROCA50	Wrocław	Inowrocławska	51.114N	17.014E
31	IWROCA34	Wrocław	Małopanewska / Legnicka Shell	51.123N	16.988E
32	IWROCA76	Wrocław	Ananasowa / Cytrynowa	51.158N	16.895E

Rys. 2.
Lokalizacja punktów pomiarowych na mapie Wrocławia (punkt zielony stacja IMGW-PIB, punkty niebieskie stacje PWS, punkty czerwone stacje MPWiK)

Fig. 2. Location of measurement points on the map of Wrocław (green point – IMGW-PIB station, blue points – PWS stations, red points – MPWiK stations)



manie sieci kanalizacji deszczowej na terenie gminy. Wysokość opadu na stacjach dokonuje się za pomocą deszczomierzy wagowych z automatycznym rejestrem pomiaru. Wykaz stacji IMGW-PIB oraz MPWiK przedstawiono w tabeli 1. Na terenie miasta i w jego najbliższej okolicy znajdują się także 32 indywidualne stacje meteorologiczne, które zarejestrowane są na portalu Weather Underground. Wykaz stacji PWS na obszarze badań przedstawiono w tabeli 2. Lokalizację wszystkich punktów pomiarowych na terenie miasta i najbliższych obrzeżach przedstawiono na rysunku 2.

Epizody pomiarowe

Badania objęły opady występujące w latach 2020–2022. Selekcji epizodów opadowych dokonano na podstawie własnych obserwacji oraz informacji pochodzących z doniesień prasowych, które obejmowały występowanie intensywnych opadów deszczu skutkujących miejscowymi podtopieniami i wylaniami wód z systemu kanalizacji deszczowej na terenie miasta. Istotnym elementem selekcji była również dostępność danych pomiarowych ze wszystkich analizowanych źródeł. Ostatecznie wytypowano trzy epizody pomiarowe:

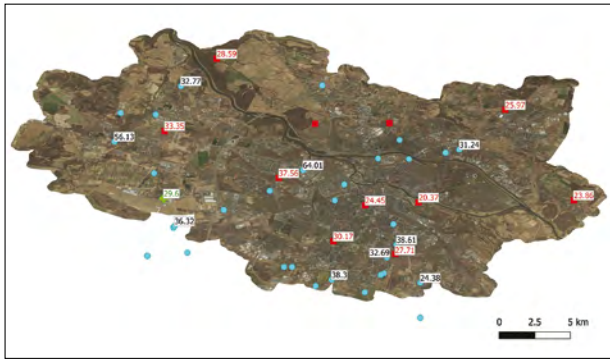
- 14 października 2020 r., 13-godzinny opad trwający od 00:00 do 13:00 typu niżowego;
- 8–9 lipca 2021 r., 17-godzinny opad trwający od 21:00 dnia 8 lipca do 14:00 dnia 9 lipca typu niżowego;
- 30–31 lipca 2022 r., 22-godzinny opad trwający od 11:00 dnia 30 lipca do 9:00 dnia 31 lipca typu niżowego.

Dane pomiarowe obejmują sumaryczne wysokości opadu w każdym z analizowanych epizodów dla poszczególnych punktów pomiarowych. W przypadku stacji PWS dane obejmują wyłącznie stacje, które w trakcie trwania epizodu pomiarowego były zarejestrowane w portalu Weather Underground. W związku ze zwiększającą się popularnością amatorskich pomiarów meteorologicznych, liczba punktów pomiarowych na terenie miasta zwiększa się wraz z upływem czasu. Dla epizodu z roku 2020 dane obejmują 9 stacji PWS, podczas gdy dla epizodu z roku 2022 już aż 25 stacji. Dla epizodów z roku 2020 i 2021 wykorzystano dane opadowe pochodzące z MPWiK we

Tabela 3. Ilość danych pozyskanych dla poszczególnych epizodów opadowych

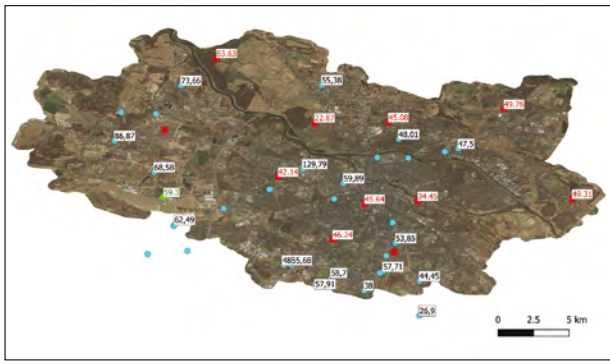
Table 3. Amount of data obtained for individual rainfall episodes

