

PRZESTRZENNO-CZASOWE ZALEŻNOŚCI STĘŻEŃ OZONU W REGIONIE CZARNEGO TRÓJKĄTA

ARTUR GZELLA, JERZY ZWOŹDZIAK

Politechnika Wroclawska, Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

Keywords: statistical analysis, multiple regression, correlation, auto-correlation, principal component analysis, O₃, meteorology.

SPACE-TIME RELATIONSHIPS OF OZONE CONCENTRATIONS IN THE BLACK TRIANGLE REGION

Meteorological parameters which are most significant for ozone forecasting were chosen in the multiple regression analysis for the daily time series. Then correlations between the variables were investigated, both for the daily and temporary values. There was confirmed a strong relationship between atmospheric conditions and ozone concentrations as well as autocorrelations of the temporary time series of ozone from different monitoring stations. Diversification of autocorrelation values arises probably from different receptor locations which was confirmed by the principal component analysis. There were also shown dependences between the ozone time series from different monitoring stations. Strong space-time relationships of ozone concentrations and meteorological conditions in the Black Triangle region can be used in modeling and forecasting of ozone episodes.

Streszczenie

W analizie regresji wielokrotnej dla szeregów czasowych wartości dobowych wytypowano parametry meteorologiczne istotne dla prognozowania stężeń ozonu w powietrzu. Następnie zbadano korelacje między wybranymi zmiennymi, zarówno dla średnich dobowych, jak i dla wartości chwilowych. Potwierdzono silny związek między warunkami atmosferycznymi i stężeniami ozonu oraz występowanie autokorelacji szeregów stężeń chwilowych z wielu stacji monitoringu atmosfery. Zróżnicowanie wartości autokorelacji wynika prawdopodobnie z różnych warunków położenia receptorów, co potwierdza analiza składowych głównych. Wykazano także istnienie zależności między seriami czasowymi stężeń ozonu z różnych punktów pomiarowych. Silne związki przestrzenno-czasowe stężeń ozonu i warunków meteorologicznych na obszarze czarnego trójkąta można wykorzystać w modelowaniu i prognozowaniu epizodów ozonowych.

WPROWADZENIE

Mechanizmy, które rządzą zjawiskami zachodzącymi w atmosferze, można opisać przy pomocy praw termodynamiki i kinetyki, jednak ogromna ilość czynników wpływających na szybkość i kierunek tych procesów nadaje im częściowo losowy charakter [10]. Jednym z takich zjawisk jest pojawianie się epizodów stężeń ozonu w powietrzu. W Europie stale rejestruje się wysokie stężenia ozonu troposferycznego w czasie tzw. epizodów letnich, narażające znaczną część populacji na przekroczenia

wartości określanych jako bezpieczne dla zdrowia ludzi [3]. Dane literaturowe wskazują na częste występowanie epizodów ozonu w Polsce: na Górnym Śląsku – w rejonie Katowic i w Beskidach Śląskich [1, 4], a także na obszarze Czarnego Trójkąta [7, 9]. Dochodzi przy tym do niekorzystnego oddziaływania na ekosystemy rolnicze i leśne, prowadzącego do strat w uprawach i do uszkodzeń naturalnej roślinności [1, 4]. Bytnerowicz i in. [4] podają jako typowy przykład smogu fotochemicznego, wykształconego wskutek korzystnych dla tego rodzaju zjawisk warunków atmosferycznych epizod z okresu 10–15 sierpnia 1997. Autorzy analizują przebieg stężeń ozonu dla stacji monitoringu w Brennej.

W przypadku prognoz stężeń ozonu duże znaczenie ma związek między stężeniem tego zanieczyszczenia a parametrami meteorologicznymi.

Celem niniejszej analizy jest:

- zbadanie zależności między warunkami meteorologicznymi i stężeniami ozonu w powietrzu (na poziomie receptora) dla regionu Czarnego Trójkąta,
- zbadanie autokorelacji szeregów czasowych stężeń ozonu dla regionu Czarnego Trójkąta,
- oraz zbadanie zależności między szeregami czasowymi stężeń ozonu z różnych stacji monitoringu, czyli korelacji przestrzennych dla regionu Czarnego Trójkąta.

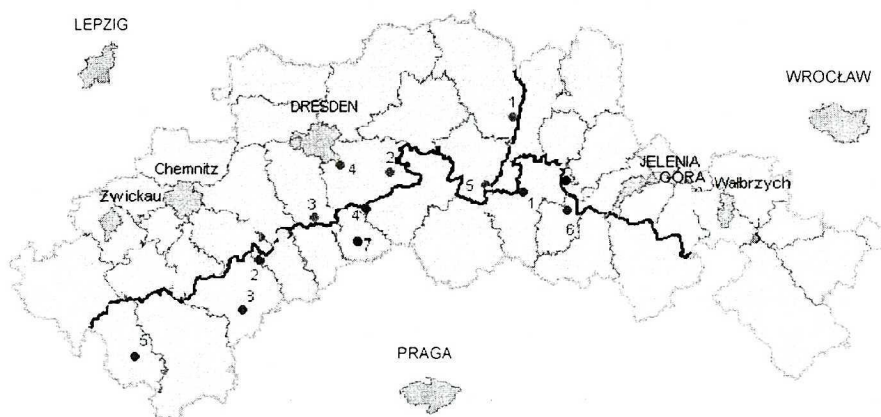
METODYKA BADAŃ

Analizę rozpoczęto od badania normalności szeregów czasowych, w którym zastosowano statystyki Kołmogorowa-Smirnowa, statystykę Lillieforsa oraz statystykę Shapiro-Wilksa.

