

ANALIZA ZMIENNOŚCI WYBRANYCH ZANIECZYSZCZEŃ POWIETRZA  
W ZALEŻNOŚCI OD OPADÓW ATMOSFERYCZNYCH  
W REJONIE URSYNOWA

*Grzegorz Majewski, Wiesława Przewoźniczuk, Małgorzata Kleniewska,  
Katarzyna Rozbicka*

Zakład Meteorologii i Klimatologii, Wydział Inżynierii i Kształtowania Środowiska, SGGW  
ul. Nowoursynowska 166, 02-776 Warszawa  
e-mail: grzegorz\_majewski@sggw.pl

**Streszczenie.** Celem pracy było określenie zmienności stężenia zanieczyszczeń gazowych ( $\text{NO}_2$  i  $\text{SO}_2$ ) i pyłowych (PM10) w zależności od warunków opadowych, oraz próba ustalenia empirycznej zależności skuteczności wymywania pyłu zawieszonego od natężenia, czasu trwania i wielkości opadu atmosferycznego. Skuteczność wymywania ( $\Delta S$ ) obliczano jako ubytek stężenia pyłu, spowodowany opadem atmosferycznym, wyrażony w % zawartości pyłu przed wystąpieniem opadu. W pracy wykorzystano średnie dobowe i średnie 1-godzinne wartości stężenia zanieczyszczeń gazowych ( $\text{NO}_2$  i  $\text{SO}_2$ ) i pyłowych (PM10) ze stacji monitoringu powietrza na Ursynowie (MzWarszUrsynow) z lat 2004-2007 oraz dobowe i 1-godzinne sumy opadów atmosferycznych ze stacji MzWarszSGGW należącej do Zakładu Meteorologii i Klimatologii SGGW. Zaprezentowane wyniki świadczą o wpływie opadów atmosferycznych na zmniejszenie zanieczyszczenia atmosfery – szczególnie pyłem zawieszonym PM10. Otrzymane zależności w postaci równań regresji prostej należy traktować głównie jako statystyczny wskaźnik roli opadów, który z pewnością nie przesądza o ich ilościowej skuteczności. Analiza dotycząca ustalenia empirycznej zależności wymywania pyłu zawieszonego PM10 od natężenia, czasu trwania i wysokości opadu atmosferycznego wykazała, że istnieje słaba, istotna statystycznie, korelacja pomiędzy skutecznością usuwania pyłu z powietrza a czasem trwania opadu i sumą opadu, a uzyskana zależność w postaci równania prostej tłumaczy ok. 10% zmienności ( $\Delta S$ ).

**Słowa kluczowe:** stężenie zanieczyszczenia, wysokość opadu atmosferycznego, czas trwania opadu, natężenie opadu, analiza regresji

WSTĘP

Wpływ elementów meteorologicznych na zróżnicowanie stężenia zanieczyszczeń wokół źródła emisji jest bezsporny. Ocenia się, że o wielkości i zmienności zanie-

czyszczenia powietrza w znacznym stopniu decydują warunki meteorologiczne, które mogą być zarówno efektywnym czynnikiem rozcieńczenia, jak i koncentracji zanieczyszczeń oraz powstawania nowych, bardziej szkodliwych związków, co wykazano w wielu pracach m. in. Seinfeld (1998), Drzeniecka i in. (2000), Godłowska i Tomaszewska (2000), van der Wal i Janssen (2000), Yang (2002), Godłowska (2004), Nowicka i in., (2004), Turahoğlu (2005), Kleniewska (2005), Rozbicka (2006), Majewski (2007), Czarnecka i Kalbarczyk (2005 i 2007). Spośród tych elementów zasadnicze znaczenie mają: obecność termicznych warstw hamujących, natężenie promieniowania, kierunek i prędkość wiatru, ciśnienie atmosferyczne, wilgotność względna powietrza i opady atmosferyczne. Wpływ wymienionych elementów meteorologicznych na stężenie zanieczyszczeń nie jest jednoznaczny ze względu na złożoność powiązań, trudnych do zweryfikowania w naturalnym środowisku.

Wymywanie zanieczyszczeń powietrza przez opady atmosferyczne (mokra depozycja) jest niezwykle ważnym zagadnieniem w modelowaniu rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w atmosferze. Może ono zachodzić w dwojaki sposób: poprzez absorpcję zanieczyszczeń w chmurach ("rain-out" lub "in cloud scavenging") oraz przez pochłanianie ich przez wszystkie rodzaje opadów atmosferycznych, czyli wymywanie podchmurowe ("wash-out" lub "below cloud scavenging").

Współczynnik wymywania zanieczyszczeń powietrza przez opady atmosferyczne –  $W$  – jest wyrażany wzorem (1) (Boubel i in. 1994)

$$W = \frac{k\rho}{\chi} \quad (1)$$

gdzie:  $k$  – koncentracja zanieczyszczenia w opadzie ( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ),  $\rho$  – gęstość powietrza ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ),  $\chi$  – stężenie zanieczyszczenia przed wystąpieniem opadu ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ).

Zmiana stężenia zanieczyszczenia gazowego w powietrzu na skutek jego wymywania przez opady, w uproszczonych modelach rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń, jest wyrażana równaniem zaniku pierwszego rzędu (2) (Juda-Rezler 2000, Markiewicz 2004):

$$\frac{dC}{dt} = -\Lambda C \quad (2)$$

gdzie:  $C$  – stężenie zanieczyszczenia w powietrzu,  $\Lambda$  – współczynnik wymywania ( $\text{s}^{-1}$ ), W modelach typu gaussowskiego występuje scałkowana postać powyższego równania [3] (Juda-Rezler 2000, Markiewicz 2004 i Markiewicz 2007)

$$C(t) = C_0 \exp(-\Lambda t) \quad (3)$$

$C(t)$  – stężenie zanieczyszczenia w powietrzu po upływie czasu  $t$  ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )  $C_0$  – stężenie początkowe ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ),  $t$  – czas trwania opadu.

W pracy podjęto próbę określenia zmienności stężenia zanieczyszczeń gazowych ( $\text{NO}_2$  i  $\text{SO}_2$ ) i pyłowych (PM10) w zależności od warunków opadowych, oraz próba ustalenia empirycznej zależności wymywania zanieczyszczeń pyłowych (PM10) od: natężenia, czasu trwania i wysokości opadu atmosferycznego.

