

## WSTĘP

Celem pracy jest:

- \* śledzenie globalnych zmian warstwy ozonowej a szczególnie procesów powodujących jej ubożenie
- \* zapewnienie podstaw do informowania społeczeństwa o skutkach ubożenia warstwy ozonowej objawiających się wzrostem natężenia biologicznie czynnego promieniowania UV-B
- \* udział w międzynarodowej wymianie danych ozonowych, zgodnie z wymaganiami Konwencji Wiedeńskiej i Światowego Systemu Obserwacji Ozonu.

Wyniki tych prac stanowią naukową podstawę działań podejmowanych na rzecz ochrony warstwy ozonowej w ramach Protokołu Montrealskiego, którego Polska jest stroną.

W okresie od 1 stycznia 2009r. do 31 grudnia 2009r. zrealizowano wszystkie zadania zgodnie ze szczegółowym zakresem prac stanowiącym załącznik nr 1 do umowy nr 40/2008/F.

W ramach poszczególnych zadań w 2009 roku w Centralnym Obserwatorium Geofizycznym Polskiej Akademii Nauk w Belsku wykonano:

- 1.1 Pomiary całkowitej zawartości ozonu przy pomocy spektrofotometru Dobsona prowadzono systematycznie pięciokrotnie ( w lecie) lub trzykrotnie (w zimie) w ciągu dnia, o ile nie uniemożliwiło tego wystąpienie opadu deszczu lub śniegu. Wartości średnie dzienne wyznaczono z pomiarów o największej dokładności, zgodnie z rekomendacją Międzynarodowej Komisji Ozonu (International Ozone Commission) Światowej Organizacji Meteorologicznej (WMO) (Załącznik 1).
- 1.2 Pomiary całkowitej zawartości ozonu przy pomocy spektrofotometru Brewera prowadzono systematycznie o ile nie uniemożliwiło tego wystąpienie opadu deszczu lub śniegu. Wartości średnie dzienne uzyskiwane są z pomiarów, dla których rozrzut nie przekracza 2,5 D.
- 2.0 Wykonano 120 serii pomiarowych przy pomocy spektrofotometru Dobsona pozwalających wyznaczyć pionowy rozkład ozonu metodą Umkehr (w tym 39 pomiarów zwanych „krótki Umkehr”, dla których nie ma jeszcze

opracowanego algorytmu do wyznaczenia profilu ozonu). Pomiary Umkehr wykonywane są w określonych warunkach pogodowych (bezchmurne niebo). Wyniki pomiarów z serii Umkehr (konwencjonalny), po wstępnym opracowaniu w Belsku wysyłane są do Światowego Centrum Danych Ozonowych w Kanadzie, gdzie profile ozonu wyznaczane są dla całej sieci światowej tego rodzaju pomiarów.

- 3.0 W Centralnym Obserwatorium Geofizycznym PAN w Belsku w 2009 roku kontynuowano rejestrację biologicznie czynnego ultrafioletowego promieniowania słonecznego rozpoczętą w roku 1975. Pomiary wykonywano przy pomocy miernika UV-Biometer Model 501A Version 3, Nr 2011 SOLAR LIGHT CO. Filadelfia USA w jednostkach [MED] (Minimum Erythema Dose). Miernik ten charakteryzuje się czułością zbliżoną do czułości erytemalnej skóry człowieka.
- 4.0 W 2009 roku wykonywano w Belsku pomiary zawartości ozonu, SO<sub>2</sub>, CO i NO<sub>2</sub> w przyziemnej warstwie atmosfery. Pomiary te wykonywane są w sposób ciągły ( 24 godziny na dobę) miernikami firmy Monitor Labs, Monitor Europe i API. Na podstawie uzyskiwanych wartości chwilowych obliczane są średnie 60 min. Na ich podstawie przeprowadzana jest dalsza analiza wyników: obliczane są dobowe wartości maksimum i minimum, średnia wartość dobową, średnie przebiegi dobowe oraz średnie miesięczne. Wyniki pomiarów przekazywano na bieżąco do krajowej bazy danych w WIOŚ, w trybie miesięcznym. (Załącznik 2)
- 5.0 Wyniki pomiarów całkowitej zawartości ozonu w atmosferze oraz natężenia promieniowania UV-B przekazywano do GIOŚ w trybie miesięcznym.
- 6.0 Wyniki pomiarów całkowitej zawartości ozonu i natężenia promieniowania UV-B przekazano do Głównego Urzędu Statystycznego.
- 7.0 W przypadku spadku całkowitej zawartości ozonu o więcej niż 20% średniej wieloletniej informację przekazywano do GIOŚ.
- 8.0 Dane o całkowitej zawartości ozonu i jego rozkładzie pionowym przekazywano do Światowego Centrum Danych Ozonowych w Toronto, Kanada.
- 9.0 Średnie dzienne wartości całkowitej zawartości ozonu przekazywano do Laboratorium Fizyki Atmosfery Uniwersytetu w Salonikach, Grecja, oraz do

Światowego Centrum Danych Ozonowych w Toronto, Kanada, gdzie sporządzane są aktualne mapy ozonu dla półkuli północnej

10.0 Opracowano końcowy raport o stanie warstwy ozonowej i natężenia promieniowania UV-B. Raport ten zawiera analizę danych i trendy w Polsce na tle zmian globalnych.

## **1. Całkowita zawartość ozonu i jego rozkład pionowy**

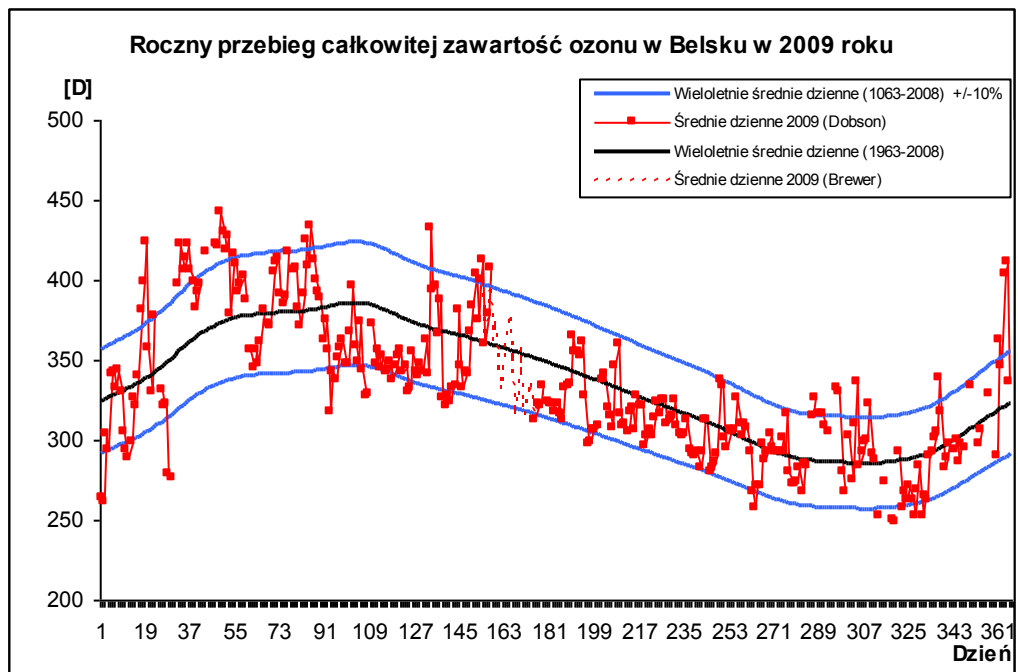
### **1.1 Całkowita zawartość ozonu uzyskana z pomiaru spektrofotometrem Dobsona**

#### **Bonawentura Rajewska-Więch, Janusz W. Krzyścin**

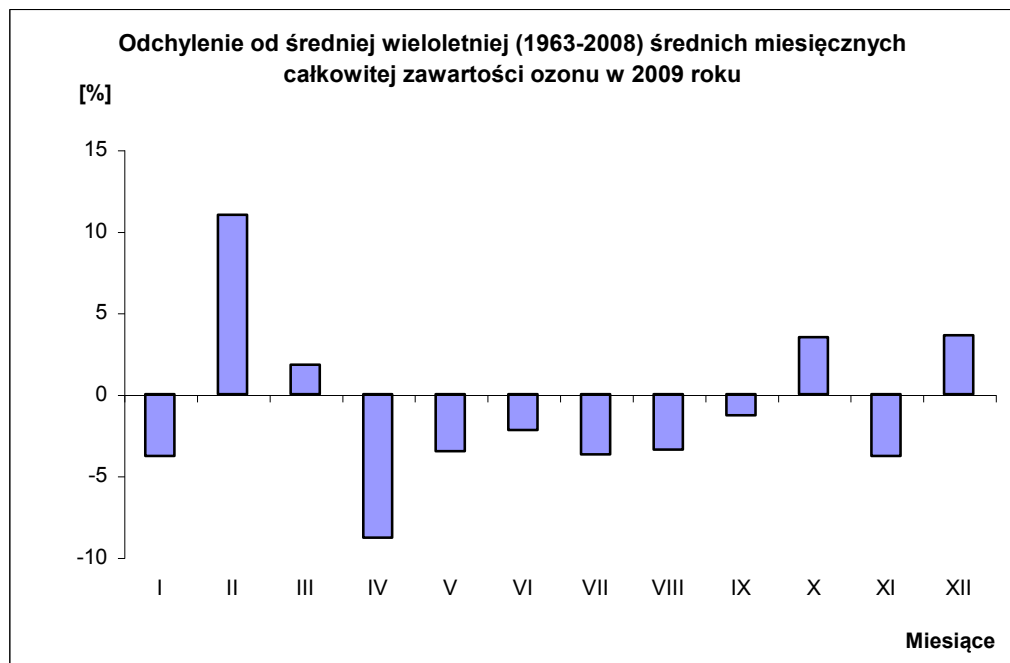
Całkowita zawartość ozonu jest wielkością, od której w znacznej mierze zależy dopływ do powierzchni Ziemi słonecznego promieniowania ultrafioletowego UV-B. Miarą jej jest grubość warstwy ozonu w atmosferze po sprowadzeniu go do warunków standardowych ciśnienia i temperatury. Średnio w atmosferze znajduje się  $8 \times 10^{18}$  cząsteczek ozonu w słupie powietrza o podstawie  $1 \text{ cm}^2$ , co jest równoważne warstwie tego gazu o grubości 0,3 cm. Jednostka całkowitej zawartości ozonu nazywana jest atmocentymetrem (atm-cm); całkowita zawartość ozonu wynosi 1 atm-cm, jeśli grubość warstwy ozonu w standardowych warunkach ciśnienia i temperatury wynosi 1 cm, a jej tysięczną część nazwano dobsonem (D).

