

PRACE GEOGRAFICZNE

zeszyt 170, 2023, 119–141

doi: 10.4467/20833113PG.23.002.17490

Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ

Komisja Geograficzna, Polska Akademia Umiejętności

Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego

ZMIANY WILGOTNOŚCI POWIETRZA W ŁÓDZI W LATACH 1966–2020 W ŚWIETLE WYBRANYCH WSKAŹNIKÓW

Joanna Wibig, *Ewelina Krawczyk*

Changes in air humidity in Łódź in the years 1966–2020 in the light of selected indicators

Abstract: The aim of the study is to present changes in air humidity in central Poland in the years 1966–2000 in Łódź as an example. The values of air temperature, relative humidity and atmospheric pressure from four observation terms, 00, 06, 12 and 18 UTC, were used. On this basis, the saturated vapour pressure, the current vapour pressure, and the saturation deficit were calculated. Then, the variability of these three indicators and relative humidity was examined. The variability of monthly and seasonal average values of humidity indices in four observation periods was presented, the trends in seasonal variability of humidity indices were calculated and the distribution functions of their distributions were compared in the midday period in three 15-year periods: 1966–1980, 1986–2000 and 2006–2020. It has been shown that the pressure of saturated water vapour is the highest in summer, the lowest in winter, and slightly higher in spring than in autumn at all times, except for the night. It increased significantly in the studied period as a result of the increase in air temperature. A comparison of the distributions in three 15-year periods shows a significant increase in the probability of occurrence of high values of saturation vapour pressure, even above 30hPa. The water vapour pressure in the air is highest in summer and lowest in winter, but in spring it is lower than in autumn. All trend coefficients are positive, but only less than half are statistically significant. A comparison of the distributions over three 15-year periods show a slight increase in the probability of higher values of the actual vapour pressure. The saturation deficit, as the difference between the previous two indicators, increases significantly. Its value

in spring is significantly higher than in autumn. The trend is positive, especially in spring and summer, and the comparison of distributions shows that in the last 15 years the probability of high values of saturation deficit increased significantly. The course of relative humidity is the opposite of saturation deficit. In autumn, the relative humidity is definitely higher than in spring. The trend is down. To sum up, warming brings an increase in the capacity of the atmosphere for water vapour, a slight increase in the amount of water vapour in the air, but also a significant increase in saturation deficit and a decrease in relative humidity, which is particularly strong in spring in the first half of the growing season.

Keywords: water vapour pressure, saturation deficit, relative humidity, linear trend, probability distribution

Zarys treści: Celem opracowania jest ocena zmian wilgotności powietrza w środkowej Polsce w latach 1966–2000 na przykładzie Łodzi. Wykorzystano wartości temperatury powietrza, wilgotności względnej i ciśnienia atmosferycznego z czterech terminów obserwacyjnych, godzin 00, 06, 12 i 18 UTC. Na tej podstawie policzono ciśnienie pary wodnej nasyconej, aktualne ciśnienie pary wodnej i niedosyt wilgotności. Następnie zbadano zmienność tych trzech wskaźników oraz wilgotności względnej. Przedstawiono zmienność średnich miesięcznych i sezonowych wartości wskaźników wilgotności w czterech terminach obserwacyjnych, policzono trendy sezonowych wartości wskaźników wilgotności i porównano dystrybuanty ich rozkładów w terminie południowym w trzech 15-letnich okresach: 1966–1980, 1986–2000 i 2006–2020. Pokazano, że ciśnienie pary wodnej nasyconej największe jest latem, najmniejsze zimą, wiosną jest nieco wyższe niż jesienią we wszystkich terminach oprócz nocnego. Ciśnienie pary wodnej nasyconej wzrosło istotnie w badanym okresie z powodu wzrostu temperatury powietrza. Porównanie rozkładów w trzech 15-letnich okresach wskazuje na znaczny wzrost prawdopodobieństwa wystąpienia wysokich wartości ciśnienia pary wodnej nasyconej, nawet powyżej 30 hPa. Ciśnienie pary wodnej w powietrzu największe jest latem, najmniejsze zimą, jednak wiosną jest niższe niż jesienią. Wszystkie współczynniki trendu są dodatnie, ale tylko mniej niż połowa jest statystycznie istotna. Porównanie rozkładów w trzech 15-letnich okresach pokazuje nieznaczny wzrost prawdopodobieństwa wystąpienia wyższych wartości ciśnienia pary wodnej. Niedosyt wilgotności jako różnica poprzednich dwóch wskaźników wzrasta wyraźnie. Jego wartość wiosną jest znacząco wyższa niż jesienią. Trendy są dodatnie, szczególnie wiosną i latem, a porównanie rozkładów wskazuje, że w ostatnim 15-leciu prawdopodobieństwo dużych wartości niedosytu wilgotności znacząco wzrosło. Przebieg wilgotności względnej jest odwrotny do niedosytu wilgotności. Jesienią wilgotność względna jest zdecydowanie wyższa niż wiosną. Trend jest spadkowy. Podsumowując, ocieplenie przynosi wzrost pojemności atmosfery na parę wodną, niewielki wzrost ilości pary wodnej w powietrzu, ale też znaczący wzrost niedosytu wilgotności i spadek wilgotności względnej, szczególnie silny wiosną w pierwszej połowie okresu wegetacyjnego.

Słowa kluczowe: ciśnienie pary wodnej, niedosyt wilgotności, wilgotność względna, trend liniowy, rozkład prawdopodobieństwa

Wstęp

Para wodna jest jednym ze składników atmosfery ziemskiej. Jej udział w dolnej atmosferze waha się od blisko zera do ponad 4% i jest w znacznym stopniu uzależniony od temperatury powietrza. Z powodu roli, jaką odgrywa w procesach radiacyjnych (poprzez pochłanianie i odbijanie promieniowania), transporcie energii, tworzeniu chmur i opadów, jest jednym z najważniejszych składników atmosfery (Willett i in. 2008; Wypych 2021). Zgodnie z równaniem Clausiusa–Clapeyrona ciśnienie pary wodnej nasyconej wzrasta o około 7% przy wzroście temperatury powietrza o 1°C (Manabe, Wetherald 1967). Z powodu postępującego ocieplenia obserwuje się podobny wzrost wilgotności właściwej w dolnej troposferze nad obszarami morskimi (Dai 2006; Douville i in. 2021). Nad lądem jest on wolniejszy, powodując spadek wilgotności względnej (Collins i in. 2013). Powszechny wzrost ilości pary wodnej, jaka może zmieścić się w powietrzu, uruchamia szereg sprzężeń zwrotnych: intensyfikuje silne opady, modyfikuje bilans energetyczny powierzchni Ziemi i atmosfery, prowadząc do zmian tempa parowania i przebiegu opadów (Douville i in. 2021). To dlatego zmiany zawartości pary wodnej w powietrzu stały się chętnie podejmowanym tematem badawczym (Elliott 1995; Peixoto, Oort 1996; Groisman i in. 1999; Dai 2006; Willett i in. 2014). Globalne tendencje wzrostu wilgotności właściwej i spadku wilgotności względnej regionalnie mogą być odmienne ze względu na rodzaj i wilgotność podłoża oraz transport wilgoci z innych regionów.

W Polsce badania nad wilgotnością powietrza zapoczątkował Gumiński (1927), który analizował przestrzenne rozkłady prężności pary wodnej i wilgotności względnej. Po drugiej wojnie światowej podobne badania podjęli Hohendorf (1955, 1960) i Wierzbicki (1959a, b, 1960), jednak obaj koncentrowali się na niedosyć wilgotności. Michna (1972) scharakteryzował sezonowy i roczny rozkład wilgotności względnej na obszarze Polski. Inni autorzy badali przebieg różnych charakterystyk wilgotności w skali regionalnej lub lokalnej. Niedźwiedz (1973) i Obrębska-Starłkowa (1986a, b) badali wilgotność w Karpatach, Głowicki (1970a, b) w Sudetach, Kotońska (1974) w Poznaniu, Tarajkowska (1974) w Częstochowie, Dubaniewicz (1977) i Kłysik (1985) w Łodzi, Gluza i Kaszewski (1984) w Lublinie, Młostek i Sobik (1984), Dubicka i in. (2003) oraz Bryś (2003) we Wrocławiu. Intensyfikacja współczesnego ocieplenia dała impuls do badań nad zmianami wilgotności. Okoniewska i Szumińska (2020) pokazały, że w latach 1952–2018 zmniejszyła się wilgotność względna w północno-zachodniej Polsce. Wypych (2008, 2010) wykazała, że niedosyt wilgotności w Krakowie w XX w. wzrósł. Wzrost widoczny był w skali całego roku (~1,7 hPa/100 lat), ale najsilniejszy w sierpniu (~3 hPa/100 lat) i zwiększył się po 1970 r. Pokazała również (Wypych 2021), że na obszarze Polski w okresie 1951–2018 r. wilgotność właściwa wzrastała, najsilniej w lecie i jesienią

(do $0,2 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}/10 \text{ lat}$). Natomiast wilgotność względną cechował trend spadkowy, najsilniejszy wiosną i latem. Tendencja ta była najbardziej wyraźna w środkowej Polsce i sięgała 5% wartości średniej.

