

Grzegorz MAJEWSKI, Dorota CICHOCKA

Zakład Meteorologii i Klimatologii SGGW w Warszawie
Division of Meteorology and Climatology WULS–SGGW

Zmiany zawartości tlenu (O_2) w powietrzu atmosferycznym aglomeracji warszawskiej w latach 2008–2009

Changes of oxygen (O_2) content in the air of Warsaw agglomeration in 2008–2009

Słowa kluczowe: tlen w atmosferze, warunki meteorologiczne, aglomeracja warszawska
Key words: oxygen in atmosphere, meteorological conditions, Warsaw agglomeration

Wstęp

Tlen jest gazem odgrywającym szczególnie ważną rolę w przyrodzie. Bez niego nie byłoby możliwe życie na Ziemi. W literaturze podręcznikowej podawany jest skład atmosfery suchej, czyli pozbawionej pary wodnej i zanieczyszczeń. W takich warunkach proporcje udziału poszczególnych składników atmosfery nie zmieniają się do wysokości około 100 km (zawartość objętościowa tlenu wynosi 20,95%, a wagowa 23,15%). Jednak w powietrzu normalnym, zawierającym parę wodną i inne domieszki, udział tlenu i innych gazów ulega zmianie. W pewnych okresach jego zawartość w powietrzu może spa-

dać do wartości zagrażających zdrowiu człowieka, co stanowi istotny problem, szczególnie w obszarach zurbanizowanych. Deficyt tlenu w obszarach miejskich pogłębia niedostatek obszarów zieleni i pobieranie znacznych ilości tlenu na potrzeby przemysłowe, komunalne i komunikacyjne (Lewińska 1991, Dubicki i in. 2002).

Deficyt tlenu w atmosferze obszarów o zwartej zabudowie szczególnie w czasie letnich upałów powoduje silne objawy niedotlenienia krwi i wpływa niekorzystnie na chorych z niewydolnością układu krążenia (Dubicki i in. 2002). Niedostateczna ilość tlenu w organizmie prowadzi do powtarzających się infekcji, alergii, ciągłego przemęczenia i wielu innych chorób (Laughlin i in. 2008). Ponadto rejestrowane w obszarach miejskich wysokie stężenia zanieczyszczeń obciążają dodatkowo ustrój człowieka (Majewski i in. 2011, Badyda i in. 2011).

Dla człowieka ważna jest nie tylko ilość tlenu w powietrzu, ale również jego zmiany w krótkim czasie. Owczarowa i inni (1974) wyróżniają 4 kryteria zmian zawartości tlenu w powietrzu na podstawie ich oddziaływania na organizm człowieka. Zmiany te, gdy nie przekraczają $2,5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$, są dla organizmu bodźcem obojętnym, od $2,5$ do $5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ są bodźcem słabym, od 5 do $10 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ – bodźcem znaczącym, natomiast powyżej $10 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ są już bodźcem groźnym.

Na zmianę zawartości tlenu w powietrzu wpływają temperatura i wilgotność powietrza oraz ciśnienie atmosferyczne (Skrzypski 1976, Błażejczyk 2004, Łykowski i Przewoźniczek 2004, Bugbee i Blonquist 2005, Migala i in. 2005). Wraz ze wzrostem temperatury i wilgotności powietrza zmniejsza się zawartość tlenu w powietrzu. Sytuacja przedstawia się odwrotnie w zależności od ciśnienia atmosferycznego. Łatwo można to zaobserwować na większych wysokościach, gdzie z powodu mniejszej gęstości powietrza, a co się z tym wiąże – obniżonego ciśnienia atmosferycznego, człowiek ma problemy z oddychaniem i od wysokości około 3000 m nie może obejść się bez aparatu tlenowego.

Interesujące badania przeprowadził Janka (2009) w Opolu. Badania polegały na określeniu wpływu natężenia ruchu drogowego na zmiany stężenia tlenu w powietrzu. Wykazano, że poziom tlenu przy skrzyżowaniach jest niższy o $0,14\text{--}3,5\%$ objętości w odniesieniu do stężenia tła tlenu. Ilość tlenu w powietrzu maleje wraz ze wzrostem natężenia ruchu drogowego, a w szczególności ze wzrostem udziału samochodów ciężarowych w ruchu. Poziom tlenu zależy także m.in. od rodzaju skrzyżowania, jego

usytuowania, zabudowy i warunków meteorologicznych.

Celem pracy było zbadanie zmian zawartości tlenu w powietrzu atmosferycznym (w przebiegu dobowym, miesięcznym i rocznym), kształtujących się w wybranych typach struktur użytkowania terenu, w dwóch kontrastowych termicznie latach. Przedstawiono analizę zróżnicowania przestrzennego i czasowego elementów meteorologicznych, mających wpływ na zawartość tlenu w powietrzu atmosferycznym. Istotnym elementem pracy było również określenie częstości występowania zmniejszonej zawartości tlenu w powietrzu atmosferycznym, przekraczającej $10 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$, określane jako „ostra”, wyraźnie odczuwalna zmiana warunków środowiskowych (Owczarowa i in. 1974).

Material i metoda

Stacje pomiarowe należące do Wojewódzkiego Inspektoratu Ochrony Środowiska w Warszawie zlokalizowane w różnych punktach miasta pozwalają na gromadzenie, oprócz pomiarów imisyjnych, również przebiegu wybranych parametrów meteorologicznych. Meteorologiczne pomiary wykonywane w różnych typach użytkowania powierzchni miejskiej pozwalają na uzyskanie szczegółowych informacji o warunkach meteorologicznych, jakie tam się kształtują. Zmiany wartości rejestrowanych na stacjach parametrów meteorologicznych wywołanych zróżnicowaną strukturą powierzchni użytkowych mają wpływ na kształtowanie się w sposób odmienny zmian zawartości

tłenu w powietrzu atmosferycznym tych obszarów.

W opracowaniu wykorzystano dane meteorologiczne z trzech stacji pomiarowych, zlokalizowanych na obszarach o różnych typach zabudowy:

1. MzWarszNiepodKom (WaK) jest stacją automatyczną, typu komunikacyjnego, znajduje się w gęsto zabudowanym centrum miasta, gdzie wpływ miejskiej wyspy ciepła jest najbardziej odczuwalny (Gołaszewski i in. 2010). Stacja mieści się w Alejach Niepodległości 227/233 w Warszawie. Położona jest w kanionie ulicznym, w bliskiej odległości od 6-pasmowej ulicy z linią tramwajową. Wzdłuż ulicy znajdują się budynki 5-kondygnacyjne.

2. MzWarszUrsynów (WaU) jest stacją typu tła miejskiego w strefie miejskiej, handlowo-mieszaniowej. Znajduje się przy ulicy Wokalnej 1 nr działki 7/5 w dzielnicy Ursynów, z dość luźną zabudową, z dużą ilością zieleni miejskiej. W odległości 150–300 m znajdują się budynki 4 piętrowe. Odległość od ulicy Bartoka, charakteryzującej się dość dużym natężeniem ruchu, wynosi około 200 m.