Dla wstępnego wytypowania parametrów meteorologicznych istotnych dla prognozowania stężeń ozonu zastosowano analizę regresji wielokrotnej dla średnich dobowych wartości stężeń ozonu. W analizie została wykorzystana seria czasowa z jednej tylko stacji monitoringu, znajdującej się w Czerniawie – ze względu na najpełniejszą i najdłuższą bazę danych istniejącą na tej stacji. Pomiary stężeń O_3 prowadzone są tam od połowy 1996 roku, za pomocą automatycznych mierników francuskiej firmy Environnement. Z całej bazy danych wybrano do analizy wartości dobowych okres od września do grudnia 1997 roku, który stanowi najdłuższą, nieprzerwaną serię czasową stężeń ozonu w Czerniawie. Wartości średnie dobowe uzyskano na podstawie wartości pomiarów chwilowych. Dodatkowo określono maksima dobowe dla temperatury – na podstawie maksymalnych temperatur spośród pomierzonych wartości chwilowych. Seria czasowa wartości dobowych została również wykorzystana do wstępnej oceny zależności między stężeniami ozonu i parametrami meteorologicznymi oraz autokorelacji szeregu czasowego stężeń ozonu. W badaniu związków między zmiennymi wykorzystano parametryczne oraz nieparametryczne testy korelacyjne. Jako kryterium do obliczania średniej przyjmowano minimum 70% pełnej ilości pomiarów w danym okresie uśredniania.

Do analizy serii czasowych wartości chwilowych wybrano okres 12–15 sierpnia 1997, szczególnie interesujący z uwagi na epizod ozonowy, który się wówczas pojawił. Szeregi czasowe badanych parametrów pochodzą z 15 stacji monitoringu, na których prowadzone były w tym czasie pomiary ozonu i parametrów meteorologicznych. Rozmieszczenie stacji przedstawiono na rysunku 1. Są to stacje czeskie – w miejscowościach: Albrechtice u Frydlantu, Tusimice, Sous, Sokolov, Sneznik, Usti nad Labem Kockov oraz Rudolice v Horach, stacje niemieckie w miejscowościach: Dresden (Dres-

den Nord i Dresden Mitte), Goerlitz, Mittelndorf, Pirna, Zinnwald i Zittau – Ost oraz polska stacja w Czerniawie. W analizie związków między wartościami chwilowymi zmiennych wykorzystano, oprócz testów korelacyjnych, także analizę składowych głównych.



Legenda:

Stacje niemieckie:

1. Goerlitz
2. Mittenndorf
3. Zinnwald
4. Pirna
5. Zittau

(nie oznaczono na mapie stacji Dresden Nord i Dresden Mitte)

Stacje czeskie:

1. Albrechtice u Frydlandu
2. Rudolice
3. Tusišice
4. Snežnik
5. Sokolov
6. Sous
7. Ustí nad Labem mesto

Stacje polskie:

1. Czerniawa

Rys.1. Rozmieszczenie stacji monitoringu atmosfery, które były źródłem danych dla analizy
Location of atmospheric monitoring stations which were used as data sources in the analysis

Dane pomiarowe, tzn. stężenia 30-minutowe zbierane są w formacie tekstowym. Przed przystąpieniem do analizy dane zostały odpowiednio sformatowane, a wszystkie wartości wynikające z awarii urządzeń pomiarowych lub ich kalibracji, zostały usunięte ze zbioru danych.

WYNIKI BADAŃ

NORMALNOŚĆ ZBIORÓW DANYCH

Zbiory wartości średnich dobowych dla stężeń ozonu oraz parametrów meteorologicznych obejmują w większości przypadków po 122 wartości. Analiza wykazała brak normalności dla szeregów: średnich dobowych stężeń ozonu, średnich dobowych temperatur (statystyka Kolmogorowa i Shapiro-Wilksa) i temperatur maksymalnych. Stwierdzono normalność szeregów: stężeń maksymalnych ozonu, średnich dobowych prędkości wiatru oraz wilgotności.

Zbiory wartości chwilowych dla stężeń ozonu oraz parametrów meteorologicznych z 15 stacji monitoringowych obejmują od 186 do 192 wartości. Przeprowadzone

testy wykazały normalność dla większości szeregów czasowych. W wielu przypadkach statystyka Kołmogorowa-Smirnowa była wprawdzie istotna statystycznie, ale bardziej adekwatne testy – Lillieforsa oraz Shapiro-Wilksa wskazywały na dobre przybliżenie serii danych rozkładem normalnym. Wyjątek stanowiły tutaj szeregi czasowe chwilowych prędkości wiatru w stacjach Rudolice i Usti, dla których istotność wykazały testy Kołmogorowa-Smirnowa i Lillieforsa.

ANALIZA REGRESJI WIELOKROTNEJ DLA WARTOŚCI DOBOWYCH

W analizie krokowej regresji wielokrotnej zbadano stopień zależności między stężeniami ozonu a grupą parametrów meteorologicznych. W analizie uwzględniono również, jako zmienną niezależną, szereg czasowy średnich dobowych stężeń ozonu opóźniony o 1. Grupa parametrów meteorologicznych obejmowała:

- średnią dobową wartość temperatury,
- średnią dobową wartość prędkości wiatru,
- średnią dobową wartość wilgotności,
- średnią dobową wartość ciśnienia,
- średnią dobową wartość kierunku wiatru.

Przeprowadzono osobne analizy dla średnich i maksymalnych wartości dobowych stężeń ozonu. W przypadku wartości średnich, istotne dla opisu jego przebiegu okazały się trzy zmienne: temperatura, wilgotność i średnie stężenie ozonu z poprzedniego dnia. Równanie regresji wyznaczone na podstawie tych parametrów ma następującą postać:

$$O_3 = 58,45 + 1,053 \cdot T - 0,473 \cdot h + 0,41 \cdot O_{3(n-1)},$$

gdzie:

- O_3 – przewidywane średnie wartości dobowe stężeń ozonu [$\mu\text{g}/\text{m}^3$];
- T – średnie wartości dobowe temperatury na powierzchni Ziemi [$^{\circ}\text{C}$];
- h – średnie wartości dobowe wilgotności [%];
- $O_{3(n-1)}$ – średnie wartości dobowe stężeń ozonu mierzone poprzedniego dnia [$\mu\text{g}/\text{m}^3$].