Epizod pomiarowy	IMGW-PIB	MPWiK	PWS
14.10.2020	1	9	9
8-9.07.2021	1	9	19
30-31.07.2022	1	0	25



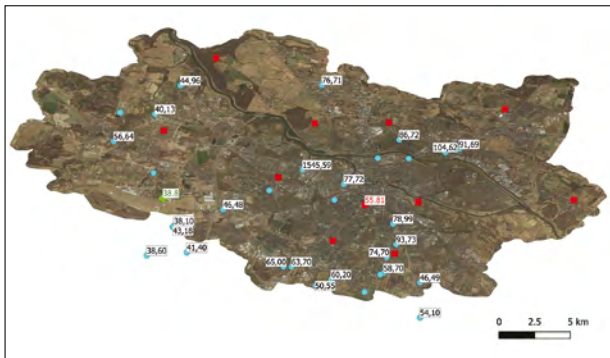
Rys. 3. Lokalizacja stacji pomiarowych we Wrocławiu dla epizodu 14.10.2020 (punkt zielony stacja IMGW-PIB, punkty niebieskie stacje PWS, punkty czerwone stacje MPWiK)

Fig. 3. Location of measurement stations in Wrocław for the episode of October 14, 2020 (green point – IMGW-PIB station, blue points – PWS stations, red points – MPWiK stations)



Rys. 4. Lokalizacja stacji pomiarowych we Wrocławiu dla epizodu 8–9.07.2021 (punkt zielony stacja IMGW-PIB, punkty niebieskie stacje PWS, punkty czerwone stacje MPWiK)

Fig. 4. Location of measurement stations in Wrocław for the episode from 8 to 9 July 2020 (green point – IMGW-PIB station, blue points – PWS stations, red points – MPWiK stations)



Rys. 5. Lokalizacja stacji pomiarowych we Wrocławiu dla epizodu 30–31.07.2022 (punkt zielony stacja IMGW-PIB, punkty niebieskie stacje PWS, punkty czerwone stacje MPWiK)

Fig. 5. Location of measurement stations in Wrocław for the episode from 30 to 31 July 2022 (green point – IMGW-PIB station, blue points – PWS stations, red points – MPWiK stations)

Wrocławiu za zgodą przedsiębiorstwa. Informacje o ilości danych pozyskanych dla poszczególnych epizodów pomiarowych przedstawiono w tabeli 3, natomiast na rysunkach 3–5 przedstawiono wartości sum opadowych dla poszczególnych stacji.

Metody badań

Symulacja przestrzenna

Wizualizację przestrzenną danych opadowych wykonano z wykorzystaniem programu SURFER w wersji 13 [5], modułu interpolacji krigging. Wiarygodność i miarodajność zastosowanej metody, nawet przy wykorzystaniu niewielkiej liczby punktów pomiarowych, potwierdzono w badaniach wykonanych przez Nowakowską i in. [11].

Dla epizodów z lat 2020 i 2021 symulacji dokonano na podstawie stacji referencyjnych – IMGW-PIB i MPWiK, w celu odczytania wartości dla stacji PWS. Dla epizodu z roku 2022, symulacji dokonano

dla danych ze stacji PWS, w celu odczytania wartości dla pozostałych punktów pomiarowych. Do analizy przestrzennej zastosowano metodę krygingu [10], która pozwala stworzyć mapę na podstawie nieregularnie rozłożonych punktów danych wejściowych XYZ oraz ich charakteru. Utworzenie dowolnej mapy wymaga istnienia regularnej siatki wartości dla prezentowanej powierzchni. Proces przetworzenia nieregularnie położonych punktów XYZ w regularną siatkę wartości nazywany jest gridingiem. Jest to proces interpolacji wartości funkcji w węzłach regularnej siatki XY na podstawie wartości funkcji w wejściowych punktach XYZ. Zastosowanie metody odwrotnych odległości do potęgi (Inverse Distance to a Power – IDP) pozwala na ważoną interpolację uśredniającą dla wartości intensywności opadów – nie wymaga dużej liczby punktów pomiarowych, przypisywana jest waga. Waga ta jest odwrotnie proporcjonalna do odległości pomiędzy punktami pomiaro-

wymi. Metoda bywa też nazywana metodą wagową [10]. Wykładnik potęgi (β) może przyjmować wartości 1, 2 lub 3. Dla algorytmu IDP, wartości analizowanej zmiennej w dowolnym węźle siatki j , czyli Z_j są obliczane z zależności:

$$Z_j = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{z_i}{d_{ij}^\beta}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_{ij}^\beta}}$$

gdzie:

- z_i – wartość zmiennej w kolejnym punkcie pomiarowym i ,
- d_{ij} – odległość węzła j od punktu i ,
- β – dobierany wykładnik potęgowy, przyjęto: $\beta = 2$ [11].