3. MzLegionZeg (Leg) również jest stacją typu tła miejskiego, lecz w strefie podmiejskiej o charakterze naturalnym. Zlokalizowana jest w Legionowie, przy ulicy Zegrzyńskiej 38, na podłożu trawiastym. Odległość od przeszkód typu drzewa, budynki jest duża. Stacja charakteryzuje się dobrym przewietrzaniem, znajduje się w odległości około 80 m od głównych ulic. Reprezentatywność obszarowa tej stacji wynosi kilkadziesiąt kilometrów średnicy.

Zawartość tlenu (O_2) w powietrzu atmosferycznym obliczona została za

pomocą przekształconego równania Clapeyrona:

$$O_2 = \frac{0,2315 \cdot (p - e)}{R \cdot T} \quad [\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$$

gdzie:

O_2 – zawartość tlenu w powietrzu atmosferycznym [$\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$],

p – ciśnienie atmosferyczne [hPa],

e – ciśnienie aktualne pary wodnej w powietrzu [hPa],

T – temperatura powietrza [K],

R – stała gazowa, $R = 2,87 \cdot 10^6 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} = 8,3 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,

0,2315 – zawartość wagowa O_2 w suchym powietrzu (po uwzględnieniu przeliczeń jednostkowych).

Obliczenia zawartości O_2 były wykonywane na podstawie danych meteorologicznych z 24 terminów w okresie doby, a następnie uśredniane dla każdej doby, miesiąca i roku.

W pracy wykorzystano również wyniki dotyczące zmian zawartości tlenu w powietrzu atmosferycznym w rejonie Ursynowa opublikowane przez Łykowski i Przewoźniczuk (2004). Badania dotyczyły 1998 roku uznanego za nieznacznie odbiegający pod względem przebiegu elementów meteorologicznych od danych wieloletnich.

Ze względu na skrajnie różne warunki pogodowe w latach 2001–2009, tj. 2008 rok charakteryzujący się najwyższą temperaturą powietrza, wynoszącą $10,2^\circ\text{C}$, oraz 2009 rok o najniższej średniej rocznej temperaturze powietrza $9,0^\circ\text{C}$ (Archiwum Zakładu Meteorologii i Klimatologii SGGW), postanowiono zbadać, jak zmienia się zawartość tlenu w powietrzu atmosferycznym w latach skrajnych termicznie.

Wyniki

Obliczone średnie wartości poszczególnych parametrów meteorologicznych były wyraźnie zróżnicowane w zależności od miejsca pomiaru (tab. 1, 2 i 3).

Temperatura powietrza średnio dla analizowanych lat była wyraźnie wyższa na stacjach miejskich w porównaniu z terenem podmiejskim. Najwyższa średnia roczna temperatura powietrza wystąpiła w centralnej części miasta, wyniosła ona 9,9°C w 2008 roku i 9,3°C w 2009 roku. Niższa o 0,2°C w 2008 roku i o 0,6°C w 2009 roku wystąpiła w obszarze o dość luźnej zabudowie, sąsiadującej z zielenią miejską (stacja WaU). Na stacji podmiejskiej zanotowano najniższe średnie roczne wartości temperatury powietrza, o ponad 0,5°C w 2008 roku i 0,8°C w 2009 roku, niższe w porównaniu ze stacją zlokalizowaną w centrum miasta. Otoczenie

stacji podmiejskiej Leg charakteryzuje się zabudową jednorodziną rozproszoną, sąsiaduje z dużą gęstą zielenią niską i wysoką, z małym udziałem powierzchni sztucznych.

Największe średnie roczne różnice temperatury powietrza między stacjami miejskimi a stacją podmiejską, rzędu 0,5°C w 2008 roku i 0,8°C w 2009 roku, wystąpiły na stacji WaK zlokalizowanej w kanionie ulicznym, na obszarze zwartej zabudowy miejskiej i wysokich bloków wielorodzinnych. Znacznie mniejsze różnice wystąpiły na stacji miejskiej WaU – wyniosły one w 2008 roku 0,3°C, natomiast w 2009 roku – 0,2°C (tab. 3). Ta odmienność wynika oczywiście ze specyfiki położenia tej stacji, która jest zlokalizowana na obszarze luźnej zabudowy sąsiadującej z terenami zielonymi, a posadowione w pobliżu wysokie budynki i betonowa nawierzchnia nie mają

TABELA 1. Podstawowe parametry meteorologiczne w 2008 roku (wartości średnie)

TABLE 1. Meteorological characteristics in 2008

Miesiąc Month	Temperatura powietrza [°C] Air temperature			Wilgotność względna [%] Relative humidity			Ciśnienie aktualne pary wodnej [hPa] Vapour pressure			Ciśnienie atmosferyczne [hPa] Air pressure
	Leg	WaU	WaK	Leg	WaU	WaK	Leg	WaU	WaK	
I	0,6	0,9	0,7	88,5	87,7	92,4	5,9	5,9	6,2	1003,9
II	2,4	2,9	3,1	81,9	81,5	89,1	6,1	6,1	6,8	1008,1
III	3,3	3,5	3,1	80,1	80,1	89,1	6,1	6,3	6,8	987,6
IV	9,1	9,3	8,3	69,2	71,7	80,2	7,5	8,1	8,7	995,6
V	13,8	13,7	12,9	63,8	67,2	78,5	9,4	10,2	11,8	1001,7
VI	18,4	18,9	19,8	46,1	51,2	68,1	8,8	10,8	15,7	1000,7
VII	19,2	19,3	20	63,0	65,4	82,6	13,2	14,4	19,5	999,0
VIII	18,2	18,7	19,4	69,1	69,4	85,8	14,4	14,6	19,2	997,5
IX	12,4	12,8	13,2	84,7	83,6	93,1	12,7	12,5	14,8	1003,2
X	9,7	10,1	10,6	84,3	82,5	95,1	10,1	10,2	12,4	1001,5
XI	4,7	5,2	5,4	91,9	88,5	96,8	8,1	8,1	9,0	998,3
XII	0,8	1,2	1,7	91,3	88,8	96,2	6,0	6,0	6,7	1004,3

TABELA 2. Podstawowe parametry meteorologiczne w 2009 roku (wartości średnie)
TABLE 2. Meteorological characteristics in 2009