Cel, dane i metody badań

Celem opracowania jest ocena zmian i zmienności wilgotności powietrza w środkowej Polsce w latach 1966–2020 na przykładzie Łodzi i na podstawie wybranych wskaźników: wilgotności względnej, prężności pary wodnej i niedosytu wilgotności. Wykorzystano dobowe wartości temperatury powietrza, wilgotności względnej i ciśnienia atmosferycznego na poziomie stacji z czterech terminów obserwacyjnych (00, 06, 12 i 18 UTC) ze stacji synoptycznej Łódź-Lublinek z lat 1966–2020. Dalej w tekście terminy te będą nazywane odpowiednio nocnym, porannym, południowym i wieczornym. Dane te pobrano ze strony danepubliczne.imgw.gov.pl udostępnionej przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej Państwowy Instytut Badawczy (IMGW-PIB).

Znając wartości temperatury powietrza (T), wilgotności względnej (f) i ciśnienia atmosferycznego (p), obliczono ciśnienie pary wodnej nasyconej (E), aktualne ciśnienie pary wodnej (e) oraz niedosyt wilgotności (Δe), wykorzystując równania zalecone przez Światową Organizację Meteorologiczną (World Meteorological Organization; WMO) (JCOMM 2015):

$$E = 6,112 \cdot \exp\left(\frac{17,62T}{243,12 + T}\right) \cdot (1,0016 + 3,15 \cdot 10^{-6}p - 0,074p^{-1})$$

$$e = E \cdot f / 100$$

$$\Delta e = E - e$$

Następnie policzono średnie wartości wskaźników wilgotności w poszczególnych terminach, miesiącach i porach roku w wieloleciu 1966–2020. Przedstawiono dobowy i roczny przebieg zmienności poszczególnych wskaźników wilgotności oraz zmienność wieloletnią. Dobowy i roczny przebieg zmienności scharakteryzowano, wykorzystując wykresy pudełkowe. Zmienność wieloletnią oceniono, obliczając parametry regresji liniowej metodą najmniejszych kwadratów. Istotność współczynnika trendu badano testem t-Studenta, przy założeniu 95% poziomu istotności. Ta metoda pozwoliła na ocenę wieloletnich zmian średnich wartości wskaźników wilgotności. Dodatkowo porównano dystrybuanty dobowych wartości wskaźników w trzech piętnastoletnich okresach 1966–1980, 1986–2000 i 2006–2020.

Wyniki

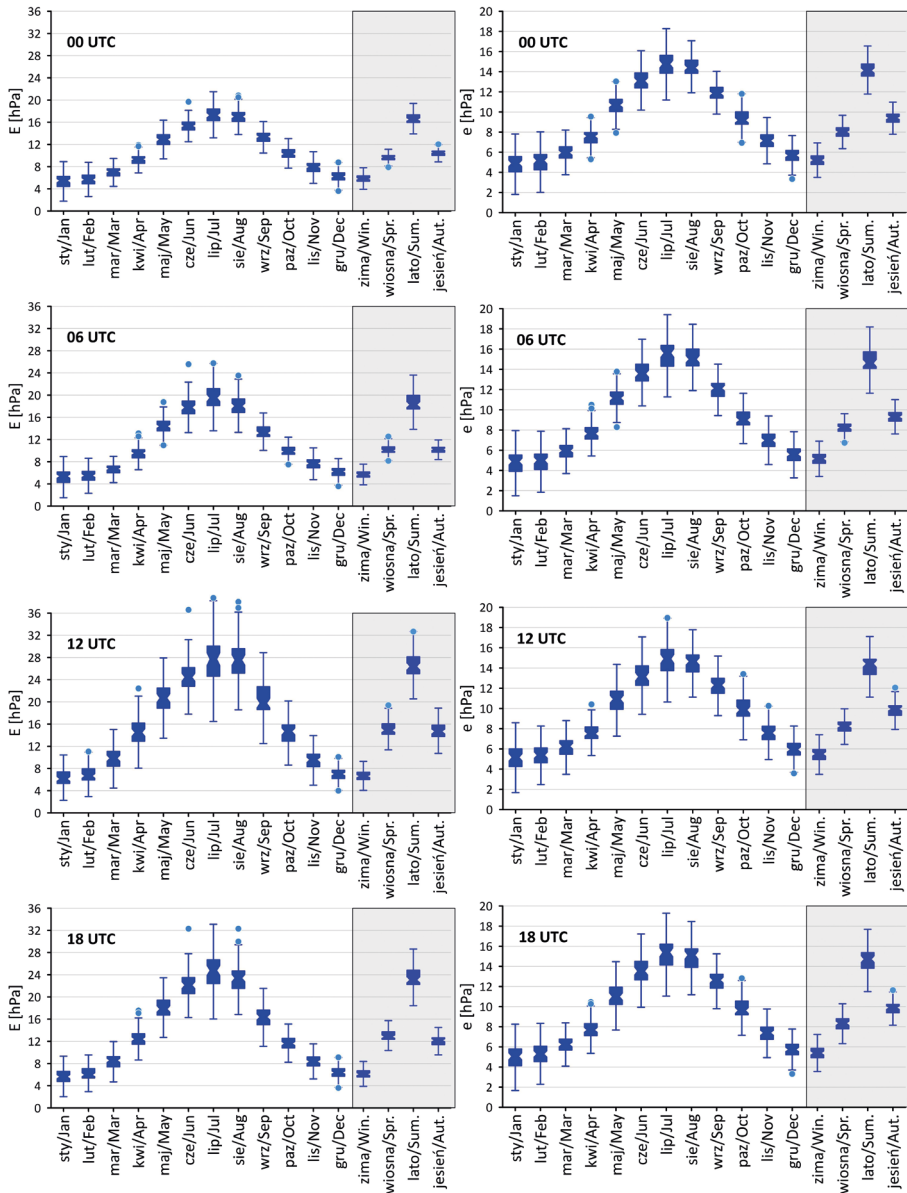
Zmienność śródroczna wskaźników wilgotności

W tym rozdziale do prezentacji wyników zastosowano wykresy pudełkowe z wąsami. Pudełko obejmuje zakres od 1. do 3. kwartyła, a wcięcie wskazuje na medianę. Wąsy oznaczają zakres 1,5 rozstępu kwartylnego. Wartości spoza tego zakresu oznaczono kropkami.

Wszystkie badane wskaźniki cechują się wyraźną cyklicznością dobową i roczną. Ciśnienie pary wodnej nasyconej (E) nie jest właściwie wskaźnikiem wilgotności, a jedynie pojemności powietrza na parę wodną i zależy głównie od temperatury powietrza, w niewielkim stopniu również od jego ciśnienia. Jego wartości w Łodzi wahają się od poniżej 2 hPa w godzinach porannych w styczniu do ponad 38 hPa w południe w lipcu (ryc. 1). Przebieg roczny E charakteryzuje się zimowym minimum obserwowanym w styczniu i letnim maksimum w lipcu. Rozrzut wartości jest również największy latem. Najmniejsza zmienność obserwowana jest w grudniu w terminach 12 UTC i 18 UTC, a w marcu i październiku w terminach 00 UTC i 06 UTC. W skali pół roku w terminie nocnym (00 UTC) wartości jesienią są nieco wyższe niż wiosną, natomiast w terminie wieczornym (18 UTC) jest odwrotnie. W porannym (06 UTC) i południowym (12 UTC) terminie wartości E jesienią i wiosną są praktycznie jednakowe. W cyklu dobowym najwyższe wartości i największy ich rozrzut obserwuje się w terminie południowym, a najniższe wartości obserwowane są o północy w cieplej porze roku i w terminie porannym w chłodnej, natomiast zakres zmienności najmniejszy jest zawsze o północy.

Aktualne ciśnienie pary wodnej przyjmuje wartości od poniżej 2 hPa w styczniu do ponad 19 hPa w lipcu (ryc. 1). Przebieg roczny cechuje się maksimum w lipcu i w sezonie letnim oraz minimum w styczniu i w sezonie zimowym. Zakres przyjmowanych wartości jest największy latem, a najmniejszy w terminie porannym wiosną, wieczornym jesienią, a w pozostałych terminach zarówno wiosną, jak i jesienią. W cyklu rocznym aktualne ciśnienie pary wodnej wiosną jest zdecydowanie niższe niż jesienią. Cykl dobowy jest zdecydowanie słabiej zaznaczony niż w przypadku ciśnienia pary wodnej nasyconej, zachodzą w nim tylko niewielkie wahania, najsilniej widoczne w miesiącach letnich. Wówczas ciśnienie pary wodnej jest najwyższe w terminie porannym i wieczornym, minimalnie mniejsze w południe ze względu na dobowy cykl rozwoju konwekcji i najniższe w terminie nocnym (00 UTC), który latem jest jedynym terminem ze Słońcem pod horyzontem.

