

Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska nr 66, 2014: 393–409
(Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. 66, 2014)

Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences No 66, 2014: 393–409
(Sci. Rev. Eng. Env. Sci. 66, 2014)

**Joanna USCKA-KOWALKOWSKA¹, Rajmund PRZYBYŁAK¹,
Mieczysław KUNZ², Rafał MASZEWSKI¹, Andrzej ARAŻNY¹,
Marek KEJNA¹**

¹Katedra Meteorologii i Klimatologii, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu
Department of Meteorology and Climatology, Nicolaus Copernicus University in Toruń

²Katedra Geomatyki i Kartografii, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu
Department of Geomatics and Cartography, Nicolaus Copernicus University in Toruń

Zróżnicowanie wilgotności powietrza na terenie Torunia w 2012 roku

Diversity of air humidity in the area of Toruń in 2012

Słowa kluczowe: wilgotność względna, ciśnienie pary wodnej, klimat miasta, Toruń

Key words: relative humidity, water vapour pressure, urban climate, Toruń

Wstęp

Miasta są obszarami charakteryzującymi się dużym zróżnicowaniem powierzchni czynnej, co skutkuje również dużym zróżnicowaniem warunków topoklimatycznych, w tym wilgotności powietrza. Problem ten przeanalizowano na przykładzie Torunia, miasta o powierzchni niespełna 116 km², zamieszkiwanego przez około 200 tys. mieszkańców. Przepływająca równoleżnikowo rzeka Wisła dzieli miasto na dwie nierównej

wielkości części. W obszarze miejskim Torunia można wyróżnić wszystkie podstawowe formy użytkowania terenu: od obszarów gęsto zabudowanego ścisłego centrum, poprzez zabudowę blokową, jednorodziną, przemysłową czy mieszaną, tereny przemysłowo-budowlane, drogowo-kolejowe, piaszczyste i zwirowe, aż po obszary porośnięte zielenią, a w tym wysoką roślinnością lasów miejskich (Kunz i inni, 2012). Pociąga to za sobą duże zróżnicowanie przestrzenne poszczególnych elementów meteorologicznych. Tereny miejskie charakteryzują się wyższą temperaturą powietrza w stosunku do obszarów otaczających (miejska wyspa ciepła), mniejszą prędkością i zmodyfikowanym kierunkiem

Praca powstała w ramach projektu N N306 723040 finansowanego ze środków Narodowego Centrum Nauki w latach 2011–2014.

wiatru, mniejszym dopływem bezpośredniego promieniowania słonecznego (w tym szczególnie najkrótszej jego części), zmianą składu chemicznego powietrza (czyli jego zanieczyszczeniem) oraz zmianą wilgotności powietrza.

Wpływ miasta na każdy z przedstawionych elementów meteorologicznych był przedmiotem badań zarówno w Polsce, jak i na świecie. Zagadnienie modyfikacji pola wilgotności na obszarze miejskim było podejmowane nieco rzadziej w porównaniu z innymi elementami meteorologicznymi. W Polsce badania takie prowadzono m.in. w Łodzi (Fortuniak, 2003, Fortuniak i inni, 2006, Podstawczyńska, Pawlak, 2006, Fortuniak i Kłysik, 2008), Krakowie (Lewińska, 1991, Lewińska, 2000), Warszawie (Stopa-Boryczka, 1992a i b, Adamczyk, 2011), Bydgoszczy (Dudek i inni, 2008), Poznaniu (Łukasiewicz, 2005) i Lublinie (Gluza, Kaszewski, 1984). Na świecie zagadnienie wpływu miasta na wilgotność powietrza podejmowali m.in. Hage (1975), Ackerman (1987), Jáuregui, Tejada (1997), Holmer, Eliasson (1999), Unger (1999), Mayer i inni (2003), Kuttler i inni (2007).

W zależności od sposobu wyrażenia wilgotności powietrza miasto może jawić się jako obszar suchszy lub wilgotniejszy od otoczenia. W związku z tym, do opracowania zagadnienia wpływu miasta na pole wilgotności wybrano dwie jej charakterystyki: wilgotność względną (%) i ciśnienie pary wodnej (hPa). Wilgotność względną jest to stosunek aktualnego ciśnienia pary wodnej do jej ciśnienia maksymalnego w danej temperaturze. Parametr ten informuje więc o stopniu nasycenia powietrza parą

wodną. Ciśnienie pary wodnej jest cząstkowym ciśnieniem, jakie wywiera para wodna znajdująca się w powietrzu. Odzwierciedla więc ono aktualną zawartość pary wodnej w powietrzu.

W świetle wcześniejszych badań obszar miejski charakteryzuje się mniejszą wilgotnością względną. Jest to spowodowane występowaniem podwyższonej temperatury powietrza w mieście, jak również szybszym spływem wód opadowych do sieci kanalizacyjnej, prowadzącym do ograniczenia parowania z podłoża – powierzchni horyzontalnych, np. ulic, placów itp. (Lewińska, 1991). Przykłady badań stwierdzających obniżenie wilgotności względnej w różnych miastach Polski i świata podaje Lewińska (2000). Inne charakterystyki wilgotności, takie jak np. ciśnienie pary wodnej, wskazują miasto na ogół jako obszar o podwyższonej wilgotności (Lewińska, 2000), choć w tym przypadku czynniki lokalne mogą powodować zakłócenie takiego obrazu. Tu przyczyną zwiększenia wilgotności w centrum miasta można upatrywać w dostarczaniu do miasta dodatkowych ilości pary wodnej pochodzenia antropogenicznego (np. spalanie paliw, zabiegi hydrotechniczne zmierzające do doprowadzenia wody do miasta), zwiększonych sumach opadów w mieście, zwiększonym parowaniu z powiększonej zabudową powierzchni podłoża (ściany domów itp.), a także mniejszej niż naturalna jego przepuszczalności oraz wzmożonej sublimacji pokrywy śnieżnej w warunkach wyższej temperatury w mieście w stosunku do terenów pozamiejskich (Bornstein, Oke 1979, za Lewińska, 2000, Fortuniak, 2003).

W zależności od sposobu użytkowania powierzchni miasta, rzeźby terenu obszaru przez nie zajmowanego, obecności zbiorników wodnych itp. rzeczywisty wpływ miasta na pole wilgotności jest zjawiskiem skomplikowanym, co powoduje, że rozkład przestrzenny tego parametru może wyglądać różnie. Celem opracowania jest przedstawienie zróżnicowania pola wilgotności powietrza w Toruniu w świetle różnych jej wskaźników oraz wskazanie warunków meteorologicznych (zachmurzenie i prędkość wiatru) wpływających na wielkość tego zróżnicowania.