Miesiąc Month	Temperatura powietrza [°C] Air temperature			Wilgotność względna [%] Relative humidity			Ciśnienie aktualne pary wodnej [hPa] Vapour pressure			Ciśnienie atmosferyczne [hPa] Air pressure
	Leg	WaU	WaK	Leg	WaU	WaK	Leg	WaU	WaK	
I	-3,1	-2,7	-2,2	90,5	88,3	96,8	4,6	4,6	5,2	1001,5
II	-1,0	-0,7	-0,3	91,7	89,1	97,9	5,7	5,3	6,0	996,8
III	2,5	2,6	3,0	80,6	81,6	94,6	5,8	6,0	7,3	995,9
IV	11,1	11,2	12,2	47,8	55,7	76,9	5,7	7,1	11,0	1003,5
V	13,5	13,6	14,4	58,1	64,3	84,8	8,6	9,5	14,0	1002,8
VI	15,9	15,9	16,5	77,0	78,7	94,1	13,9	14,4	18,4	998,3
VII	19,8	20	20,7	70,5	72,9	89,3	15,8	16,9	22,4	998,0
VIII	18,3	18,5	19,3	66,8	70,6	85,2	13,6	14,8	19,3	1002,7
IX	15,2	15,4	16,3	71,9	75,2	86,9	11,9	12,9	16,3	1004,5
X	6,2	6,6	7,1	90,7	91,6	96,0	8,8	9,2	10,0	999,5
XI	5,3	5,4	5,7	90,8	92,5	96,6	8,2	8,5	9,1	996,6
XII	-1,6	-1,6	-0,9	90,3	91,7	96,7	5,4	5,4	6,0	996,0

TABELA 3. Różnice między wartościami poszczególnych elementów meteorologicznych w terenie miejskim (WaU, WaK) i podmiejskim (Leg)

TABLE 3. Differences between values of the analysed meteorological parameters in the urban area (WaU, WaK) and suburban area (Leg)

Okres Period	Temperatura powietrza [°C] Air temperature				Wilgotność względna [%] Relative humidity				Ciśnienie aktualne pary wodnej [hPa] Vapour pressure			
	WaK		WaU		WaK		WaU		WaK		WaU	
	2008		2009		2008		2009		2008		2009	
	WaK	WaU	WaK	WaU	WaK	WaU	WaK	WaU	WaK	WaU	WaK	WaU
I	0,1	0,3	0,9	0,4	3,9	-0,8	6,3	8,5	0,3	0,0	0,6	0,0
II	0,7	0,5	0,7	0,3	7,2	-0,4	6,2	8,8	0,7	0,0	0,3	-0,4
III	-0,2	0,2	0,5	0,1	9,0	0,0	14,0	13,0	0,7	0,2	1,5	0,2
IV	-0,8	0,2	1,1	0,1	11,0	2,5	29,1	21,2	1,2	0,6	5,3	1,4
V	-0,9	-0,1	0,9	0,1	14,7	3,4	26,7	20,5	2,4	0,8	5,4	0,9
VI	1,4	0,5	0,6	0,0	22,0	5,1	17,1	15,4	6,9	2,0	4,5	0,5
VII	0,8	0,1	0,9	0,2	19,6	2,4	18,8	16,4	6,3	1,2	6,6	1,1
VIII	1,2	0,5	1,0	0,2	16,7	0,3	18,4	14,6	4,8	0,2	5,7	1,2
IX	0,8	0,4	1,1	0,2	8,4	-1,1	15,0	11,7	2,1	-0,2	4,4	1,0
X	0,9	0,4	0,9	0,4	10,8	-1,8	5,3	4,4	2,3	0,1	1,2	0,4
XI	0,7	0,5	0,4	0,1	4,9	-3,4	5,8	4,1	0,9	0,0	0,9	0,3
XII	0,9	0,4	0,7	0,0	4,9	-2,5	6,4	5,0	0,7	0,0	0,6	0,0
I XII	0,5	0,3	0,8	0,2	11,1	0,3	14,1	2,1	2,4	0,4	3,1	0,6

takiego wpływu na modyfikację bilansu cieplnego jak w centrum miasta.

W 2008 roku zróżnicowanie średnich miesięcznych wartości temperatury powietrza wykazuje znacznie większe wahania. Na stacji WaK w miesiącach marzec, kwiecień i maj różnice między średnią miesięczną temperaturą powietrza mierzoną na tej stacji a obszarem podmiejskim mają znak ujemny, czyli obszar podmiejski jest cieplejszy niż centrum miasta. Związane jest to z przesłonięciem horyzontu, czego skutkiem jest różnica w dopływie promieniowania całkowitego, które w tym czasie na obszarze podmiejskim osiąga już znaczne wartości, a centrum jest w tzw. cieniu zabudowy. W odległości kilku metrów od stacji, od strony zachodniej, znajduje się zacieniająca ją kilkukondygnacyjna zabudowa. W pozostałych miesiącach roku wyższą temperaturę powietrza notowano na stacji w centrum miasta. Szczególnie duże różnice temperatury powietrza między stacjami miejskimi a stacją podmiejską wystąpiły w czerwcu (1,4°C) i sierpniu (1,2°C). Na stacji WaU jedynie w miesiącu maju notowano niższą temperaturę powietrza niż na stacji podmiejskiej. W pozostałych miesiącach roku różnice temperatury powietrza wynosiły od 0,1 do 0,5°C (tab. 3).

W 2009 roku we wszystkich analizowanych miesiącach notowano wyższą temperaturę powietrza na stacji zlokalizowanej w centrum miasta (WaK). Szczególnie duże różnice temperatury powietrza między stacjami miejskimi a stacją podmiejską wystąpiły w kwietniu i wrześniu (1,1°C) oraz w sierpniu (1,0°C). Najmniejsza różnica cechowała marzec i listopad (około 0,5°C). Znacznie mniejsze różnice temperatu-

ry powietrza wystąpiły na stacji WaU. Największe różnice notowano w kwietniu i październiku (0,4°C). W czerwcu i grudniu nie stwierdzono różnicy między średnią miesięczną wartością temperaturą powietrza obliczoną dla tych stacji (tab. 3).

Specyficzne położenie stacji WaK odzwierciedlają także dni charakterystyczne pod względem termicznym. Na stacji tej w obydwu analizowanych latach wystąpiła najmniejsza liczba dni gorących, przy stosunkowo wysokiej temperaturze średniej, co związane jest z dużym zacienieniem obszaru stacji wśród gęstej zabudowy właśnie wtedy, kiedy dopływ promieniowania słonecznego do powierzchni jest największy. Największa nadwyżka ciepła miejskiego ujawnia się na tej stacji w nocy, kiedy bilans promieniowania składa się ze strumieni promieniowania długofalowego. Potwierdza to rejestrowana na tej stacji najmniejsza liczba dni chłodnych i mroźnych, jak również największa liczba nocy ciepłych (57 – w 2008 roku, 42 – w 2009 roku) i bardzo ciepłych (5 – w 2008 roku i 13 – w 2009 roku) – tabela 4.