Najczęściej do analiz opadów stosowano $\beta = 2$ [11]. Warto zauważyć, że metoda ta może tylko interpolować wartości, a nie je ekstrapolować. Nigdy bowiem wartości interpolowane nie będą większe od największej wartości spośród zmierzonych, ani nie będą mniejsze od wartości najmniejszej. Różne mogą być kryteria wyboru posterunków pomiarowych wykorzystywanych do obliczeń. Dla dużych obszarów zlewni, z gęstą siecią pomiarową, ogranicza się liczbę posterunków poprzez zdefiniowanie maksymalnego zasięgu oddziaływania lub maksymalnej liczby posterunków. Według badań Zawilskiego [24], brak pomiaru dla jednego stanowiska w bardzo małym stopniu zmienia wartości interpolowane (metodą IDP) w węzłach siatki, nie położonych w jego bezpośrednim otoczeniu. W metodzie krigging, najpowszechniej stosowanej w procedurach interpolacyjnych, program pozwala dobrać indywidualne parametry wariogramu przystosowujące go do struktury i charakteru danych włącznie z uwzględnieniem zjawiska anizotropii opartych na metodach geostatystyki. Pozwala na tworzenie złożonych prezentacji map nakładanych – wymagana jest duża liczba punktów pomiarowych.

Porównanie wskazań stacji pomiarowych

W celu weryfikacji poprawności danych pochodzących ze stacji PWS oraz porównania wyników symulacji z danymi pomiarowymi, wyznaczono odchylenia pomiędzy wartościami wyrażone względną różnicą procentową. Różnice wyrażone w procentach obliczono za pomocą poniższej zależności [7, 8]:

$$\Delta P = \frac{P_{sym} - P_{rz}}{P_{rz}} \cdot 100[\%]$$

gdzie:

ΔP – względna różnica procentowa wartości symulowanej od rzeczywistej, %

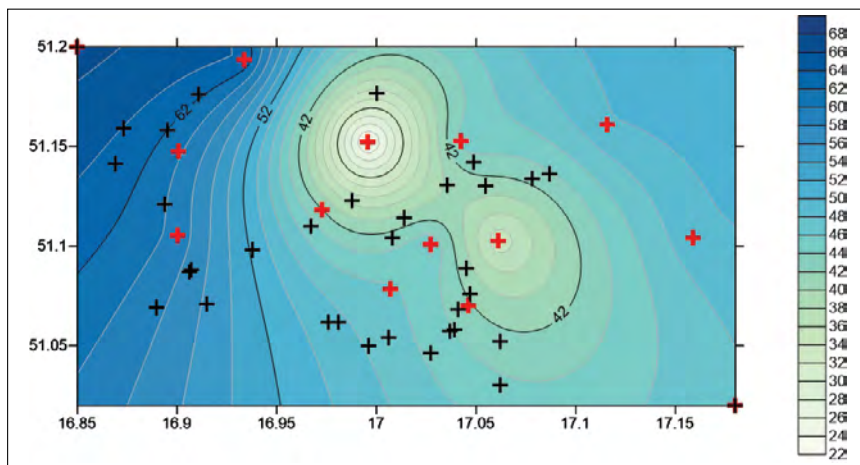
P_{sym} – wysokość opadu symulowanego przy pomocy metody krigingu, mm

P_{rz} – wysokość opadu rzeczywistego zarejestrowanego przez deszczomierz, mm

Na podstawie obliczonej różnicy zweryfikowano poprawność opadów dla stacji PWS. Przyjęto, że wartość odchylenia nieprzekraczająca 30% pozwala na uznanie wysokości opadu podawanego przez deszczomierz PWS za prawidłową. Założenia tego dokonano na podstawie doniesień literaturowych, mówiących o tym, że różnice wysokości opadu pomiędzy różnego typu stacjami oraz metodami odczytu (manualna, automatyczna) sięgają mogą właśnie 30% [7, 21, 22].