#### MATERIAŁ I METODA

W pracy wykorzystano średnie dobowe i średnie 1-godzinne wartości stężenia zanieczyszczeń gazowych ( $\text{NO}_2$  i  $\text{SO}_2$ ) i pyłowych (PM10) ze stacji monitoringu powietrza na Ursynowie (MzWarszUrsynow) z lat 2004-2007 oraz dobowe i 1-godzinne sumy opadów atmosferycznych ze stacji MzWarszSGGW należącej do Zakładu Meteorologii i Klimatologii SGGW.

Wpływ opadów atmosferycznych na stężenie analizowanych zanieczyszczeń oceniano przy wykorzystaniu analizy regresji prostej i wielokrotnej, na poziomach istotności  $\alpha = 0,05$  i  $\alpha = 0,01$ . W analizie korelowane zmienne (stężenie zanieczyszczenia, suma opadu, czas trwania opadu) były ujęte w postaci wartości dobowych, pentadowych, dekadowych i miesięcznych (średnich lub sum).

W pracy podjęto także, próbę ustalenia empirycznej zależności między wymywaniem pyłu zawieszonego przez opady deszczu a natężeniem, czasem trwania i wysokością opadu atmosferycznego. Ilość substancji usuniętej z powietrza przez opady, nazwaną przez autorów **skutecznością** usuwania pyłu z powietrza, wyrażano w procentach zawartości pyłu przed opadem i obliczano wg wzoru [4].

$$\Delta S = \frac{S_t - S_0}{S_0} \cdot 100\% \quad (4)$$

gdzie:  $\Delta S$  – skuteczność usuwania pyłu z powietrza (%),  $t$  – czas trwania opadu (h),  $S_t$  – stężenie pyłu zawieszonego PM10 po upływie czasu  $t$  ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ),  $S_0$  – stężenie pyłu PM10 przed rozpoczęciem opadu ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ).

Wobec występującej niekiedy dużej zmienności czasowej stężenia pyłu,  $S_t$  i  $S_0$  obliczano jako średnie stężenia z 3 godzin przed wystąpieniem i po zakończeniu opadu. Następnie, obliczono korelację i wyznaczono równania regresji między skutecznością usuwania pyłu  $\Delta S$  a natężeniem, czasem trwania i wysokością opadu atmosferycznego. Obliczenia te przeprowadzono po wyeliminowaniu przypadków  $\Delta S \leq 0$ , czyli tych sytuacji, kiedy po zakończeniu opadu następował wzrost stężenia pyłu.

Podstawę do obliczeń stanowiły średnie godzinowe wartości stężenia pyłu PM10, zarejestrowane na stacji MzWarszUrsynow oraz sumy godzinowe opadu atmosferycznego zarejestrowane na stacji MzWarszSGGW. Stacje te znajdują się w odległości 800 m od siebie. Obliczenia dotyczyły tylko opadów ciekłych w okresie IV-X, w latach 2005, 2006 i 2007. Dla wszystkich rozpatrywanych

w tym okresie przypadków wystąpienia opadu zanotowano godzinę początku i końca opadu i określono czas trwania opadu z dokładnością do 1 godziny.

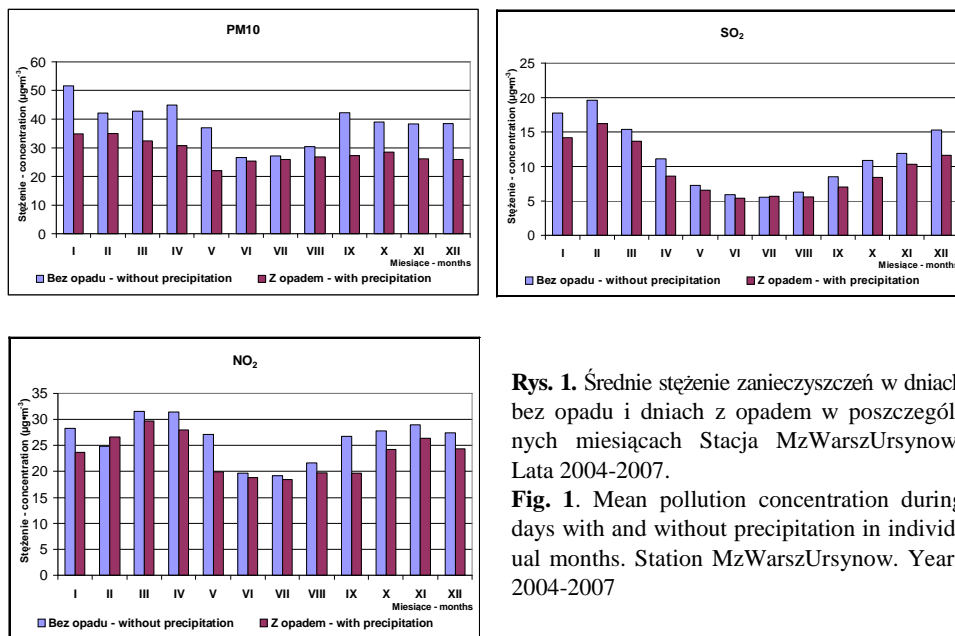
Natężenie opadu obliczano dzieląc sumę opadu przez czas jego trwania z dokładnością do 1 godziny (5).

$$I = \frac{P}{t} \quad (5)$$

$I$  – natężenie opadu ( $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ),  $P$  – suma opadu (mm),  $t$  – czas trwania opadu (h).