Warunki charakteryzujące zawartość pary wodnej w powietrzu na analizowanych stacjach miały podobny przebieg roczny. Najmniejsza średnia miesięczna wartość wilgotności względnej powietrza w tym okresie wystąpiła w kwietniu (2009 rok) i czerwcu (2008 rok), natomiast największa – w listopadzie, z wyjątkiem stacji WaU w 2008 roku i stacji WaK w 2009 roku, kiedy największą wilgotność względną powietrza notowano w grudniu (tab. 2). Największe średnie roczne wartości rejestrowano na stacji WaK zlokalizowanej w centrum miasta (87,3% – w 2008 roku, i 91,3%

TABELA 4. Liczba dni/nocy charakterystycznych pod względem termicznym na analizowanych stacjach w latach 2008–2009

TABLE 4. Number of characteristic days and nights with respect to thermal conditions at analysed stations in 2008–2009

Dni / Noce Days / Nights	Stacja / Station					
	Leg	WaU	WaK	Leg	WaU	WaK
	2008			2009		
Dni gorące, $t_{\max} > 25^{\circ}\text{C}$ Hot days, $t_{\max} > 25^{\circ}\text{C}$	40	44	40	31	33	28
Noce ciepłe, $t_{\min} > 15^{\circ}\text{C}$ Warm nights, $t_{\min} > 15^{\circ}\text{C}$	25	35	57	29	32	42
Noce bardzo ciepłe, $t_{\min} > 18$ Very warm nights, $t_{\min} > 18^{\circ}\text{C}$	2	4	5	4	6	13
Noce gorące (tropikalne), $t_{\min} > 20^{\circ}\text{C}$ Hot nights(tropical), $t_{\min} > 20^{\circ}\text{C}$	0	0	0	0	0	3
Doby tropikalne, $t_{\max} > 30^{\circ}\text{C}$ i $t_{\min} > 20^{\circ}\text{C}$ Tropical days, $t_{\max} > 30$ i $t_{\min} > 20^{\circ}\text{C}$	0	0	0	0	0	2
Dni chłodne, $t_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$ Cold days, $t_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$	82	75	62	102	88	79
Dni mroźne, $t_{\max} < 0^{\circ}\text{C}$ Frosty days, $t_{\max} < 0^{\circ}\text{C}$	18	16	16	38	39	37
Dni bardzo mroźne, $t_{\min} < -10^{\circ}\text{C}$ Very frosty days, $t_{\min} < -10^{\circ}\text{C}$	4	4	4	16	9	9

– w 2009 roku), najmniejsze zaś na stacji podmiejskiej (76,2% – w 2008 roku, i 77,2% – w 2009 roku) – tabele 1 i 2.

Odchylenie wartości wilgotności względnej powietrza na stacjach miejskich w porównaniu z terenem podmiejskim wskazuje na zwiększoną zawartość wilgoci w powietrzu w mieście. Zarówno centrum miasta o zwartej zabudowie i niewielkim odsetku zieleni miejskiej, jak i obszar reprezentujący luźną zabudowę (WaU) odznaczają się większą wilgotnością względną niż stacja podmiejska. W przypadku stacji WaU dotyczy to przede wszystkim półrocza ciepłego, gdyż na tej stacji w miesiącach półrocza chłodnego (I, II, IX–XII – w 2008 roku i I, II – w 2009 roku) występuje nie-

znacznie większa wilgotność powietrza w porównaniu ze stacją podmiejską.

W analizowanych latach wilgotność względna powietrza w centrum miasta w porównaniu z terenem podmiejskim była większa średnio o 11,1% w 2008 roku i 14,1% w 2009 roku. Na stacji miejskiej WaU różnice wilgotności względnej w porównaniu z stacją Leg były zdecydowanie mniejsze – średnio o 0,3% w 2008 roku i 2,1% w 2009 roku (tab. 3).

Średnie miesięczne wartości ciśnienia pary wodnej wykazują charakterystyczny przebieg roczny – minimum w styczniu i prawie trzykrotnie większe wartości w okresie lata, z maksimum w miesiącu lipcu. Największa średnia roczna wartość tego parametru wystąpiła na stacji znajdującej się w centrum

miasta – wyniosła 11,5 hPa, natomiast w 2008 roku – 12,1 hPa. Najmniejsze średnie roczne wartości ciśnienia aktualnego pary wodnej wystąpiły na stacji podmiejskiej – w obydwu analizowanych latach wynosiły 9,0 hPa (tab. 1 i 2).

Porównanie średnich miesięcznych wartości ciśnienia aktualnego pary wodnej między stacjami miejskimi a stacją podmiejską wskazuje na występowanie znacznie większych wartości badanego parametru na stacjach miejskich. Zdecydowanie większe różnice ciśnienia aktualnego pary wodnej między porównywanymi punktami pomiarowymi wystąpiły na stacji WaK w cieplej porze roku, z maksimum wynoszącym 6,9 hPa w czerwcu 2008 roku i 6,6 hPa w lipcu 2009 roku. Średnie miesięczne różnice ciśnienia aktualnego pary wodnej między stacją WaU a stacją podmiejską były znacznie mniejsze. Średnia roczna różnica wyniosła 0,4 hPa w 2008 roku i 0,6 hPa w 2009 roku (tab. 3).

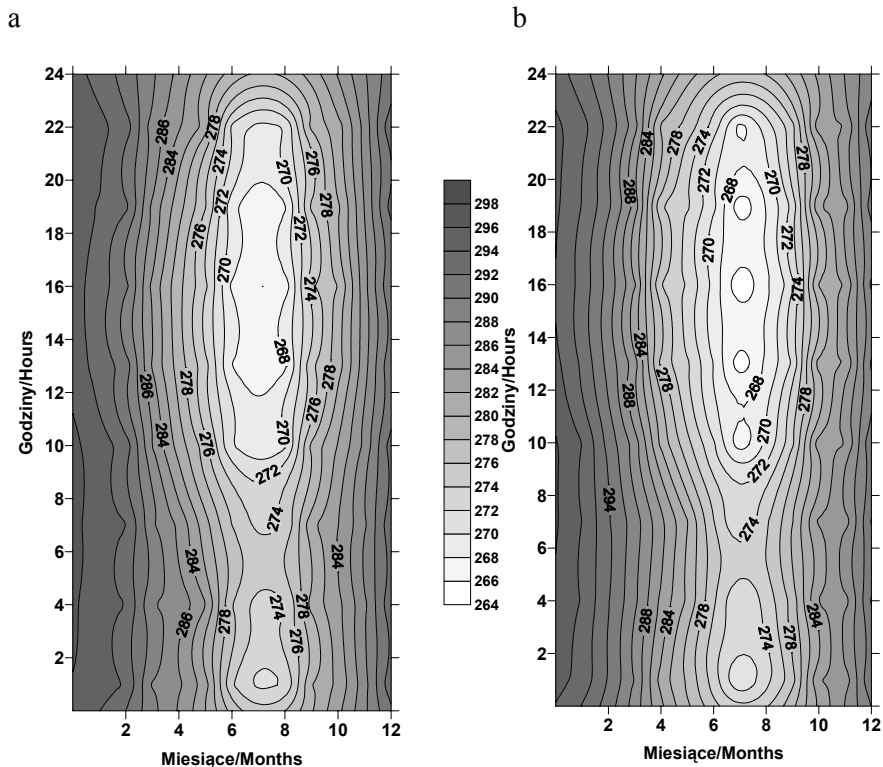
Badania naukowe wykazują, że głębokie kaniony ulic wskutek złego przewietrzania i parowania oraz dopływu wilgoci pochodzenia antropogenicznego stają się wilgotniejsze. Zawartość pary wodnej w powietrzu miasta nie jest jednakowa nad całym jego obszarem, zależy od struktury zabudowy i osłabienia prędkości wiatru (Lewińska 1991, Fortuniak 2003, Fortuniak i Kłysik 2008). Badania przeprowadzone dla Krakowa wykazały, że w zabudowie śródmiejskiej zawartość pary wodnej była większa niż w osiedlach otwartych, o luźnej zabudowie. W obszarach o luźnej zabudowie zawartość pary wodnej nie różniła się zasadniczo od jej zawartości w obszarach podmiejskich (Lewińska 1991).