Analiza danych o całkowitej zawartości ozonu uzyskanych przy pomocy spektrofotometru Dobsona pozwala stwierdzić, że w ciągu roku 2009 wartości całkowitej zawartości ozonu w Belsku były za wyjątkiem lutego, marca, października i grudnia niższe od średniej wieloletniej z lat 1963-2008 (Tab.1.1.1, Rys.1.1.1). Odchylenia procentowe średnich miesięcznych całkowitej zawartości ozonu od odpowiednich średnich wieloletnich przedstawia Rys.1.1.1a.

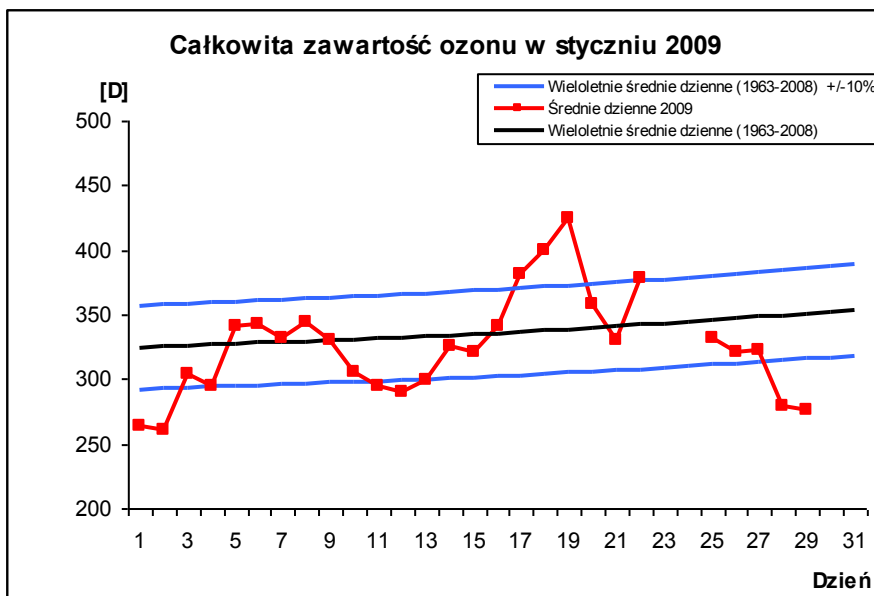
Jak widać ujemne odchylenia średniej miesięcznej całkowitej zawartości ozonu od średniej wieloletniej zaobserwowano w styczniu 3,8%, kwietniu 8,8%, maju 3,5%, czerwcu 2,2%, lipcu 3,7%, sierpniu 3,4%, wrześniu 1,3%, i listopadzie 3,8%.