## WYNIKI

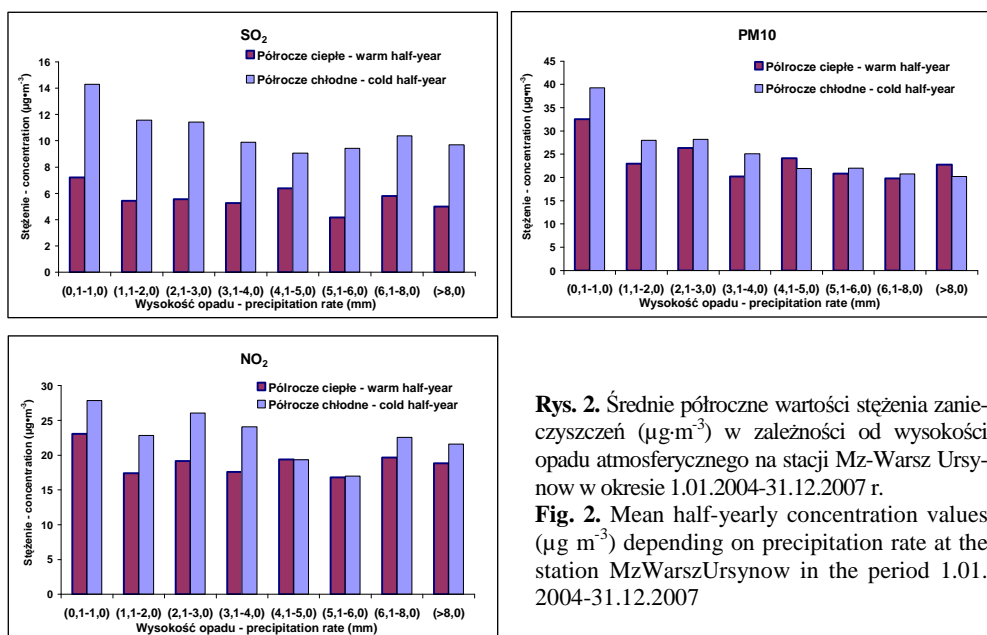
Porównanie średniego stężenia analizowanych zanieczyszczeń, obliczonego dla dni z opadem i dni bez opadu, wskazało na rolę tego czynnika meteorologicznego w oczyszczaniu powietrza z zanieczyszczeń, aczkolwiek nie zawsze rola ta była jednoznaczna (rys. 1). Stężenie pyłu PM10 w dniach z opadem było we wszystkich miesiącach mniejsze niż w dniach bez opadu. W przypadku stężenia dwutlenku siarki i dwutlenku azotu były jednak sytuacje, gdzie stężenie tych zanieczyszczeń było większe w dniach z opadem (w lipcu dla  $\text{SO}_2$  oraz w lutym dla  $\text{NO}_2$ ). Jednak w skali całego roku stężenie analizowanych zanieczyszczeń w dniach z opadem było mniejsze niż w dniach bez opadu: dla pyłu PM10 – o około 29%, dwutlenku siarki – o około 17% i dwutlenku azotu – o około 11%.



**Rys. 1.** Średnie stężenie zanieczyszczeń w dniach bez opadu i dniach z opadem w poszczególnych miesiącach Stacja MzWarszUrsynow. Lata 2004-2007.

**Fig. 1.** Mean pollution concentration during days with and without precipitation in individual months. Station MzWarszUrsynow. Years 2004-2007

Zależność średnich dobowych stężeń zanieczyszczeń PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub> i NO<sub>2</sub> od wysokości opadu atmosferycznego dla stacji MzWarszUrsynów przedstawiono na rysunku 2.



**Rys. 2.** Średnie półroczne wartości stężenia zanieczyszczeń ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) w zależności od wysokości opadu atmosferycznego na stacji Mz-Warsz Ursynow w okresie 1.01.2004-31.12.2007 r.

**Fig. 2.** Mean half-yearly concentration values ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) depending on precipitation rate at the station MzWarszUrsynow in the period 1.01.2004-31.12.2007

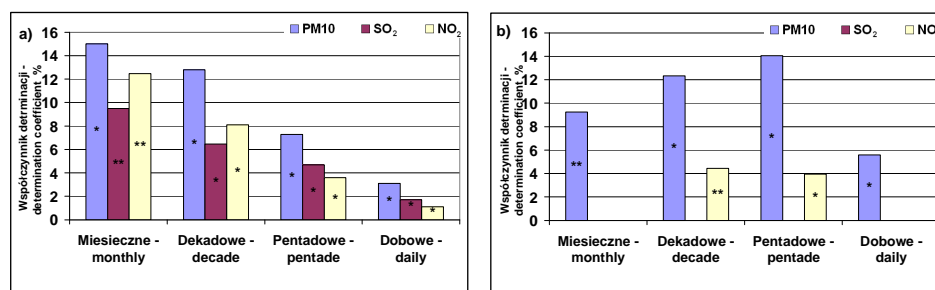
Dla pyłu zawieszono PM<sub>10</sub> obserwuje się w półroczu ciepłym, spadek stężenia pyłu wraz ze wzrostem wysokości opadu atmosferycznego do wysokości opadu ok. 4 mm, a powyżej wzrost stężenia pyłu PM<sub>10</sub>. W półroczu chłodnym nie obserwuje się wzrostu stężenia pyłu PM<sub>10</sub> przy wyższych opadach. Najniższe wartości stężenia pyłu PM<sub>10</sub> w półroczu ciepłym przypadają na przedział 3,1-4,0 mm, a najwyższe występują przy najniższych opadach atmosferycznych i zawierają się w przedziale 0,1-1,0 mm. W półroczu chłodnym najniższe stężenia pyłu PM<sub>10</sub> występują przy opadach powyżej 8 mm, a najwyższe występują przy najniższych opadach atmosferycznych w przedziale 0,1-1,0 mm.

Dla dwutlenku azotu obserwuje się spadek stężenia tego gazu wraz ze wzrostem wysokości opadu atmosferycznego do ok. 6 mm, a powyżej wyraźny wzrost wartości stężenia NO<sub>2</sub> wraz z wysokością opadu atmosferycznego, zarówno w półroczu chłodnym, jak i ciepłym. Najniższe stężenie dwutlenku azotu w obydwu półroczach występowały przy opadach o wysokości 5,1-6,0 mm, a najwyższe przy najniższych opadach atmosferycznych o wartościach w przedziale 0,1-1,0 mm.

Dla dwutlenku siarki obserwuje się spadek stężenia tego gazu wraz ze wzrostem wysokości opadu atmosferycznego do wysokości opadu ok. 5 mm, a powyżej wzrost wartości stężenia tego gazu wraz z wysokością opadu atmosferycznego, co najbardziej widoczne jest w półroczu chłodnym. W półroczu ciepłym trudno jednoznacznie określić wpływ opadu na stężenie  $\text{SO}_2$ , gdyż jak widać z rysunku 2, spadek i wzrost stężenia w przedziałach wysokości opadu powtarza się naprzemian. Najniższe wartości stężenia dwutlenku siarki w półroczu ciepłym występują przy opadach o wysokości 5,1-6,0 mm, natomiast w półroczu chłodnym 4,1-5,0 mm. Najwyższe wartości stężenia  $\text{SO}_2$ , w obydwu półroczach występują przy najniższych opadach atmosferycznych i zawierają się w przedziale 0,1-1,0 mm.