Metodyka badań

Opracowanie wykonano na podstawie pomiarów wilgotności powietrza prowadzonych na terenie Torunia w 2012 roku. Punkty pomiarowe zostały zlokalizowane w częściach miasta różniących się sposobem użytkowania terenu. Do opracowania wybrano pięć punktów, z których cztery zostały założone na potrzeby przedstawianych badań, a jeden to stacja Hydrologiczno-Meteorologiczna IMGW Toruń-Wrzosy – WRZ (tab. 1, rys. 1). Punkt LO1 jest położony na terenie średniowiecznej starówki i reprezentuje obszar ścisłego centrum miasta. Punkt WRZ znajduje się w północnej części miasta, w sąsiedztwie zabudowy jednorodzinnej. Podobne otoczenie charakteryzuje punkt BOR, jednakże znajduje się on w lewobrzeżnej części miasta (jako jedyny spośród pięciu wybranych punktów). Kolejne stanowisko pomiarowe (LBI) zostało zlokalizowane w obszarze leśnym, na wschodzie mia-

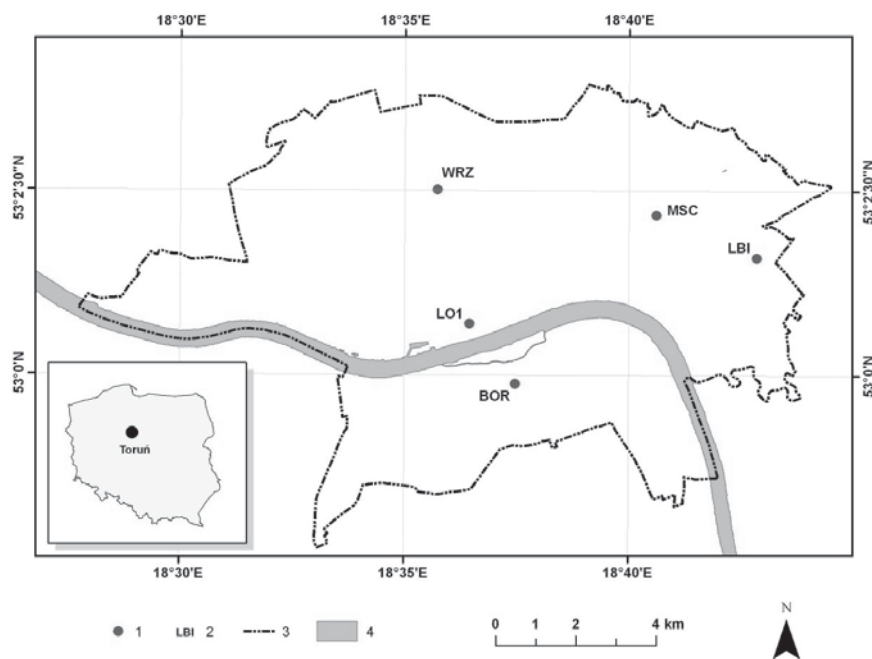
sta. Tereny przemysłowe reprezentuje punkt – MSC.

Pomiary były wykonywane w sposób automatyczny co godzinę za pomocą trzech rodzajów stacji: Vaisala, Madge-Tech i Davis (tab. 1). Mierzono wilgotność względną i temperaturę powietrza, natomiast ciśnienie pary wodnej zostało wyliczone za pomocą programu Bioklima 2.6 (Błażejczyk, Błażejczyk, 2013). Średnie wartości dobowe dla obu charakterystyk wilgotności dla wszystkich punktów pomiarowych obliczono jako średnie arytmetyczne z 24 pomiarów.

W opracowaniu przedstawiono przebiegi roczne charakterystyk wilgotności (wilgotności względnej w % i ciśnienia pary wodnej w hPa) oraz ich różnic między obszarami o różnym sposobie zagospodarowania terenu. Zbadano także wpływ warunków meteorologicznych (zachmurzenia i prędkości wiatru) na zróżnicowanie wilgotności na terenie miasta. Ważnym elementem pracy jest analiza wpływu cyrkulacji atmosferycznej na zróżnicowanie wilgotności powietrza na obszarze miasta. Posłużono się typami cyrkulacji według klasyfikacji T. Niedźwiedzia (1981) z „Katalogu cyrkulacji atmosferycznej dla Regionu Bydgosko-Toruńskiego” (Przybylak, Maszewski, 2009, 2013). W klasyfikacji tej określono rodzaj ośrodka barycznego (antycyklon – indeks „a”, cyklon – indeks „c”) oraz kierunek adwekcji według róży 8-kierunkowej. Ponadto wyróżniono centrum antycyklonu (Ca), klin antycyklonalny (Ka), centrum cyklonu (Cc) oraz bruzdę cyklonalną (Bc), natomiast pozostałe sytuacje określano jako „X”. Przedstawiono częstość występowania poszczególnych typów cyrkulacji oraz ich wpływ na wilgotność w mieście.

TABELA 1. Charakterystyka punktów pomiarowych
TABLE 1. Overview of the measurement sites

Punkt pomiarowy Site ID	WRZ	MSC	LBI	LO1	BOR	
Część miasta Part of town	prawobrzeżna				lewobrzeżna	
Otoczenie Surroundings	zabudowa jednorodzinna	tereny przemysłowe	obszar leśny	centrum miasta	zabudowa jednorodzinna	
Współrzędne/ /Coordinates WGS-84 [DD MM SS,SS]	ϕ [N]	53 02 31,01	53 02 10,47	53 01 35,75	53 00 41,94	52 59 53,07
	λ [E]	18 35 44,81	18 40 36,86	18 42 51,11	18 36 27,06	18 37 28,71
Wysokość (m n.p.m.) Elevation (m a.s.l.)	69,0	66,7	66,0	49,0	47,5	
Przyrząd pomiarowy Instrument	Vaisala	MadgeTech	MadgeTech	Davis	Davis	



RYSUNEK 1. Lokalizacja wykorzystanych w opracowaniu punktów pomiarów wilgotności powietrza w Toruniu w 2012 roku: 1 – punkt pomiarowy, 2 – oznaczenie punktu pomiarowego, 3 – granice administracyjne miasta, 4 – rzeka Wisła

FIGURE 1. Location of the air humidity measurement sites in Toruń selected for the study in 2012: 1 – measurement site, 2 – site ID, 3 – administrative boundaries of the city, 4 – the Vistula River

Wyniki

W warunkach klimatycznych Polski lata ciepłe przeplatają się z chłodnymi, a wilgotne z suchymi. Dzieje się tak na skutek napływu różnorodnych mas powietrza, sterowanego położeniem względem obszaru Polski głównych centrów barycznych. W badanym 2012 roku Toruń nieco częściej znajdował się w zasięgu układów wysokiego ciśnienia w porównaniu z układami niskiego ciśnienia. Dominował napływ powietrza z sektora zachodniego.

Na podstawie danych ze stacji IMGW Toruń-Wrzosy w porównaniu do okresu 1971–2000 rok 2012 był średnio cieplejszy o 0,4°C (tab. 2). W przebiegu rocznym aż 8 miesięcy badanego roku było cieplejszych, a jedynie 4 chłodniejsze niż średnio w okresie wieloletnim. Spośród miesięcy cieplejszych na uwagę

zasługują marzec i listopad (cieplejsze o 2,4°C w stosunku do wartości wieloletnich dla tych miesięcy). W przypadku miesięcy chłodniejszych wyraźnie zaznacza się luty (chłodniejszy o 4,6°C w porównaniu do średniej wieloletniej) i grudzień (chłodniejszy o 2,1°C).

W 2012 roku wilgotność względna była nieco niższa w porównaniu do okresu wieloletniego (tab. 2). Szczególnie duże różnice zaznaczyły się na wiosnę, kiedy to w każdym miesiącu wilgotność względna była znacznie niższa niż średnio (o 5 do 7%) oraz we wrześniu (o 3%). W przypadku ciśnienia pary wodnej badany rok był nieco wilgotniejszy (o 0,2 hPa). Wyraźnie niższe ciśnienie pary wodnej w porównaniu do okresu wieloletniego wystąpiło w lutym i grudniu (odpowiednio o 1,1 i 0,9 hPa), zaś wyższe w listopadzie (o 1,1 hPa) (tab. 2).