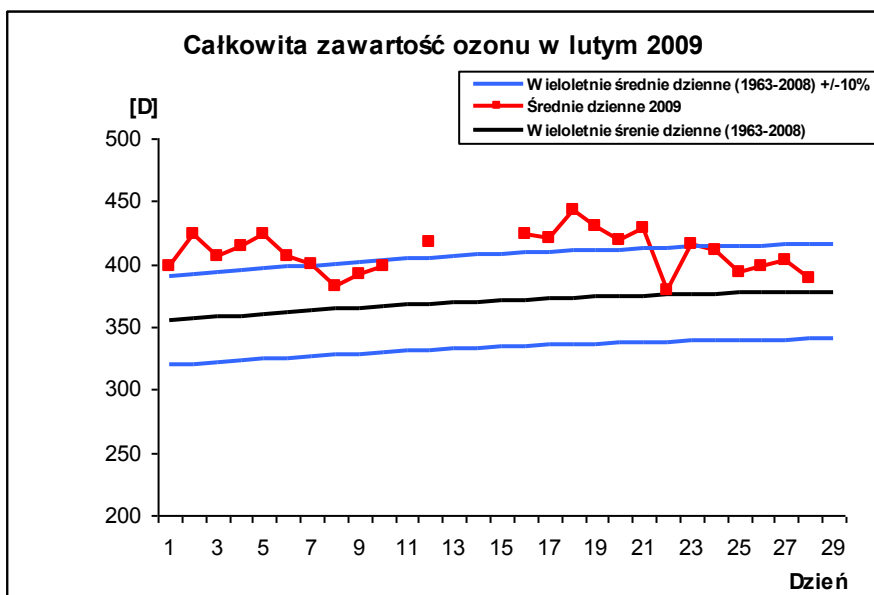
Rys. 1.1.1



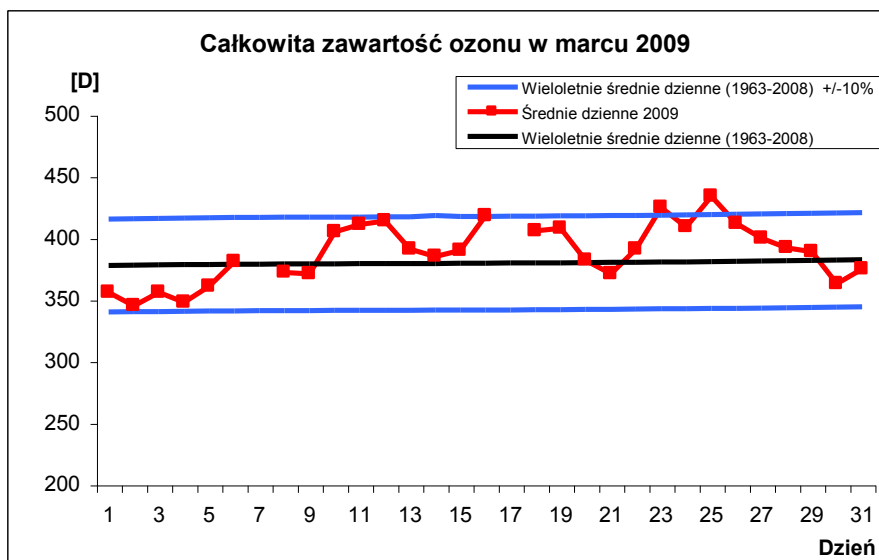
Rys. 1.1.1a



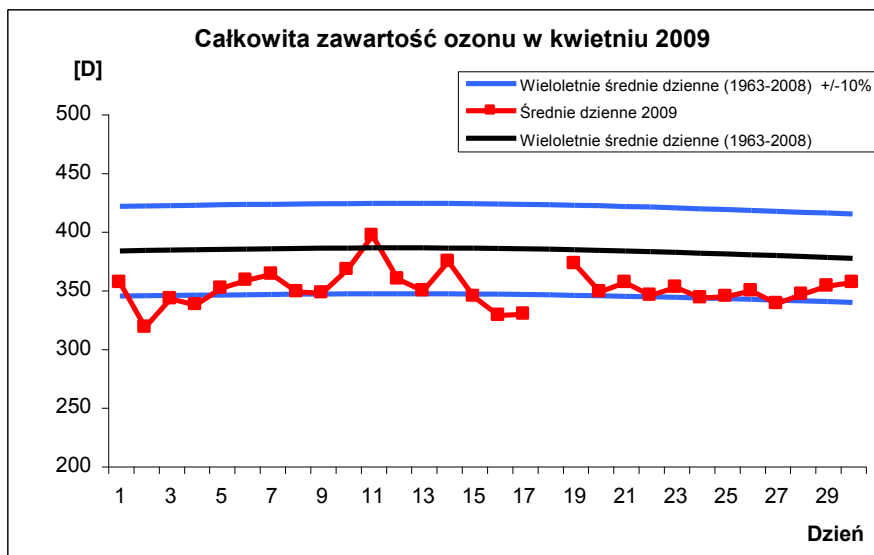
Rys. 1.1.2



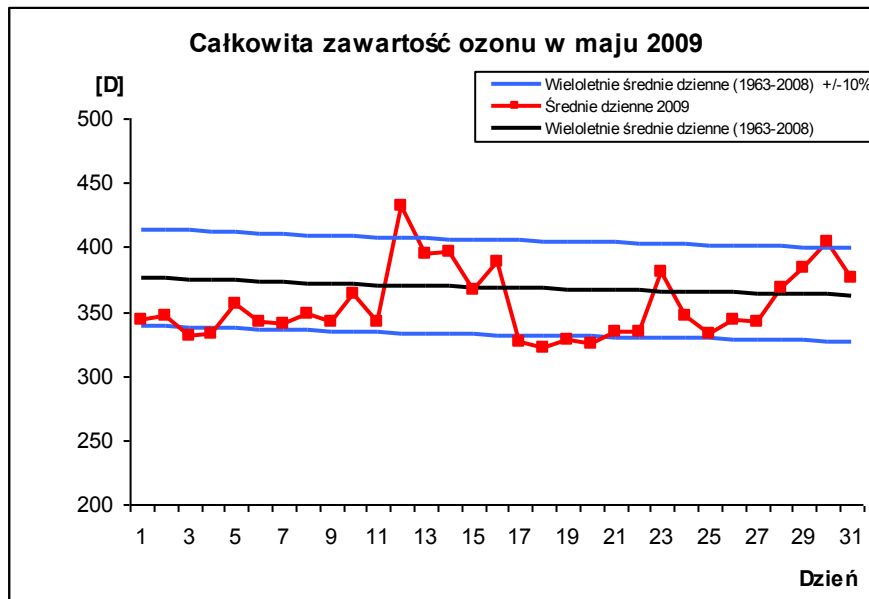
Rys.1.1.3



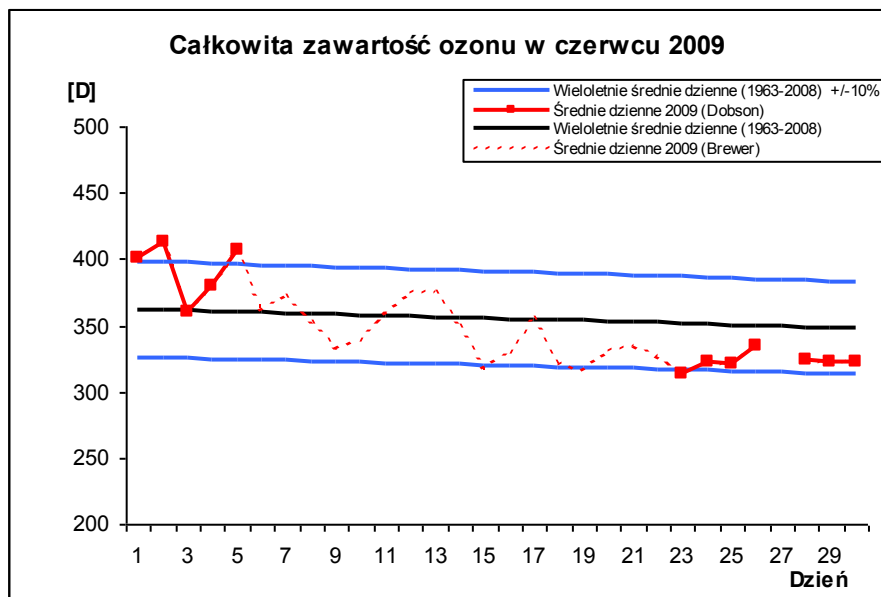
Rys.1.1.4



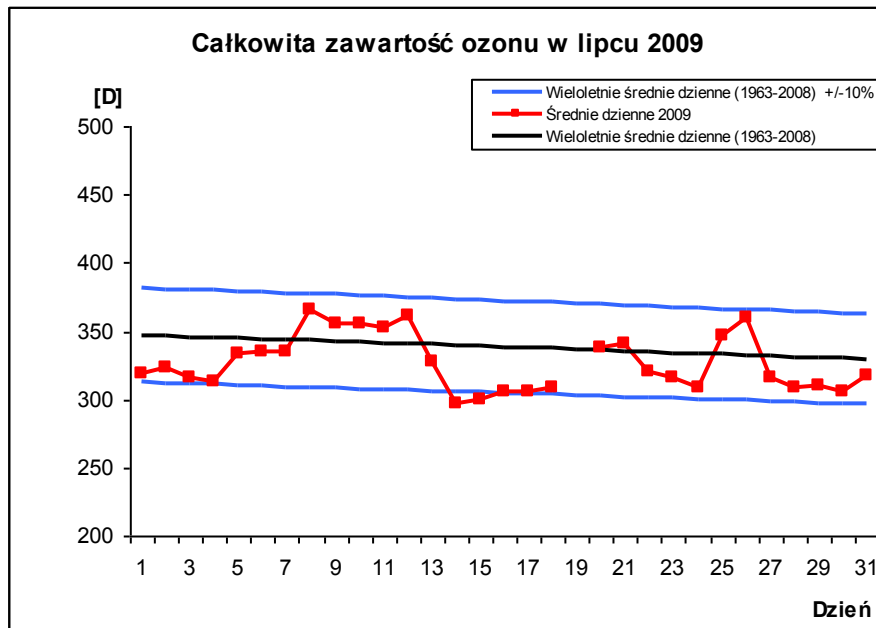
Rys.1.1.5



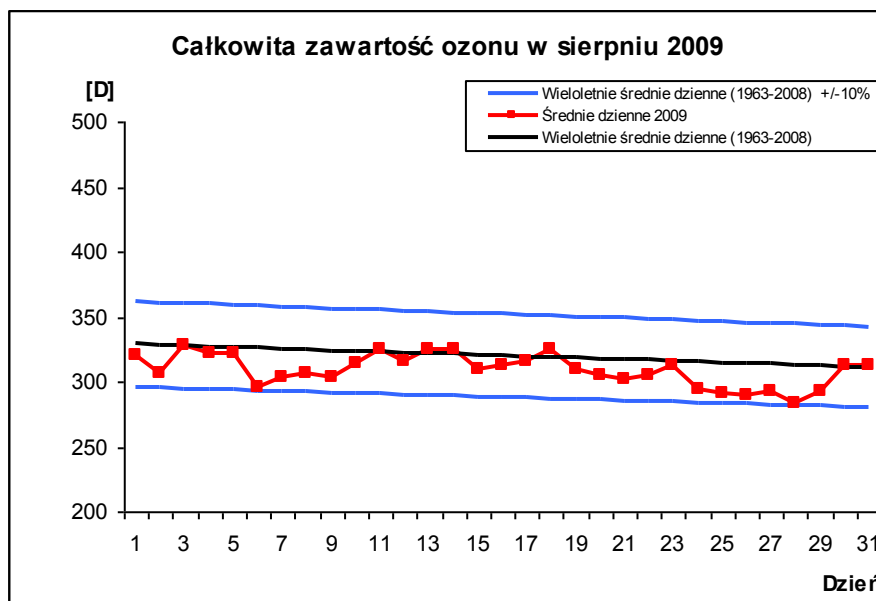
Rys.1.1.6



Rys.1.1.7

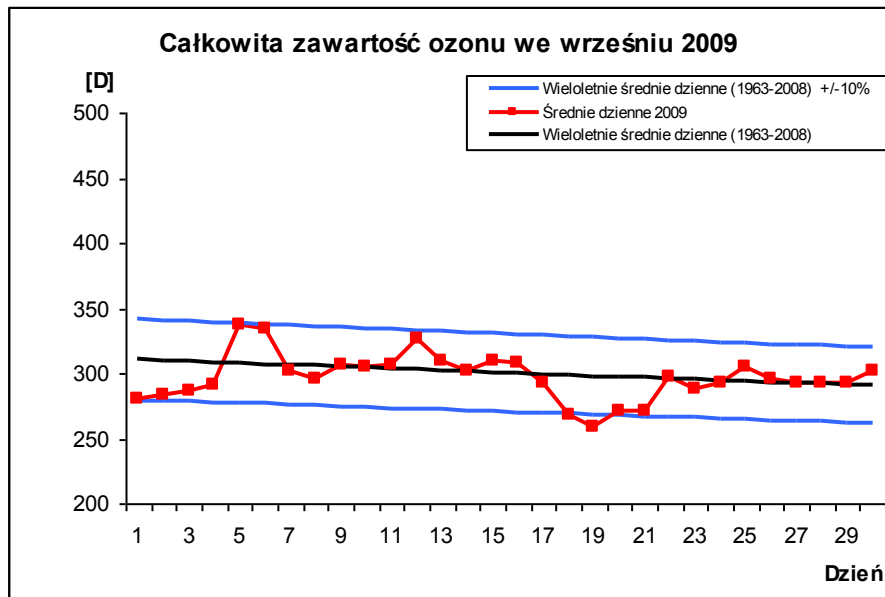


Rys.1.1.8

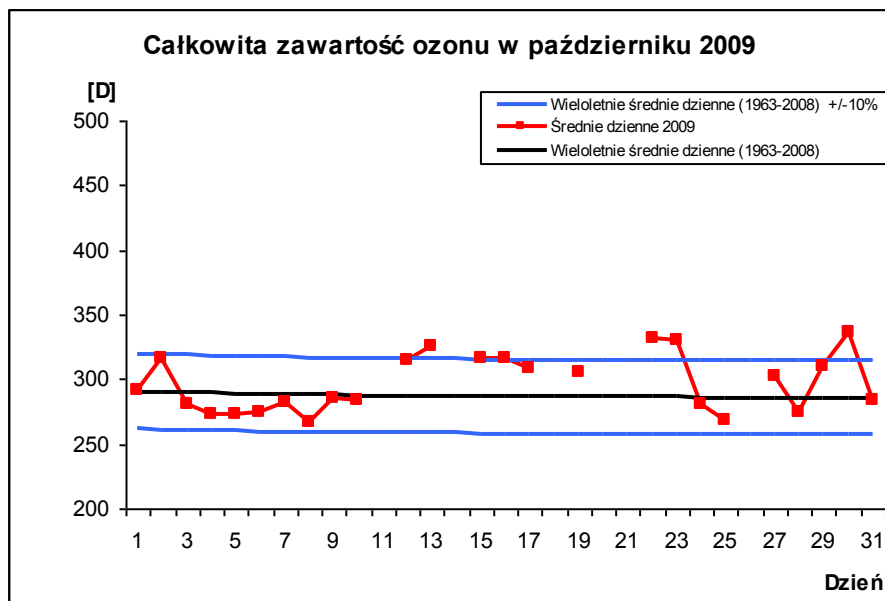


Rys.1.1.9

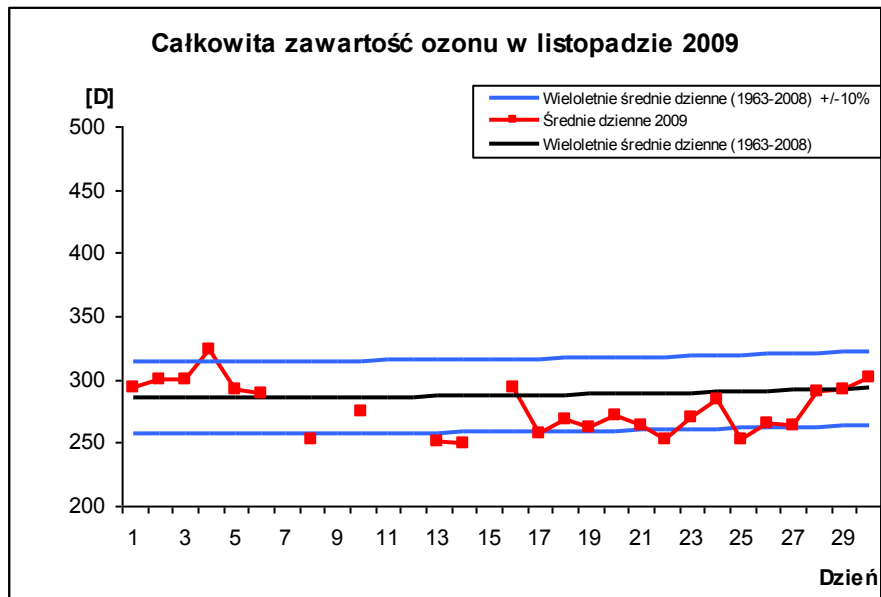




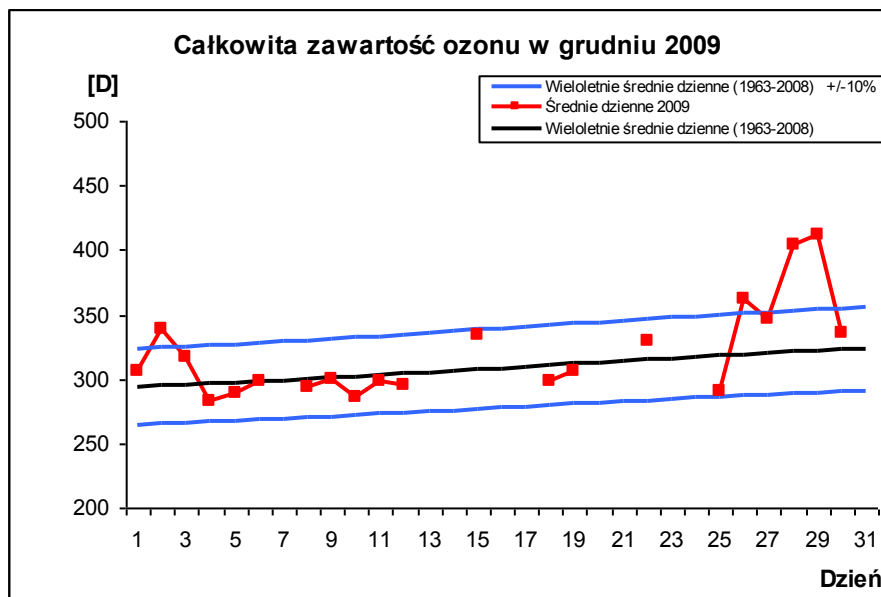
Rys.1.1.10



Rys.1.1.11



Rys.1.1.12



Rys.1.1.13

Tabela 1.1.1. Średnie miesięczne całkowitej zawartości ozonu [D] w 2009 roku i ich odstępstwa od średnich wieloletnich 1963-2008.

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
<b>Śr. wiel. 1963-2008</b>	338	371	381	386	368	355	338	320	300	287	287	309
<b>Śr. mieś. 2009</b>	325	412	388	351	355	347	326	309	296	297	276	320
<b>Różnica w %</b>	-3,8	11,0	1,8	-8,8	-3,5	-2,2	-3,7	-3,4	-1,3	3,5	-3,8	3,6

W miesiącach letnich, kiedy promieniowanie ultrafioletowe osiąga maksymalne wartości, ze względu na dominującą zależność od wysokości Słońca, odchylenia średnich miesięcznych wartości ozonu w odniesieniu do średnich wieloletnich wynosiły -3,5% w maju, -2,2% w czerwcu, -3,7% w lipcu i -3,4% w sierpniu.

Przebieg średnich wartości dziennych całkowitej zawartości ozonu w atmosferze w poszczególnych miesiącach przedstawia sekwencja rysunków (Rys.1.1.2 – Rys.1.1.13), gdzie czerwona linia – średnie dzienne całkowitej zawartości ozonu w 2009 roku, linia czarna – wieloletnia (1963-2008) średnia dzienna całkowitej zawartości ozonu, linia niebieska – odchylenie o  $\pm 10\%$  od wieloletniej średniej dziennej. Jeśli odniesiemy te przebiegi do miesięcznych średnich wieloletnich, to widzimy, że największe niedobory całkowitej zawartości ozonu obserwowano w styczniu, kwietniu, maju, czerwcu, lipcu, sierpniu, wrześniu, i listopadzie. W styczniu (Rys.1.1.2) średnie dzienne wartości całkowitej zawartości ozonu z wyjątkiem dziesięciu dni były poniżej średniej wieloletniej. Luty 2009 roku (Rys.1.1.3) był wyjątkowym miesiącem na przestrzeni ostatnich kilkunastu lat. Średnia miesięczna wartość całkowitej zawartości ozonu była o 11% wyższa od średniej wieloletniej, a średnie dzienne w ciągu całego miesiąca były wyższe od dziennych średnich wieloletnich (1963-2008). W marcu (Rys.1.1.4) średnie dzienne całkowitej zawartości ozonu z wyjątkiem jedenastu dni były wyższe od średniej wieloletniej. W kwietniu za wyjątkiem jednego dnia średnie dzienne całkowitej zawartości ozonu miały wartości niższe od odpowiednich średnich wieloletnich 1963-2008 (Rys.1.1.5). Niedobory całkowitej zawartości ozonu w miesiącach letnich (maj, czerwiec, lipiec, sierpień) w stosunku do średniej wieloletniej mogą stanowić potencjalne zagrożenie wzmożonym dopływem promieniowania ultrafioletowego. Średnie dzienne wartości ozonu w maju i w czerwcu (Rys.1.1.6, Rys.1.1.7) za wyjątkiem odpowiednio ośmiu i siedmiu dni były poniżej wieloletniej średniej