Powyższe równanie redukuje o 81% pozostałą zmienność szeregu. Stopień zależności między zmienną objaśnianą a zmiennymi niezależnymi wynosi 90%. Błąd standardowy estymacji (dyspersja danych wokół linii regresji) wynosi $9,34 \mu\text{g}/\text{m}^3$, a błąd standardowy dla wyrazu wolnego jest równy 6,98.

Analiza szeregu maksymalnych dobowych stężeń ozonu wykazała, że do jego opisu potrzeba czterech zmiennych: temperatury, średniego stężenia ozonu z poprzedniego dnia, prędkości wiatru i wilgotności. Po odpowiednim dopasowaniu współczynników regresji do każdego z wymienionych parametrów otrzymano równanie:

$$O_{3 \max} = 52,21 + 0,628 \cdot O_{3(n-1)} + 1,209 \cdot T - 1,401 \cdot WV - 0,277 \cdot h,$$

gdzie:

- $O_{3 \max}$ – przewidywane maksymalne wartości dobowe stężeń ozonu [$\mu\text{g}/\text{m}^3$];
- WV – średnia dobowa wartość prędkości wiatru [m/s],
(pozostałe oznaczenia jak wyżej).

Równanie regresji redukuje pozostałą zmienność szeregu o 83%, natomiast stopień zależności między zmienną objaśnianą a zmiennymi niezależnymi wynosi 91%. Błąd standardowy estymacji wynosi $11,64 \mu\text{g}/\text{m}^3$, a błąd standardowy dla wyrazu wol-

nego równa się 8,81. W obu przypadkach analiza reszt modeli regresji wykazała dobre dopasowanie reszt do rozkładu normalnego.

Na podstawie analizy regresji wielokrotnej wytypowano do dalszych badań 3 parametry meteorologiczne: temperaturę, wilgotność i prędkość wiatru oraz szereg stężeń ozonu opóźniony o okres 1 doby.

KORELACJE STĘŻEŃ OZONU I PARAMETRÓW METEOROLOGICZNYCH

W przypadku wartości dobowych widać wyraźną zależność między stężeniem ozonu a temperaturą i wilgotnością. Poziom istotności p dla testów korelacji między średnim stężeniem dobowym ozonu a prędkością wiatru przekracza wartość 0,05. Wyniki obliczeń współczynnika korelacji przedstawiono w tabeli 1. Współczynniki korelacji, które są istotne statystycznie zaznaczono pogrubioną czcionką.

Tabela 1. Korelacje – wartości średnie dobowe oraz ozon a temperatura maksymalna
Correlations – daily values and ozone against maximal temperature

Zmienne Variables	Dług. analizow. okresu (mies.) Lenght of analyzed period (month)	Korelacje nieparametryczne Non – parametrical correlations		
		rang Spearmanna range of Spearmann	tau Kendalla tau of Kendall	gamma gamma
WV : O ₃	2,5	- 0,19	- 0,12	- 0,12
H : O ₃	3	- 0,61	- 0,44	- 0,45
T : O ₃	4	0,71	0,54	0,54
T _{max} : O ₃	4	0,75	0,58	0,59
T _{max} : O ₃ max	4	0,76	0,59	0,59

Oznaczenia, marks:

WV – prędkość wiatru, wind velocity

H – wilgotność względna, relative humidity

T – temperatura, temperature

O₃ – stężenie ozonu, ozone concentration

W tabeli 2 zestawiono współczynniki korelacji wartości chwilowych dla ozonu i takich parametrów meteorologicznych jak: temperatura, wilgotność i prędkość wiatru z okresu 12 – 15 sierpnia 1997 roku. Wszystkie współczynniki korelacji są istotne statystycznie. Pogrubioną czcionką zaznaczono wartości korelacji przekraczające |0,5|. Wysokie współczynniki korelacji (powyżej 0,5) wystąpiły w przypadku 11 stacji spośród 15 analizowanych dla temperatury oraz dla 7 stacji spośród 11 analizowanych dla wilgotności. Dla 6 stacji spośród 15 przeanalizowanych wyróżniono znaczące, dodatnie zależności między stężeniem ozonu a prędkością wiatru. W przypadku trzech stacji monitoringu: Sneznik, Rudolice i Zinnwald występowała odwrotna korelacja między stężeniem ozonu i prędkością wiatru dla wartości chwilowych. Korelacje zbadane dla stacji w Rudnolicach przy pomocy testów nieparametrycznych wykazały brak istotności statystycznej (wartości korelacji między - 0,11 do - 0,07). Korelacje między stężeniem ozonu i prędkością wiatru zbadane dla stacji w Usti dodatkowo przy pomocy testów nieparametrycznych wykazały istotność statystyczną i kształtowały się na poziomie od 0,21 do 0,3. Najwyraźniej widoczne zależności przedstawiono na rysunkach 2 i 3.