TABELA 2. Przebieg roczny temperatury i wilgotności powietrza w Toruniu (IMGW Wrzosy) w 2012 roku (a) na tle okresu 1971–2000 (b)

TABLE 2. Annual course of air temperature and humidity in Toruń (IMGW Wrzosy) in 2012 (a) and in the years 1971–2000 (b)

Okres Period	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok Year
Temperatura powietrza/Air temperature (°C)													
a	-0,4	-5,4	5,1	9,2	15,1	15,8	19,4	18,6	14,0	8,2	5,5	-2,1	8,6
b	-1,6	-0,8	2,7	7,6	13,3	16,3	18,0	17,8	13,1	8,3	3,1	0,0	8,2
a-b	1,2	-4,6	2,4	1,6	1,8	-0,5	1,4	0,8	0,9	-0,1	2,4	-2,1	0,4
Wilgotność względna/Relative humidity (%)													
a	89	84	74	65	63	74	75	72	77	85	89	88	78
b	87	84	79	72	69	72	73	73	80	84	88	89	79
a-b	2	0	-5	-7	-6	2	2	-1	-3	1	1	-1	-1
Ciśnienie pary wodnej/Water vapour pressure (hPa)													
a	5,7	4,1	6,6	7,3	10,4	13,3	16,6	14,8	12,1	9,4	8,1	4,8	9,4
b	5,1	5,2	6,0	7,5	10,4	13,0	14,6	14,4	12,0	9,4	7,0	5,7	9,2
a-b	0,6	-1,1	0,6	-0,2	0,0	0,3	2,0	0,4	0,1	0,0	1,1	-0,9	0,2

W zależności od sposobu użytkowania terenu na obszarze miasta zmienia się zarówno wilgotność względna, jak i ciśnienie pary wodnej (tab. 3).

W przypadku wilgotności względnej jej wartość zależy nie tylko od zawartości w powietrzu pary wodnej, ale również od temperatury. Średnio w roku najmniejszą wilgotność względną stwierdzono w centrum miasta w punkcie LO1 (75%), natomiast największą w lesie na wschodzie miasta w punkcie LBI (82%). Mała wilgotność względna w punkcie LO1 była spowodowana podwyższoną temperaturą panującą w centrum miasta, natomiast do przyczyn wystąpienia maksimum wilgotności względnej w punkcie LBI można zaliczyć obniżoną temperaturę, jak i większy zapas wilgoci zgromadzonej w obszarze leśnym. Na pozostałych punktach znajdujących się w otoczeniu domków jednorodzinnych (WRZ, BOR) oraz na terenach przemysłowych (MSC) wilgotność względna wynosiła od 78 do 79%.

W przypadku ciśnienia pary wodnej średnio w roku największe wartości wystąpiły w centrum miasta (LO1) oraz w obszarze leśnym (LBI) – po 9,8 hPa. W pierwszym przypadku (LO1) maksimum może być wywołane antropogenicznym dopływem pary wodnej w ścisłym centrum miasta oraz zwiększonym parowaniem z rzeki Wisły przepływającej obok starówki. W literaturze wskazuje się też na mniejsze przewietrzanie obszaru gęsto zabudowanego, co powoduje zatrzymywanie wilgoci (Stopa-Boryczka, 1992a). W przypadku punktu LBI zwiększone ciśnienie pary wodnej może być związane z większą ewapotranspiracją w obszarze leśnym. Zdecydowanie najsuchsze są północne obrzeża miasta – WRZ (9,4 hPa) – brak tu istotnych źródeł pary wodnej, a gleby są piaszczyste i przez większą część roku silnie prze-

ślowych (MSC) wilgotność względna wynosiła od 78 do 79%. W przypadku ciśnienia pary wodnej średnio w roku największe wartości wystąpiły w centrum miasta (LO1) oraz w obszarze leśnym (LBI) – po 9,8 hPa. W pierwszym przypadku (LO1) maksimum może być wywołane antropogenicznym dopływem pary wodnej w ścisłym centrum miasta oraz zwiększonym parowaniem z rzeki Wisły przepływającej obok starówki. W literaturze wskazuje się też na mniejsze przewietrzanie obszaru gęsto zabudowanego, co powoduje zatrzymywanie wilgoci (Stopa-Boryczka, 1992a). W przypadku punktu LBI zwiększone ciśnienie pary wodnej może być związane z większą ewapotranspiracją w obszarze leśnym. Zdecydowanie najsuchsze są północne obrzeża miasta – WRZ (9,4 hPa) – brak tu istotnych źródeł pary wodnej, a gleby są piaszczyste i przez większą część roku silnie prze-

TABELA 3. Średnie miesięczne i roczne wartości wilgotności względnej – f (%) i ciśnienia pary wodnej – e (hPa) w wybranych punktach Torunia w 2012 roku

TABLE 3. Mean monthly and yearly values of relative humidity – f (%) and water vapour pressure – e (hPa) in selected sites in Toruń in 2012

Punkt pomiarowy Measurement site	Parametr Parameter	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok Year
LO1	f	86	82	72	62	59	71	70	68	74	83	90	89	75
	e	5,8	4,3	6,9	7,7	10,8	13,7	17,1	15,6	12,7	9,8	8,5	5,1	9,8
WRZ	f	89	84	74	65	63	74	75	72	77	85	89	88	78
	e	5,7	4,1	6,6	7,3	10,4	13,3	16,6	14,8	12,1	9,4	8,1	4,8	9,4
LBI	f	92	88	77	69	66	77	79	75	80	90	95	95	82
	e	5,7	4,2	6,7	7,7	10,8	13,7	17,4	15,4	12,4	9,8	8,6	5,1	9,8
MSC	f	91	86	75	65	61	74	75	71	77	87	94	93	79
	e	5,7	4,2	6,7	7,6	10,6	13,6	17,1	15,3	12,4	9,8	8,6	5,1	9,7
BOR	f	87	83	73	65	62	73	75	72	78	86	91	89	78
	e	5,7	4,2	6,7	7,5	10,7	13,4	17,0	15,4	12,3	9,5	8,3	5,0	9,6

suszone. Jest to teren o luźnej zabudowie, co sprzyja jego przewietrzaniu, i w konsekwencji mniejszej zawartości pary wodnej w powietrzu.

Bez względu na położenie punktu pomiarowego przebieg roczny zarówno wilgotności względnej, jak i ciśnienia pary wodnej, wykazuje zbliżone prawidłowości. W przypadku wilgotności względnej, jej minimum w przebiegu rocznym w 2012 roku przypadło na maj, a maksimum na listopad (tab. 3). Majowe minimum jest charakterystyczne także dla okresu wieloletniego i jest spowodowane stosunkowo wysoką temperaturą w tym miesiącu, a jednocześnie mniejszymi opadami w porównaniu z okresem letnim. Maksimum przypadające w okresie chłodnym – w listopadzie, a na niektórych stacjach również w grudniu lub styczniu spowodowane jest niską temperaturą powietrza w tym czasie. Najniższe minimum wystąpiło w centrum miasta (LO1), natomiast najwyższe w lasach na wschodzie miasta (LBI). Jeśli chodzi o maksimum, to jego najwyższe wartości wystąpiły na obsza-

rze leśnym (LBI), a najniższe na północy miasta (WRZ) – tabela 3.