dziennej (1963-2008). W dniach od 06.06.2009 do 21.06.2008 spektrofotometr Dobsona z Belska uczestniczył w Międzynarodowym Porównaniu Spektrofotometrów Dobsona w Hohenpeissenberg, Niemcy. W trakcie porównania dokonano przeglądu części optycznej i elektronicznej przyrządu. Wykonano wszystkie niezbędne testy i kalibracje, oraz w trakcie bezpośredniego porównania ze sub-standardem światowym sprawdzono stałe poza atmosferyczne. Średnia miesięczna całkowitej zawartości ozonu w czerwcu policzona została wykorzystując średnie dzienne ozonu otrzymane z pomiaru spektrofotometrem Brewera. W lipcu i sierpniu 2009 roku średnie dzienne wartości całkowitej zawartości ozonu z wyjątkiem odpowiednio ośmiu i trzech dni w każdym z tych miesięcy były poniżej średniej wieloletniej (Rys.1.1.8, Rys.1.1.9). We wrześniu i październiku odpowiednio zanotowano osiem i dwanaście dni kiedy to średnie dzienne wartości ozonu były powyżej średniej wieloletniej dla tych dni (Rys.1.1.10, Rys.1.1.11). W listopadzie obserwowano w Belsku wartości średniej dziennej całkowitej zawartości ozonu za wyjątkiem siedmiu dni poniżej średniej wieloletniej (Rys.1.1.12). W grudniu 2009 roku zaobserwowano dziesięć dni kiedy średnia dzienna całkowita zawartość ozonu przekroczyła jej średnią wieloletnią (Rys.1.1.13). Znaczne spadki całkowitej zawartości ozonu, przekraczające  $\pm 10\%$  średniej wieloletniej obserwowano w styczniu, kwietniu, maju, lipcu, wrześniu i listopadzie.

Przebieg zmienności z dnia na dzień całkowitej zawartości ozonu w Belsku w 2009 roku w odniesieniu do przebiegu średnich wieloletnich (1963-2008) i ich odchyień  $\pm 10\%$  od średniej wieloletniej przedstawiono na Rys.1.1.1.

Stacja ozonu w Centralnym Obserwatorium Geofizycznym PAN w Belsku uczestniczy w programie sporządzania codziennych map całkowitej zawartości ozonu dla półkuli północnej przez Northern Hemisphere Ozone Mapping Centre w Laboratorium Fizyki Atmosfery Uniwersytetu w Salonikach, Grecja oraz w Światowym Centrum Danych Ozonowych w Toronto, Kanada. Program ten realizowany jest w ramach Systemu Globalnego Monitoringu Ozonu (GO<sub>3</sub>OS), działającego pod egidą Światowej Organizacji Meteorologicznej (WMO). Dzięki temu mamy dostęp do aktualnych danych o całkowitej zawartości ozonu w ciągu całego roku, uzyskanych przez stacje pomiarowe biorące udział w tym eksperymencie.

W załączeniu (Załącznik 1) przedstawiono wyniki wszystkich pomiarów całkowitej zawartości ozonu wykonane za pomocą spektrofotometru Dobsona w Belsku od stycznia do grudnia 2009 roku.