Na podstawie uzyskanych wyników trudno jednoznacznie określić wpływ opadów atmosferycznych na stężenie analizowanych zanieczyszczeń, szczególnie przy wyższych wartościach opadu atmosferycznego. Spadek wartości stężenia np. dla  $\text{NO}_2$  wraz ze wzrostem wysokości opadu atmosferycznego może być spowodowany wzrostem wydajności reakcji utleniania w fazie ciekłej, a wzrost stężenia dwutlenku azotu czy pozostałych analizowanych zanieczyszczeń przy wyższych wartościach opadu atmosferycznego, wskazuje na złożoność tego zjawiska, które zależy nie tylko od wysokości opadu atmosferycznego, ale również od innych czynników, takich jak: charakterystyka czasu trwania i natężenia opadu, rodzaju opadu, rozmiaru kropeł deszczu ich składu chemicznego, czy od innych elementów meteorologicznych. Świadczy to o złożoności zjawiska oczyszczania atmosfery przez opady atmosferyczne.

Pierwsze próby statystycznej oceny wpływu opadów atmosferycznych na stężenie analizowanych zanieczyszczeń przeprowadzono przy zastosowaniu wartości dobowych, pentadowych, dekadowych, i miesięcznych obu zmiennych (stężenia zanieczyszczenia i wysokości opadu atmosferycznego). Korelowano średnie stężenia analizowanych zanieczyszczeń z sumami opadów, a także z czasem ich trwania. Współczynniki determinacji dla zależności stężenia zanieczyszczeń od sumy opadów atmosferycznych według dni, pentad, dekad i miesięcy ilustruje rysunek 3. Wszystkie uzyskane wyniki były statystycznie istotne, opisujące ujemną zależność stężenia analizowanych zanieczyszczeń od sumy opadów. Wysokość opadu zaledwie w 3,6-15% objaśnia zmienność analizowanych zanieczyszczeń. Najwyższy współczynnik determinacji uzyskany dla wartości miesięcznych: wynosił odpowiednio: dla pyłu  $\text{PM}_{10}$  – 15%,  $\text{SO}_2$  – 9,5% i  $\text{NO}_2$  – 12,5%. Najniższe współczynniki korelacji uzyskano dla wartości dobowych obu zmiennych. Istotne współczynniki korelacji dla zależności stężenia zanieczyszczeń od czasu trwania opadu uzyskano dla pyłu  $\text{PM}_{10}$  (dla wszystkich okresów: miesięcy, dekad, pentad i dni), i  $\text{NO}_2$  (dla dekad i pentad). Najlepszy opis zależności stężenia zanieczyszczenia od czasu trwania opadu uzyskano dla wartości pentadowych ( $R^2$  około 15%).

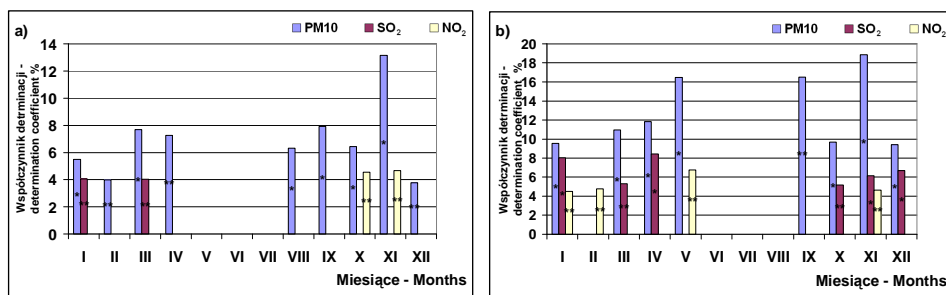


istotny: \* dla  $\alpha = 0,01$ , \*\* dla  $\alpha = 0,05$  – significant: \* at  $\alpha = 0.01$ , \*\* at  $\alpha = 0.05$

**Rys. 3.** Współczynnik determinacji (%) dla ujemnej zależności liniowej między stężeniem zanieczyszczeń a wysokością opadu atmosferycznego (a) i czasem trwania opadu atmosferycznego (b) wg miesięcy, dekad i pentad i dni. Lata 2004-2007

**Fig. 3.** Determination coefficient (%) for negative linear relationship of pollutants concentration and precipitation rate (a) precipitation duration (b) in months, decades, pentads and days. Years 2004-2007.

Na rysunku 4 przedstawiono współczynniki determinacji dla ujemnej zależności liniowej między stężeniem zanieczyszczeń: a wysokością opadu atmosferycznego i czasem trwania opadu wg miesięcy. Najlepszy opis zmienności zanieczyszczenia uzyskano dla pyłu PM10 – dla większości miesięcy uzyskano istotne statystycznie zależności. Najlepszy opis zmienności stężenia pyłu uzyskano względem czasu trwania opadu – w listopadzie ( $R^2 = 19\%$ ). W przypadku stężenia NO<sub>2</sub> względem sumy opadów, istotne współczynniki korelacji uzyskano tylko w październiku i listopadzie, natomiast dla SO<sub>2</sub>, w styczniu i marcu. Wyższe współczynniki korelacji uzyskano dla związku stężenia zanieczyszczeń gazowych z czasem trwania opadu. W przypadku SO<sub>2</sub> istotną zależność uzyskano dla miesięcy I, III, IV, X, XI i XII, natomiast dla NO<sub>2</sub> – I, II, V i XI.