Ciśnienie pary wodnej, podobnie jak wilgotność względna, ma również charakterystyczny przebieg roczny na wszystkich analizowanych stanowiskach. Maksimum przypada na lipiec, kiedy to występuje duże parowanie, zarówno dzięki wysokiej temperaturze jak i dużemu zapasowi wody w glebie, gdyż lipiec jest również miesiącem o najwyższych opadach w ciągu roku. Minimum w 2012 roku przypadło na luty, który był również najchłodniejszym miesiącem. Najniższe minimum wystąpiło na północy miasta (WRZ), natomiast najwyższe w centrum miasta (LO1). Jeśli chodzi o maksimum, to jego najwyższe wartości zostały zaobserwowane na obszarze leśnym (LBI), a najniższe na północy miasta (WRZ) – tabela 3.

W tabeli 4 przedstawiono różnice między stacją śródmiejską (LO1) a pozostałymi stacjami. W przypadku wartości rocznych obserwowane są ujemne odchylenia wilgotności względnej, wynoszące od 2 (w porównaniu z WRZ

TABLE 4. Różnice wilgotności powietrza (f w % i e w hPa) pomiędzy wybranymi punktami Torunia w 2012 roku

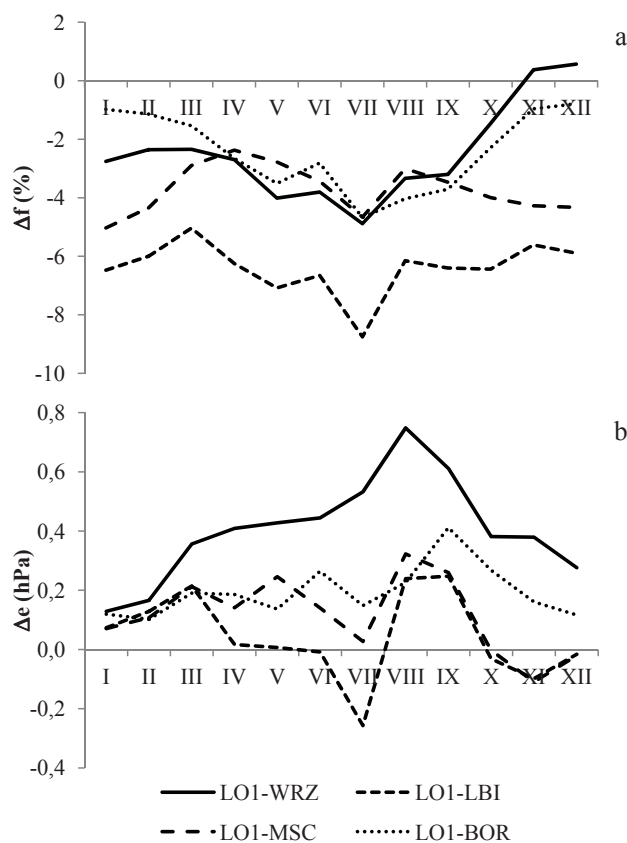
TABLE 4. Differences in the air humidity (f in % and e in hPa) between selected sites in Toruń in 2012

Punkty pomiarowe Measurement sites	Parametr Parameter	III–V	VI–VIII	IX–XI	XII–II	Rok Year
LO1-WRZ	f	-3	-4	-1	-2	-2
	e	0,4	0,6	0,5	0,2	0,4
LO1-LBI	f	-6	-7	-6	-6	-6
	e	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0
LO1-MSK	f	-3	-4	-4	-5	-4
	e	0,2	0,2	0,0	0,1	0,1
LO1-BOR	f	-3	-4	-2	-1	-2
	e	0,2	0,2	0,3	0,1	0,2

i BOR) do 6% i dodatnie różnice ciśnienia pary wodnej (do 0,4 hPa). We wszystkich porach roku centrum charakteryzuje się mniejszą wilgotnością względną w stosunku do pozostałych stacji, jednakże szczególnie duże różnice są widoczne latem. W przypadku ciśnienia pary wodnej różnice zawsze są dodatnie, jednak ich największe wartości mogą przypadać na różne pory roku w zależności od punktu pomiarowego (tab. 4).

W świetle średnich wartości miesięcznych wilgotności względnej centrum miasta jest suchsze w porówna-

niu z innymi punktami przez cały rok (rys. 2a). Odchylenia dodatnie wystąpiły jedynie w listopadzie i grudniu w porównaniu z punktem WRZ. W przypadku różnic między punktami LO1 w stosunku do WRZ i BOR ich największe wartości widoczne są w lipcu, a najmniejsze pod koniec roku (listopad, grudzień). Dla dwóch pozostałych punktów (LBI i MSC) również widać zwiększenie różnic w stosunku do stacji LO1 w lipcu, ale drugie maksimum (w przypadku punktu MSC pierwszorzędne) występuje w okresie jesienno-zimowym.

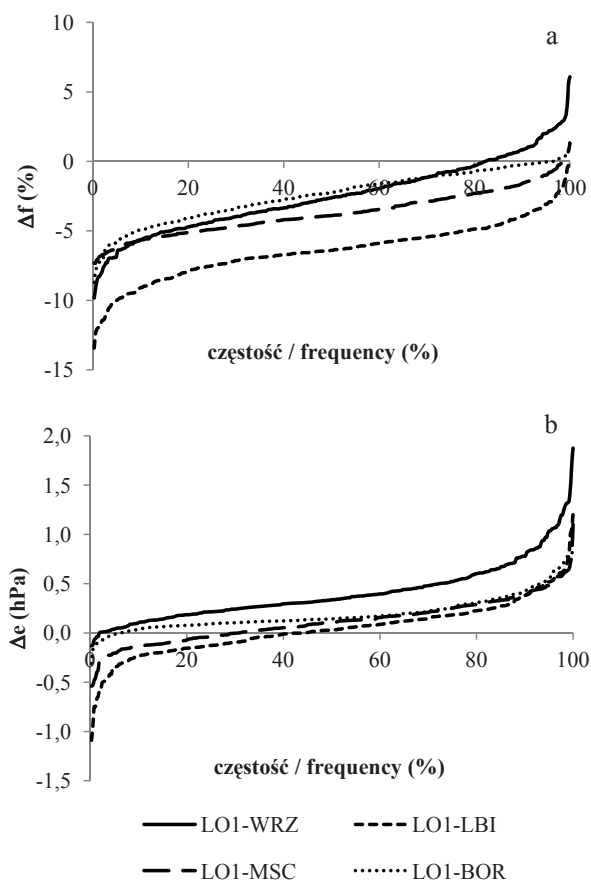


RYSUNEK 2. Przebieg roczny różnic średnich miesięcznych wartości wilgotności względnej – f (a) i ciśnienia pary wodnej – e (b) między wybranymi punktami Torunia w 2012 roku
 FIGURE 2. Annual course of the differences in mean monthly values of relative humidity – f (a) and water vapour pressure – e (b) between selected sites in Toruń in 2012

Przebieg roczny różnic średnich miesięcznych wartości ciśnienia pary wodnej między centrum miasta i wybranymi punktami jest bardziej złożony w porównaniu do analogicznego przebiegu różnic wilgotności względnej (rys. 2b). W przypadku punktów WRZ i BOR, wyższe ciśnienie pary wodnej występuje w centrum miasta (szczególnie późnym latem i wczesną jesienią), natomiast minimum różnic przypada na zimę. Różnice ciśnienia pary wodnej między centrum miasta (LO1) a obszarem prze-

mysłowym na jego północy (MSC) i leśnym na wschodzie (LBI) są mniejsze od opisanych wcześniej. W okresie od października do grudnia, a w przypadku punktu LBI także w czerwcu i lipcu różnice są ujemne.