Bardzo wyraźny cykl roczny i dobowy ma niedosyt wilgotności (ryc. 2). Największe wartości, przekraczające 27 hPa, obserwowane są w lipcu w terminie południowym, najniższe – zimą. W cyklu dobowym najniższe wartości występują w terminie nocnym, nieco wyższe w porannym, latem termin ten wypada już po wschodzie Słońca,

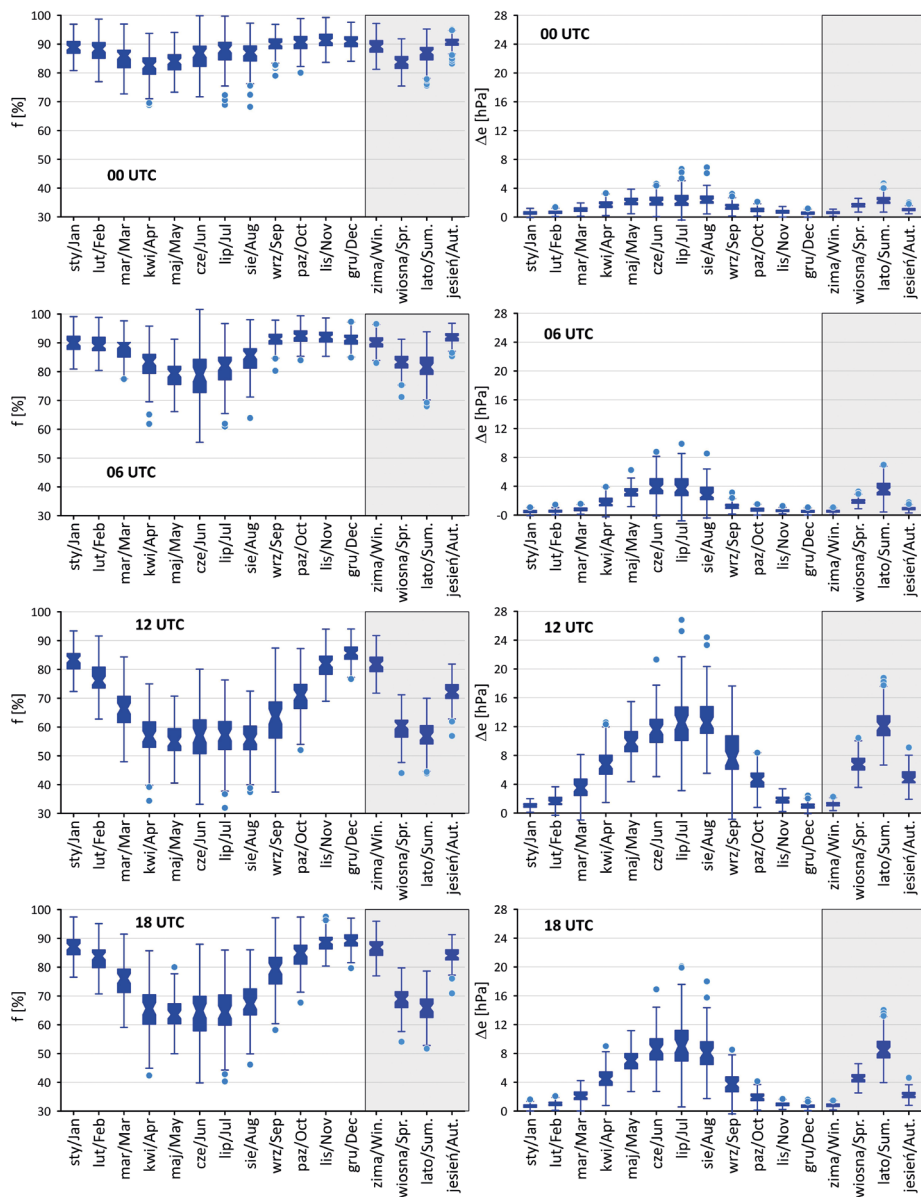


Ryc. 1. Średnie miesięczne i sezonowe (szare tło) wartości ciśnienia pary wodnej nasyconej (prawa kolumna) i ciśnienia pary wodnej (lewa kolumna) w czterech terminach obserwacyjnych w Łodzi w latach 1966–2020

Fig. 1. Mean monthly and seasonal (grey background) values of saturated water vapour pressure (left column) and water vapour pressure (right column) in four observation terms in Łódź during the period 1966–2020

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem oprogramowania Grapher 17.

Source: author's own elaboration using Grapher 17 software.



Ryc. 2. Średnie miesięczne i sezonowe (szare tło) wartości wilgotności względnej (lewa kolumna) i niedosytu wilgotności (prawa kolumna) w czterech terminach obserwacyjnych w Łodzi w latach 1966–2020

Fig. 2. Mean monthly and seasonal (grey background) values of relative humidity (left column) and saturation deficit (right column) in four observation terms in Łódź during the period 1966–2020

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem oprogramowania Grapher 17.

Source: author's own elaboration using Grapher 17 software.

w pozostałych porach roku wartości praktycznie nie różnią się od tych z terminu niedosytu wilgotności i obserwowane są oczywiście w terminie południowym. Niedosyt wilgotności jest wiosną znacząco wyższy od obserwowanego jesienią. Odzwierciedla to niekorzystny bilans wodny na początku sezonu wegetacyjnego.

Przebieg sezonowy i dobowy wilgotności względnej zasadniczo jest odwrotny do przebiegu niedosytu wilgotności (ryc. 2). Najniższe wartości wilgotności względnej obserwowane są jednak w czerwcu, przy najwyższych wartościach niedosytu w lipcu. Niskie wartości wilgotności względnej są obserwowane też w kwietniu. Ponadto wiosną w terminie nocnym obserwuje się nieco niższe wartości wilgotności względnej niż latem.

Wieloletnia zmienność wskaźników wilgotności

Postępujące współcześnie ocieplenie klimatu powoduje zmiany wskaźników wilgotności, które są w znacznym stopniu zależne od temperatury powietrza i dlatego wyniki przedstawione są z podziałem na pory roku i terminy obserwacyjne.

Na podstawie współczynników kierunkowych trendu w każdym terminie oraz sezonie zaobserwowano tendencję wzrostową temperatury powietrza (tab. 1). Najmniejsze zmiany zaobserwowano w godzinach nocnych, szczególnie wiosną i jesienią (ryc. 3).

Prężność pary wodnej nasyconej jest teoretyczną wartością zależną głównie od temperatury powietrza. Określa ona pojemność powietrza dla pary wodnej i w połączeniu z aktualną prężnością pary wodnej pozwala na ocenę stopnia nasycenia powietrza atmosferycznego parą wodną, wyrażanego za pomocą wilgotności względnej lub niedosytu wilgotności, istotnie modyfikując charakterystyczne zmiany dobowe i sezonowe tych wskaźników.

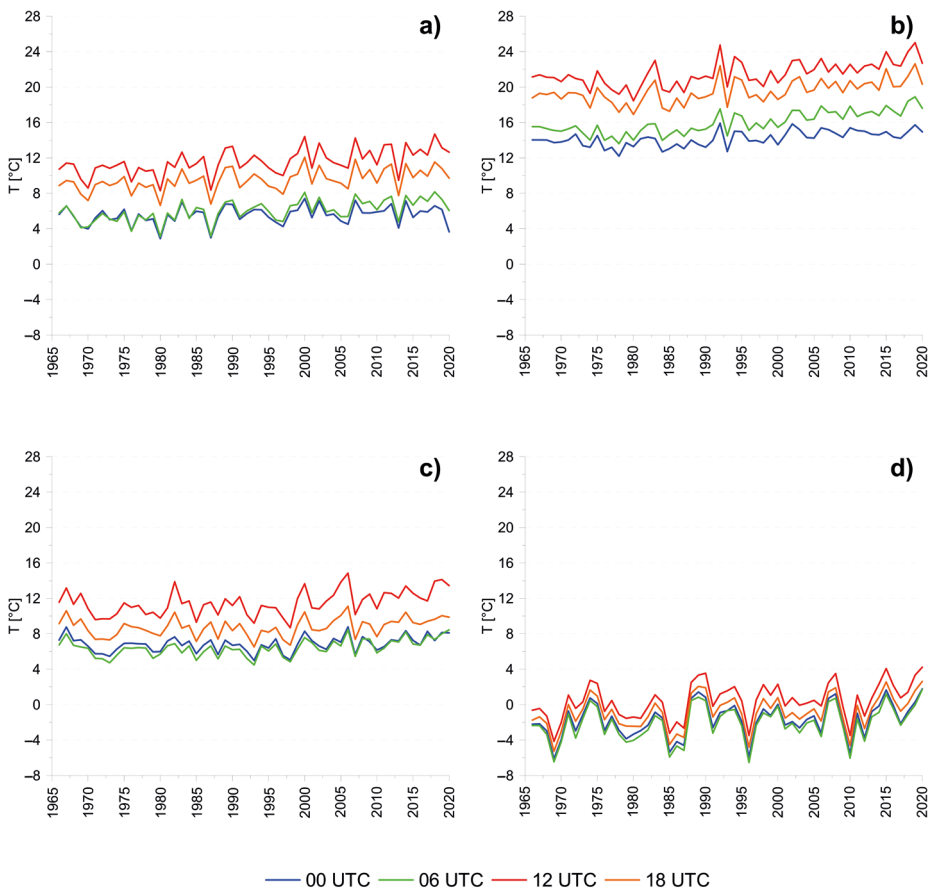
Tab. 1. Współczynniki trendu temperatury powietrza w Łodzi w latach 1966–2020 w poszczególnych porach roku i terminach obserwacyjnych w °C/10 lat. Wartości statystycznie istotne pogrubiono

Table 1. Trend coefficients of air temperature in Łódź in the years 1966–2020 in the respective seasons and observation terms in °C/10 years. Values statistically significant are marked in bold

Termin Term	Wiosna Spring	Lato Summer	Jesień Autumn	Zima Winter
00:00	0,14	0,30	0,15	0,38
6:00	0,42	0,61	0,26	0,38
12:00	0,50	0,52	0,39	0,50
18:00	0,35	0,45	0,18	0,41

Źródło: opracowanie własne. / Source: own work.