Wyniki analizy i dyskusja

Na podstawie danych ze stacji referencyjnych (IMGW-PIB i MPWiK) wykonano symulacje krigingowe dla epizodów pomiarowych z roku 2020 i 2021. Symulację wykonano dla obszaru całego miasta Wrocław w zakresie współrzędnych od 51.020 N do 51.200 N oraz od 16.850 E do 17.180 E. Wyniki symulacji przedstawiono na rysunkach 6 i 7. Na podstawie symulacji określono sumaryczne wysokości opadu dla obszaru aglomeracji wrocławskiej. Symulacja przeprowadzona dla epizodu opadowego z dnia 14.10.2020 wykazała, że najwyższe sumaryczne wartości opadu, sięgające 38 mm uzyskano dla środkowo-zachodniej części miasta w zakresie współrzędnych geograficznych od 51.080



Rys. 7. Symulacja czasowo-przestrzenna opadu z dnia 8-9.07.2021 na podstawie stacji IMGW-PIB i MPWiK (punkty czarne to wyniki modelowania dla stacji PWS, punkty czerwone to dane wejściowe MPWiK, IMGW)
 Fig. 7. Temporal and spatial simulation of precipitation on July 8-9, 2021 based on the IMGW – PIB and MPWiK stations (black points are modeling results for the PWS station, red points are input data from MPWiK, IMGW)

N do 51.130 N oraz od 16.930 E do 16.980 E. Najniższy, nieznacznie przekraczający 20 mm, opad wystąpił w środkowo-wschodniej części miasta na obszarze pomiędzy rzędnymi 51.080 N–51.130 N i 17.040 E-17.110 E.

Symulacja wykonana dla epizodu opadowego z dnia 8–9.07.2021 wykazała, że najniższe wartości opadu wystąpiły w centrum miasta – poniżej 42 mm podczas gdy na jego obrzeżach były znacząco wyższe sięgające nawet 66 mm w północno-zachodniej części aglomeracji. Ponadto zauważono, że wraz z przejściem chmury opadowej, z zachodu na wschód, sumaryczne wartości opadu uległy zmniejszeniu.

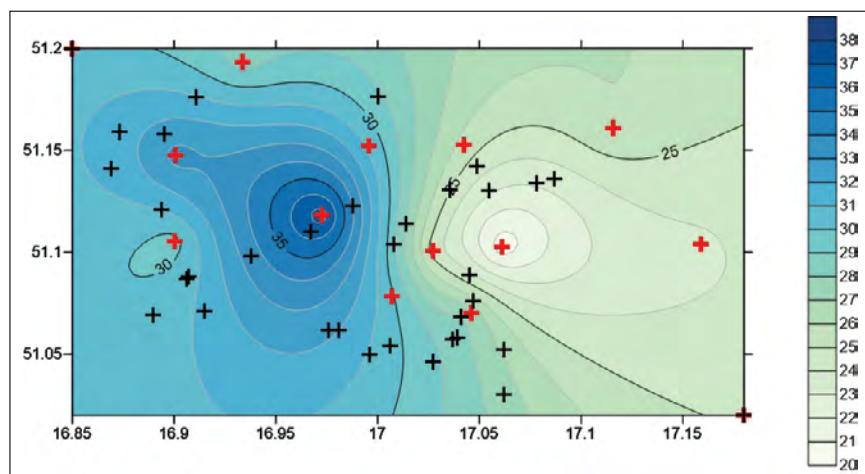
Na podstawie epizodów opadowych z dni: 14.10.2020 oraz 8–9.07.2021, ze

stacji referencyjnych (IMGW i MPWiK) wykonano symulacje sumarycznych wartości opadu atmosferycznego dla lokalizacji stacji PWS, a następnie porównano wartości odczytane z symulacji z wartościami rzeczywistymi zarejestrowanymi przez deszczomierze prywatnych stacji meteorologicznych. W celu sprawdzenia poprawności danych obliczono procentową odchyłkę symulacji od rzeczywistego wskazania stacji PWS. W tabelach 4 i 5 przedstawiono sumaryczne wartości opadu (dla symulacji i deszczomierza) oraz obliczoną odchyłkę.

Tabela 4: Odchylenia względne wysokości opadów z deszczomierza i symulacji dla epizodu z dnia 14.10.2020

Table 4. Relative deviations of rainfall from the rain gauge and simulation for the episode of October 14, 2020

Numer stacji	Wysokość opadu deszczomierz [mm]	Wysokość opadu symulacja [mm]	ΔP [mm]
2	56,13	31,4	-44%
4	32,77	31,2	-5%
12	36,32	30,8	-15%
14	31,24	23,5	-25%
19	24,38	27,0	11%
20	38,30	30,5	-20%
27	32,69	28,0	-14%
28	38,61	26,5	-31%
31	64,01	34,0	-47%