Tabela 2. Korelacje – wartości chwilowych dla ozonu i parametrów meteorologicznych dla poszczególnych stacji monitoringowych

Correlations – hourly values for ozone and meteorological parameters from various monitoring stations

	temperatura – ozon temperature – ozone	wilgotność – ozon humidity – ozone	prędkość wiatru – ozon wind velocity – ozone
Czerniawa	0,24	-0,33	0,25
Albrechtice	0,43	-0,44	0,09
Tusimice	0,85	-0,79	0,39
Sous	0,63	-0,53	0,22
Sokolov	0,80	-0,64	0,63
Sneznik	0,43	-	-0,14
Usti nL mesto	0,34	0,37	0,34
Rudolice	0,64	-	-
Dresden N. d. d.	0,86	-0,83	0,51
Dresden Mitte	0,82	-	0,53
Goerlitz	0,74	-0,76	0,68
Mittelndorf	0,65	-0,61	0,34
Pirna	0,85	-0,82	0,72
Zinnwald	0,52	-0,40	-0,09
Zittau	0,86	-	0,73

AUTOKORELACJA SZEREGÓW CZASOWYCH STĘŻEŃ OZONU

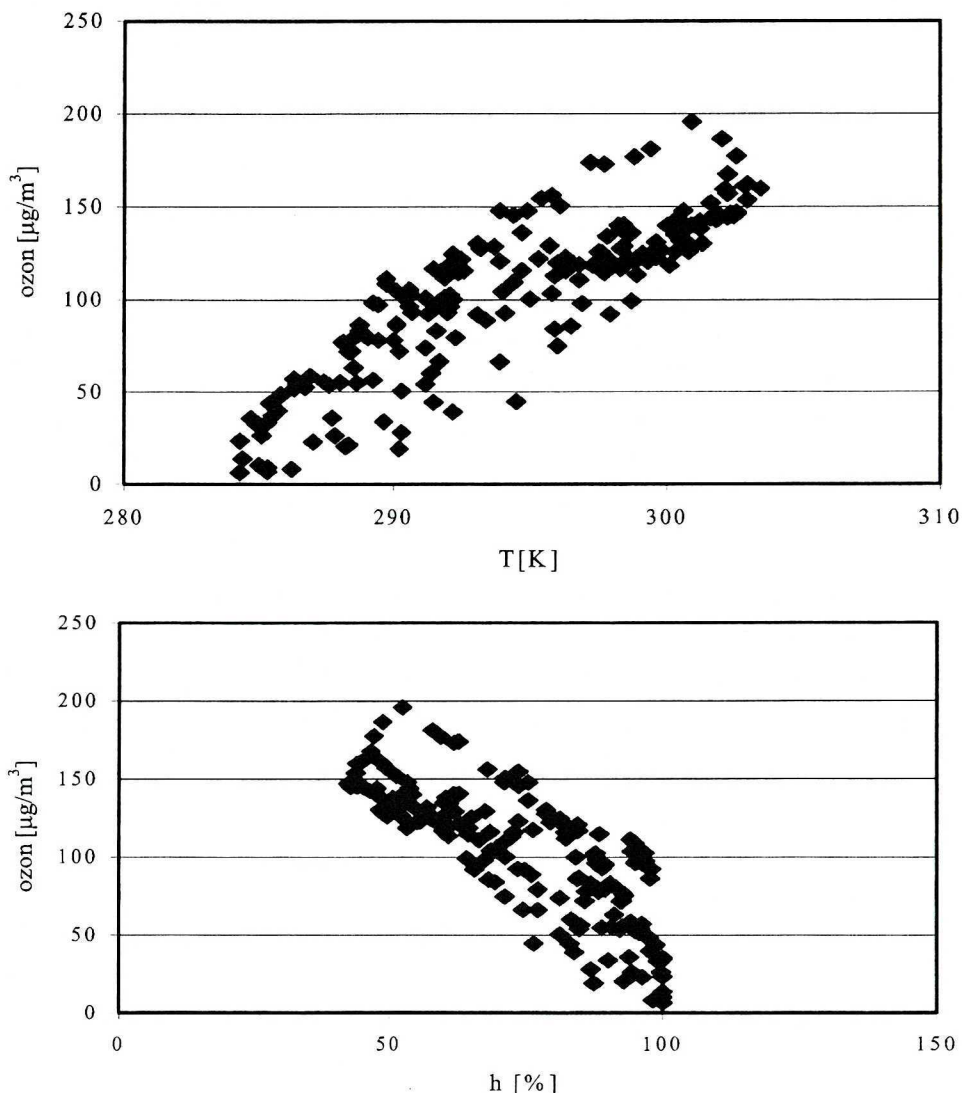
W analizie autokorelacyjnej jako zmienną zależną traktuje się szereg zmiennej niezależnej opóźniony o określoną liczbę obserwacji. Ponieważ współczynnik autokorelacji definiowany jest podobnie jak współczynnik korelacji liniowej Pearsona [6], w analizie zastosowano parametryczne i nieparametryczne testy korelacyjne.

Dla szeregu czasowego średnich stężeń dobowych ozonu zmierzonych na stacji monitoringu w Czerniawie oraz tego samego szeregu przesuniętego o jedną wartość (opóźnienie 1) przeprowadzono nieparametryczne analizy korelacyjne. W wyniku transformacji badane szeregi czasowe miały długość 121 wartości. Współczynnik R Spearmana wynosi 0,82; Tau Kendalla: 0,63; natomiast współczynnik gamma: 0,64. Wszystkie wymienione wartości wystąpiły z poziomem istotności p dla testów korelacji poniżej 0,05. Wykres rozrzutu dla szeregu stężeń dobowych i tego samego szeregu, opóźnionego o jedną wartość przedstawiono na rysunku 4.

Dla szeregów czasowych chwilowych (mierzonych co 30 minut) stężeń ozonu w powietrzu, zarejestrowanych na 15 stacjach monitoringu i tych samych szeregów, przesuniętych o 48 wartości przeprowadzono parametryczne analizy korelacyjne. W wyniku transformacji badane szeregi czasowe miały długość 144 wartości. Wyniki przedstawiono w tabeli 3. W tabeli zaznaczono pogrubioną czcionką współczynniki korelacji, dla których uzyskano znaczące wartości korelacji. Wszystkie współczynniki korelacji są istotne statystycznie.