Dobowy przebieg temperatury powietrza z maksimum w terminach okołopołudniowych we wszystkich sezonach jest przyczyną znacznego przyrostu ciśnienia pary wodnej nasyconej w tych terminach (ryc. 4). Wieloletnie zmiany ciśnienia pary wodnej nasyconej (tab. 2) odzwierciedlają wspomniane wcześniej trendy temperatury powietrza. Wielkość trendów waha się od 0,09 hPa/10 lat jesienią w terminie nocnym

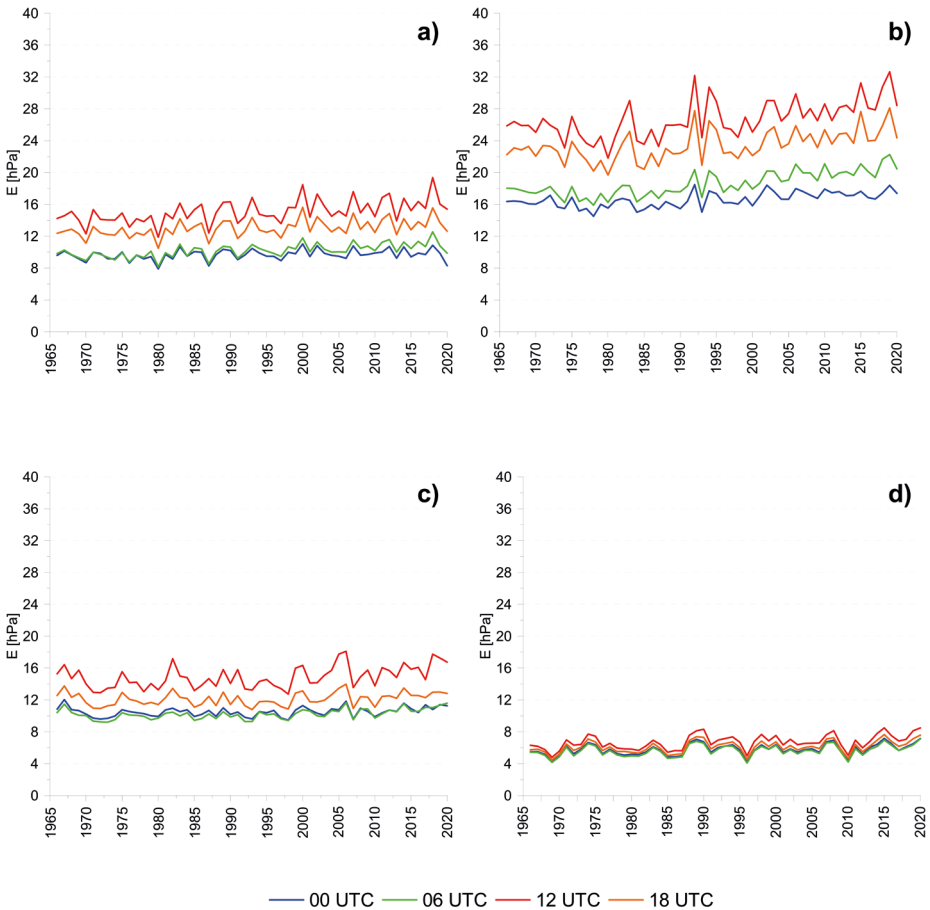


Ryc. 3. Wieloletnie zmiany średniej temperatury powietrza w poszczególnych terminach obserwacyjnych a) wiosną, b) latem, c) jesienią, d) zimą w Łodzi w latach 1966–2020

Fig. 3. Long-term changes in mean air temperature in respective observation terms in a) spring, b) summer, c) autumn, d) winter in Łódź in the period 1966–2020

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem oprogramowania Grapher 17.

Source: author's own elaboration using Grapher 17 software.



Ryc. 4. Wieloletnie zmiany średniej prężności pary wodnej nasyconej w poszczególnych terminach obserwacyjnych a) wiosną, b) latem, c) jesienią, d) zimą w Łodzi w latach 1966–2020
 Fig. 4. Long-term changes in mean saturation water vapour pressure in respective observation terms in a) spring, b) summer, c) autumn, d) winter in Łódź in the period 1966–2020

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem oprogramowania Grapher 17.

Source: author's own elaboration using Grapher 17 software.

do 0,85 hPa/10 lat latem w terminie południowym. Zmiany są statystycznie istotne prawie we wszystkich terminach i sezonach.

Aktualna prężność pary wodnej charakteryzuje bezwzględną zawartość pary wodnej w powietrzu i jest jedną z podstawowych charakterystyk wilgotności stosowanych

Tab. 2. Współczynniki trendu ciśnienia pary wodnej nasyconej w Łodzi w latach 1966–2020 w poszczególnych porach roku i terminach obserwacyjnych. Wartości statystycznie istotne pogrubiono

Table 2. Trend coefficients in saturated water vapour pressure in Łódź in the years 1966–2020 in the respective seasons and observation terms in hPa/10 years. Values statistically significant are marked in bold

Termin Term	Wiosna Spring	Lato Summer	Jesień Autumn	Zima Winter
00:00	0,10	0,34	0,09	0,16
6:00	0,32	0,73	0,19	0,16
12:00	0,47	0,85	0,37	0,25
18:00	0,30	0,64	0,12	0,18

Źródło: opracowanie własne. / Source: own work.

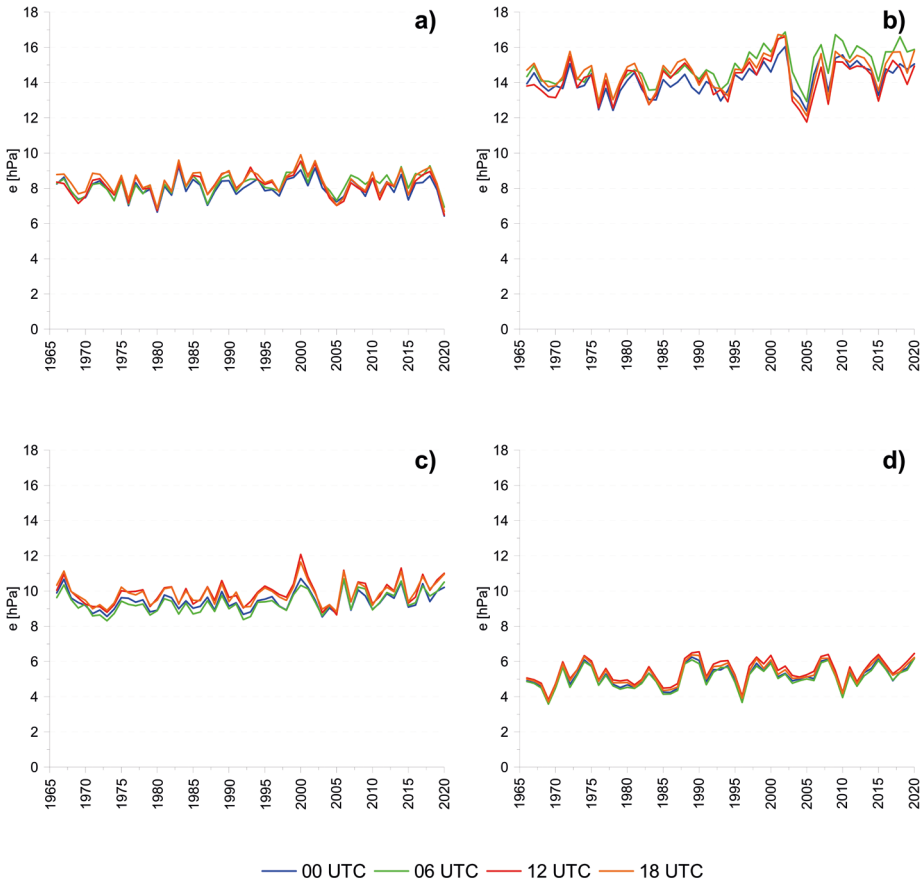
w meteorologii. Wielkość tego wskaźnika wraz z prężnością pary wodnej nasyconej wpływa na miary wilgotności względnej i niedosytu wilgotności.

Obserwacje wieloletnich zmian aktualnego ciśnienia pary wodnej wskazują na nieznaczny wzrost ilości pary wodnej w powietrzu (ryc. 5). Wszystkie współczynniki trendu są dodatnie, lecz w większości przypadków statystycznie nieistotne (tab. 3). Wartości trendu nie przekraczają 0,35 hPa /10 lat. Statystycznie istotny jest tylko trend latem w terminie nocnym oraz wiosną, latem i jesienią w terminie porannym.

Silny trend wzrostowy ciśnienia pary wodnej nasyconej, przy niewielkiej tylko zmianie aktualnej prężności pary wodnej powoduje istotny wzrost niedosytu wilgotności.