W skali rocznej ciśnienie atmosferyczne porównywanych lat było bardzo zbliżone, w 2008 roku średnia wartość tego parametru była jedynie o 0,5 hPa większa niż w 2009 roku i wyniosła 1000,1 hPa.

Omówione zmiany wartości rejestrowanych elementów meteorologicznych, wywołanych zróżnicowaną strukturą powierzchni analizowanych terenów, wpłynęły na kształtowanie się zawartości tlenu w powietrzu atmosferycznym tych obszarów (tab. 5 i 6).

Zawartość tlenu w powietrzu cechuje się określonym rytmem rocznym, maksimum przypada na miesiące zimowe i wynosi średnio, w zależności od lokalizacji stacji: 293,9 g·m⁻³ (2008 rok) i 295,5 g·m⁻³ (2009 rok) na stacji podmiejskiej Leg; 293,6 g·m⁻³ (2008 rok) i 295,2 g·m⁻³ (2009 rok) na stacji WaU; 293,3 g·m⁻³ (2008 rok) i 294,4 g·m⁻³ (2009 rok) na stacji WaK. Minimum występuje w okresie lata, kiedy jest mniejsze średnio o 22 g·m⁻³ na stacjach WaU i Leg oraz o 24 g·m⁻³ na stacji zlokalizowanej w centrum miasta. Zakres różnic jest zdecydowanie większy w 2009 roku, w którym dochodzą one do około 28 g·m⁻³ na stacji WaK (tab. 5 i 6).

Zmienność zawartości tlenu w powietrzu analizowanych obszarów w ciągu doby całego roku przedstawiają izoplety na rysunkach 1–3. Średnia zawartość tlenu w powietrzu wykazuje cykliczność dobową. Maksymalne wartości osiągane są w godzinach nocnych, a minimum przypada na godziny popołudniowe (około godz. 16). Największe różnice zawartości tlenu w cyklu dobowym wystąpiły w lipcu 2008 roku na wszystkich analizowanych stacjach, z największą wartością na stacji w centrum miasta (ponad 7 g·m⁻³).



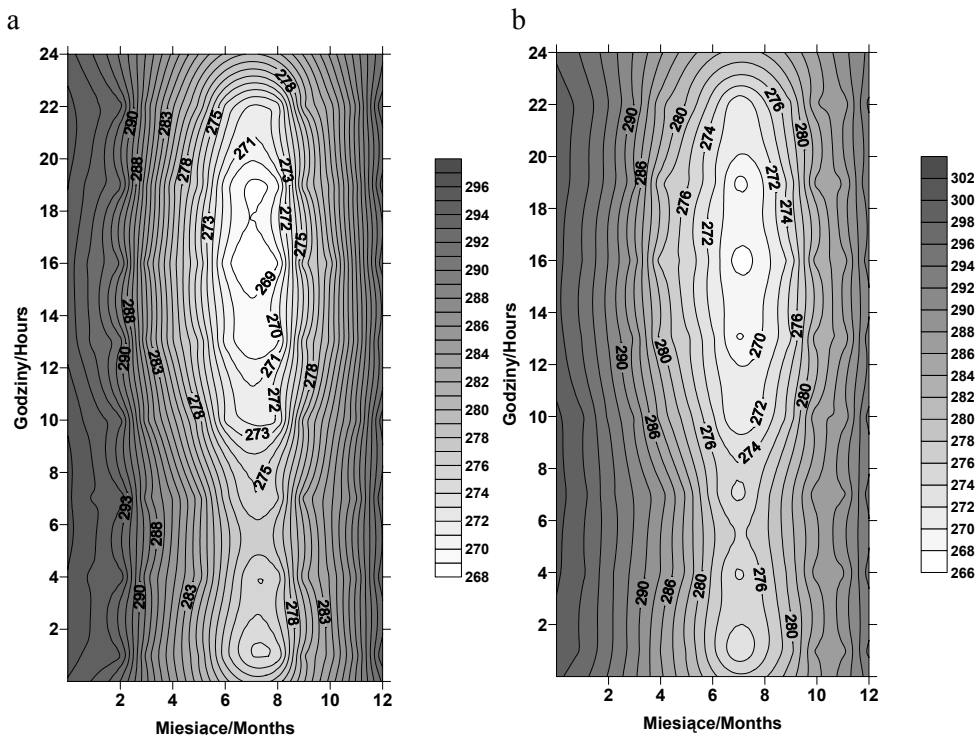
RYSunEK 1. Graficzny obraz zmian zawartości tlenu w powietrzu atmosferycznym w ciągu roku w różnych porach doby na stacji WaK [$\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]: a – w 2008 roku, b – w 2009 roku

FIGURE 1. Graphical illustration of changes of air oxygen content during an year for different day times at the station WaK [$\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]: a – in 2008, b – in 2009

Najmniejszym zróżnicowaniem zawartości tlenu (nieprzekraczającym $2,5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$), charakteryzował się grudzień.

Średnie roczne wartości tlenu w powietrzu w 2008 roku kształtowały się następująco: $283,2 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ na stacji podmiejskiej, $282,8 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ na stacji WaU i $282,1 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ na stacji WaK. Wartość maksymalną uzyskano na stacji Leg w miesiącu styczniu ($315,0 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$), a wartość minimalną – w centrum miasta we wrześniu ($256,6 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$). Największa amplituda zawartości tlenu wystąpiła na stacji WaK w lutym ($35,2 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$), a najmniejsza – na stacji WaU ($20,5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$) – tabela 5.

Podobny rozkład przestrzenny zawartości tlenu w powietrzu stwierdzono w 2009 roku. Największa średnia roczna zawartość tlenu w powietrzu wystąpiła na stacji podmiejskiej ($284,0 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$), natomiast najmniejsza – na stacji zlokalizowanej w centrum miasta ($282,3 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$). Wartość maksymalną, podobnie jak miało to miejsce w 2008 roku, uzyskano w styczniu na stacji podmiejskiej ($325,3 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$). Z kolei najmniejszą wartość zawartości tlenu uzyskano na stacji w centrum miasta ($253,7 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$). Największa amplituda zawartości tlenu w powietrzu wystąpiła w styczniu na



RYSUNEK 2. Graficzny obraz zmian zawartości tlenu w powietrzu atmosferycznym w ciągu roku w różnych porach doby na stacji WaU [$\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]: a – w 2008 roku, b – w 2009 roku
 FIGURE 2. Graphical illustration of changes of air oxygen content during an year for different day times at the station WaU [$\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]: a – in 2008, b – in 2009

stacji Leg ($45,8 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$), natomiast najmniejsza – w listopadzie na stacji WaU ($20,5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$) – tabela 6.