Rys. 6. Symulacja czasowo-przestrzenna opadu z dnia 14.10.2020 na podstawie stacji IMGW-PIB i MPWiK (punkty czarne to wyniki modelowania dla stacji PWS, punkty czerwone to dane wejściowe MPWiK, IMGW)
 Fig. 6. Temporal and spatial simulation of rainfall on October 14, 2020 based on the IMGW – PIB and MPWiK stations (black points are modeling results for the PWS station, red points are input data from MPWiK, IMGW)

Dla epizodu opadowego z dnia 14.10.2020 wykazano, że wartości otrzymane w symulacji są niższe od zarejestrowanych na stacjach, we wszystkich przypadkach poza stacją nr 19, gdzie wartość otrzymana podczas symulacji była wyższa od wartości odczytanej z deszczomierza i wyniosła 11%. Pozostałe odchyłki mieszczą się w zakresie od – 5% dla stacji nr 4

do – 47% dla stacji nr 31. Zgodnie z przedstawionym wcześniej założeniem, stwierdzono, że wartości odchyłki przekraczające $\pm 30\%$ sprawiają że wartości podawane przez stację stają się niewiarygodne. Wartości odchyłki przekraczające 30% uzyskano dla 3 stacji PWS o nr 2, 28 i 31.

Tabela 5. Odchylenia względne wysokości opadów z deszczomierza i symulacji dla epizodu z dnia 8-9.07.2021

Table 5. Relative deviations of rainfall from the rain gauge and simulation for the episode of July 8-9, 2021

Numer stacji	Wysokość opadu deszczomierz [mm]	Wysokość opadu symulacja [mm]	ΔP [mm]
2	86,87	63,5	-27%
3	68,58	57,2	-17%
4	73,66	62,4	-15%
8	57,91	47,9	-17%
13	55,38	35,7	-36%
14	47,50	44,0	-7%
17	48,01	43,0	-10%
19	44,45	42,8	-4%
20	58,70	47,0	-20%
21	48,00	48,8	2%
22	55,68	48,4	-13%
23	38,00	45,8	21%
24	57,71	44,0	-24%
26	26,90	44,4	65%
28	53,85	41,8	-22%
30	59,89	40,0	-33%
31	129,79	38,0	-71%

Dla epizodu opadowego w dn. 8-9.07.2021, podobnie jak dla wcześniejszego wykazano, że wartości otrzymane podczas symulacji były w przeważającej części niższe niż zarejestrowane na stacjach (14 na 17 stacji). Tylko dla 3 punktów pomiarowych wykazano wyższe wartości uzyskane podczas symulacji niż zarejestrowane na stacji – były to punkty nr 21 (odchyłka 2%), 23 (odchyłka 21%) oraz 26 (odchyłka 65%). Dla pozostałych punktów pomiarowych odchyłki wahały się od – 4% dla stacji nr 19 do – 71% dla stacji nr 31. Wartości odchyłki przekraczające $\pm 30\%$, świadczące o małej wiarygodności pomiaru uzyskano dla 4 stacji PWS o nr 13 (-36%), 26 (65%), 30 (-33%) oraz 31 (-71%), przy czym dla stacji 31 przekroczenie założonej odchyłki stwierdzono już drugi raz (w obu dokonanych symulacjach).

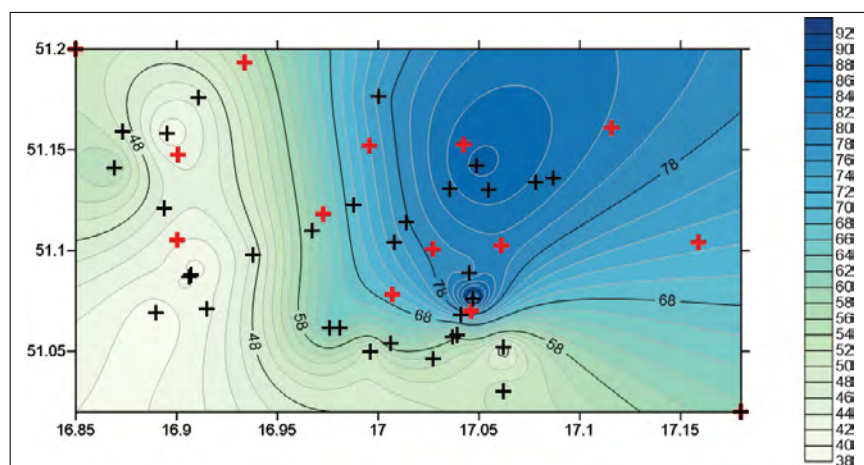
Na podstawie analizy odchyłek uzyskanych dla stacji PWS stwierdzono, że wartości uzyskiwane dla 6 stacji o nr 2, 13, 26, 28, 30 i 31 są mało wiarygodne.