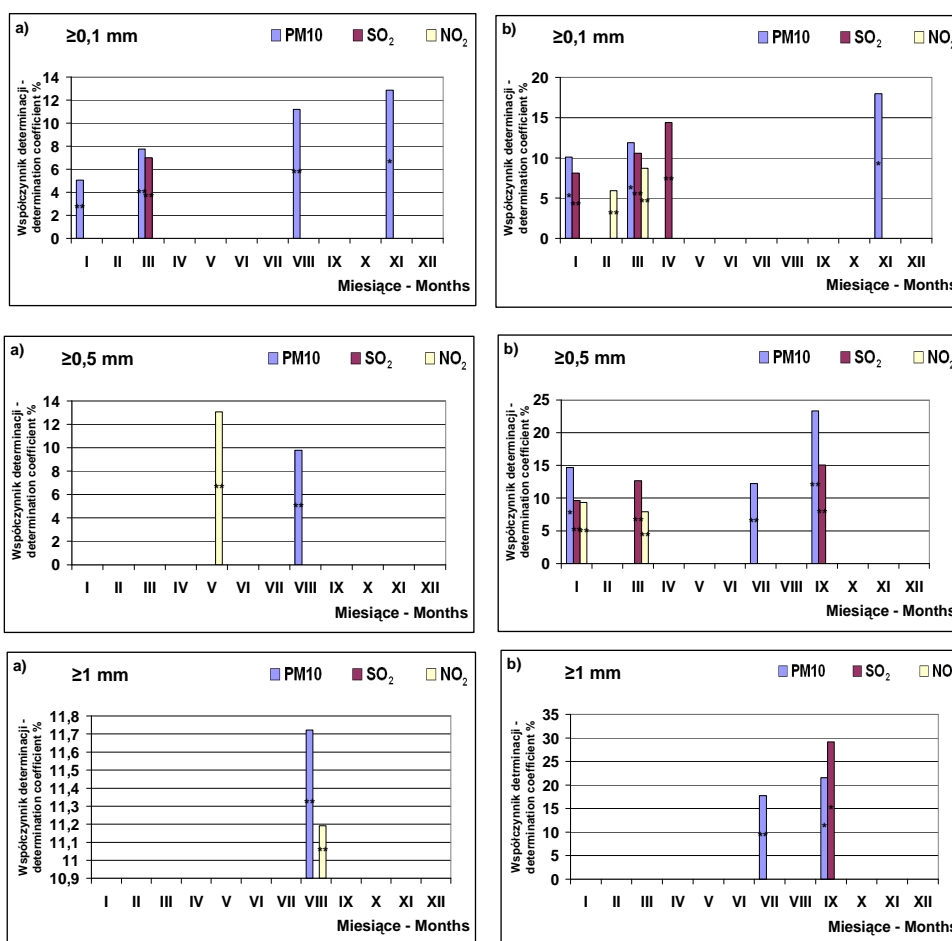


istotny: \* dla  $\alpha = 0,01$ , \*\* dla  $\alpha = 0,05$  – significant: \* at  $\alpha = 0.01$ , \*\* at  $\alpha = 0.05$

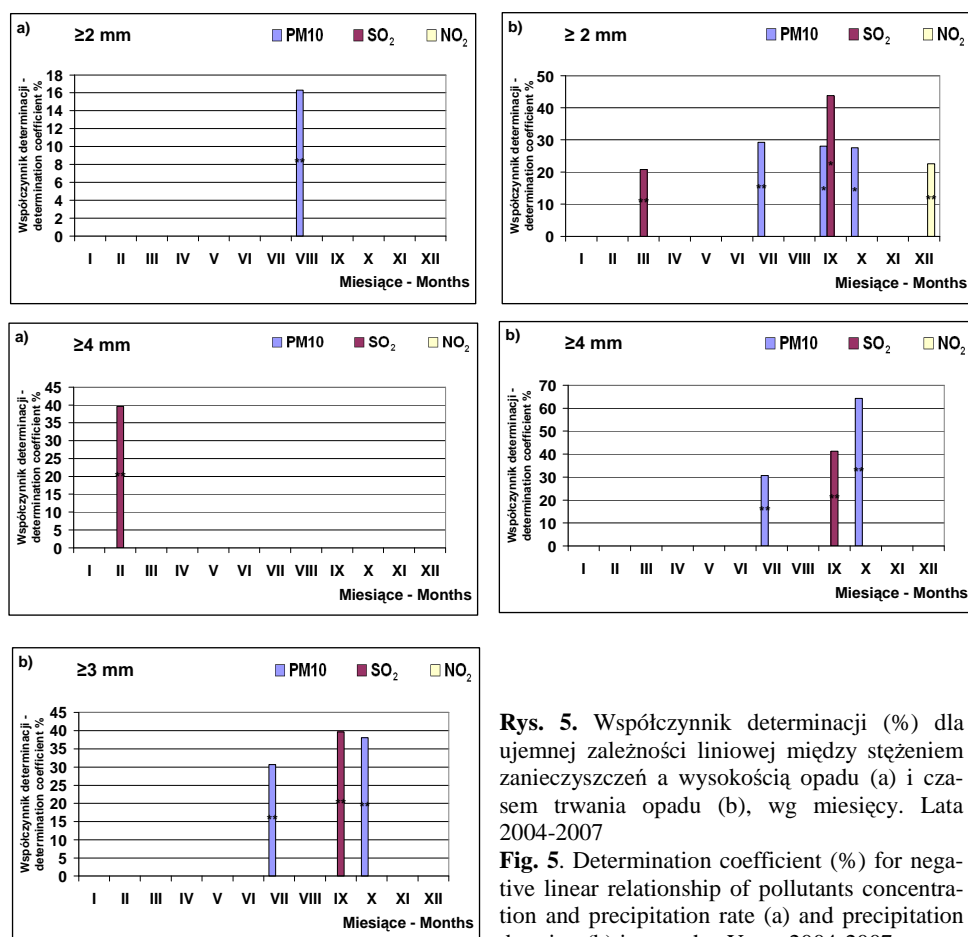
**Rys. 4.** Współczynnik determinacji (%) dla ujemnej zależności liniowej między stężeniem zanieczyszczeń a wysokością opadu atmosferycznego (a) i czasem trwania opadu (b), wg miesięcy. Lata 2004-2007

**Fig. 4.** Determination coefficient (%) for negative linear relationship of pollutants concentration and precipitation rate (a) and precipitation duration (b) in months. Years 2004-2007

Współczynniki determinacji dla zależności stężenia zanieczyszczeń od opadu dobowego, co najmniej 0,1; 0,5; 1,0; 2,0; 3,0 i 4,0 mm według miesięcy ilustruje rysunek 5. Wszystkie statystycznie istotne wyniki opisały ujemną zależność stężenia analizowanych zanieczyszczeń od wysokości opadu i czasu jego trwania wg podziału danych na liczby dni z opadem. Znacznie lepsze wyniki uzyskano wg przyjętego podziału wysokości opadu od  $\geq 0,1$  mm do  $\geq 4$  mm. W przypadku pyłu PM10 największy wpływ na zmniejszenie jego stężenia wywarł czas trwania opadu dla dni z opadem  $\geq 4$  mm w miesiącu październiku ( $R^2$  około 64%). Dla  $SO_2$ , dla dni z opadem  $\geq 3$  mm w miesiącu wrześniu ( $R^2$  około 40%). W przypadku  $NO_2$ , dla dni z opadem  $\geq 2$  mm w miesiącu grudniu ( $R^2$  około 22%).