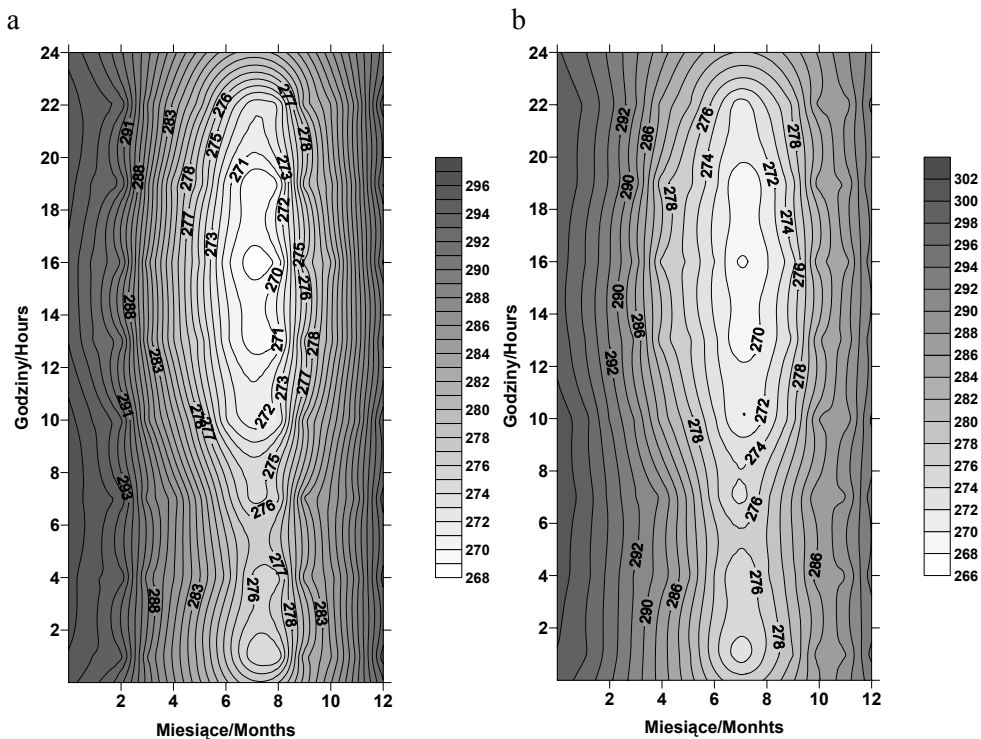
Ogólne charakterystyki zawartości tlenu w powietrzu atmosferycznym uzyskane w latach 2008–2009 nie odbiegają znacząco od prezentowanych przez innych autorów (Skrzypski 1976, Łykowski i Przewoźniczuk 2004, Sikora 2008).

Różnice w zawartości tlenu w powietrzu na analizowanych stacjach wynikają głównie ze zróżnicowania warunków meteorologicznych modyfikowanych przez warunki lokalne różnych typów użytkowania terenu.

Pomiary meteorologiczne wykonywane na stacji położonej w centrum

miasta, zlokalizowanej w kanionie ulicznym, wykazały, że atmosfera tego obszaru charakteryzuje się wyższą temperaturą powietrza i większą wilgotnością niż teren podmiejski, czego konsekwencją jest zmniejszenie zawartości tlenu w powietrzu atmosferycznym. Deficyt tlenu, pogłębia ponadto niedostatek obszarów zieleni i pobieranie znacznej ilości tlenu, m.in. na potrzeby komunikacyjne.

Na obszarze badań najczęściej występują zmiany nieprzekraczające $2,5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$, które są dla organizmu bodźcem obojętnym – w 2008 roku na stacji podmiejskiej obserwuje się je przez 216 dni, na stacji WaU – przez 212 dni, natomiast na stacji zlokalizowanej w centrum mia-

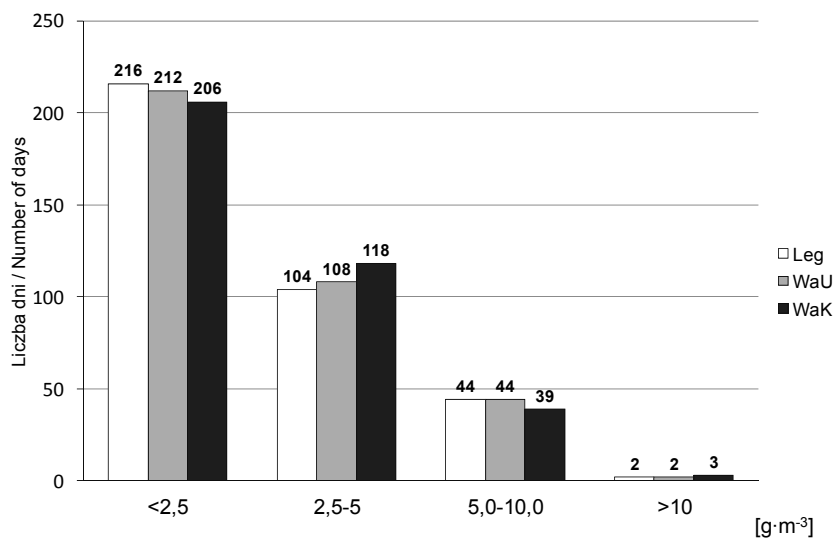


RYSUNEK 3. Graficzny obraz zmian zawartości tlenu w powietrzu atmosferycznym w ciągu roku w różnych porach doby na stacji podmiejskiej Leg [$\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]: a – w 2008 roku, b – w 2009 roku
 FIGURE 3. Graphical illustration of changes of air oxygen content during an year for different day times at the station Leg [$\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]: a – in 2008, b – in 2009

sta – przez 206 dni (rys. 4.) W 2009 roku zmniejszyła się liczba dni ze zmianami klasyfikowanymi jako obojętne, występującymi na stacjach, do odpowiednio: 199, 201 i 198 dni (rys. 5). Zmiany z przedziału $2,5\text{--}5\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ (odczuwalne jako bodziec słaby) w 2008 roku stanowiły: 28% (104 dni) na stacji Leg, 29% (108 dni) na stacji WaU i 32% (118 dni) na stacji WaK. W 2009 roku zmiany te dla każdej analizowanej stacji wynosiły około 32% dni. Zmiany określane jako bodziec znaczący ($5\text{--}10\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$) w 2008 roku występowały na stacjach Leg i WaU przez 44 dni (12%), a na stacji w centrum miasta – przez 39 dni (10,5%). W 2009 roku notowano je przez