Skumulowane częstości różnic średnich dobowych obu badanych charakterystyk wilgotności w stosunku do centrum miasta (LO1) dla wszystkich wziętych do opracowania punktów przedstawia rysunek 3. W przypadku wilgotności względnej dla punktów LBI, MSC i BOR

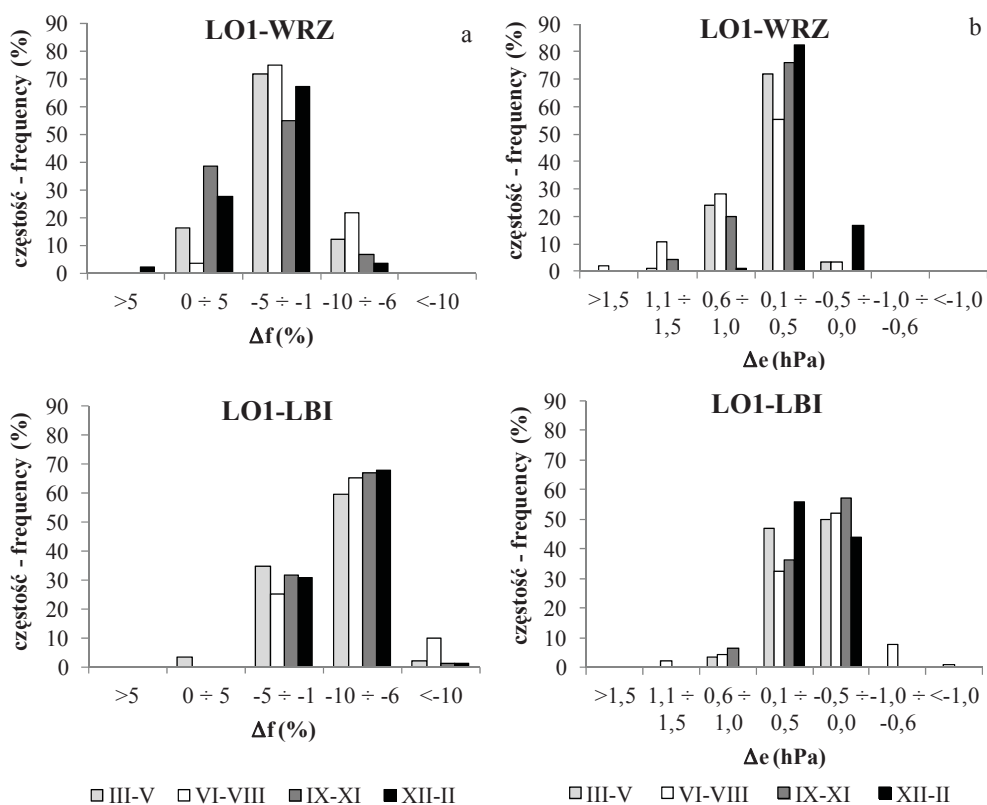


RYSUNEK 3. Skumulowana częstość względna różnic średnich dobowych wartości wilgotności względnej – f (a) i ciśnienia pary wodnej – e (b) pomiędzy wybranymi punktami Torunia w 2012 roku
 FIGURE 3. Cumulative relative frequency of the differences in mean diurnal values of relative humidity – f (a) and water vapour pressure – e (b) between selected sites in Toruń in 2012

większe jej wartości wystąpiły niemal w 100% w porównaniu do centrum miasta. Dla stacji WRZ ponad 80% przypadków stanowią różnice świadczące o większej wilgotności w tym punkcie (rys. 3a). Dla ciśnienia pary wodnej sytuacja jest inna, tzn. większą wilgotnością charakteryzuje się centrum miasta, na co wskazuje od około 60% dni przy porównaniu ze stacją LBI do ponad 98% dla stacji WRZ (rys. 3b).

Dla dwóch punktów, z których jeden jest zlokalizowany w północnej części miasta w otoczeniu o zabudowie

jednorodzinnej (WRZ), natomiast drugi w kompleksie leśnym na wschodzie miasta (LBI), przedstawiono częstość rozdzielonych różnic średnich dobowych wartości wilgotności względnej i ciśnienia pary wodnej w stosunku do centrum miasta (LO1) w poszczególnych porach roku (rys. 4). W świetle wilgotności względnej centrum miasta jest obszarem suchszym w stosunku do jego obrzeży. W przypadku badanych punktów szczególnie uwidacznia się to w relacji z obszarem leśnym na wschodzie miasta, gdzie maksimum częstości różnic przy-



RYSUNEK 4. Częstość względna różnic średnich dobowych wartości wilgotności względnej – f (a) i ciśnienia pary wodnej – e (b) pomiędzy wybranymi punktami Torunia w 2012 roku

FIGURE 4. Relative frequency of differences in mean diurnal values of relative humidity – f (a) and water vapour pressure – e (b) between selected sites in Toruń in 2012

padło na klasę od -10 do -6% . Inaczej wygląda sytuacja, gdy analizie zostaną poddane różnice wielkości ciśnienia pary wodnej. W tym przypadku centrum miasta jest raczej obszarem wilgotniejszym. Uwidacznia się to dla różnicy LO1-WRZ. W przypadku porównania punktów LO1 z LBI różnice dodatnie i ujemne mają zbliżony udział.

Rozkład pola wilgotności powietrza w świetle różnych jej wskaźników kształtowany jest w znacznym stopniu poprzez występujące układy baryczne. W badanym 2012 roku obszar Torunia był nieco częściej w zasięgu układów antycyklonalnych w porównaniu z układami cyklonalnymi i przeważał napływ powietrza z sektora zachodniego (tab. 5). Spośród pór roku najwyraźniejsza prze-

waga typów cyrkulacji antycyklonalnych wystąpiła latem, niewielka wiosną i jesienią, natomiast zimą badany obszar był zdecydowanie częściej w zasięgu układów cyklonalnych.

Istotnym problemem podjętym w opracowaniu jest określenie wpływu poszczególnych rodzajów sytuacji synoptycznych na zróżnicowanie wilgotności powietrza na obszarze miasta. Problem ten został zbadany dla dwóch par różnic: LO1-WRZ oraz LO1-LBI.

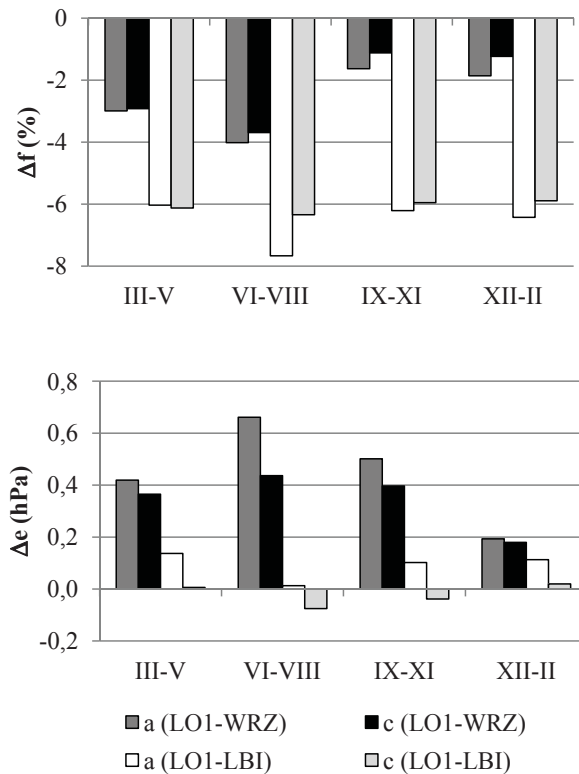
W przypadku wilgotności względnej (rys. 5) obserwuje się nieco większe różnice, gdy badany obszar był w zasięgu antycyklonu. Szczególnie wyraźne zwiększenie zróżnicowania przy poszczególnych rodzajach układów barycznych uwidacznia się jesienią i zimą (LO1-WRZ) oraz latem (LO1-LBI). Warto również zwrócić uwagę, że w świetle wilgotności względnej, niezależnie od rodzaju występującego ośrodka barycznego, centrum miasta jest zawsze suchsze od wybranych do porównania punktów leżących na jego obrzeżu.