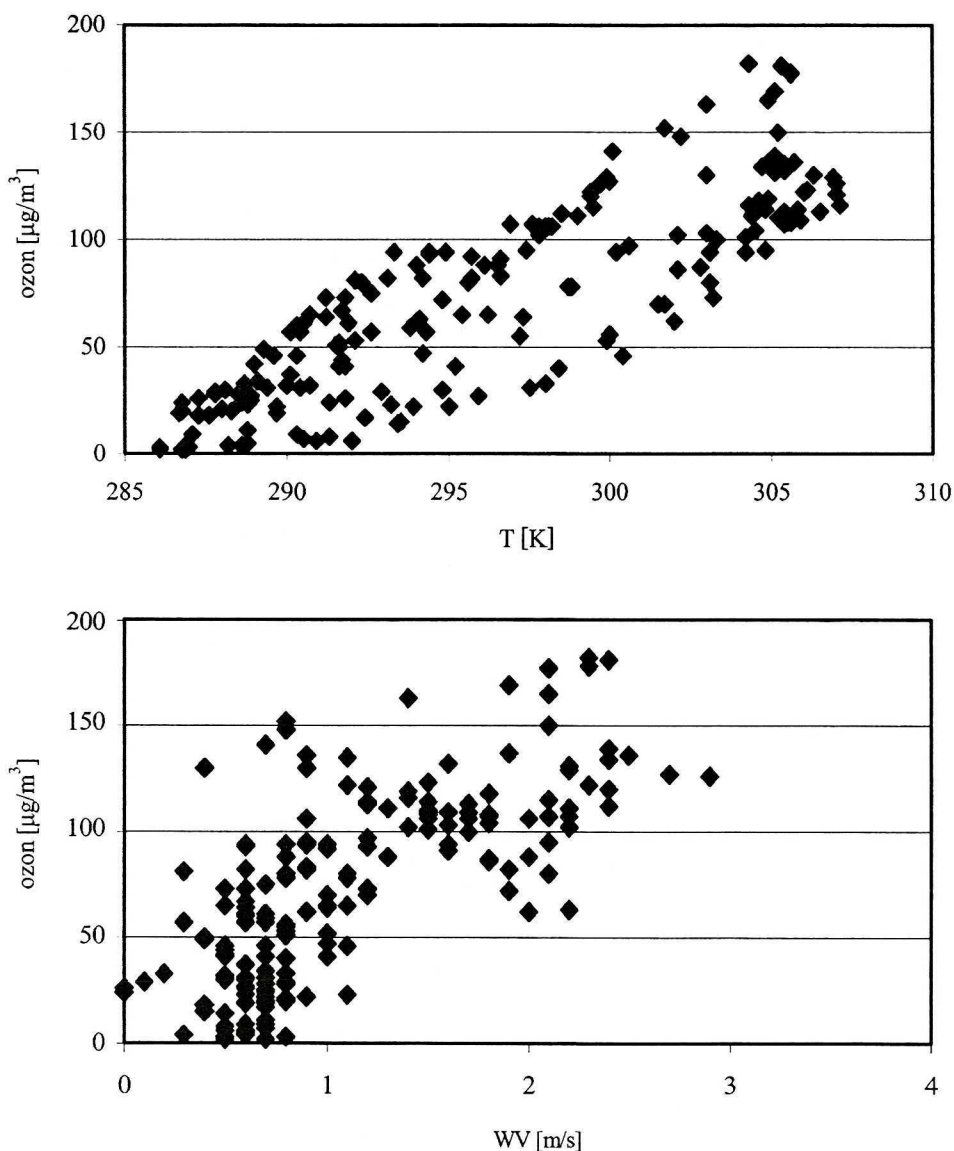
KORELACJE MIĘDZY SZEREGAMI CZASOWYMI STĘŻEŃ CHWILOWYCH OZONU
Z RÓŻNYCH STACJI MONITORINGU

Przeprowadzono analizę parametryczną korelacji między szeregami czasowych stężeń chwilowych ozonu z różnych stacji monitoringu atmosfery na obszarze Czarnego



Rys. 2. Wykresy korelacyjne dla ozonu i temperatury (wyżej) oraz ozonu i wilgotności (niżej) dla stacji monitoringu w miejscowości Tusimice (Czechy)
Correlation diagrams for ozone against temperature (top) and ozone against humidity (bottom) for monitoring station in Tusimice (Czech Republic)

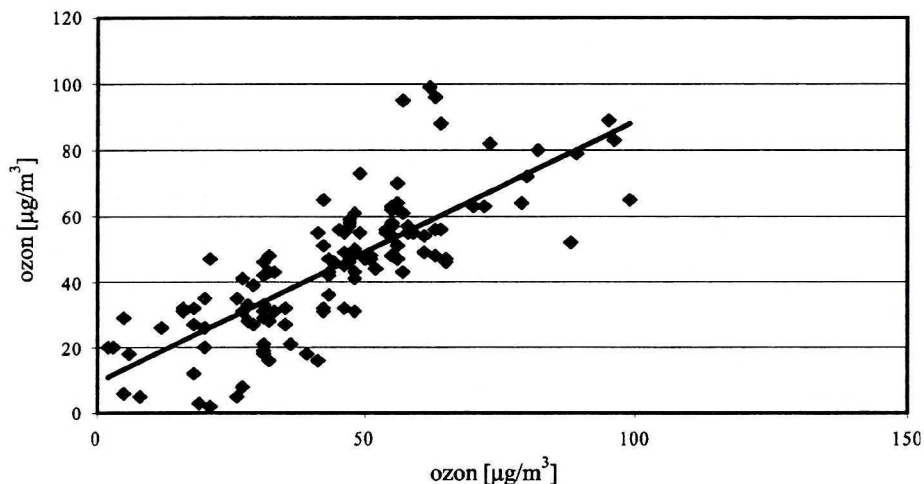
Trójkąta. Poszczególnym stacjom przyporządkowano numery zgodnie z kolejnością zaprezentowaną w tabeli 3, co ułatwia przedstawienie macierzy korelacji dla 15 szeregów czasowych stężeń ozonu. Współczynniki korelacji parametrycznych między poszczególnymi stacjami przedstawiono w tabeli 4. Pogrubiona czcionką oznaczono współczynniki, których wartości przekraczają 0,5.