Wieloletnie zmiany niedosytu wilgotności charakteryzują się znacznym zróżnicowaniem. Najbardziej wyraźne zmiany obserwowane są w terminie południowym, najmniejsze w terminie nocnym (ryc. 6). Wiosną wszystkie trendy wzrostowe są statystycznie istotne, latem nieistotne są zmiany w terminie nocnym. Jesienią istotny trend obserwowany jest tylko w terminie południowym, a zimą w południowym i wieczornym. Najsilniejszy trend latem w godzinach południowych osiągnął 0,70 hPa/10 lat (tab. 4). Dość silny wzrostowy trend niedosytu wilgotności w cieplej porze roku, w okresie wegetacyjnym oznacza pogłębianie się problemów z deficytem wody.

W przypadku wilgotności względnej dominują trendy ujemne (ryc. 7). Wartości trendu wahają się od $-1,65\%/10$ lat wiosną w terminie południowym do $0,05\%/10$ lat jesienią w terminie nocnym (tab. 5). Spadek wilgotności względnej jest istotny w każdym terminie wiosną i jest zgodny z silnym wzrostem niedosytu wilgotności w tej porze roku. Latem we wszystkich terminach występują trendy spadkowe. Ale są statystycznie istotne tylko w terminie porannym i południowym. Jesienią



Ryc. 5. Wieloletnie zmiany średniego ciśnienia pary wodnej w poszczególnych terminach obserwacyjnych a) wiosną, b) latem, c) jesienią, d) zimą w Łodzi w latach 1966–2020

Fig. 5. Long-term changes in mean water vapour pressure in respective observation terms in a) spring, b) summer, c) autumn, d) winter in Łódź in the period 1966–2020

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem oprogramowania Grapher 17.

Source: author's own elaboration using Grapher 17 software.



Ryc. 6. Wieloletnie zmiany średniego niedosytu wilgotności w poszczególnych terminach obserwacyjnych a) wiosną, b) latem, c) jesienią, d) zimą w Łodzi w latach 1966–2020

Fig. 6. Long-term changes in mean saturation deficit in respective observation terms in a) spring, b) summer, c) autumn, d) winter in Łódź in the period 1966–2020

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem oprogramowania Grapher 17.

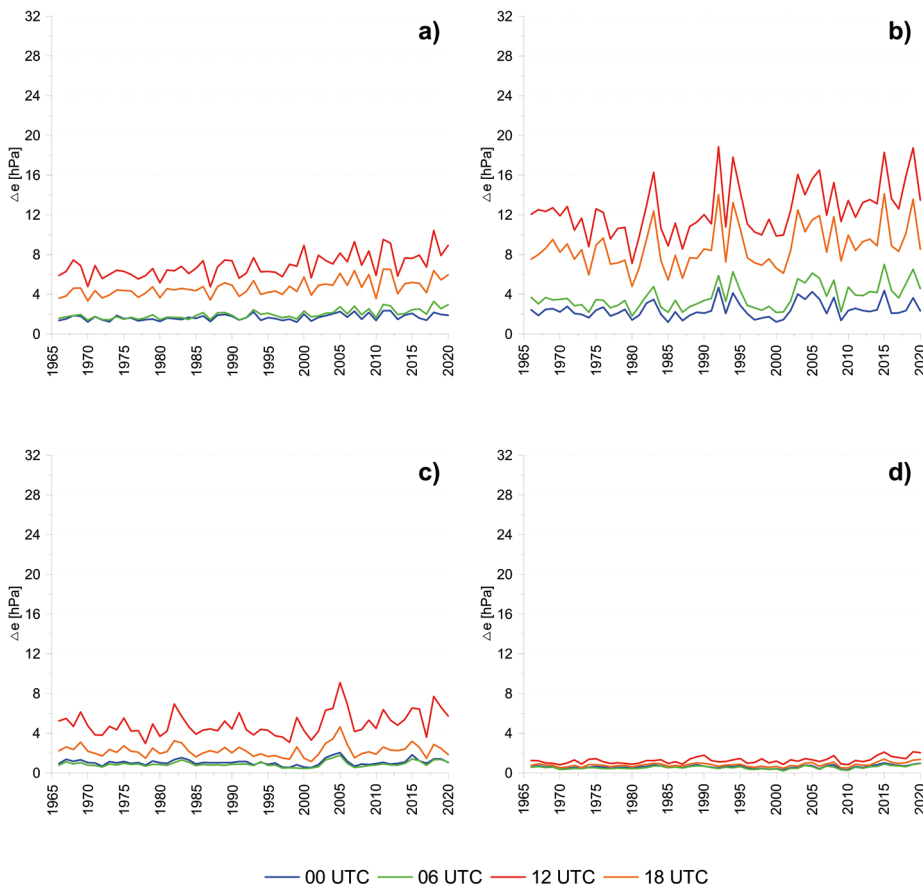
Source: author's own elaboration using Grapher 17 software.

Tab. 3. Współczynniki trendu prężności pary wodnej w Łodzi w latach 1966–2020 w poszczególnych porach roku i terminach obserwacyjnych w hPa/10 lat. Wartości statystycznie istotne pogrubiono

Table 3. Trend coefficients in water vapour pressure in Łódź in the years 1966–2020 in the respective seasons and observation terms in hPa/10 years. Values statistically significant are marked in bold

Termin Term	Wiosna Spring	Lato Summer	Jesień Autumn	Zima Winter
00:00	0,02	0,23	0,08	0,13
6:00	0,12	0,36	0,16	0,13
12:00	0,02	0,15	0,13	0,15
18:00	0,00	0,16	0,10	0,13

Źródło: opracowanie własne. / Source: own work.

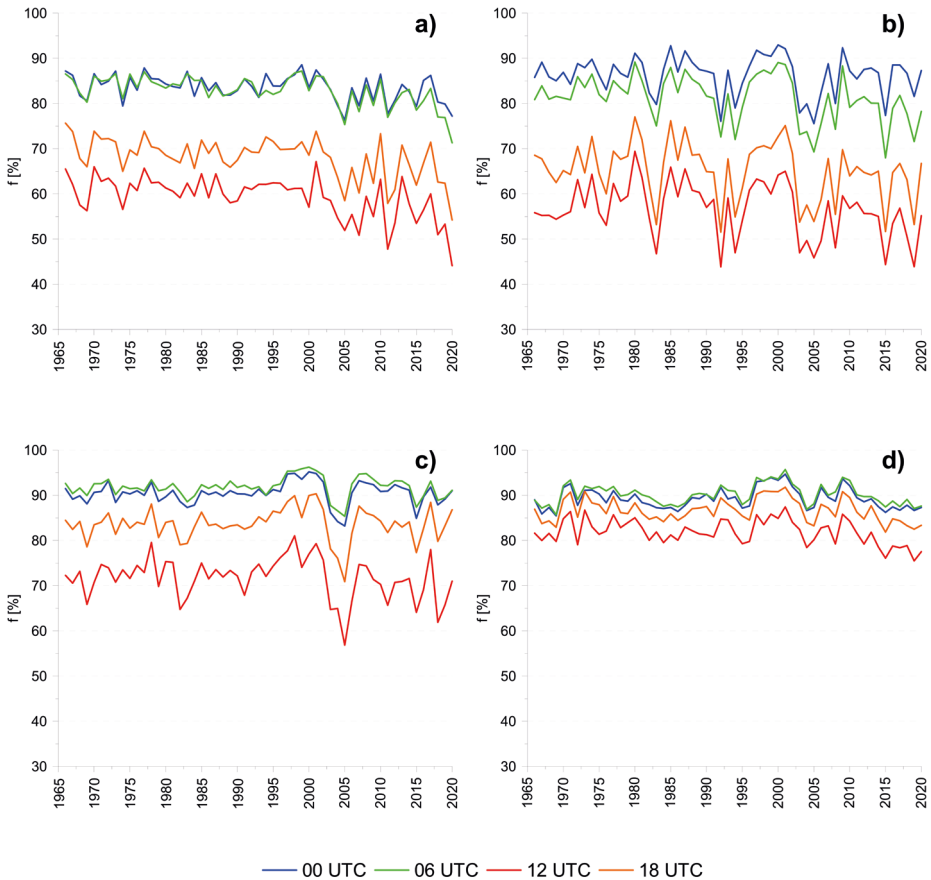


Tab. 4. Współczynniki trendu niedosytu wilgotności w Łodzi w latach 1966–2020 w poszczególnych porach roku i terminach obserwacyjnych w hPa/10 lat. Wartości statystycznie istotne pogrubiono

Table 4. Trend coefficients in saturation deficit in Łódź in the years 1966–2020 in the respective seasons and observation terms in hPa/10 years. Values statistically significant are marked in bold

Termin Term	Wiosna Spring	Lato Summer	Jesień Autumn	Zima Winter
00:00	0,08	0,11	0,01	0,03
6:00	0,20	0,37	0,03	0,03
12:00	0,44	0,70	0,25	0,10
18:00	0,30	0,49	0,02	0,05

Źródło: opracowanie własne. / Source: own work.