Dla epizodu opadowego z dnia 30–31.07.2022 r przeprowadzono symulację potencjalnego pola opadowego na podstawie danych pozyskanych ze stacji PWS oraz modelu przestrzennego. Wykonano

dwie symulacje na podstawie danych dla wszystkich dostępnych stacji PWS (Rys. 8) oraz dla stacji PWS z wykluczeniem stacji uznanych za mało wiarygodne (odchyłka $>30\%$) (Rys. 9). Wyniki wykonanych symulacji przedstawiono na rysunkach 8 i 9.

mało wiarygodny. Najniższe sumaryczne wartości opadu atmosferycznego wykazano dla południowo-zachodniej części miasta z wartościami rzędu 38 mm.

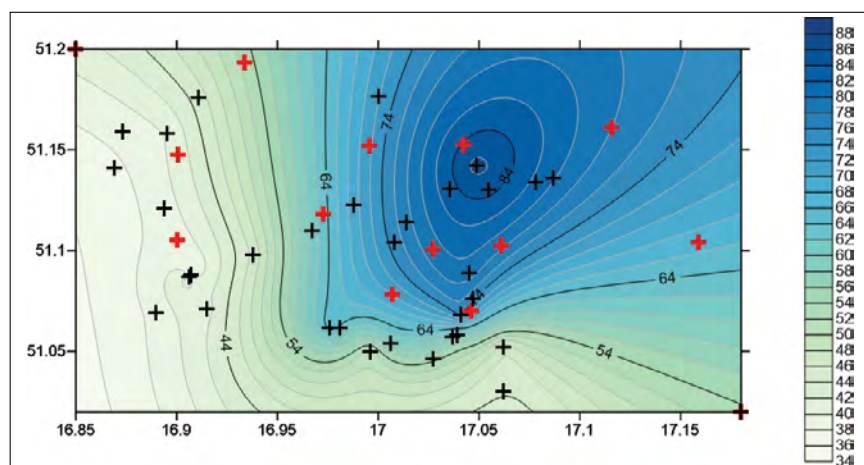
Symulacja przeprowadzona dla stacji PWS z pominięciem stacji uznanych we



Rys. 8.

Symulacja czasowo-przestrzenna wysokości opadu z dnia 30-31.07.2022 na podstawie wszystkich stacji PWS (punkty czarne to dane wejściowe dla stacji PWS, punkty czerwone to wyniki modelowania dla stacji MPWiK, IMGW)

Fig. 8. Temporal and spatial simulation of rainfall on July 30–31, 2022 based on all PWS stations (black points are input data from PWS station, red points are modeling results for the MPWiK, IMGW stations)



Rys. 9.

Symulacja czasowo-przestrzenna opadu z dnia 30-31.07.2022 na podstawie stacji PWS uznanych za wiarygodne (punkty czarne to dane wejściowe dla stacji PWS, punkty czerwone to wyniki modelowania dla stacji MPWiK, IMGW)

Fig. 9. Temporal and spatial simulation of precipitation on from 30 to 31 July 2022 based on PWS stations considered reliable (black points are input data from PWS station, red points are modeling results for the MPWiK, IMGW stations)

Symulacja czasowo-przestrzenna wykonana dla wszystkich stacji PWS wykazała najwyższe sumy opadów dla północno-wschodniej części aglomeracji, w zakresie współrzędnych 51.110 N-51.200 N oraz 17.030 E-17.100 E z wartościami sięgającymi 94 mm. Ponadto zauważono obszar o wartościach sumarycznej wysokości opadu sięgających 34-40 mm w południowo-wschodniej części miasta. Wartości te wynikają jednak z obecności punktu pomiarowego nr 28, który na podstawie poprzednich analiz, uznany został za

wcześniejszych analizach za niewiarygodne (Rys. 8) wykazała podobną strukturę przestrzenną. Najwyższe wartości sumarycznej wysokości opadu analogicznie jak w symulacji (Rys. 9) wykazano dla północno-wschodniej części aglomeracji dla współrzędnych w zakresie 51.110 N-51.200 N oraz 17.030 E-17.100 E z wartościami sięgającymi 86 mm. Najniższe wartości opadu uzyskano dla całej zachodniej części aglomeracji z wartościami 34-40 mm.

Na podstawie uzyskanych symulacji (Rys. 8 i 9) odczytano dane dla pozostałych

stacji pomiarowych – IMGW-PIB oraz MPWiK i zestawiono je w tabeli 6.