Rys. 3. Wykresy korelacyjne dla ozonu i temperatury (wyżej) oraz ozonu i prędkości wiatru (niżej) dla stacji monitoringu w Pirnie (Niemcy)
Correlation diagrams for ozone against temperature (top) and ozone against wind velocity (bottom) for monitoring station in Pirmasheim (Germany)

ANALIZA SKŁADOWYCH GŁÓWNYCH

W celu wyraźniejszego wyodrębnienia i uzasadnienia wpływu czynnika warunków lokalizacji na kształtowanie się poziomów stężenia ozonu i ich autokorelacji przeprowadzono analizę składowych głównych. Analiza została wykonana dla szeregów czasowych chwilowych stężeń ozonu z 15 stacji monitoringowych, na pierwotnej ma-



Rys. 4. Wykres rozrzutu – autokorelacja szeregu czasowego średnich dobowych stężeń ozonu
Dissipation diagram – auto-correlation of daily ozone time series

Tabela 3. Autokorelacje szeregów stężeń chwilowych ozonu
Auto-correlations of time series of hourly ozone concentrations

Lp. Nr	Stacja Station	Autokorelacja Auto-correlation
1	Czerniawa	- 0,23
2	Albrechtice	- 0,06
3	Tusimice	0,72
4	Sous	0,23
5	Sokolov	0,68
6	Sneznik	0,06
7	Usti nL mesto	0,40
8	Rudolice	0,12
9	Dresden Nord	0,85
10	Dresden Mitte	0,80
11	Goerlitz	0,46
12	Mittelndorf	0,56
13	Pirna	0,81
14	Zinnwald	- 0,04
15	Zittau	0,78

cierzy korelacji (tzn. dla zasobów zmienności wspólnej). Z uwagi na cel analizy wskazane było dokonanie rotacji struktury czynnikowej i uzyskanie nowego, bardziej przejrzystego układu ładunków [8]. Wykorzystano tutaj metodę „varimax surową”, która maksymalizuje wariancję w kolumnach macierzy surowych ładunków czynnikowych. W wyniku analizy wartości własnych poszczególnych czynników wyodrębnionych w analizie stwierdzono, że czynnik 1 zawiera ponad 68% całkowitej wariancji zbioru danych, powinien zatem zgrupować większość zmiennych, podlegających wpływowi tego samego rodzaju. W tabeli 5 przedstawiono ładunki czynnikowe poszczególnych zmiennych i zaznaczono pogrubioną czcionką współczynniki korelacji, których wartość bezwzględna jest większa niż 0,7.

Tabela 4. Współczynniki korelacji parametrycznych między poszczególnymi stacjami
Parametrical correlation coefficients between various monitoring stations

	1*	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1,00	0,83	0,46	0,65	0,38	0,59	0,52	0,48	0,21	0,38	0,46	0,60	0,40	0,70	0,38
2	0,83	1,00	0,65	0,72	0,65	0,79	0,73	0,63	0,49	0,60	0,56	0,76	0,65	0,76	0,61
3	0,46	0,65	1,00	0,81	0,81	0,61	0,68	0,71	0,68	0,80	0,78	0,62	0,83	0,54	0,86
4	0,65	0,72	0,81	1,00	0,70	0,48	0,48	0,56	0,47	0,63	0,70	0,53	0,60	0,46	0,69
5	0,38	0,65	0,81	0,70	1,00	0,57	0,75	0,51	0,76	0,84	0,74	0,71	0,85	0,44	0,84
6	0,59	0,79	0,61	0,48	0,57	1,00	0,84	0,72	0,51	0,58	0,33	0,73	0,69	0,86	0,60
7	0,52	0,73	0,68	0,48	0,75	0,84	1,00	0,63	0,69	0,77	0,50	0,85	0,81	0,73	0,72
8	0,48	0,63	0,71	0,56	0,51	0,72	0,63	1,00	0,56	0,60	0,47	0,57	0,68	0,72	0,67
9	0,21	0,49	0,68	0,47	0,76	0,51	0,69	0,56	1,00	0,91	0,75	0,73	0,88	0,43	0,82
10	0,38	0,60	0,80	0,63	0,84	0,58	0,77	0,60	0,91	1,00	0,82	0,82	0,94	0,51	0,91
11	0,46	0,56	0,78	0,70	0,74	0,33	0,50	0,47	0,75	0,82	1,00	0,62	0,76	0,34	0,76
12	0,60	0,76	0,62	0,53	0,71	0,73	0,85	0,57	0,73	0,82	0,62	1,00	0,82	0,72	0,73
13	0,40	0,65	0,83	0,60	0,85	0,69	0,81	0,68	0,88	0,94	0,76	0,82	1,00	0,63	0,92
14	0,70	0,76	0,54	0,46	0,44	0,86	0,73	0,72	0,43	0,51	0,34	0,72	0,63	1,00	0,55
15	0,38	0,61	0,86	0,69	0,84	0,60	0,72	0,67	0,82	0,91	0,76	0,73	0,92	0,55	1,00