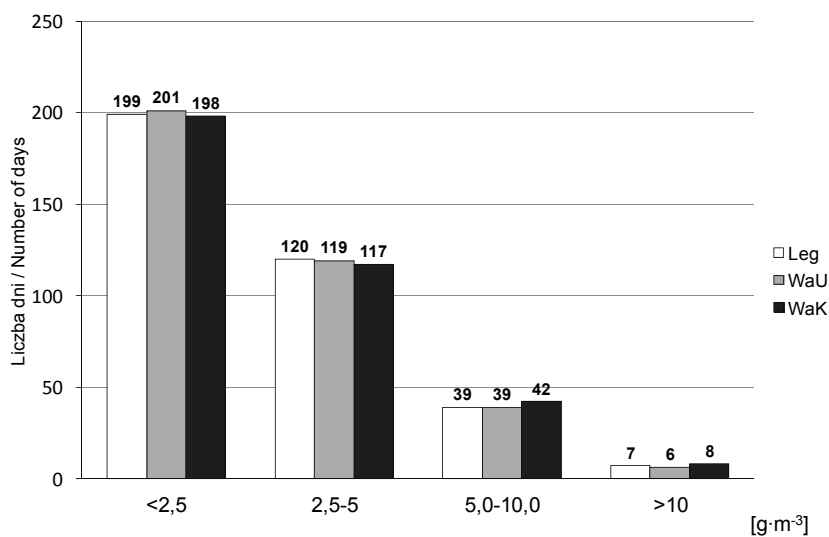
10,5% dni roku na stacji Leg i WaU, a przez 11,5% dni (42 dni) na stacji WaK. Najgroźniejsze dla zdrowia człowieka zmiany (przekraczające $10\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$) w 2008 roku stanowiły poniżej 1% dni roku na każdej analizowanej stacji. W 2009 roku dni klasyfikowanych jako groźne dla zdrowia było dwukrotnie więcej. Podobne wyniki otrzymał Sikora (2008) dla Wrocławia. Zmiany zawartości tlenu klasyfikowane jako słabe występowały w 30%, jako znaczące w 16% i jako ostre w 1,4%.

Zmiany zawartości tlenu z dnia na dzień, będące bodźcem znaczącym i groźnym, występują najczęściej w styczniu, październiku i grudniu. Naj-



RYSUNEK 4. Liczba dni ze zmianami zawartości tlenu w powietrzu w przyjętych klasach wielkości w 2008 roku

FIGURE 4. Number of days with changes of air oxygen concentration within assumed variability ranges in 2008



RYSUNEK 5. Liczba dni ze zmianami zawartości tlenu w powietrzu w przyjętych klasach wielkości w 2009 roku

FIGURE 5. Number of days with changes of air oxygen concentration within assumed variability ranges in 2009

więcej dni o zmianach zawartości tlenu w powietrzu powyżej $10 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ stwierdzono na stacji zlokalizowanej w centrum miasta, różnice między pozostałymi stacjami są niewielkie i wynoszą 1–2 dni w roku.

Podsumowanie i wnioski

Zróznicowana struktura analizowanych obszarów przyczyniła się do różnicowania rejestrowanych elementów meteorologicznych, mających wpływ na zawartość tlenu w powietrzu atmosferycznym tych obszarów.

Średnia roczna zawartość tlenu w powietrzu jest większa na terenach podmiejskich niż w centrum miasta. Największą średnią roczną zawartość tlenu w powietrzu na wszystkich analizowanych stacjach uzyskano w 2009 roku. Największa wystąpiła na stacji podmiejskiej ($284,0 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$), a najmniejsza na stacji zlokalizowanej w ścisłym centrum miasta, w kanionie ulicznym, w obszarze zwartej zabudowy miejskiej ($282,3 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$).

Zawartość tlenu w powietrzu cechuje się określonym rytmem rocznym, maksimum przypada na miesiące zimowe. Większe średnie wartości zawartości tlenu w powietrzu uzyskano na wszystkich analizowanych stacjach w 2009 roku – od $295,5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ na stacji podmiejskiej do $294,4 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ na stacji w centrum miasta. Minimum zawartości tlenu w powietrzu występuje w okresie lata – w porównaniu z miesiącami zimowymi jest mniejsze średnio o $22 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ na stacjach WaU i Leg oraz o $24 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ na stacji zlokalizowanej w centrum miasta. W 2009 roku stwierdzono zdecydowanie większy zakres różnic, dochodzący na stacji WaK do około $28 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$.

Największa średnia miesięczna wartość zawartości tlenu w powietrzu występują w styczniu, a najmniejsza – w lipcu. Średnia zawartość tlenu w powietrzu wykazuje cykliczność dobową. Maksymalne wartości osiągane są w godzinach nocnych, a minimum przypada na godziny popołudniowe (około godz. 16). Największe różnice zawartości tlenu w cyklu dobowym wystąpiły w lipcu 2008 roku na wszystkich analizowanych stacjach, z największą wartością na stacji w centrum miasta (ponad $7 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$). Najmniejsze różnice zawartości tlenu wystąpiły na wszystkich stacjach w grudniu (nie przekraczały $2,5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$).

Zagrożenie zdrowia człowieka, wynikające z dużej zmienności zawartości tlenu w powietrzu w krótkim czasie, jest największe w półroczu chłodnym – przede wszystkim w styczniu, październiku i grudniu. Najmniej dni ze zmianami zawartości tlenu w powietrzu, rzędu poniżej $2,5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$, będące dla organizmu bodźcem obojętnym, wystąpiło na stacji zlokalizowanej w ścisłym centrum miasta. Na stacji tej stwierdzono też występowanie największej liczby dni ze zmianami zawartości tlenu w powietrzu, klasyfikowane jako ostra, wyraźnie odczuwalna zmiana warunków środowiskowych.

Literatura

- BADYDAA., CZECHOWSKI P., MAJEWSKI G., LUBIŃSKI W., DĄBROWIECKI P. 2011: Zanieczyszczenie powietrza atmosferycznego jako czynnik ryzyka chorób układu oddechowego. Jakość powietrza a jakość życia. Red. W. Wardecki. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk: 7–15.