Różnice ciśnienia pary wodnej (rys. 5), podobnie jak wilgotności względnej, osiągają większe wartości przy typach cyrkulacji antycyklonalnych w porównaniu z cyklonalnymi. W przypadku relacji LO1-WRZ największe różnice występują latem i jesienią, wiosną są nieco mniejsze, natomiast najmniejsze różnice przypadają na zimę. O wiele bardziej skomplikowane są relacje różnic ciśnienia pary wodnej między stacjami LO1 i LBI. Wiosną, jesienią i zimą większe różnice występowały, gdy badany obszar znajdował się w zasięgu antycyklonu. Latem i jesienią, gdy zalegają układy cyklonalne, różnice są ujemne, co oznacza, że obszar miasta w świetle ciśnienia pary

TABELA 5. Częstość występowania typów cyrkulacji (%) w Regionie Bydgosko-Toruńskim w 2012 roku (Przybylak, Maszewski, 2013)

TABLE 5. Frequency of occurrence of individual circulation types (%) in the Bydgoszcz-Toruń Region in 2012 (Przybylak, Maszewski, 2013)

Typ cyrkulacji Type of circulation	III–V	VI–VIII	IX–XI	XII–II
Na + NEa	9,8	4,3	0,0	4,4
Ea + SEa	5,4	6,5	2,2	17,6
Sa + SWa	9,8	6,5	20,9	3,3
Wa + Nwa	15,2	13,0	13,2	7,7
Ca + Ka	12,0	26,1	14,3	6,6
Nc + NEc	3,3	5,4	6,6	7,7
Ec + SEc	2,2	4,3	2,2	1,1
Sc + SWc	10,9	5,4	17,6	12,1
Wc + NWc	14,1	15,2	15,4	29,7
Cc + Bc	14,1	7,6	4,4	6,6
a	52,2	56,5	50,5	39,6
c	44,6	38,0	46,2	57,1



RYSUNEK 5. Różnice wilgotności względnej – Δf (%) i ciśnienia pary wodnej – Δe (hPa) między punktami pomiarowymi LO1 i WRZ oraz LO1 i LBI przy typach antycyklonalnych (a) i cyklonalnych (c) w Toruniu w 2012 roku

FIGURE 5. Differences in the relative humidity – Δf (%) and water vapour pressure – Δe (hPa) between LO1 and WRZ measurement sites and between LO1 and LBI for anticyclonic (a) and cyclonic (c) types in Toruń in 2012

wodnej jest wtedy suchszy. Latem następuje odwrócenie relacji wielkości różnic ciśnienia pary wodnej przy różnych układach barycznych, tzn. przy typach antycyklonalnych różnica jest mniejsza niż przy typach cyklonalnych.

Na zróżnicowanie wielkości wilgotności powietrza wpływają pozostałe elementy meteorologiczne. Różnice średnich dobowych wartości wilgotności względnej i ciśnienia pary wodnej dla punktów LO1 i WRZ zostały skorelowane ze średnimi dobowymi wartościami

prędkości wiatru i zachmurzenia ze stacji WRZ (stacja IMGW Toruń-Wrzosy) – tabela 6.

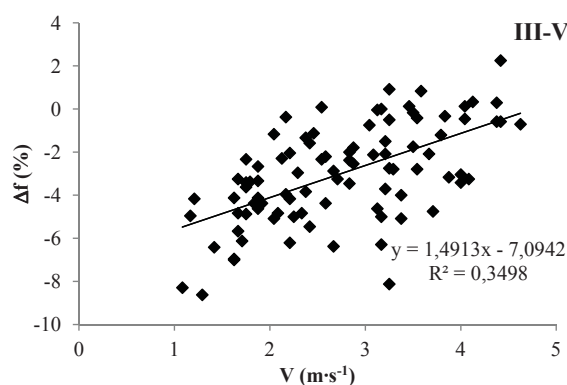
Znaleziono istotną statystycznie korelację wielkości różnic wilgotności względnej i prędkości wiatru dla wszystkich pór roku. Różnice te generalnie przyjmują wartości ujemne, więc dodatnia korelacja oznacza w tym przypadku, że im większa prędkość wiatru, tym mniejsza wielkość różnic (rys. 6). Przy słabym wietrze większe są różnice temperatury powietrza, a tym samym

TABELA 6. Współczynniki korelacji liniowej między różnicami średnich dobowych wartości wilgotności powietrza (e w hPa i f w %) między punktami pomiarowymi LO1 i WRZ a prędkością wiatru – V ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) i zachmurzeniem – C (skala 0–8) w Toruniu w 2012 roku

TABLE 6. Linear correlation coefficients between the differences in mean diurnal values of air humidity (e in hPa and f in %) between LO1 and WRZ measurement sites and the wind speed – V ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) and cloudiness – C (scale of 0–8) in Toruń in 2012

Elementy Elements	III–V	VI–VIII	IX–XI	XII–II
e – V	–0,19	–0,32	–0,13	0,00
f – V	0,59	0,47	0,46	0,40
e – C	–0,45	–0,63	–0,53	–0,36
f – C	0,13	0,05	0,08	–0,06

Wartości istotne statystycznie na poziomie co najmniej 0,05 zostały pogrubione/Statistically significant values at a level of at least 0.05 are shown in bold.



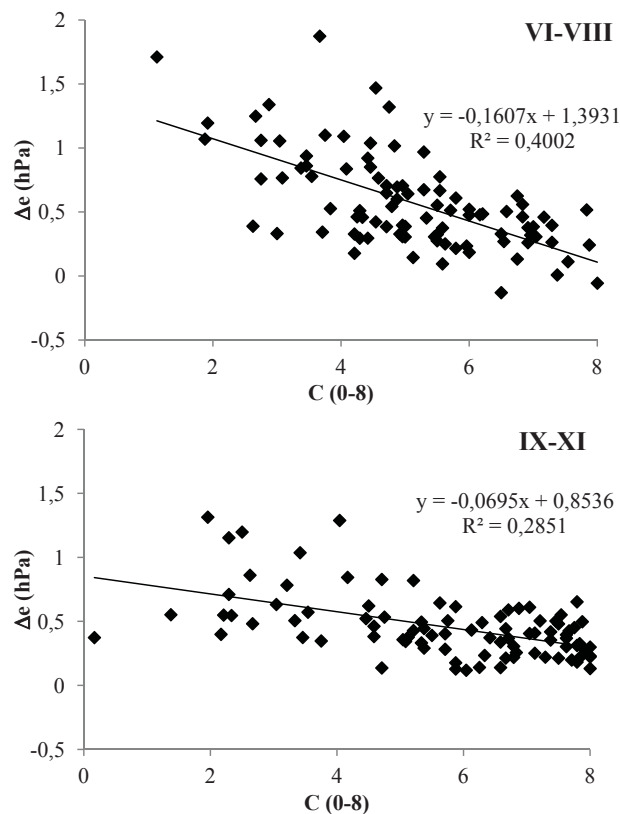
RYSUNEK 6. Zależność różnic średnich dobowych wartości wilgotności względnej powietrza (LO1-WRZ) i prędkości wiatru wiosną w 2012 roku

FIGURE 6. Correlation between the differences in mean diurnal values of relative humidity of air (LO1-WRZ) and the wind speed in the spring of 2012

wilgotności względnej, która z temperaturą jest bardzo silnie związana. Różnice ciśnienia pary wodnej wykazują korelację ujemną z prędkością wiatru, jednakże korelacja ta jest istotna statystycznie tylko latem.