W ostatnim etapie badań dokonano sprawdzenia wartości uzyskanych metodą symulacji krigingowej z wartością rzeczywistą odczytaną na stacji referencyjnej

- Kriging jest metodą, której rezultaty można określić co najmniej jako dobre (jeśli chodzi o interpolację danych);
- Brak pojedynczych punktów w bardzo małym stopniu zmienia wartości interpolowane metodą krigingu;

Tabela 6. Sumaryczne wysokości opadu dla stacji IMGW-PIB i MPWiK podczas epizodu opadowego w dn. 30–31.07.2022

Table 6. Total rainfall amounts for the IMGW-PIB and MPWiK stations during the rainfall episode from 30 to 31 July 2022

ID stacji	Nazwa ulicy	Wysokość opadu wszystkie PWS [mm]	Wysokość opadu wiarygodne PWS [mm]
D01	Bogusławskiego	78,8	79,0
D02	Bystrzycka	63,0	63,0
D03	Dobra	81,8	78,0
D04	Gitarowa	72,4	66,8
D05	Na Grobli	81,2	78,4
D06	Jagniątkowska	43,0	41,0
D07	Milicka	85,0	84,3
D08	Powstańców Śląskich	69,8	70,2
D09	Ślázowa	74,0	71,8
D10	Terenowa	82,0	72,5
D11	Wędkarzy	54,2	52,4
IMGW-PIB	Wrocław-Strachowice	42,4	39,4

IMGW-PIB Wrocław-Strachowice, która wyniosła 38,8 mm. Obliczona odchyłka wykazała, że wartości uzyskane w wyniku symulacji były wyższe od zarejestrowanej na deszczomierzu odpowiednio o 9% w przypadku symulacji obejmującej wszystkie dostępne dane PWS (Rys. 8) oraz o 1,5% dla symulacji PWS z wiarygodnymi danymi. Uzyskane w obliczeniach odchyłki są niewielkie, a uzyskane wyniki są wiarygodne i spełniają, a nawet znacząco obniżają, przyjęty w założeniach warunek maksymalnej wartości odchyłki nieprzekraczającej 30% nawet dla symulacji uwzględniającej wszystkie dane pozyskane ze stacji PWS.

Podsumowanie

Powszechny dostęp do rozwijających się technologii informatycznych będzie powodował, że będzie powstawało coraz więcej prywatnych stacji meteorologicznych, również w Polsce. Aktualna dysproporcja pokrycia terenu w stacje pomiarowe pomiędzy instytucjami państwowymi, a użytkownikami prywatnymi powoduje, że PWS stają się istotnym źródłem informacji meteorologicznej. Badania przeprowadzone w niniejszej pracy dla Wrocławia wykazały, że pomiary opadów z PWS mogą być użyteczne, choć wymagają weryfikacji z powodu potencjalnie nieprawidłowego umiejscowienia stacji. Porównano pomiary z PWS z danymi z profesjonalnych stacji meteorologicznych, wskazując na ich potencjalne zastosowanie w monitorowaniu intensywnych opadów, które prowadzą do podtopień. Przeprowadzone analizy pozwoliły sformułować następujące wnioski:

- Ze względu na wrażliwość metody krigingu na efekty wygładzenia semiwariogramu empirycznego skrajne wartości mogą być niedoszacowane a niekiedy przeszacowane w całościowym ujęciu modelu, dlatego do ich wagi proponowane jest zastosowanie innej metody analizy;
- Duże zagęszczenie PWS (nawet po odrzuceniu nietypowych wartości wyników) pozwala na wiarygodne symulowanie wysokości opadu dla aglomeracji miejskiej miasta Wrocławia;
- Symulacje wysokości opadów uzyskane metodą krigingu pozwalają na uzupełnienie danych pomiarowych ze stacji, które nie rejestrują danych (np. z przyczyn technicznych);
- Analiza sum opadów z prywatnych stacji meteorologicznych (PWS) pozwala na wykorzystanie ich do weryfikacji modeli opadowych;
- Z uwagi na konieczność uwiarygodnienia danych pochodzących z PWS (lokalizacja stacji, kompletność) niezbędne jest opracowanie procedury statystycznej weryfikacji danych.

LITERATURA

- [1] Bell S., Cornford D., Bastin L., How Good Are Citizen Weather Stations? Addressing a Biased Opinion. *Weather* 2015, 70, 75–84.
- [2] Drożdżół R., Absalon D., Evaluation of Selected Amateur Rain Gauges with Hellmann Rain Gauge Measurements. *Climate*. (2023). 11(5). 10.3390/cli11050107.
- [3] Dubicki A., Dubicka M., Szymanowski M., Klimat Wrocławia. Informator 2002, <http://www.eko.org.pl/wroclaw/pdf/klimat.pdf>
- [4] Fortuniak K., Miejska wyspa ciepła. Podstawy energetyczne, studia eksperymentalne, modele numeryczne i statystyczne. Wyd. Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź 2003.