* 1 – 15: numeracja stacji zgodnie z tabelą 3

Tabela 5. Ładunki czynnikowe
Loadings

Stacja Station	Czynnik 1 Factor 1	Czynnik 2 Factor 2	Czynnik 3 Factor 3
Czerniawa	0,05	0,44	0,84
Albrechtice	0,31	0,59	0,67
Tusimice	0,77	0,30	0,41
Sous	0,56	0,12	0,75
Sokolov	0,82	0,24	0,32
Sneznik	0,28	0,89	0,21
Usti nL mesto	0,50	0,78	0,16
Rudolice	0,40	0,70	0,22
Dresden Nord	0,88	0,32	-0,05
Dresden Mitte	0,88	0,37	0,19
Goerlitz	0,82	0,00	0,44
Mittelndorf	0,57	0,64	0,27
Pirna	0,83	0,49	0,15
Zinnwald	0,18	0,87	0,33
Zittau	0,86	0,36	0,18

DYSKUSJA WYNIKÓW

Brak normalności w przypadku niektórych zmiennych wymagał zastosowania dla nich nieparametrycznych testów korelacyjnych (współczynniki R Spearmana, Tau Kendalla oraz gamma) dla uzyskania wiarygodnej informacji o występowaniu lub braku zależności między zmiennymi.

Analiza krokowej regresji wielokrotnej dla średnich dobowych wartości stężeń pozwoliła wstępnie wytypować parametry meteorologiczne istotne dla prognozowania

stężenia ozonu. Sformułowano dla stacji w Czerniawie równania regresji, opisujące przebieg serii czasowej średnich i maksymalnych stężeń dobowych ozonu przy pomocy parametrów meteorologicznych i szeregu średnich dobowych wartości stężeń ozonu opóźnionego o 1 dobę. Równania wymagają sprawdzenia dla danych, które nie były użyte do ich budowy.

Dla czasów uśredniania rzędu doby wykazano silne i istotne statystycznie związki między stężeniami ozonu oraz temperaturą i wilgotnością. Zależności dla prędkości wiatru okazały się nieistotne statystycznie. Wysokie i istotne statystyczne korelacje między temperaturą, wilgotnością względną oraz prędkością wiatru i stężeniami ozonu wykazano dla wartości chwilowych. W literaturze naukowej można odnaleźć podobny zbiór zmiennych, silnie skorelowanych z epizodami ozonu [2, 5]. Wyróżnia się na przykład: dobowe maksimum temperatury przy powierzchni Ziemi, maksimum temperatury zmierzone poprzedniego dnia, od strony nawietrznej stacji, średnią prędkość wiatru mierzoną w godzinach 7–10, wilgotność względną mierzoną w godzinach 10–16 i wysokość warstwy mieszania, mierzona w godzinach 7–10. Dla niektórych obszarów miejskich (zachodnie stany USA) wykazano, że lepszymi predyktorami od temperatury przy powierzchni Ziemi oraz porannej wysokości warstwy mieszania są: temperatura na wysokości odpowiadającej ciśnieniu 850 mb oraz popołudniowa wysokość warstwy mieszania. Pod uwagę bierze się także maksymalne stężenie ozonu poprzedniego dnia [2].

Analiza autokorelacyjna dla wartości dobowych wykazała istnienie znaczącej i istotnej statystycznie zależności między stężeniami ozonu z dwóch kolejnych dni. W przypadku wartości chwilowych stężeń ozonu wykazano zróżnicowanie, jeśli chodzi o zależności występujące wewnątrz serii czasowej dla poszczególnych stacji monitoringu. Dla badanego okresu można pod względem wartości korelacji wyróżnić trzy grupy stacji monitoringowych. Pierwsza grupa charakteryzuje się bardzo słabą, często odwrotną zależnością stężeń występujących w odstępie 24 godzin (48 pomiarów). Reprezentacyjną stacją dla tej grupy jest Czerniawa (korelacja na poziomie: $-0,23$). Do tej grupy stacji należą także: Rudolice, Zinnwald, Albrechtice, Sous i Sneznik. Druga grupa stacji wykazuje średnią zależność stężeń występujących w odstępie 24 godzin (48 pomiarów). Reprezentacyjną dla tej grupy stacją jest Mittelndorf. Wyniki analizy dla szeregów stężeń chwilowych wykazały w przypadku Mittelndorf istotną zależność o średniej mocy (na poziomie $0,56$). Do grupy tej należą też stacje w Goerlitz i w Usti. Trzecia grupa stacji charakteryzuje się wysokimi współczynnikami korelacji parametrycznych dla stężeń występujących w odstępie 24 godzin. Typowym przykładem jest tutaj stacja Dresden Nord. Współczynniki parametrycznej korelacji dla szeregów stężeń chwilowych wykazały dla Drezna istotną i silną zależność (na poziomie $0,85$). Pozostałe stacje tej grupy to: Tusimice, Sokolov, Dresden Mitte, Pirna i Zittau. Przynajmniej takiego rozdziału stacji są różnice w ich położeniu. Pierwsza grupa to stacje monitoringu zlokalizowane na znacznych wysokościach nad poziomem morza, w otoczeniu naturalnym lub w środowisku zmienionym rolniczo. W drugiej i trzeciej grupie są stacje położone na terenach typowo miejskich lub poza miejskich, ale o znaczącej gęstości zabudowy i z występującym przemysłem.

Na współczynniki korelacji między szeregami czasowymi stężeń chwilowych ozonu z różnych stacji monitoringu mogą mieć wpływ przede wszystkim dwa czynniki:

- odległość stacji monitoringu,
- wspólne cechy lokalizacji stacji monitoringu.

Rzeczywiście – analiza wykazała, że wysokie wartości korelacji parametrycznych występują dla punktów pomiarowych znajdujących się stosunkowo blisko siebie.