## **1.2 Całkowita zawartość ozonu uzyskana z pomiaru spektrofotometrem Brewera Janusz Jarosławski, Bonawentura Rajewska-Więch**

Przez cały 2009 rok wykonywano pomiary całkowitej zawartości ozonu przy pomocy spektrofotometru Brewera. Wartości średnie dzienne całkowitej zawartości ozonu uzyskiwane są z pomiarów, dla których rozrzut nie przekracza 2,5 D.

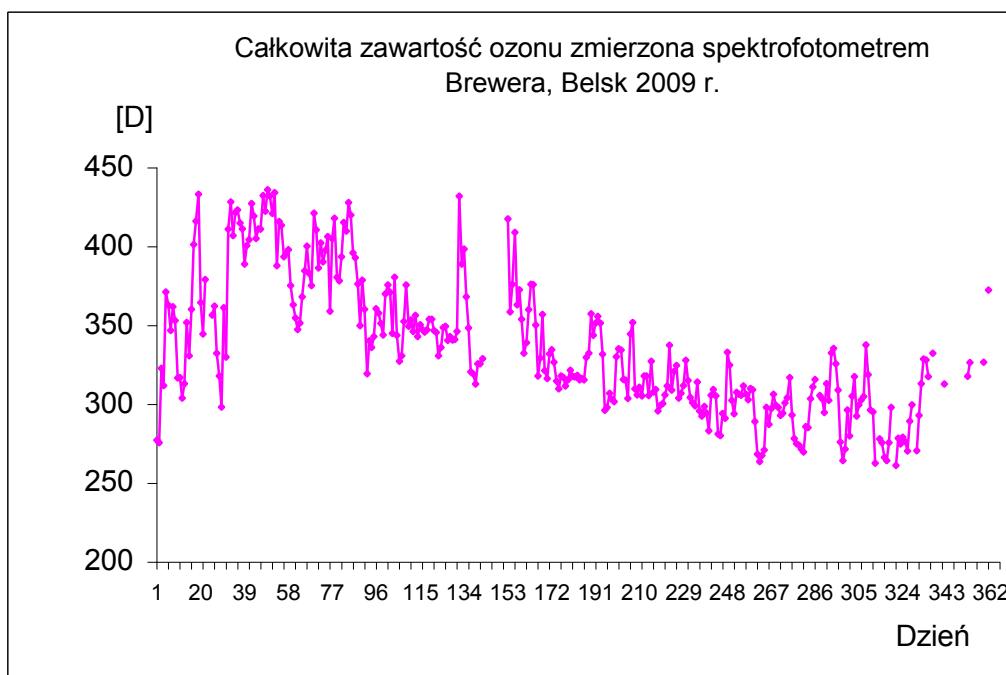
Metodę pozwalającą wyznaczyć całkowitą zawartość ozonu na podstawie pomiarów w świetle rozproszonym z zenitu opracowano w 1995 roku. Pozwoliło to na wykonywanie pomiarów również w okresie pochmurnej pogody, co ma istotne znaczenie szczególnie w okresie jesienno-zimowym ze względu na ograniczoną liczbę dni pogodnych. Wyniki pomiarów w postaci średnich dziennych całkowitej zawartości ozonu przedstawiono w Tabeli 1.2.1 i na Rys.1.2.1

W dniach od 25.05.2009 do 29.05.2009 spektrofotometr Brewera uczestniczył w międzynarodowym porównaniu w Hydrometeorological Institute Solar and Ozone Observatory, Hradec Kralove, Czechy. Podczas porównania wykonano wzorcowanie oraz przegląd części optycznej i elektronicznej spektrofotometru Brewera, przez kanadyjskiego eksperta, pana Kena Lamba.

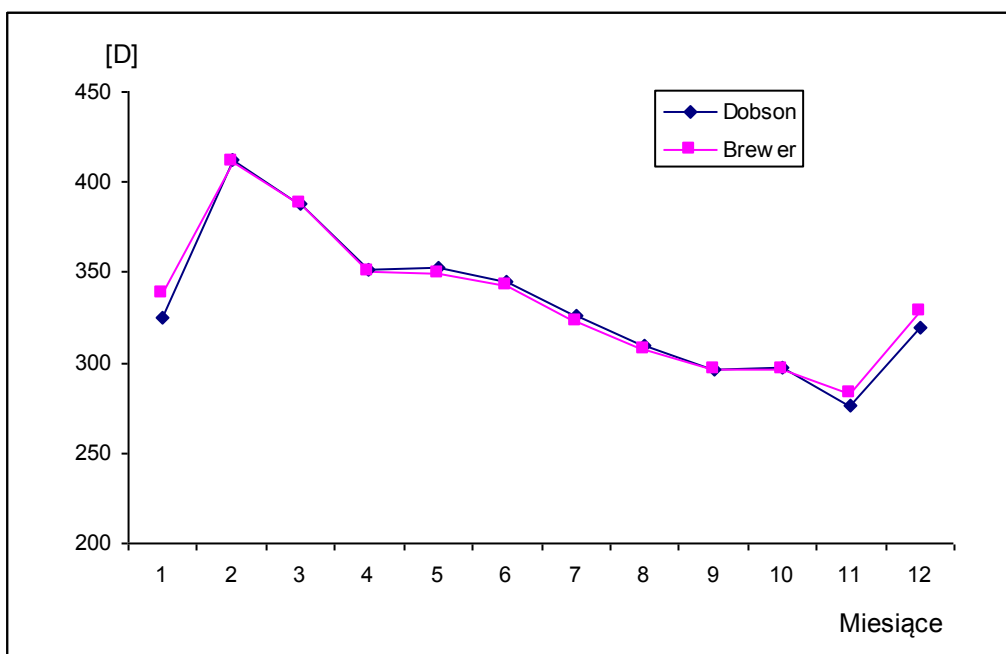
Spektrofotometr Brewera został bardzo starannie sprawdzony i wykalibrowany. Jednocześnie wykonano pomiary porównawcze całkowitej zawartości ozonu ze spektrofotometrami kanadyjskim, czeskim, słowackim i węgierskim. Wyniki pomiarów porównawczych świadczą o tym, że poziom kalibracji jest zgodny ze wzorcowym spektrofotometrem kanadyjskim w granicach 2%.

Tabela 1.2.1. Średnie dzienne wartości całkowitej zawartości ozonu uzyskane z pomiaru spektrofotometrem Brewera w Belsku w 2009 roku.

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1	276,6	410,3	362,4	359,6	346,2	-	316,6	317,3	280,4	303,5	299,0	316,9
2	275,1	427,7	354,0	318,8	344,9	416,9	317,7	304,8	279,4	316,3	302,0	-
3	322,2	406,2	346,7	339,7	330,0	357,9	314,9	326,6	293,5	292,5	304,3	331,7
4	311,2	420,9	350,8	335,3	335,3	375,4	315,6	307,2	290,5	277,6	337,0	-
5	370,6	422,6	367,4	342,2	348,0	408,4	314,8	308,8	332,3	274,4	318,0	315,2
6	362,1	414,2	383,9	360,0	348,8	362,4	329,1	295,2	324,1	273,3	295,8	335,8
7	346,2	410,5	399,5	357,2	339,8	372,0	331,7	298,5	301,8	271,0	294,5	-
8	361,2	388,3	382,3	350,6	342,2	353,2	356,8	299,8	293,3	269,2	262,0	312,2
9	352,5	399,9	374,6	343,2	340,0	331,7	343,0	305,2	307,0	285,1	-	-
10	316,1	403,7	420,5	369,4	340,5	338,4	350,9	311,0	305,7	284,6	277,4	306,8
11	316,3	426,7	409,9	375,0	345,5	359,4	355,0	336,7	305,0	302,9	274,9	308,0
12	303,3	418,8	385,7	370,3	431,3	375,4	350,8	308,3	311,0	310,3	265,7	327,3
13	312,4	404,5	401,6	344,3	388,2	375,3	331,1	320,3	305,7	315,0	263,6	-
14	351,2	410,6	389,7	379,8	397,7	349,6	295,6	323,9	302,2	-	275,0	-
15	330,0	410,3	397,0	343,0	367,4	317,2	297,4	303,2	309,3	304,8	297,4	-
16	359,5	431,8	405,7	326,7	347,8	328,6	306,3	306,3	308,5	302,9	319,8	328,9
17	400,7	421,7	358,3	330,0	320,0	356,2	302,5	311,2	288,4	294,2	260,5	347,3
18	415,5	435,3	404,2	351,8	318,5	320,8	301,0	327,3	267,6	312,4	277,8	317,0
19	432,6	431,2	417,2	375,1	312,1	315,6	329,4	314,5	263,0	301,9	274,2	325,9
20	363,9	420,3	379,8	348,8	325,0	331,2	334,5	303,7	266,9	332,0	278,5	-
21	344,0	433,5	377,6	352,9	325,1	333,9	333,7	300,4	270,3	334,7	275,7	392,5
22	378,5	387,2	392,8	345,6	328,3	326,1	315,1	298,3	297,3	325,0	269,7	339,9
23	-	415,2	414,6	355,6	-	314,1	314,7	313,5	286,5	308,4	288,6	-
24	411,0	412,8	409,1	342,2	-	309,1	303,1	295,1	296,6	275,5	299,0	-
25	355,9	392,9	427,3	349,7	-	317,3	343,9	291,9	305,7	263,6	-	326,0
26	361,6	395,1	419,4	346,8	-	316,5	351,2	298,0	298,8	271,0	270,0	-
27	331,7	397,3	395,3	345,2	-	310,9	309,2	293,7	297,4	295,8	292,3	371,8
28	317,3	374,6	392,3	346,5	-	314,9	305,3	282,6	292,3	279,2	312,5	-
29	297,6		375,7	353,3	-	320,9	310,2	305,1	293,6	304,5	328,0	-
30	360,6		349,2	353,2	-	317,0	304,7	308,8	300,3	316,8	327,5	361,0
31	329,2		378,0		-		317,3	304,7		291,8		-



Rys.1.2.1



Rys.1.2.2

Zgodność danych uzyskanych ze spektrofotometru Brewera z danymi otrzymanymi przy pomocy spektrofotometru Dobsona może być oceniona jako dobra. Różnica średnich miesięcznych całkowitej zawartości ozonu uzyskanych za pomocą spektrofotometru Dobsona i Brewera wynosi około  $\pm 2\%$  w ciągu całego roku. Należy dodać, że wyniki tych pomiarów różnią się między innymi dlatego, że spektrofotometr Brewera dostarcza danych w których uwzględniony jest błąd wynikający z obecności w atmosferze zaburzającego absorbera, jakim jest dwutlenek siarki ( $\text{SO}_2$ ). Mimo wymienionych różnic pomiarowych, średnie miesięczne całkowitej zawartości ozonu uzyskane przy pomocy obydwu przyrządów różnią się niewiele (Rys.1.2.2).