Tab. 5. Współczynniki trendu wilgotności względnej w Łodzi w latach 1966–2020 w poszczególnych porach roku i terminach obserwacyjnych w %/10 lat. Wartości statystycznie istotne pogrübiono

Table 5. Trend coefficients in relative humidity in Łódź in the years 1966–2020 in the respective seasons and observation terms in %/10 years. Values statistically significant are marked in bold

Termin Term	Wiosna Spring	Lato Summer	Jesień Autumn	Zima Winter
00:00	-0,66	-0,33	0,04	0,01
6:00	-1,14	-1,15	-0,02	-0,01
12:00	-1,65	-1,18	-0,64	-0,59
18:00	-1,50	-1,07	0,05	-0,24

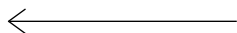
Źródło: opracowanie własne. / Source: own work.

wszystkie zmiany są statystycznie nieistotne. W terminach porannym i południowym tendencje są spadkowe, a wieczorem i w nocy wzrostowe. Zimą spadek wilgotności względnej jest skutkiem znacznego wzrostu temperatury, a co za tym idzie prężności pary wodnej nasyconej. Spadek jest jednak istotny statystycznie jedynie w terminie południowym.

Obserwowane trendy są w głównej mierze wynikiem wzrostu temperatury i idącego za tym wzrostu prężności pary wodnej nasyconej. Zmiany ilości pary wodnej w atmosferze są stosunkowo niewielkie i rzadko statystycznie istotne.

Wieloletnie zmiany dystrybuant wskaźników wilgotności

Dystrybuanty wszystkich czterech elementów porównano w trzech 15-letnich okresach oddzielonych 5-letnimi przerwami: 1966–1980, 1986–2000 i 2006–2020. Na wykresach (ryc. 8–11) przedstawiono różnice w terminie południowym, gdy są największe. W terminie nocnym różnice są nieznaczące. W terminach porannym i wieczornym są statystycznie istotne, gdy w danej porze roku termin ten przypada na porę dzienną (między wschodem a zachodem Słońca), a nieistotne, gdy nie.



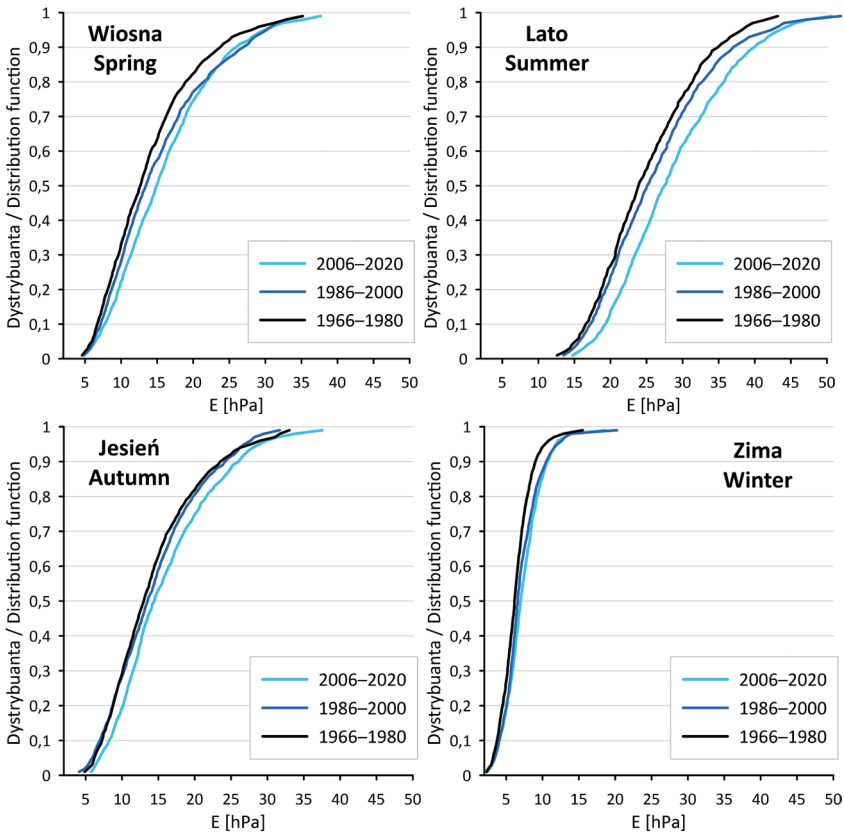
Ryc. 7. Wieloletnie zmiany średniej wilgotności względnej w poszczególnych terminach obserwacyjnych a) wiosną, b) latem, c) jesienią, d) zimą w Łodzi w latach 1965–2020

Fig. 7. Long-term changes in mean relative humidity in respective observation terms in a) spring, b) summer, c) autumn, d) winter in Łódź in the period 1966–2020

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem oprogramowania Grapher 17.

Source: author's own elaboration using Grapher 17 software.

W przypadku prężności pary wodnej nasyconej najsilniejsze różnice obserwowane są latem (ryc. 8). Wartości prężności pary wodnej nasyconej wyższe od 20 hPa, występowały w ostatnim okresie co najmniej 10% częściej niż w pierwszym. Najwyższe obserwowane wartości o 8 hPa przekraczają te z pierwszego 15-lecia. Wiosną dystrybuanta w trzecim 15-leciu różni się istotnie od dystrybuant w pierwszym i drugim podokresie. Natomiast dystrybuanta w środkowym okresie jest zbliżona do tej z początkowego 15-lecia w zakresie niższych wartości i do tej z końcowego 15-lecia w zakresie wyższych



Ryc. 8. Porównanie rozkładów prawdopodobieństwa prężności pary wodnej nasyconej w terminie południowym w trzech 15-letnich okresach: 1966–1980, 1986–2000 i 2006–2020 oraz czterech porach roku

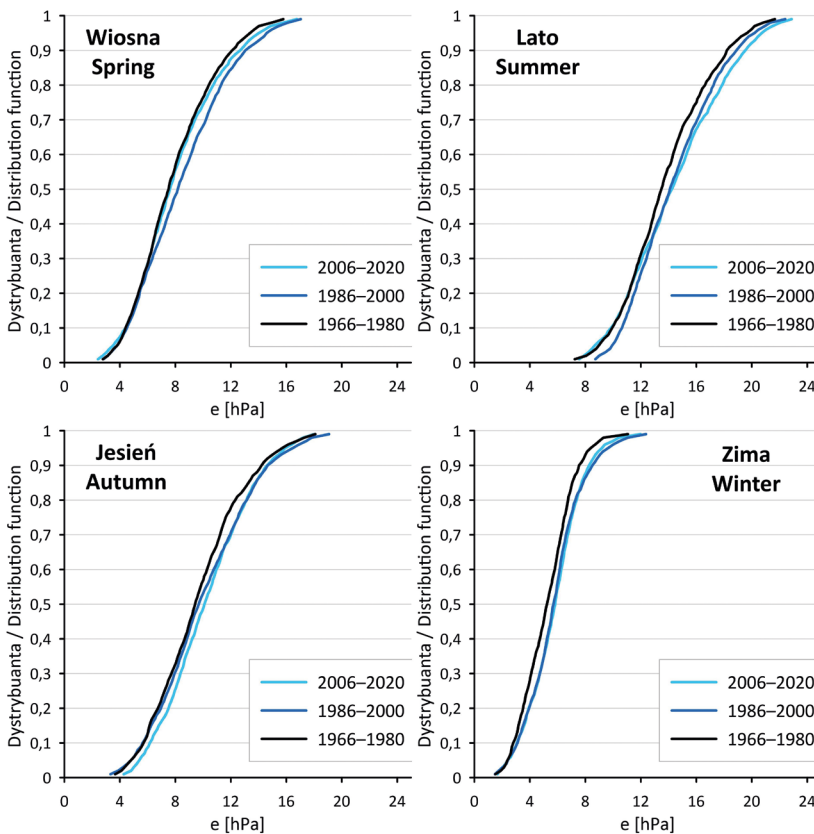
Fig. 8. Comparison of the probability distribution of saturated vapour pressure in the midday term in three 15-year periods: 1966–1980, 1986–2000 and 2006–2020, and four seasons

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem oprogramowania Grapher 17.

Source: author's own elaboration using Grapher 17 software.

wartości. Jesienią dystrybuanty w początkowym i środkowym 15-leciu są praktycznie jednakowe, a ocieplenie oraz wzrost prężności pary wodnej nasyconej są widoczne w końcowym 15-leciu. Zimą krzywe dla drugiego i trzeciego 15-lecia są zbliżone. Widać, że zimowy wzrost prężności pary wodnej nasyconej był najsilniejszy w pierwszej części badanego okresu, a potem utrzymywał się na podobnym poziomie.