**Rys. 5.** Współczynnik determinacji (%) dla ujemnej zależności liniowej między stężeniem zanieczyszczeń a wysokością opadu (a) i czasem trwania opadu (b), wg miesięcy. Lata 2004-2007

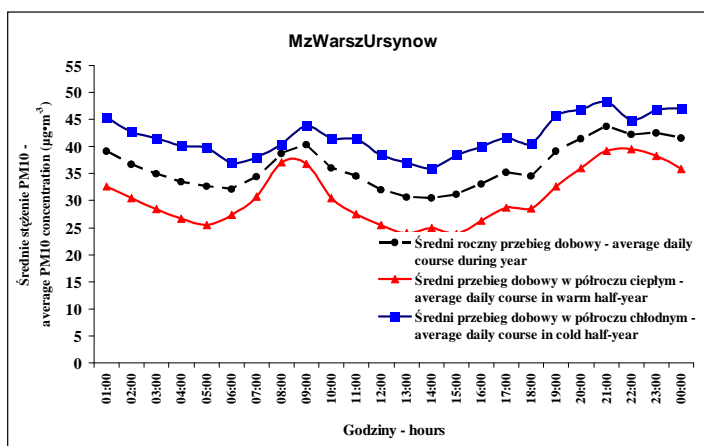
**Fig. 5.** Determination coefficient (%) for negative linear relationship of pollutants concentration and precipitation rate (a) and precipitation duration (b) in months. Years 2004-2007

istotny: \* dla  $\alpha = 0,01$ , \*\* dla  $\alpha = 0,05$   
 significant: \* at  $\alpha = 0.01$ , \*\* at  $\alpha = 0.05$

Uzyskane wyniki są zbliżone do wyników uzyskanych przez innych autorów. Van der Wal'a i Jansen wykazali, że stężenie pyłu PM10 lepiej opisała długotrwałość niż suma opadów, a opad objaśniał zmienność stężenia pyłu PM10 jedynie w 5-11%.

Badania przeprowadzone przez Czarnecką i in. (2007) wykazały, iż najlepszy opis wymywającej roli opadów w przypadku pyłu PM10 uzyskano za pomocą liczby dni z opadem dobowym, co najmniej 0,5 mm, szczególnie podczas kalendarzowej zimy, a w ujęciu miesięcznym – w sierpniu i w styczniu.

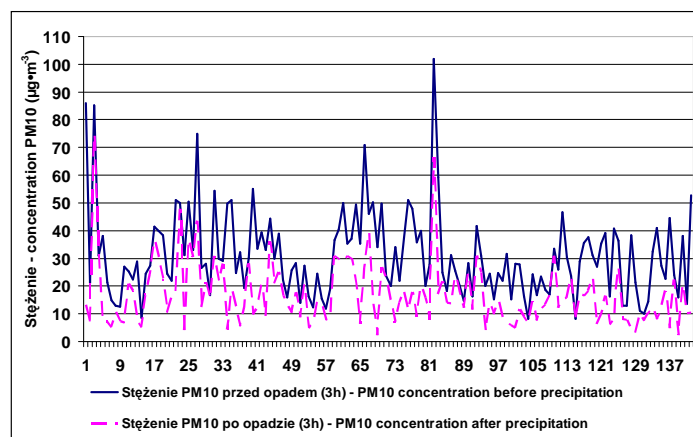
W dalszej analizie podjęto próbę ustalenia empirycznej zależności wymywania pyłu zawieszonego PM10 od natężenia, czasu trwania i wysokości opadu atmosferycznego. Ilość substancji usuniętej z powietrza przez opady obliczano jako ubytek stężenia zanieczyszczenia spowodowany opadem, wyrażony w procentach zawartości zanieczyszczenia przed opadem. Rozpatrzono łącznie 141 przypadków wystąpienia opadu atmosferycznego w miesiącach IV-X lat 2005, 2006, 2007 i obliczono dla nich skuteczność usuwania PM10 –  $\Delta S$ , według zależności (4). Dwanaście procent tych przypadków stanowiły sytuacje, kiedy  $\Delta S \leq 0$ , czyli po zakończeniu opadu nie wystąpiło oczyszczenie atmosfery z pyłu zawieszonego. Przeanalizowano dokładnie wszystkie parametry tych opadów i okazało się, że w 90% przypadków zakończenie opadu przypadało na godziny szczytu komunikacyjnego. Ze sporządzonych wykresów przebiegu dobowego stężenia pyłu, wynika bowiem, że w ciągu doby występują 2 wyraźne maksima: słabsze w godzinach 8-11 i silniejsze w godzinach 18-21 (rys. 6). W przebiegu dobowym stężenia PM10 są również dwa wyraźne spadki wartości: nad ranem aż do wschodu słońca oraz w godzinach okołopołudniowych. Taki przebieg dobowy stężeń wynika z przebiegu dobowego emisji zanieczyszczeń do atmosfery (szczyty komunikacyjne, procesy spalania paliw w niskich źródłach komunalnych) oraz z dobowego cyklu zmian wysokości warstwy mieszania, związanego z rozwojem i zanikaniem procesów konwekcyjnych.



**Rys. 6.** Średni dobowy przebieg wartości stężenia PM10 na stacji MzWarszUrsynow, W latach 2004-2007  
**Fig. 6.** Mean daily course of PM10 concentration value at the station MzWarszUrsynow, years 2004-2007

Stężenie pyłu zawieszonego PM10 przed wystąpieniem opadu atmosferycznego i po wystąpieniu opadu w analizowanym okresie przedstawiono na rysunku 7. Dla wszystkich przypadków, w których skuteczność usuwania PM10 była dodatnia obliczono współczynniki korelacji liniowej między skutecznością usuwania pyłu

$\Delta S$  a czasem trwania opadu ( $t$ ), sumą opadu ( $P$ ) i natężeniem opadu ( $I$ ) oraz przeprowadzono analizę regresji prostej za pomocą programu Statistica 8.0. Wyniki przedstawiono w tabeli 1.