Jakkolwiek podstawowym przyrządem sieci pomiarów całkowitej zawartości ozonu nadal pozostaje spektrofotometr Dobsona, możliwość kontynuacji pomiarów i analiz porównawczych obu przyrządów jest niezwykle ważna, chociażby ze względu na zapewnienie ciągłości serii pomiarów przy pomocy spektrofotometru Dobsona w razie jego awarii po ponad 45-letnim okresie pracy.

### **1.3 Rozkład pionowy ozonu metodą Umkehr**

**Bonawentura Rajewska-Więch, Janusz W. Krzyścin**

Serie pomiarów wykonywanych w świetle rozproszonym pochodzącym z nie zachmurzonego zenitu przy odległościach zenitalnych Słońca  $60^\circ - 90^\circ$  umożliwiają wyznaczenie rozkładu pionowego ozonu tzw. metodą Umkehr. Wyniki pomiarów z tych serii, po wstępnym opracowaniu w Belsku, wysyłane są do Centrum Danych Ozonowych w Kanadzie, gdzie profile ozonu wyznaczane są z tego rodzaju obserwacji dla całej sieci światowej pomiarów spektrofotometrycznych. Ze względu na wymagania pogodowe (około 3,5 godzin bezchmurnej pogody) liczba serii pomiarów Umkehr zmienia się znacznie z roku na rok.



Tabela 1.3.1 Zawartości ozonu w poszczególnych warstwach umkehrwskich

Data	Zawartość Ozonu w warstwach [D]										O <sub>3</sub> [D]
	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
2 03 2009 A	1,47	3,82	10,42	21,1	33,8	61,2	91,1	64,4	32,9	27,6	347
2 03 2009 P	1,43	3,41	8,95	20,2	36,8	62,1	80,2	63,5	37,3	32,1	347
31 03 2009 A	1,34	3,31	10,02	22,7	34,3	50,6	74,0	81,5	58,6	40,8	379
31 03 2009 P	1,35	3,38	10,23	23,0	37,4	60,8	81,9	75,3	47,2	33,8	375
1 04 2009 A	1,34	3,31	9,85	21,6	34,2	55,0	77,0	70,8	43,5	34,8	353
1 04 2009 P	1,32	3,15	9,58	23,7	37,0	55,4	71,7	65,2	43,2	36,9	350
2 04 2009 P	1,36	3,53	11,25	25,3	38,3	54,1	64,9	52,9	30,9	33,3	317
3 04 2009 A	1,29	2,97	8,52	20,4	35,4	52,5	68,0	59,1	35,2	35,8	321
3 04 2009 P	1,33	3,29	10,14	24,3	40,6	60,4	71,6	56,6	33,1	31,4	334
4 04 2009 P	1,33	3,26	9,84	22,3	36,5	56,1	71,5	61,0	36,7	34,4	335
7 04 2009 P	1,30	3,14	9,82	24,5	39,6	57,0	70,8	63,3	39,8	35,0	346
14 04 2009 A	1,26	2,93	8,95	22,3	37,3	60,2	86,6	76,3	43,3	31,1	370
16 04 2009 P	1,28	3,11	9,80	23,0	38,0	57,9	69,2	55,3	32,0	32,5	323
17 04 2009 A	1,24	2,78	8,44	21,9	35,8	52,2	64,9	61,4	39,4	37,0	328
19 04 2009 A	1,24	2,87	9,00	23,3	38,8	60,7	80,8	73,1	45,0	33,5	369
20 04 2009 P	1,26	2,99	9,37	22,2	38,0	60,8	76,8	62,5	35,5	31,0	341
21 04 2009 A	1,24	2,85	8,90	22,5	37,0	54,1	71,4	67,4	42,3	35,6	345
21 04 2009 P	1,25	2,91	9,15	22,4	36,9	55,6	73,7	70,7	45,8	36,8	357
22 04 2009 A	1,24	2,90	8,97	21,3	37,0	59,1	75,7	63,6	36,4	31,8	339
22 04 2009 P	1,24	2,85	8,92	22,6	38,9	59,8	75,0	63,6	37,6	32,4	344
24 04 2009 A	1,24	2,88	9,22	23,6	40,0	61,3	76,6	61,4	34,4	30,1	341
25 04 2009 A	1,23	2,82	8,96	23,2	39,4	59,7	75,5	63,6	36,6	31,3	343
26 04 2009 A	1,24	2,94	9,67	23,7	36,6	55,3	72,5	69,0	45,2	36,6	355
28 04 2009 A	1,20	2,65	8,25	22,7	41,0	60,1	72,2	61,0	37,5	33,6	342
28 04 2009 P	1,20	2,69	8,67	24,6	40,4	57,7	70,3	61,6	39,1	34,5	343
29 04 2009 A	1,22	2,84	9,02	21,5	35,5	54,8	73,6	69,7	43,9	36,0	350
29 04 2009 P	1,23	2,93	9,93	25,3	38,5	55,8	73,4	68,1	41,6	33,4	351
30 04 2009 A	1,21	2,80	8,84	20,9	34,3	54,9	74,2	74,3	50,0	38,1	362
1 05 2009 P	1,25	3,14	10,80	24,0	38,0	68,3	84,4	53,4	27,0	25,7	335
2 05 2009 P	1,22	2,89	9,30	20,9	32,4	51,5	74,4	72,0	44,4	36,2	347
3 05 2009 A	1,19	2,66	8,31	20,8	36,0	54,7	70,2	61,7	36,6	34,7	329
4 05 2009 A	1,20	2,71	8,44	20,1	35,0	54,9	70,4	62,6	37,8	35,5	331

Tabela 1.3.1 cd. Zawartości ozonu w poszczególnych warstwach umkehrwskich

Data	Zawartość Ozonu w warstwach [D]										O <sub>3</sub>
	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	[D]
13 05 2009 A	1,18	2,68	8,78	21,8	37,4	60,6	81,5	80,1	52,6	36,3	384
14 05 2009 A	1,16	2,59	8,67	24,0	39,5	59,3	82,0	84,8	55,7	35,7	394
14 05 2009 P	1,17	2,64	8,86	23,9	39,9	60,2	80,4	82,2	55,4	36,6	392
15 05 2009 A	1,19	2,84	9,75	23,0	36,5	59,6	81,0	74,7	45,8	33,8	369
18 05 2009 A	1,15	2,57	8,34	21,0	36,4	54,7	67,3	56,7	32,8	34,5	317
25 05 2009 A	1,17	2,79	9,71	21,9	33,8	56,1	79,5	63,5	32,9	29,3	331
25 05 2009 P	1,15	2,64	9,08	23,2	38,0	57,0	71,5	60,3	33,9	31,2	329
26 05 2009 A	1,11	2,34	7,37	19,9	36,1	53,2	69,9	66,5	41,9	37,2	338
26 05 2009 P	1,13	2,48	8,23	22,2	37,7	54,0	69,8	66,3	42,1	36,9	343
28 06 2009 P	1,24	3,59	15,33	31,4	34,8	40,7	64,4	61,9	38,0	36,4	328
30 06 2009 A	1,22	3,42	14,03	29,0	31,3	38,5	67,2	63,3	38,7	37,5	324
1 07 2009 P	1,21	3,32	13,43	28,5	32,8	39,7	64,6	57,2	33,9	37,3	312
3 07 2009 P	1,12	2,49	8,22	20,0	34,7	57,1	70,9	55,5	30,2	32,0	313
4 07 2009 A	1,17	2,95	11,43	26,7	36,9	52,1	64,7	52,9	28,8	30,9	309
13 07 2009 A	1,26	3,67	14,35	28,6	32,7	40,5	69,5	68,7	44,2	38,5	342
14 07 2009 A	1,23	3,39	14,02	31,1	38,9	50,3	55,9	43,8	24,6	31,3	296
27 07 2009 P	1,20	3,01	10,74	25,5	39,0	57,4	66,6	50,5	28,2	30,6	313
28 07 2009 A	1,20	3,02	10,78	24,8	35,5	51,5	61,5	50,6	29,4	34,5	305
30 07 2009 A	1,33	4,12	16,15	30,8	37,2	49,9	57,7	45,9	26,1	31,4	302
1 08 2009 P	1,33	4,03	14,68	27,2	32,9	45,9	63,4	53,7	31,0	34,7	310
7 08 2009 A	1,23	3,11	10,64	24,8	34,1	40,8	64,1	53,5	31,1	38,2	303
10 08 2009 A	1,25	3,28	11,82	28,0	38,1	45,8	59,5	52,3	31,1	36,5	309
14 08 2009 P	1,25	3,17	10,54	23,8	33,9	47,6	67,4	59,6	36,6	37,3	324
19 08 2009 P	1,23	2,94	9,25	23,0	36,5	53,8	67,1	53,9	30,7	32,7	312
20 08 2009 A	1,25	3,04	9,89	25,4	38,9	53,8	61,2	46,5	26,5	32,1	300
21 08 2009 A	1,15	2,28	6,33	24,6	53,6	61	56,1	38,2	21,6	28,9	294
21 08 2009 P	1,22	2,82	8,83	25,7	44,3	55,9	57,1	43,4	25,4	32,9	299
24 08 2009 A	1,35	3,83	12,80	25,1	33,7	50,5	64,2	46,7	23,8	29,5	292
24 08 2009 P	1,29	3,34	10,96	24,9	37,0	55,2	65,3	44,9	22,9	28,2	294
25 08 2009 A	1,33	3,70	12,81	27,5	36,1	48,5	58,6	44,6	24,1	31,6	290
25 08 2009 P	1,27	3,19	10,14	24,3	40,8	64,2	65,3	37,4	18,3	23,8	287
27 08 2009 P	1,37	4,09	14,83	30,8	37,6	49,1	54,9	41,3	23,5	31,7	291