- BŁAŻEJCZYK K. 2004: Bioklimatyczne uwarunkowania rekreacji i turystyki w Polsce. *Prace Geograficzne* 192, IGI PZ PAN, Warszawa.
- BUGBEE B., BLONQUIST M. 2005: Absolute and Relative Gas Concentration: Understanding Oxygen in Air (<http://www.apogee-inst.com>; posted 2005, Verified 24, Apr. 2006).
- DUBICKIA., DUBICKAM., SZYMANOWSKIM. 2002: Klimat Wrocławia. W: Środowisko Wrocławia. Informator 2002. Dolnośląska Fundacja Ekorozwoju, Wrocław: 9–25.
- FORTUNIAK K. 2003: Miejska wyspa ciepła. Podstawy energetyczne, studia eksperymentalne, modele numeryczne i statystyczne. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź.
- FORTUNIAK K., KŁYSIK K. 2008: Osobliwości klimatu miast na przykładzie Łodzi. W: Klimat i bioklimat miast. Red. K. Kłysik, J. Wibig, K. Fortuniak. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź: 477–488.
- GOŁASZEWSKI D., MAJEWSKI G., KLENIEWSKA M. 2010: Formation of urban heat island in Warsaw in conditions of variable cloudiness in 2003–2008. *Acta Agrophysica* 184, 5: 104–118.
- JANKA R.M. 2009: Wpływ natężenia ruchu pojazdów na poziom stężenia tlenu w powietrzu na obszarach skrzyżowań i traktów drogowych. *Ochrona Powietrza i Problemy Odpadów* 43, 1: 12–23.
- LAUGHLIN D.P., STAMFORD J., WHITE D. 2008: Fizjologia człowieka. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- LEWIŃSKAJ. 1991: Klimat miasta – Vademecum urbanisty. Wydawnictwo IGI PZ PAN, Warszawa.
- ŁYKOWSKI B., PRZEWOŹNICZUK W. 2004: Wpływ warunków meteorologicznych na zawartość tlenu w powietrzu atmosferycznym w rejonie Ursynowa. *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska* 1 (28): 152–157.
- MAJEWSKI G., KLENIEWSKA M., BRANDYK A. 2011: Seasonal Variation of Particulate Matter Mass Concentration and Content of Metals. *Polish Journal of Environmental Studies* 20, 2: 417–427.
- MIGAŁA K., PUCZKO D., SIKORA S. 2005: Warunki bioklimatyczne strefy polarnej na przykładzie południowo-zachodniej części Svalbardu. XV Ogólnopolskie Seminarium Meteorologii i Klimatologii Polarnej. 6–7 maja 2005 r., Gdynia.
- OWCZAROWA W.F., BYSZEWA I.W., SZWIEJNOWA T.G., ALESZINA T.P. 1974: Specjalizowany prognoz pogody dla medycznych celów i profilaktyka nieteopaczeskich reakcji. *Woprosy Kurortologii* 2.
- SEŃCZUK W. 2002: Toksykologia. PZWL, Warszawa.
- SIKORA S. 2008: Bioklimat Wrocławia. Rozprawy Naukowe Instytutu Geografii i Rozwoju Regionalnego Uniwersytetu Wrocławskiego, Wrocław.
- SKRZYPSKI J. 1976: Porównanie zawartości tlenu w powietrzu w Krynicy i innych wybranych miejscowościach Polski. *Przegląd Geograficzny* 4: 253–261.

Streszczenie

Zmiany zawartości tlenu (O₂) w powietrzu atmosferycznym aglomeracji warszawskiej w latach 2008–2009. Tlen jest pierwiastkiem odgrywającym szczególną rolę w środowisku. Bierze udział w procesach życiowych i reakcjach chemicznych organizmów, dlatego zmiany jego zawartości w powietrzu mogą stanowić zagrożenie dla ich odpowiedniego przebiegu. Głównym celem pracy było określenie zmian zawartości tlenu w powietrzu atmosferycznym (w przebiegu dobowym miesięcznym i rocznym) aglomeracji warszawskiej. Do analizy wykorzystano parametry meteorologiczne z trzech stacji pomiarowych (różniących się stopniem zurbanizowania) z lat 2008–2009. Stacja MzWarszNiepodKom (WaK) znajduje się w centrum miasta, stacja MzWarszUrsynów (WaU) zlokalizowana jest w południowej (peryferyjnej) dzielnicy Warszawy i stacja MzLegionZeg (Leg) znajduje się w strefie podmiejskiej miasta. Wyniki badań pozwoliły na określenie częstości występowania zmniejszonego poziomu tlenu w powietrzu, zagrażającego zdrowiu człowieka. Zawartość tlenu w powietrzu atmosferycznym obliczona została za pomocą przekształconego równania Clapeyrona. Zróżnicowana struktura analizowanych obszarów przyczyniła się do różnicowania się rejestrowanych elementów meteorologicznych, mających wpływ na zawartość tlenu w powietrzu atmosferycznym tych obszarów. Średnia roczna zawartość tle-

nu w powietrzu jest wyższa na terenach podmiejskich niż w centrum miasta. Największą średnią roczną zawartość tlenu w powietrzu na wszystkich analizowanych stacjach uzyskano w 2009 roku. Największa wystąpiła na stacji podmiejskiej ($284,0 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$), najmniejsza – na stacji zlokalizowanej w ścisłym centrum miasta w obszarze zwartej zabudowy miejskiej ($282,3 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$). Zawartość tlenu w powietrzu cechuje się określonym rytmem rocznym, maksimum przypada na miesiące zimowe, a minimum występuje w okresie lata. Średnia zawartość tlenu w powietrzu wykazuje cykliczność dobową. Maksymalne wartości osiągane są w godzinach nocnych, a minimalne w godzinach popołudniowych. Zagrożenie zdrowia człowieka, wynikające z dużej zmienności zawartości tlenu w powietrzu w krótkim czasie, jest największe w półroczu chłodnym, przede wszystkim w styczniu, październiku i grudniu. Najmniej dni ze zmianami zawartości tlenu w powietrzu, rzędu poniżej $2,5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$, będącymi dla organizmu bodźcem obojętnym, wystąpiło na stacji zlokalizowanej w ścisłym centrum miasta. Na stacji tej stwierdzono też występowanie największej liczby dni ze zmianami zawartości, klasyfikowanymi jako ostra, wyraźnie odczuwalna zmiana warunków środowiskowych.

Summary

Changes of oxygen (O_2) content in the air of Warsaw agglomeration in 2008–2009. Oxygen is an element that plays a special role in the environment. It takes part in the life processes of organisms and chemical reactions, so changing its content in the air could pose a threat to their proper course. The main aim is to assess changes of oxygen content in the air in Warsaw agglomeration. The research was conducted in 2008–2009, at three stations in different degree of urbanization surroundings. MzNiepodKom (WaK) is located in the city center, the station MzWarszUrsynów (WaU) is located

in the southern suburb of Warsaw, and the station MzLegionZeg (Leg) located in the suburban area of the city Legionowo. This will allow to define frequency of a reduced level of oxygen in the air, threatening human health. The content of oxygen in the air was calculated with the modified Clapeyron formula. A different structure of analysed areas contributed to the variation of the recorded meteorological parameters, that influence the concentration of oxygen in the air over those areas. Mean yearly air oxygen concentration is higher on suburban area than in the city centre. The highest annual mean air oxygen concentration at all analysed station was reached in 2009. The highest mean value was recorded at suburban station ($284.0 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$), and the lowest was reached at the station located exactly in the city centre, within the dense urban housing ($282.3 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$). Air oxygen concentration is characterized by a certain yearly course: maximum takes place in winter months, and minimum of air oxygen content is observed during summer. Mean oxygen concentration in the air has a daily periodicity. In the daily course of oxygen concentration, the maximum is reached at night, and the minimum is observed in the afternoon hours. The threat to human health, resulting from a considerable variability of oxygen in the air in short periods of time, is the highest in the cold half-year, and first of all in January, October and December. The lowest number of days with changes of air oxygen concentration below $2.5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$, which is an indifferent incentive for human organism, was observed at the station located exactly in the city centre. At that station, there was also the highest number of days with oxygen changes classified as a hard, highly noticeable, change of environmental conditions.

Authors' address:

Grzegorz Majewski, Dorota Cichońska
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
Zakład Meteorologii i Klimatologii
ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa
Poland
e-mail: grzegorz_majewski@sggw.pl