Przykładem mogą tutaj być takie stacje jak: Sneznik i Zinnwald (0,86), Dresden Nord i Dresden Mitte (0,91), Dresden Mitte i Pirna (0,94), lub Mittelndorf i Pirna (0,82). Istotną rolę odgrywa jednak także drugi z wymienionych czynników. Wysokie współczynniki korelacji występują także w przypadku stacji odległych od siebie, ale położonych w podobnych warunkach otoczenia. Przykładem mogą być tutaj takie stacje jak: Sokolov i Pirna (0,85), Sokolov i Dresden Nord (0,76), lub Sokolov i Zittau (0,84). Występują również takie sytuacje, kiedy stacje monitoringu leżą daleko od siebie, warunki ich położenia są różne, a mimo to współczynniki korelacji osiągają wysokie wartości, np.: Sokolov i Mittelndorf (0,71) albo kiedy stacje, przy podobnych warunkach położenia, wykazują niewielkie zależności dla stężeń ozonu np.: Czerniawa i Rudolice (0,48). Ogólnie wyniki analizy potwierdzają jednak istnienie zależności między różnymi punktami pomiarowymi stężeń ozonu. 83% przedstawionych korelacji przekracza wartość 0,5.

W analizie składowych głównych wyodrębniono ładunki czynnikowe poszczególnych zmiennych i zaznaczono pogrubioną czcionką współczynniki korelacji, których wartość bezwzględna jest większa niż 0,7. Według tego kryterium, wszystkie stacje wymienione w analizie autokorelacji w trzeciej grupie, czyli takie, które są położone w strefie wpływów miejskich, zgrupował pierwszy czynnik. Stacje z drugiej grupy zachowują się różnie, co wynika ze zróżnicowanego charakteru ich położenia. Według wyników tej analizy np. stacja w Mittelndorf mogłaby być zaliczona do pierwszej grupy, ponieważ wykazuje względnie słabą i dosyć równomiernie rozłożoną wśród trzech czynników korelację – podobnie jak Albrechtice. Stacje pierwszej grupy, znajdujące się pod dominującym wpływem warunków naturalnych, w większości są skorelowane z innymi czynnikami niż pierwszy lub nie wykazują korelacji wyższej niż 0,7 dla żadnego z czynników.

WNIOSKI

Wyniki analiz korelacyjnych potwierdziły zależności między stężeniem ozonu oraz parametrami meteorologicznymi, jak również autokorelację szeregów stężeń ozonu. Parametry meteorologiczne wytypowane jako najlepsze dla opisywania przebiegu stężeń ozonu są często wymieniane w literaturze [2, 5].

Analiza autokorelacji szeregów stężeń chwilowych z różnych stacji monitoringu atmosfery wyodrębniła trzy grupy stacji. Zróżnicowanie w kształtowaniu się autokorelacji wynika z różnych warunków położenia receptorów, co potwierdza analiza składowych głównych. Wykazano ponadto istnienie zależności między seriami czasowymi stężeń ozonu z różnych punktów pomiarowych.

Przeprowadzona analiza statystyczna danych pomiarowych potwierdziła występowanie znaczących związków czasowo-przestrzennych dla stężeń ozonu oraz silną korelację tych stężeń z warunkami meteorologicznymi. Zależności te można bez wątpienia wykorzystać w modelowaniu i prognozowaniu stężeń ozonu na obszarze Czarne-go Trójkąta, co powinno być przedmiotem dalszych badań.

LITERATURA

- [1] Bytnerowicz A., S. Godzik, M. Poth, I. Anderson, J. Szdzuj, C. Tobias, S. Macko, P. Kubiesa, T. Staszewski, M. Fenn: *Chemical Composition of Air, Soil and Vegetation in Forests of the Silesian Beskid Mountains, Poland*, Water, Air and Soil Pollution, **116**, 141–150 (1999).
- [2] Chaloulakou A., D. Assimacopoulos, T. Lekkas: *Forecasting daily maximum ozone concentrations in the Athens basin*, Environmental Monitoring and Assessment, **56**, 97–112 (1999).
- [3] Friedrich R., S. Reis, D. Simpson, N. Moussiopoulos, P. Sahm: *Tropospheric Ozone Abatement in Europe*, [in:] Eurotrac-2 Symposium 2000, Guest Contribution, GUEST – 8, Int. Sc. Secr. GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, Munich, Germany, 2000.
- [4] Godzik S.: *Ozone in the Upper Silesia Region – Concentration and Effects to Plant I*, [in:] International Symposium on Air Pollution and Climate Change Effects on Foest Ecosystems, February 5 – 9, 1996, Riverside, California.
- [5] Hubbard M.C., W.G. Cobourn: *Development of a regresion model to forecast ground-level ozone concentration in Louisville, KY*, Atmospheric Environment, **32**, 14/15, 2637–2647 (1998).
- [6] Józwiak J., J. Podgórski: *Statystyka od podstaw*, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 2000.
- [7] Memmesheimer M., J. Tippke, H.J. Jakobs, G. Piekorz, M. Weber, G. Schneider, A. Ebel, M. Kerschgen: *Test case for BERLIOZ*, Application of the EURAD modeling system to a sommer smog episode in July 1994 with special emphasis on the urban plume of Berlin.
- [8] Wilks D.S.: *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, Academic Press, 1995
- [9] Zwoździak J., A. Zwoździak, A. Gzella: *Prognozowanie stężeń zanieczyszczeń w powietrzu za pomocą wyrównywania wykładniczego i techniki ARIMA*, [in:] *Materiały III Forum Inżynierii Ekologicznej*, Nałęczów 2000.
- [10] Zwoździak J.: *Metody prognozy i analizy stężeń zanieczyszczeń w powietrzu w regionie Czarnego Trójkąta*, PWr Wrocław 1995.

Wpłynęło: 18 stycznia 2002, zaakceptowano do druku: 4 września 2002.