Zachmurzenie wykazuje istotną statystycznie korelację z różnicami ciśnienia pary wodnej, natomiast z wil-

gotnością względną nie stwierdzono korelacji (tab. 6). Największa korelacja wielkości zachmurzenia i różnic ciśnienia pary wodnej wystąpiła latem i jesienią (rys. 7). W sytuacji dużego zachmurzenia zmniejszają się różnice temperatury i tym samym wielkości parowania. Powoduje to zmniejszenie różnic ciśnienia pary wodnej na obszarze Torunia.



RYSUNEK 7. Zależność różnic średnich dobowych wartości ciśnienia pary wodnej (LO1-WRZ) i zachmurzenia w wybranych porach 2012 roku
 FIGURE 7. Correlation between the differences in mean diurnal values of water vapour pressure (LO1-WRZ) and cloudiness in selected seasons of 2012

Podsumowanie i dyskusja wyników

W opracowaniu przedstawiono zagadnienie zróżnicowania pola wilgotności powietrza w Toruniu w 2012 roku. Do tego celu wykorzystano wyniki pomiarów z pięciu punktów usytuowanych w różnych częściach miasta. Wilgotność powietrza została przedstawiona poprzez dwie jej charakterystyki: wilgotność względną (%) i ciśnienie pary wodnej (hPa).

Uzyskane wyniki wskazują na duże zróżnicowanie wilgotności powietrza

w mieście zarówno w świetle wartości średnich rocznych, miesięcznych, jak i dobowych. W przypadku wilgotności względnej średnio w roku najmniejsza wartość wystąpiła w centrum miasta w punkcie LO1 (75%), natomiast największa w lesie, na wschodzie miasta, w punkcie LBI (82%). Podobne wyniki uzyskano także dla innych miast, gdzie były wykonywane tego typu badania, np. w Lublinie (Gluza i Kaszewski, 1984), Warszawie (Stopa-Boryczka, 1992a i b), Krakowie (Lewińska, 2000) i Bydgoszczy (Dudek i inni, 2008). W przypadku

ciśnienia pary wodnej średnio w roku największe wartości wystąpiły w centrum miasta (LO1) oraz obszarze leśnym (LBI) – po 9,8 hPa, natomiast najmniejsze na północy miasta w punkcie WRZ (9,4 hPa). W innych miastach różnice tego parametru między centrum a peryferiami miasta mogą przyjmować różne znaki. Podobne wyniki do przedstawianych w artykule uzyskano także dla Krakowa (Lewińska, 2000), natomiast odwrotne dla Warszawy (Stopa-Boryczka, 1992), Bydgoszczy (Dudek i inni, 2008), gdzie uzyskano dodatnią wartość różnicy niedosytu ciśnienia pary wodnej.

Jak podano wcześniej, w świetle wilgotności względnej centrum miasta jest obszarem suchszym w stosunku do jego obrzeży. W przypadku badanych punktów szczególnie uwidacznia się to w relacji z obszarem leśnym na wschodzie miasta (LO1-LBI), gdzie maksimum częstości różnic średnich wartości dobowych przypadło na klasę od –10 do –6%. Inaczej wygląda sytuacja, gdy analizie zostaną poddane analogiczne różnice wielkości ciśnienia pary wodnej. W tym przypadku centrum miasta jest raczej obszarem wilgotniejszym. Uwidacznia się to dla różnicy LO1-WRZ. W przypadku porównania punktów LO1 z LBI różnice dodatnie i ujemne mają zbliżony udział.

Zbadano także wpływ sytuacji synoptycznych na zróżnicowanie wilgotności powietrza na terenie miasta. W przypadku wilgotności względnej obserwuje się nieco większe jej różnice, gdy badany obszar był w zasięgu antycyklonu. Warto zauważyć, że niezależnie od rodzaju występującego ośrodka barycznego, w świetle wilgotności względnej, centrum miasta jest zawsze suchsze od wybranych do porównania punktów leżących na jego

obrzeżu. Różnice ciśnienia pary wodnej, podobnie jak wilgotności względnej, osiągają większe wartości przy typach cyrkulacji antycyklonalnych w porównaniu z cyklonalnymi, jedynie latem dla punktów LO1 i LBI następuje odwrócenie relacji wielkości różnic przy różnych układach barycznych, tzn. przy typach antycyklonalnych różnica jest mniejsza niż przy typach cyklonalnych. Dla tej samej pary stacji latem i jesienią, gdy zalegają układy cyklonalne różnice są ujemne, co oznacza, że obszar miasta w świetle ciśnienia pary wodnej jest wtedy suchszy, poza tym różnice wskazują na większą wilgotność w centrum miasta.

Na zróżnicowanie wielkości wilgotności powietrza wpływają pozostałe elementy meteorologiczne. Problem ten zbadano na przykładzie stacji LO1 i WRZ. Znalezione istotną statystycznie korelację wielkości różnic wilgotności względnej oraz prędkości wiatru dla wszystkich pór roku. W przypadku zachmurzenia jego wielkość jest istotnie skorelowana z różnicami ciśnienia pary wodnej, natomiast z wilgotnością względną nie wykazuje korelacji.

Literatura

- Ackerman, B. (1987). Climatology of Chicago Area urban-rural differences in humidity. *J. Climate and Appl. Meteorol.*, 26, 427–430.
- Adamczyk, A.B. (2011). Warunki termiczne i wilgotnościowe aglomeracji warszawskiej. *Prace i Studia Geograficzne*, 47, 355–363.
- Błażejczyk, K. i Błażejczyk, M. (2013). Pakiet programu komputerowego Bioklima 2.6. www.igipz.pan.pl/geoekoklimat/blaz/bioklima.htm.
- Dudek, S., Kuśmierk, R., Żarski, J. (2008). Porównanie wybranych elementów meteorologicznych w Bydgoszczy i jej okolicy. *Przełąd Naukowy. Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, XVII, 1 (39), 26–34.