**Rys. 7.** Stężenie pyłu zawieszonego PM10 przed wystąpieniem opadu atmosferycznego i po wystąpieniu opadu w analizowanych przypadkach

**Fig. 7.** PM10 concentration before and after the occurrence of precipitation for analysed cases

**Tabela 1.** Współczynniki korelacji liniowej między skutecznością usuwania pyłu  $\Delta S$  a czasem trwania opadu ( $t$ ), sumą opadu ( $P$ ) i natężeniem opadu ( $I$ )

**Table 1.** Linear correlation coefficients of the effectiveness of particulate matter removal from the air with precipitation duration ( $t$ ), precipitation total ( $P$ ) and precipitation intensity ( $I$ )

Zmienna zależna Dependent variable	Zmienne niezależne Independent variables	Współczynnik korelacji Correlation coefficient	Współczynnik determinacji (%) Determination coefficient (%)	Istotność współczynnika korelacji Correlation coefficient significance	Równanie regresji Regression equation
$\Delta S$ (%)	Czas $t$ Time $t$ (h)	0,31	9,6	0,01	$\Delta S = 37,3 + 1,8t$
	Suma opadu $P$ Precipitation total $P$	0,28	8,0	0,01	$\Delta S = 41,1 + 0,8P$
	Natężenie opadu $I$ Precipitation intensity $I$	0,13	1,6	nieistotny insignificant	

Podjęto też próbę znalezienia zależności krzywoliniowej skuteczności usuwania pyłu od wszystkich trzech zmiennych niezależnych, ale nie uzyskano lepszego dopasowania linii regresji do danych empirycznych niż w przypadku zależności prostej.

Z powyższej tabeli wynika, że istnieje słaba, istotna statystycznie, korelacja pomiędzy skutecznością usuwania pyłu z powietrza a czasem trwania opadu i sumą opadu, a uzyskana zależność w postaci równania prostej tłumaczy ok. 10% zmienności  $\Delta S$ . Wysoka istotność współczynnika korelacji pozwala wyciągnąć wniosek, iż taka zależność nie jest dziełem przypadku i zachodzi również w populacji generalnej.

**Tabela 2.** Liczebność opadów o różnych czasach trwania w okresie IV-X lat 2005, 2006, 2007 zarejestrowanych na stacji Ursynów-SGGW

**Table 2.** Number of precipitation events of various duration in the period IV-X of years 2005, 2006, 2007 recorded at Ursynów-SGGW station

Czas trwania opadu Precipitation duration (h)	Liczba przypadków Number of events
$\leq 2$	47
2-5	53
5-10	24
10-15	5
15-20	3
>20	2

Następnie przeanalizowano dokładniej zależność skuteczności usuwania pyłu od czasu trwania opadu. Średni czas trwania opadu w rozpatrywanych okresach letnich lat 2005, 2006 i 2007 wynosił ok. 5 godzin. Liczebność opadów o różnych czasach trwania przedstawiono w tabeli 2.

W rozpatrywanych okresach letnich wystąpiło 100 przypadków opadu o czasie trwania mniejszym lub równym 5 godzin i 34 przypadki opadów o czasie trwania dłuższym od 5 godzin.

W następnym etapie obliczeń zbiór wszystkich danych pomiarowych podzielono na dwie części według kryterium czasu trwania opadu:  $t \leq 5$  godzin i  $t > 5$  godzin. Dla obu grup danych obliczono wartości średnie wszystkich rozpatrywanych parametrów (tab. 3). Z tabeli wynika, że opady o czasie trwania  $t \leq 5$  godz. miały mniejszą średnią skuteczność usuwania zanieczyszczenia niż opady o czasie  $t > 5$  godzin. Z rozkładu częstości skuteczności  $\Delta S$  sporządzonego dla dwóch grup opadów, wyodrębnionych według w/w kryterium czasu trwania wynikało, iż przy opadach o  $t \leq 5$  godz., przypadki prawie całkowitego usunięcia zanieczyszczenia, a więc o skuteczności

$\Delta S > 80\%$  stanowiły zaledwie 5%, a w grupie drugiej ( $t > 5$  godzin) aż 30% wszystkich przypadków.

**Tabela 3.** Podział opadów w zależności od ich czasu trwania (okres IV-X lat 2005, 2006, 2007, stacja MzWarszSGGW)

**Table 3.** Division of precipitation events depending on their duration (period IV-X for years 2005, 2006, 2007, MzWarszSGGW station)

Kryterium – Criteria	$t \leq 5$ h	$t > 5$ h
Wartość średnia $\Delta S$ Mean value of $\Delta S$	41	58
Wartość średnia P Mean value of P	3	12,6
Wartość średnia I Mean value of I	1,1	1,2
Wartość średnia t Mean value of t	3	10

**Tabela 4.** Rozkład częstości sum opadów w okresie IV-X lat 2005, 2006, 2007 zarejestrowanych na stacji MzWarszSGGW

**Table 4.** Distribution of precipitation frequency in the period IV-X of years 2005, 2006, 2007 recorded at MzWarszSGGW station

Suma opadu – Precipitation totals	Liczba przypadków – Number of events
2	60
2-5	33
5-10	19
10-15	10
15-20	6
20-25	2
25-30	2
30-35	1
> 35	1

Sumy opadów w rozpatrywanym okresie IV-X 2005, 2006, 2007 osiągały wartości z przedziału 0,1-74,4 mm. Średnia suma wynosiła 5,5 mm. Rozkład częstości tych sum przedstawia tabela 4. Opady o wysokości  $P \leq 5$  mm stanowiły około 70% wszystkich przypadków. Ich średnie natężenie wynosiło  $0,7 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ , a średnia skuteczność usuwania zanieczyszczeń – 42% i była niższa niż skuteczność opadów o wysokości  $P > 5$  mm (tab. 5).

**Tabela 5.** Podział opadów w zależności od ich wysokości (okres IV-X lat 2005, 2006, 2007, stacja MzWarszSGGW)

**Table 5.** Division of precipitation events depending on their rate (period IV-X for years 2005, 2006, 2007, MzWarszSGGW station)

Kryterium – Criteria	$P \leq 5$ mm	$P > 5$ mm
Wartość średnia $\Delta S$ Mean value of $\Delta S$	42	53
Wartość średnia t Mean value of t	3	8
Wartość średnia I Mean value of I	0,7	2,2
Wartość średnia P Mean value of P	1,8	14

#### WNIOSKI

1. Zaprezentowane wyniki świadczą o wpływie opadów atmosferycznych na zmniejszenie zanieczyszczenia atmosfery – szczególnie pyłem zawieszonym PM10. Otrzymane zależności w postaci równań regresji prostej należy traktować głównie jako statystyczny wskaźnik roli opadów, który z pewnością nie przesądza o ich ilościowej skuteczności, ze względu na fakt, iż o wymywającej roli opadów, decyduje wiele innych, nieuwzględnionych w niniejszej analizie cech opadów takich jak, wielkości kropeł oraz prędkość opadania.