Dystrybuanty prężności pary wodnej są do siebie bardziej zbliżone niż prężności pary wodnej nasyconej (ryc. 9). Jednak i w tym przypadku różnica między dystrybuantami



Ryc. 9. Porównanie rozkładów prawdopodobieństwa prężności pary wodnej w terminie południowym w trzech 15-letnich okresach: 1966–1980, 1986–2000 i 2006–2020 oraz czterech porach roku

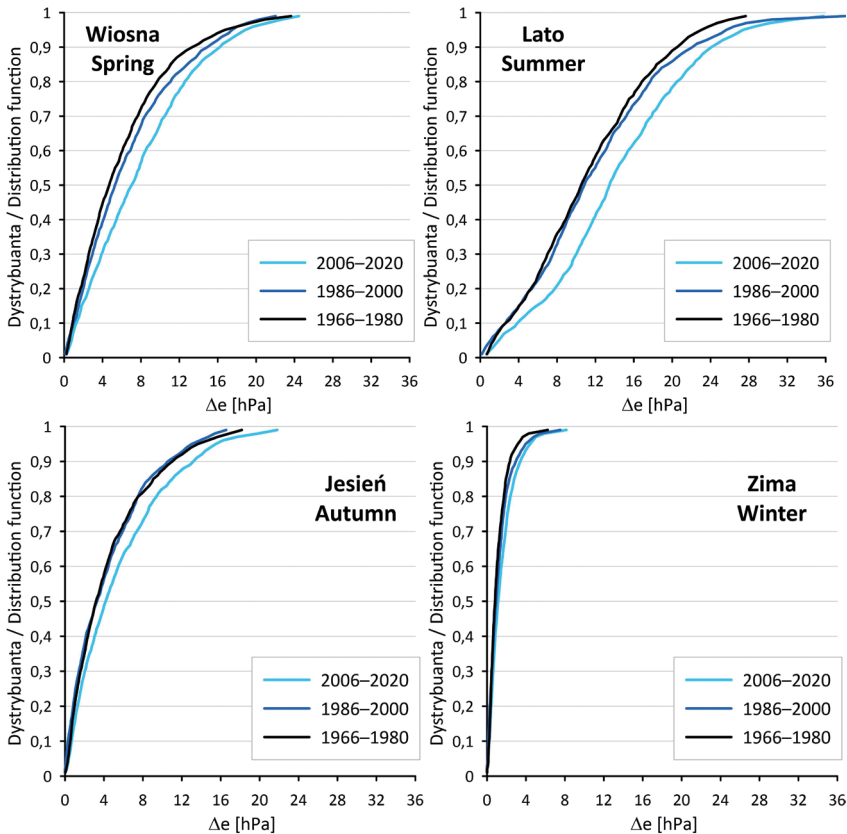
Fig. 9. Comparison of the probability distribution of water vapour pressure in the midday term in three 15-year periods: 1966–1980, 1986–2000 and 2006–2020, and four seasons

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem oprogramowania Grapher 17.

Source: author's own elaboration using Grapher 17 software.

w końcowym i początkowym 15-leciu jest statystycznie istotna we wszystkich porach roku oprócz wiosny. Wiosną dystrybuanty w końcowym i początkowym 15-leciu są zbliżone, natomiast istotnie wilgotniejsze było środkowe 15-lecie, czyli lata 1986–2000. Zmniejszenie ilości pary wodnej po roku 2000, przy stosunkowo dużym ociepleniu świadczy o narastającym deficycie wilgoci w pierwszej części sezonu wegetacyjnego.

Nasilanie się niedosytu wilgotności widoczne jest na ryc. 10 prezentującej porównanie dystrybuanty tego parametru w trzech podokresach. We wszystkich porach roku



Ryc. 10. Porównanie rozkładów prawdopodobieństwa niedosytu wilgotności w terminie południowym w trzech 15-letnich okresach: 1966–1980, 1986–2000 i 2006–2020 oraz czterech porach roku

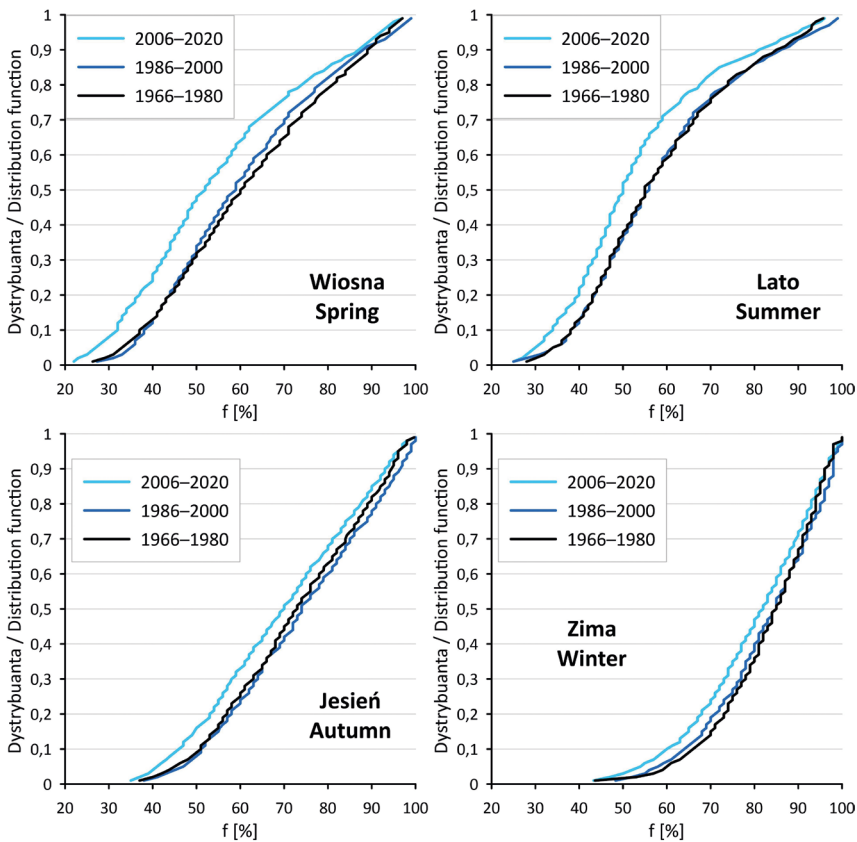
Fig. 10. Comparison of the probability distribution of saturation deficit in the midday term in three 15-year periods: 1966–1980, 1986–2000 and 2006–2020, and four seasons

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem oprogramowania Grapher 17.

Source: author's own elaboration using Grapher 17 software.

dystrybuanta w trzecim 15-leciu znacząco różni się od tych z pozostałych okresów. Latem deficyty przekraczające 8 hPa są nawet o 20% częstsze w końcowym 15-leciu niż w początkowym. Wiosną różnica jest nieco mniejsza, ale każda wartość niedosytu wilgotności powyżej 4 hPa jest o około 15% częstsza w końcowym 15-leciu niż w początkowym.

Statystycznie istotne różnice między rozkładem w końcowym i początkowym 15-leciu są widoczne także w przypadku wilgotności względnej (ryc. 11). Tym razem



Ryc. 11. Porównanie rozkładów prawdopodobieństwa wilgotności względnej w terminie południowym w trzech 15-letnich okresach: 1966–1980, 1986–2000 i 2006–2020 oraz czterech porach roku

Fig. 11. Comparison of the probability distribution of relative humidity in the midday term in three 15-year periods: 1966–1980, 1986–2000 and 2006–2020, and four seasons

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem oprogramowania Grapher 17.

Source: author's own elaboration using Grapher 17 software.

oczywiście niższe wartości wilgotności są w ostatnim 15-leciu obserwowane częściej niż w dwóch poprzednich. Największe wartości występują wiosną, gdy wszystkie wartości wilgotności poniżej 70% są o 10% częstsze. Duże różnice (około 10%) obserwowane są również latem w zakresie wilgotności 40–70%.

Wnioski

Podsumowując przedstawione powyższej rezultaty badań, można stwierdzić, że wilgotność powietrza w Łodzi w latach 1966–2020 uległa istotnym zmianom. Porównanie trendów wskaźników wilgotności powietrza wskazuje na znaczne zmiany wskaźników opisujących stopień nasycenia powietrza parą wodną (wilgotności względnej i niedosytu wilgotności) przy stosunkowo niewielkich zmianach ilości pary wodnej w powietrzu, tu opisaną prężnością pary wodnej. To wskazuje na wpływ temperatury powietrza jako głównego czynnika zmian wskaźników wilgotności, co sugerowali już Manabe i Wetherald (1967). Postępujące ocieplenie, statystycznie istotne we wszystkich porach roku, spowodowało bardzo wyraźny wzrost prężności pary wodnej nasyconej, czyli pojemności powietrza na parę wodną. Taka sytuacja w klimatach morskich powoduje zazwyczaj silny wzrost prężności pary wodnej, wewnątrz kontynentu może jednak skutkować niewielkim tylko wzrostem prężności pary wodnej przy znaczącym spadku wilgotności względnej (Dai 2006; Collins i in. 2013; Douville i in. 2021). Tak właśnie dzieje się w Łodzi, gdzie obserwuje się wieloletni wzrost niedosytu wilgotności oraz spadek wilgotności względnej, przy niewielkim tylko wzroście ilości pary wodnej w powietrzu. Na podobne zmiany wskazuje też Wypych (2021). Wpływ temperatury powietrza na charakterystyki wilgotności przyczynia się również do ich zróżnicowania w cyklu dobowym i rocznym. Dlatego najbardziej wyraźne trendy parametrów wilgotności pojawiają się przeważnie w terminach odpowiadających występowaniu maksimum termicznego w odpowiednim cyklu czasowym, tj. w godzinach południowych oraz latem. Zróżnicowanie dobowe parametrów wilgotności oraz rozbieżność trendów w różnych terminach obserwacyjnych wskazują, że amplitudy dobowe charakterystyk wilgotności stopniowo się zwiększają. Szczególnie widoczne jest to w półroczu ciepłym.

Obserwowane trendy wskazują na rozwój warunków meteorologicznych sprzyjających deficytowi wody, rozwojowi suszy atmosferycznej, a w przypadku nasilania się zjawiska – również suszy glebowej i hydrologicznej. W następstwie tych zjawisk niekorzystne skutki będą odczuwalne w różnych dziedzinach działalności człowieka i w środowisku naturalnym. Paradoksalnie silny wzrost prężności pary wodnej nasyconej może prowadzić również do częstszych opadów o bardzo dużej intensywności (Wibig, Piotrowski 2018).