Tabela 1.3.1 cd. Zawartości ozonu w poszczególnych warstwach umkehrowskich

Data	Zawartość Ozonu w warstwach [D]										O <sub>3</sub>
	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	[D]
28 08 2009 A	1,32	3,50	11,37	24,3	33,6	48,3	60,5	44,7	22,8	30,7	282
28 08 2009 P	1,33	3,66	12,54	27,8	37,6	49,8	56,5	40,5	21,4	30,0	282
31 08 2009 A	1,3	3,30	10,16	22,5	33,1	50,8	63,6	53,8	32,3	35,8	309
1 09 2009 P	1,25	2,86	8,13	21,2	41,1	57,4	57,4	37,2	19,3	29,3	276
2 09 2009 A	1,32	3,45	10,89	24,3	36,1	51,7	59,3	40,8	20,8	29,5	279
8 09 2009 A	1,41	4,06	12,94	24,5	31,8	46,1	60,9	48,2	25,3	32,0	289
8 09 2009 P	1,36	3,63	11,29	24,2	34,3	50,5	60,2	46,4	26,5	34,2	295
9 09 2009 A	1,42	4,14	12,63	23,0	31,3	48	63,9	52,4	29,3	33,8	302
10 09 2009 A	1,35	3,50	11,11	26,1	35,3	40,6	62,8	53,3	31,4	37,6	304
14 09 2009 A	1,38	3,69	10,87	21,9	30,0	45	65,8	54,3	31,1	36,1	302
15 09 2009 P	1,39	3,72	11,28	23,9	33,7	51,6	69,0	53,0	28,8	31,1	308
18 09 2009 P	1,40	3,79	11,23	22,8	32,3	46,9	57,3	37,9	18,4	29,9	263
20 09 2009 A	1,42	3,91	11,50	23,1	32,3	45,6	55,4	37,7	19,2	32,1	264
21 09 2009 A	1,50	4,58	13,26	22,8	30,9	45,2	56,9	38,6	19,0	30,6	265
25 09 2009 A	1,48	4,34	12,93	24,2	31,6	49,2	72,4	54,4	27,3	28,5	306
30 09 2009 A	1,49	4,31	12,63	24,2	31,0	44,1	64,1	53,2	30,6	35,1	302
5 10 2009 A	1,46	3,99	11,38	24,2	35,9	51,7	59,7	37,7	18,5	27,3	272

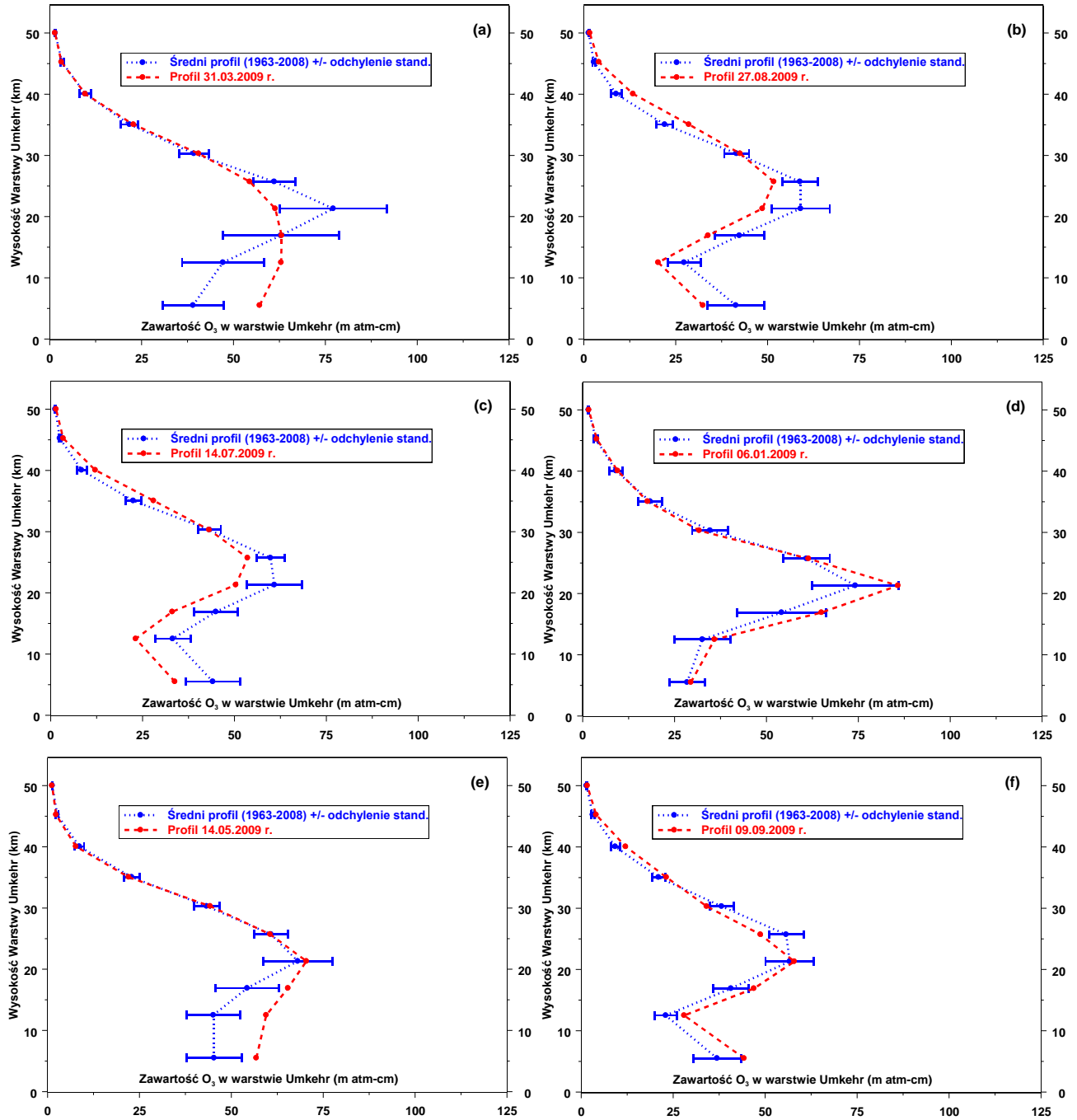
W 2009 roku w COG PAN w Belsku wykonano 120 (w tym 39 tzw. „krótkich Umkehrów”, z których rozkłady pionowe zostaną policzone w późniejszym terminie) serii pomiarów przy pomocy spektrofotometru Dobsona pozwalających wyznaczyć rozkład pionowy ozonu w warstwie atmosfery leżącej poniżej 50 km. Tabela 1.3.1 przedstawia zawartości ozonu wyrażone w dobsonach w dziesięciu warstwach o grubości około 5 km wyznaczonych metodą Umkehr w 2009 roku w Belsku. W Tabeli 1.3.2 przedstawiono średnie miesięczne zawartości ozonu w poszczególnych warstwach umkehrowskich (AVE) wyrażone w dobsonach, odchylenie standardowe (SD) oraz obserwowaną całkowitą zawartość ozonu w dobsonach. Profile ozonu uzyskane metodą Umkehr, ze względu na swoją specyfikę, głównie używane są do analiz wielkoskalowych.