- [5] Galon Z., Surfer. Podręcznik użytkownika. Gambit Centrum Oprogramowania i Szkoleń Sp. z o.o., Kraków 2014
- [6] Główny Urząd Statystyczny, <https://stat.gov.pl/>
- [7] Kotowski A., Danciewicz A., Kaźmierczak B., The Accuracy of measurements of precipitation amount using standard and tipping bucket pluviographs in comparison to Hellmann rain gauges. *Environment Protection Engineering* 2011, vol. 37, no. 2, s. 23–34.
- [8] Licznar P., Dżugaj D., Niesobka M., Ekspertyza techniczna polegająca na weryfikacji poprawności działania deszczomierzy wchodzących w skład sieci monitoringu opadów atmosferycznych należących do MPWiK S.A. we Wrocławiu. Raport serii SPR nr 19, Wrocław 2013.
- [9] Ludwińska A., Dudkiewicz E., Efekty wynikające ze zwiększania pojemności zbiornika gromadzącego wodę deszczową na obszarze Polski o średniej wysokości opadów. *Instal* 4 (2024), s. 40–47.
- [10] Magnuszewska A., GIS w geografii fizycznej. Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa 1999.
- [11] Nowakowska M., Kaźmierczak B., Kotowski A., Metodyka analizy przestrzennej zmienności opadów na przykładzie Wrocławia. Interdyscyplinarne zagadnienia w inżynierii i ochronie środowiska T. 3 (red. T. M. Trzczeńska), Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2013, s. 465–472.
- [12] Rak J., Wartalska K., Kaźmierczak B., Ryzyko pogodowe w funkcjonowaniu przedsiębiorstw wodno-kanalizacyjnych w Polsce, *Instal* 1 (2021), s. 39–42.
- [13] Raport Klimatu Polski, IMGW – PIB, Warszawa, 2024.
- [14] Różdżyński K., Derek P., Górka A., Grzelak-Agiaciak E., Jurczak K., Kamińska M., Kieloch B., Lech H., Letachowicz J., Ragin G., Sępko W., Suhecki St., Trzebnia J., Woźniak Ł., 2014, Instrukcja dla stacji meteorologicznych, IMGW-PIB, Warszawa, 2015, s. 389.
- [15] Suchorab P., Iwanek M., Efektywność wybranej instalacji dualnej wykorzystującej wody deszczowe w warunkach rzeczywistych opadów, *Instal* 12 (2021), s. 40–45.
- [16] Suligowski R., Struktura czasowa i przestrzenna opadów atmosferycznych w Polsce. Próba regionalizacji. *Prace Instytutu Geografii Akademii Świętokrzyskiej*, nr 12, Kielce 2004.
- [17] Szymanowski M., Kryza M., Zastosowanie regresji ważonej geograficznie do interpolacji przestrzennej miejskiej wyspy ciepła we Wrocławiu. *Prace i Studia Geograficzne* 2011, vol. 47, s. 417–423.
- [18] Szymanowski M., Kryza M., Zastosowanie regresji ważonej geograficznie do modelowania miejskiej wyspy ciepła we Wrocławiu. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji* 2009, vol. 20, s. 407-419.
- [19] Szymanowski M., Miejska wyspa ciepła we Wrocławiu. *Studia Geograficzne* 77, Wyd. Uniwersytetu Wrocławskiego, Wrocław 2004.
- [20] Twardosz R., Dobowy przebieg opadów atmosferycznych w ujęciu synoptycznym na przykładzie Krakowa (1886-2002). *Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego*. Kraków 2005.
- [21] Urban G., Strug K., Evaluation of precipitation measurements obtained from different types of rain gauges. 2021, *Meteorol. Z.* 30, 445–463.
- [22] Urban G., Kowalewski M. K., Sawicki J., Borowiecki K., Assessment of the quality of measurements from selected amateur rain gauges *Meteorologische Zeitschrift* Vol. 33 No. 2 (2024), s. 159–174.
- [23] Wunderground.com, instalation guide [dostęp: 09.07.2023], www.wunderground.com
- [24] Zawilski M., Wstępne rezultaty monitoringu przestrzennego rozkładu opadów w łodzi w 2010 roku. Wyd. ABRYS, Warszawa 2011, s. 31–39.