- Fortuniak, K. (2003). *Miejska wyspa ciepła. Podstawy energetyczne, studia eksperymentalne, modele numeryczne i statystyczne*. Łódź: Wyd. UŁ, 233.
- Fortuniak, K., Kłysik, K., Wibig, J. (2006). Urban-rural contrasts of meteorological parameters in Łódź. *Theor. Appl. Climatol.*, 84, 91–101.
- Fortuniak, K. i Kłysik, K. (2008). Osobliwości klimatu miast na przykładzie Łodzi. K. Kłysik, J. Wibig, K. Fortuniak (red.), *Klimat i bioklimat miast*. Łódź: Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, 477–488.
- Gluz, A.F. i Kaszewski, B.M. (1984). *Zróżnicowanie temperatury i wilgotności powietrza w Lublinie*. Materiały I Ogólnopolskiej Konferencji „Klimat i Bioklimat miast”. Łódź: Uniw. Łódzki.
- Hage, K.D. (1975). Urban-rural humidity differences. *J. Appl. Meteorol.*, 14, 1277–1283.
- Holmer, B. i Eliasson, I. (1999). Urban-rural vapour pressure differences and their role in the development of urban heat island. *Int. J. Climatol.*, 19, 989–1009.
- Jáuregui, E. i Tejada, A. (1997). Urban-rural humidity contrasts in Mexico City. *Int. J. Climatol.*, 17, 187–196.
- Kunz, M., Uscka-Kowalkowska, J., Przybylak, R., Kejna, M., Araźny, A., Maszewski, R. (2012). Zróżnicowanie klimatów lokalnych Torunia – założenia projektu i wstępne wyniki badań. *Roczniki Geomatyki X*, 3 (55), 85–94.
- Kuttler, W., Weber, S., Schonfeld, J., Hessel-schwerdt, A. (2007). Urban/rural atmospheric water vapour pressure differences and urban moisture excess in Krefeld. *Hermany, Int. J. Climatol.*, 27, s. 2005–2015.
- Lewińska, J. (red.) (1991). *Klimat miasta. Vademecum urbanisty*. Kraków: Instytut Gospodarki Przestrzennej i Komunalnej, 168.
- Lewińska, J. (2000). *Klimat miasta. Zasoby, zagrożenia, kształtowanie*. Kraków: Instytut Gospodarki Przestrzennej i Komunalnej, 151.
- Łukasiewicz, S. (2005). Temperatura i wilgotność powietrza w Ogrodzie Botanicznym UAM na tle wyników pomiarów stacji meteorologicznej Poznań Ławica. *Badania Fizjograficzne nad Polską Zachodnią, Seria A – Geografia Fizyczna*, 56, 83–92.
- Mayer, H., Matzarakis, A., Iziomon, M.G. (2003). Spatio-temporal variability of moisture conditions within the Urban Canopy Layer. *Theor. Appl. Climatol.* 76, 165–179.
- Niedźwiedz, T. (1981). *Sytuacje synoptyczne i ich wpływ na zróżnicowanie przestrzenne wybranych elementów klimatu w dorzeczu górnej Wisły*. Rozprawy habilitacyjne UJ, Kraków.
- Podstawczyńska, A. i Pawlak, W. (2006). Pomiarzy wybranych elementów meteorologicznych w kanionie ulicznym Łodzi. *Annales UMCS, LXI, 43, Sectio B*, 370–379.
- Przybylak, R. i Maszewski, R. (2009). Zmienność cyrkulacji atmosferycznej w Regionie Bydgosko-Toruńskim w latach 1881–2005. *Acta Agrophysica*, 14 (2), 427–448.
- Przybylak, R. i Maszewski, R. (2013). *Katalog cyrkulacji atmosferycznej dla Regionu Bydgosko-Toruńskiego w okresie 1881–2012* (zbiór komputerowy), Toruń: Katedra Meteorologii i Klimatologii UMK.
- Stopa-Boryczka, M. (1992a). Deformacja pól zmiennych meteorologicznych przez zabudowę w Warszawie. *Prace i Studia Geograficzne*, 11, Warszawa, 39–73.
- Stopa-Boryczka, M. (1992b). Z badań klimatu Warszawy, Zakładu Klimatologii Uniwersytetu Warszawskiego. *Prace i Studia Geograficzne*, 11, 21–38.
- Unger, J. (1999). Urban-rural air humidity differences in Szeged, Hungary. *Int. J. Climatol.*, 19, 1509–1515.

Streszczenie

Zróżnicowanie wilgotności powietrza na terenie Torunia w 2012 roku.

W opracowaniu przedstawiono zagadnienie zróżnicowania pola wilgotności powietrza w Toruniu w 2012 roku. Do tego celu wykorzystano wyniki pomiarów z 5 punktów usytuowanych w różnych częściach miasta. Wilgotność powietrza została przedstawiona poprzez dwie jej charakterystyki: wilgotność względną (%) i ciśnienie pary wodnej (hPa).

Uzyskane wyniki wskazują na duże zróżnicowanie wilgotności powietrza w mieście zarówno w świetle wartości średnich rocznych, miesięcznych, jak i dobowych. W przypadku wilgotności względnej średnio w roku najmniejszą wartość zaobserwowano w centrum miasta w punkcie LO1 (75%), natomiast największą w lesie na wschodzie

miasta w punkcie LBI (82%). W przypadku ciśnienia pary wodnej średnio w roku największe wartości wystąpiły w centrum miasta (LO1) oraz obszarze leśnym (LBI) – po 9,8 hPa, natomiast najmniejsze na północy miasta w punkcie WRZ (9,4 hPa).

Zbadano także wpływ sytuacji synoptycznych na zróżnicowanie wilgotności powietrza na terenie miasta. Zarówno w przypadku wilgotności względnej, jak i ciśnienia pary wodnej obserwuje się nieco większe ich zróżnicowanie na terenie miasta w czasie występowania układów antycyklonalnych w porównaniu z cyklonalnymi. Jedynie latem między stacjami LO1 (centrum miasta) i LBI (obszar leśny na wschodzie miasta) następuje odwrócenie relacji wielkości różnic ciśnienia pary wodnej przy różnych układach barycznych.

Na zróżnicowanie wielkości wilgotności powietrza wpływają pozostałe elementy meteorologiczne. Problem ten zbadano na przykładzie stacji LO1 i WRZ. Znalezione istotną statystycznie korelację wielkości różnic wilgotności względnej oraz prędkości wiatru dla wszystkich pór roku. W przypadku zachmurzenia jego wielkość jest istotnie skorelowana z różnicami ciśnienia pary wodnej, natomiast z wilgotnością względną nie wykazuje korelacji.

Summary

Diversity of air humidity in the area of Toruń in 2012. In this article the problem of spatial diversity of the air humidity field in Toruń in 2012 is addressed. For this purpose, results of measurements taken at 5 sites located in different parts of the city were used. The air humidity is presented through its relative humidity (%) and the water vapour pressure (hPa).

The obtained results indicate a substantial diversity of air humidity in the city, whether represented as mean annual, monthly or diurnal values. In the case of the relative humidity, the lowest mean value was obse-

erved in the city centre, at LO1 (75%), whereas the highest value was recorded in a wood at the LBI (82%) site, located in the east of the city. As far as the water vapour pressure is concerned, the highest annual mean values occurred in the city centre (LO1) and the woodland area (LBI) – 9.8 hPa each, whereas the lowest readings were observed at WRZ in the north of the city (9.4 hPa).

The influence of the synoptic situations on the diversity of air humidity in the city was also analysed. Both the relative humidity and the water vapour pressure were found to be slightly more diversified within the city when anticyclonic pressure systems prevailed, as compared to cyclonic systems. Only in the summer, between LO1 (city centre) and LBI (woodland in the east), did the correlation reverse.

The diversity of air humidity is affected by meteorological elements. The problem was studied on the basis of the observations made at the LO1 and WRZ sites. A statistically significant correlation was found in the values of the difference in relative humidity and wind speed in all seasons of the year. In the case of cloudiness, its amount is significantly correlated with the differences in the water vapour pressure, but no correlation was found of this element with the relative humidity.

Authors' addresses:

Joanna Uscka-Kowalkowska,
Rajmund Przybylak, Rafał Maszewski,
Andrzej Araźny, Marek Kejna
Katedra Meteorologii i Klimatologii
Wydział Nauk o Ziemi
Uniwersytet Mikołaja Kopernika
ul. Lwowska 1, 87-100 Toruń
Poland
e-mail: joannauk@umk.pl
rp11@umk.pl

Mieczysław Kunz
Katedra Geomatyki i Kartografii
Wydział Nauk o Ziemi
Uniwersytet Mikołaja Kopernika
ul. Lwowska 1, 87-100 Toruń
Poland