2. Analiza dotycząca ustalenia zależności między skutecznością wymywania pyłu zawieszonego PM10, oznaczoną przez autorów jako  $\Delta S$ , a natężeniem, czasem trwania i wysokością opadu atmosferycznego wykazała, że istnieje słaby, choć istotny statystycznie związek zmiennej zależnej jedynie z czasem trwania i wysokością opadu atmosferycznego. Związek z natężeniem opadu okazał się nieistotny. Uzyskane zależności w postaci równań regresji tłumaczą ok. 10% zmienności  $\Delta S$  świadczą o tym, że im dłuższy czas trwania opadu, i im większa suma opadu, tym bardziej skuteczne oczyszczanie powietrza z zanieczyszczeń.

#### PIŚMIENNICTWO

- Boubel R.W., Fox D.L., Turner D.B. Stern A.C. 1994. Fundamentals of air pollution. Academic Press, San Diego.
- Czarnicka M., Kalbarczyk R., Kalbarczyk E., 2005. Zmienność stężenia ditlenku siarki i ditlenku azotu na Pomorzu w zależności od warunków meteorologicznych. Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie, t. 5, z. spec., 14, 93-106.

- Czarnecka M., Kalbarczyk R., Kalbarczyk E., 2007. Variability in particulate matter concentrations versus precipitation in Pomerania region. *Pol. J. Natur. Sc.*, 22(4), 645-659.
- Drzeniecka A., Peryma J., Pyka J., Szczurek A., 2000. Wpływ warunków meteorologicznych na stężenie zanieczyszczeń powietrza w Śródmieściu Wrocławia. *Chemia i Inżynieria Ekologiczna*, T.7, nr 8/9, 865-882, Opole.
- Godłowska J., Tomaszewska A.M., 2000. Imisja wybranych zanieczyszczeń powietrza a procesy w warstwie granicznej - analiza statystyczna. *Wiad. IMGW*, t. XXIII(XLIV), 3, 47-52.
- Godłowska J., 2004. The particulate matter PM10 air pollution in Cracow. *Wiad. IMGW*, t. XXVII(XLVIII), 1, 79-90.
- Juda-Rezler K., 2000. Oddziaływanie zanieczyszczeń na środowisko. Oficyna Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- Kleniewska M., 2005. Wpływ warunków meteorologicznych na stężenie dwutlenku siarki w atmosferze w rejonie aglomeracji warszawskiej. Praca doktorska. Wydz. Inżynierii i Kształtowania Środowiska, SGGW, Warszawa.
- Majewski G., 2007. Wpływ warunków meteorologicznych na zanieczyszczenie powietrza pyłem zawieszonym w rejonie aglomeracji warszawskiej. Praca doktorska. Wydz. Inżynierii i Kształtowania Środowiska SGGW, Warszawa.
- Markiewicz M.T., 2004. Podstawy modelowania rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w powietrzu atmosferycznym. Oficyna Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- Markiewicz M.T., 2007. Methods of wet deposition description In air pollution dispersion models. *Environment Protection Engineering*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 33, (1) 113-120.
- Nowicka A., Rynkiewicz I., Dragańska E., Panfil M., 2004. Wpływ elementów meteorologicznych na stan zanieczyszczenia powietrza atmosferycznego w Olsztynie. *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, Rocznik XIII, 1(28). Wyd. SGGW, Warszawa.
- Rozbicka K., 2006. Wpływ warunków meteorologicznych na stężenie tlenków azotu w atmosferze w rejonie aglomeracji warszawskiej. Praca doktorska. Wydz. Inżynierii i Kształtowania Środowiska, SGGW, Warszawa.
- Seinfeld J.H., 1998. *Atmospheric chemistry and physics of air pollution*. John Wiley and Sons, New York.
- Turahoğlu F.S., Nuhoğlu A., Bayraktar H., 2005. Impacts of some meteorological parameters on SO<sub>2</sub> and TSP concentrations in Erzurum, Turkey. *Chemosphere*, 59, 1633-1642.
- Wal J.T. van der, Janssen L.H.J.M., 2000. Analysis of spatial and temporal variations of PM 10 concentrations in the Netherlands using Kalman filtering. *Atmospheric Environment*, 34, 3675-3687.
- Yang K.L., 2002. Spatial and seasonal variation of PM10 mass concentrations in Taiwan. *Atmospheric Environment*, 36, 3403-3411.

ANALYSIS OF SELECTED AIR POLLUTANTS VARIABILITY  
DEPENDING ON PRECIPITATION IN URSYNÓW AREA

*Grzegorz Majewski, Wiesława Przewoźniczuk, Małgorzata Kleniewska,  
Katarzyna Rozbicka*

Division of Meteorology and Climatology, Faculty of Engineering and Environmental Science,  
Warsaw University of Life Sciences  
ul. Nowoursynowska 166, 02-776 Warszawa  
e-mail: grzegorz\_majewski@sggw.pl

**Abstract.** The aim of this paper was to determine the concentration variability of gaseous effluents ( $\text{NO}_2$  and  $\text{SO}_2$ ) and of particulate matter pollution (PM10) depending on precipitation, and also an attempt at finding an empirical relationship of particulate matter (PM10) washing out effectiveness with precipitation intensity, duration and rate. Washing out effectiveness  $\Delta S$  was calculated as particulate matter concentration decrease caused by precipitation, expressed as percentage of PM10 concentration before precipitation occurrence. In this paper mean daily and mean hourly values of gaseous effluents ( $\text{NO}_2$  and  $\text{SO}_2$ ) concentration and of particulate matter (PM10) concentration were used, previously recorded at the air quality monitoring station Ursynow from 2004 to 2007, as well as daily and hourly precipitation rates from the station MzWarszSGGW which belongs to the Chair of Meteorology and Climatology of Warsaw University of Life Sciences. The results shown in the paper generally confirm a favourable role of precipitation in decreasing the atmosphere pollution – especially particulate matter (PM10). The resulting determination coefficients should be regarded mainly as statistical indicators of precipitation role which certainly do not determine its quantitative effectiveness. The analysis concerning the empirical relationship of particulate matter (PM10) washing out with precipitation intensity, duration and rate indicated that there existed a weak, statistically significant correlation of the effectiveness of particulate matter removal from the air with both the duration of precipitation as well as precipitation rate, and the resulting formula, in the form of linear function, explains about 10% of  $\Delta S$  variability.

**Key words:** pollution concentration, precipitation rate, precipitation duration, precipitation intensity, regression analysis