Podziękowania

Autorki dziękują IMGW-PIB za udostępnienie danych oraz dwóm anonimowym recenzentom za wnikliwe uwagi.

Literatura

- Bryś T., 2003, *Variability of saturation deficit in Wrocław in the 20th century and some of its conditions*, [w:] Pyka J.L., Dubicka M., Szczepankiewicz-Szmyrka A., Sobik M., Błaś M. (red.), *Man and climate in the 20th century*, Studia Geograficzne, Uniwersytet Wrocławski, 75, 203–215.
- Collins M., Knutti R., Arblaster J., Dufresne J.-L., Fichetef T., Friedlingstein P., Gao X., Gutowski W.J., Johns T., Krinner G., Shongwe M., Tebaldi C., Weaver A.J., Wehner M., 2013, *Long-term climate change: Projections, commitments and irreversibility*, [w:] Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Doschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M. (red.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, 1029–1136, DOI: 10.1017/CBO9781107415324.024.
- Dai A., 2006, *Recent climatology, variability, and trends in global surface humidity*, Journal of Climate, 19, 3589–3606.
- Douville H., Raghavan K., Renwick J., Allan R.P., Arias P.A., Barlow M., Cerezo-Mota R., Cherchi A., Gan T.Y., Gergis J., Jiang D., Khan A., Mba W.P., Rosenfeld D., Tierney J., Zolina O., 2021, *Water cycle changes*, [w:] V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonno, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, B. Zhou, (red.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, 1055–1210.
- Dubaniewicz H., 1977, *Wpływ miasta na kształtowanie się wilgotności powietrza obszarów przyległych na przykładzie Łodzi*, Studia Regionalne, 1(6), 95–103.
- Dubicka M., Rosiński D., Szymanowski M., 2003, *The influence of urban environment on air humidity in Wrocław*, [w:] J.L. Pyka, M. Dubicka, A. Szczepankiewicz-Szmyrka, M. Sobik, M. Błaś (red.), *Man and climate in the 20th century*, Studia Geograficzne, Uniwersytet Wrocławski, 75, 504–527.
- Elliott W.P., 1995, *On detecting long-term changes in atmospheric moisture*, Climate Change, 31, 349–367.
- Głowicki B., 1970a, *Frekwencja klas wilgotności względnej we Wrocławiu w 1961 r.*, Acta Universitatis Wratislaviensis, Prace Obserwatorium Meteorologicznego Wrocław, 130(16), 115–120.
- Głowicki B., 1970b, *Przebieg niedosytu wilgotności we Wrocławiu w 1961r.*, Acta Universitatis Wratislaviensis, Prace Obserwatorium Meteorologicznego Wrocław, 130(16), 121–127.

- Gluza A., Kaszewski B., 1984, *Zróżnicowanie temperatury i wilgotności względnej powietrza w Lublinie*, [w:] *Klimat i Bioklimat Miast, Materiały I Ogólnopolskiej Konferencji*, Łódź, 22–24 listopada 1984, 107–114.
- Groisman P. Ya., Karl T.R., Easterling D.R., Knight R.W., Jamason P.F., Hennessy K.J., Suppiah R., Page C.M., Wibig J., Fortuniak K., Razuvaev V.N., Douglas A., Førland E., Zhai P.-M., 1999, *Changes in the probability of heavy precipitation: Important indicators of climatic change*, *Climatic Change*, 42(1), 243–283.
- Gumiński R., 1927, *Wilgotność powietrza w Polsce (wahania roczne i rozkład geograficzny)*, *Prace Meteorologiczne i Hydrograficzne*, 3, 1–71.
- Hohendorf E., 1955, *Miesięczne i roczne sumy niedosytów wilgotności powietrza w Polsce*, *Prace PIHM*, 41, 1–79.
- Hohendorf E., 1960, *Rozmieszczenie średnich wieloletnich niedosytów wilgotności powietrza w głównych porach roku w Polsce*, *Wiadomości Instytutu Melioracji*, 1(3), 8–23.
- JCOMM Ship Observation Team, 2015, *Recommended algorithms for the computation of marine meteorological variables*. Geneva, Switzerland, Joint Technical Commission for Oceanography and Marine Meteorology (JCOMM), 21pp. (JCOMM-TR-063), DOI: 10.25607/obp/1.
- Kłysik K., 1985, *Wpływ struktury termiczno-wilgotnościowej przyziemnych warstw powietrza na klimat lokalny w wybranych warunkach terenowych*, *Acta Geographica Lodziensia* 49, 1–119.
- Kotońska B., 1974, *Wilgotność powietrza w Poznaniu*, *Badania Fizjograficzne nad Polską Zachodnią*, Seria A: Geografia Fizyczna, 27, 71–87.
- Manabe S., Wetherald R.T., 1967, *Thermal equilibrium of the atmosphere with a given distribution of relative humidity*, *Journal of Atmospheric Sciences*, 24(3), 241–258.
- Michna E., 1972, *O wilgotności względnej powietrza w Polsce*, *Przegląd Geofizyczny*, 17(1), 3–14.
- Młostek E., Sobik M., 1984, *Ustovija vlažnosti vozduha w gorode v izbrannykh sinoptičeskikh situacijach na primiere goroda Wrocławia*, [w:] *Mikroklimat i mezoklimat gorodskich aglomeracji*, Brno, 36–43.
- Niedźwiedz T., 1973, *Temperatura i wilgotność powietrza w warunkach rzeźby pogórskiej Karpat (na przykładzie doliny Raby koło Gaika-Brzezowej)*, *Zeszyty Naukowe UJ, Prace Geograficzne*, 32, 7–88.
- Obrębska-Starkłowa B., Kowanetz L., Zajac J., 1986a, *Wilgotność względna powietrza w Beskidach i na Podhalu*, *Zeszyty Naukowe UJ, Prace Geograficzne*, 64, 21–47.
- Obrębska-Starkłowa B., Kowanetz L., Zajac J., 1986b, *Ciśnienie pary wodnej w Beskidach i na Podhalu*, *Zeszyty Naukowe UJ, Prace Geograficzne*, 67, 45–67.
- Okoniewska M., Szumińska D., 2020, *Changes in Potential Evaporation in the years 1952–2018 in North-Western Poland in terms of the impact of climatic changes on hydrological and hydrochemical conditions*, *Water*, 12, 877, DOI: 10.3390/w12030877.
- Peixoto J. P., Oort A. H., 1996, *The climatology of relative humidity in the atmosphere*, *Journal of Climate*, 9, 3443–3463.
- Tarajkowska M., 1974, *Wpływ miasta na warunki wilgotnościowe powietrza na przykładzie Częstochowy*, *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Łódzkiego. Nauki Matematyczno-Przyrodnicze*, Seria II, 63, 43–56.

- Wibig J., Piotrowski P., 2018, *Impact of the air temperature and atmospheric circulation on extreme precipitation in Poland*, International Journal of Climatology, 38, 4533–4549.
- Wierzbicki Z., 1959a, *Niedosyt wilgotności powietrza w Polsce*, Acta Geographica Polonica, 7(3/4), 430–440.
- Wierzbicki Z., 1959b, *O niedosycie wilgotności powietrza w Polsce*, Annales UMCS, sec. B, 14(1), 1–45.
- Wierzbicki Z., 1960, *Niedosyt wilgotności powietrza w Polsce w latach 1949–58*, Prace PIHM, 57, 24–48.
- Willett K.M., Dunn R.J.H., Thorne P.W., Bell S., de Podesta M., Parker D.E., Jones P.D., Williams C.N., 2014, *HadISDH land surface multi-variable humidity and temperature record for climate monitoring*, Climate in the Past, 10, 1983–2006, DOI: 10.5194/cp-10-1983-2014.
- Willett K.M., Jones P.D., Gillett N.P., Thorne P.W., 2008, *Recent changes in Surface humidity: development of HadCRUH dataset*, Journal of Climate, 21, 5364–5382. DOI: 10.1175/2008JCLI2274.1.
- Wypych A., 2008, *Niedosyt wilgotności powietrza miarą zmienności warunków wilgotnościowych w Krakowie*, Acta Agrophysica, 12(1), 277–288.
- Wypych A., 2010, *Twentieth century variability of surface humidity as the climate change indicator in Kraków (Southern Poland)*, Theoretical and Applied Climatology, 101, 475–482.
- Wypych A., 2021, *Air humidity change*, [w:] M. Falarz (red.), *Climate change in Poland. Past, present, future*, Springer Nature Switzerland AG, 331–348, DOI: 10.1007/978-3-030-70328-8.

Joanna Wibig
Zakład Meteorologii i Klimatologii Uniwersytet Łódzki
ul. Narutowicza 88, 90–139 Łódź
joanna.wibig@geo.uni.lodz.pl
ORCID: 0000-0002-8560-0325

Ewelina Krawczyk
Szkoła Doktorska Nauk Ścisłych i Przyrodniczych
Uniwersytet Łódzki
ul. Banacha 12/16, 90–237 Łódź
ewelina.krawczyk@edu.uni.lodz.pl
ORCID: 0000-0003-4893-0699