Tabela 1.3.2 Średnie miesięczne zawartości ozonu w poszczególnych warstwach umkehrowskich

Miesiąc	Średnia zawartość ozonu w warstwie [D]											Ozon [D]
	2009	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
AVE III	1,40	3,48	9,90	21,8	35,6	58,7	81,8	71,2	44,0	33,6	4	362,0
SD	0,06	0,23	0,66	1,3	1,8	5,4	7,1	8,7	11,4	5,5		17,4
AVE IV	1,26	2,97	9,29	22,9	37,7	57,1	73,2	64,6	39,5	34,0	24	344,1
SD	0,05	0,21	0,66	1,3	1,9	2,8	4,7	6,2	4,9	2,3		13,7
AVE V	1,75	2,69	8,90	22,1	36,7	57,2	75,6	68,1	41,5	34,1	13	349,2
SD	0,04	0,20	0,86	1,5	2,1	4,4	6,0	9,7	9,1	3,4		26,3
AVE VI	1,23	3,51	14,68	30,2	33,0	39,6	65,8	62,6	38,4	37,0	2	326,0
SD	0,01	0,12	0,92	1,7	2,5	1,6	3,8	1,0	0,5	0,8		2,8
AVE VII	1,22	3,25	12,39	27,0	36,0	49,8	63,9	53,1	30,7	33,3	8	311,5
SD	0,06	0,50	2,55	3,6	2,5	6,6	5,1	7,7	6,1	3,1		13,7
AVE VIII	1,30	3,33	11,10	25,6	37,6	51,3	61,6	47,2	26,4	32,2	16	298,6
SD	0,06	0,47	2,17	2,1	5,3	5,9	4,1	6,5	5,1	3,8		11,8
AVE IX	1,40	3,84	11,58	23,6	33,2	47,8	62,0	64,7	25,7	32,3	13	290,3
SD	0,07	0,45	1,36	1,3	3,0	4,3	5,0	7,2	5,1	2,9		17,2
AVE X	1,46	3,99	11,38	24,2	35,9	51,7	59,7	37,7	18,5	27,3	1	272,0
SD	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		-

Na Rys.1.3.1 możemy zobaczyć interesujące przykłady zmian zawartości ozonu w poszczególnych umkehrowskich warstwach atmosfery. Jak widać zmiany te w odniesieniu do średniej wieloletniej 1963-2008 (linia niebieska) są najbardziej spektakularne w dolnej stratosferze i w troposferze. Niestety, w metodzie Umkehr zawartości ozonu wyznaczone w najniższych warstwach są najmniej wiarygodne. Na Rys.1.3.1 można zauważyć znacznie większą zmienność średnich zawartości ozonu w dolnej stratosferze w okresie zimowo-wiosennym w porównaniu do lata. Ponadto profile ozonu w poszczególnych dniach mogą znacznie odbiegać od średnich wieloletnich, zarówno co do wartości w poszczególnych warstwach jak i wysokości wystąpienia maksimum ozonu.

Należy dodać, że zmiany profilu ozonu przy ustalonej całkowitej zawartości ozonu są jednym z czynników wpływających na wielkość natężenia promieniowania



Rys. 1.3.1.

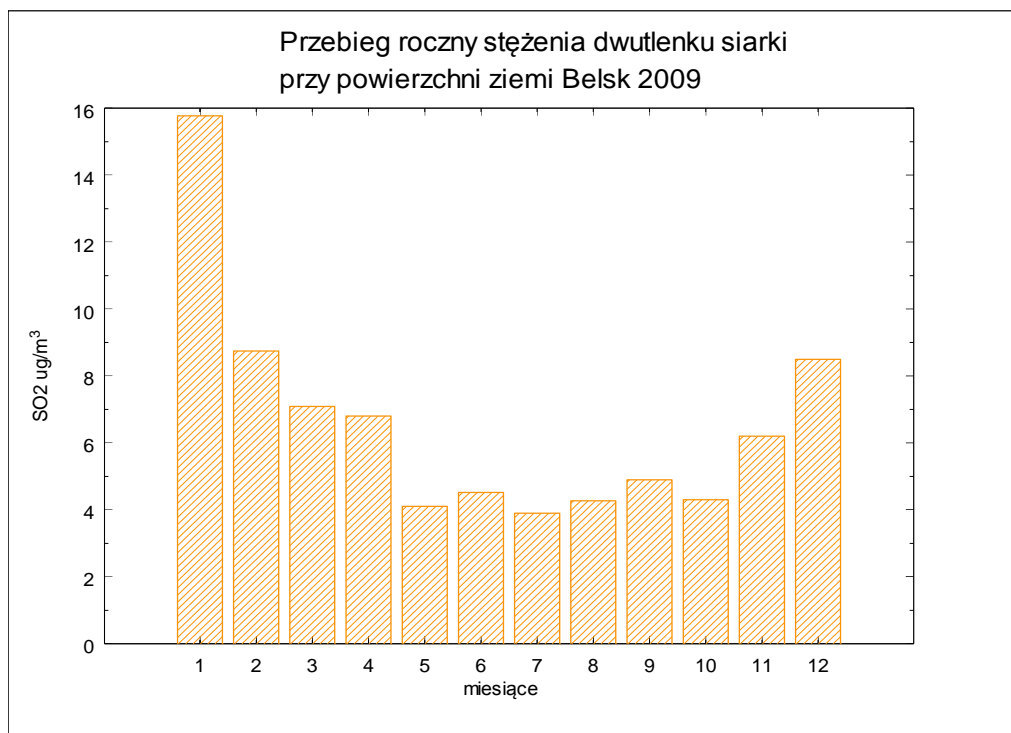
UV-B docierającego do powierzchni Ziemi. Dane ozonowe ze stacji dysponującymi długimi, ciągłymi i wiarygodnymi seriami pomiarowymi są szczególnie cenione w analizach statystycznych, mających na celu poznanie zmian zawartości ozonu na różnych wysokościach w atmosferze. W Europie są tylko trzy stacje wykonujące spektrofotometryczne pomiary rozkładu pionowego ozonu metodą Umkehr, w których tego typu pomiary wykonywane są ponad dwadzieścia lat. Należy do nich Belsk z ponad 45-letnią zrewaloryzowaną serią pomiarową. Wyniki pomiarów rozkładu pionowego ozonu metodą Umkehr w Belsku są szeroko stosowane w najpoważniejszych analizach statystycznych i metodycznych.

## 2. Zawartość dwutlenku siarki, ozonu i dwutlenku azotu w przyziemnej warstwie atmosfery w Centralnym Obserwatorium Geofizycznym PAN w Belsku w 2009 r.

### 2.1 Dwutlenek siarki

#### Janusz Jarosławski

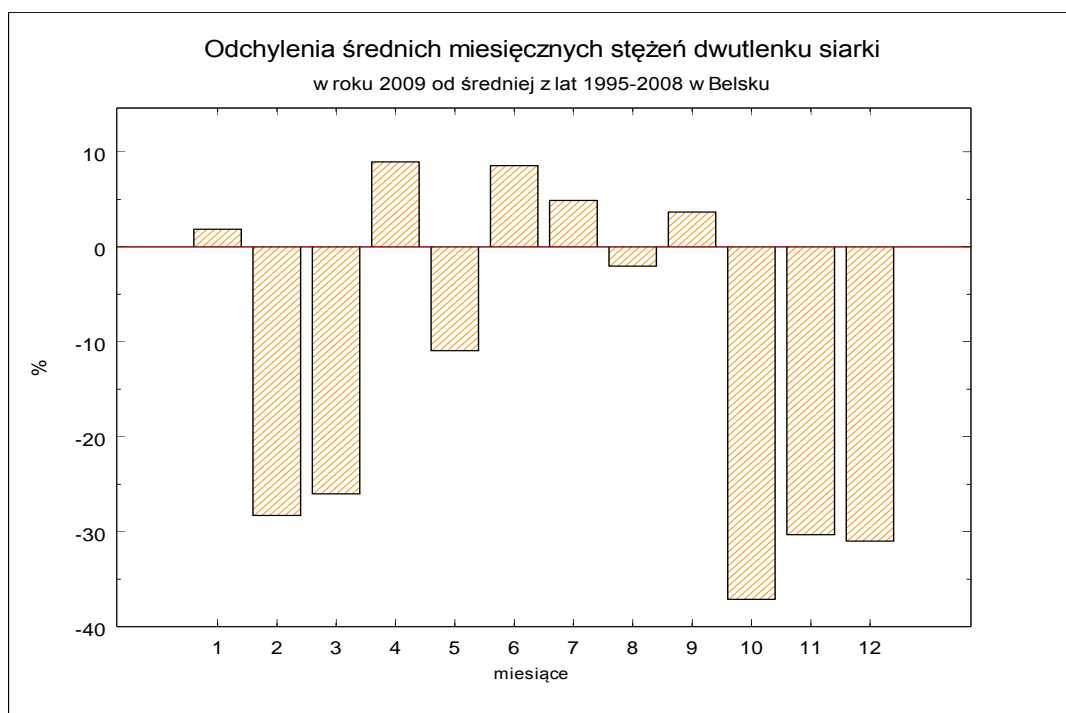
Rok 2009 był kolejnym rokiem systematycznych pomiarów stężeń dwutlenku siarki na stacji w Belsku. Pomiar wykonywany był przyrządem firmy Monitor Europe ML9850 działającym w oparciu o zjawisko fluorescencji  $\text{SO}_2$  w promieniowaniu UV. Wyniki ciągłych pomiarów w postaci średnich 60-min obejmują okres od stycznia do grudnia.



Rys.2.1.1.

Przebieg roczny średnich miesięcznych stężeń  $\text{SO}_2$  charakteryzował się występowaniem stosunkowo niskich poziomów stężeń o wartości ok.  $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  w miesiącach od maja do października oraz nieco wyższych poziomów stężeń ( $7\text{-}16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) w pozostałym okresie roku (Rys 2.1.1.). Maksymalne średnie miesięczne

stężenie  $\text{SO}_2$  w roku 2009 zostało zmierzone w styczniu ( $15,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) i było dwukrotnie wyższe niż maksymalne średnie miesięczne stężenie  $\text{SO}_2$  zmierzone w roku 2008 (w styczniu). W pięciu miesiącach roku 2009 średnie miesięczne stężenia  $\text{SO}_2$  były niższe od zmierzonych w okresie 1995-2008 o ok. 30%. Najniższe średniomiesięczne stężenie  $\text{SO}_2$  w ciągu roku zmierzono w lipcu (średnia miesięczna -  $3,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) – wyższe o  $1,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  od najniższej wartości średniomiesięcznej stężeń z roku 2008. W roku 2009 mieliśmy do czynienia ze spadkiem jesienno-zimowych stężeń  $\text{SO}_2$  w stosunku do średnich wieloletnich, chociaż nie tak dużym, jak w roku 2008, kiedy spadki sięgały 60% średnich wieloletnich wartości stężeń  $\text{SO}_2$ . (z wyjątkiem stycznia). W sezonie letnim od wielu lat średnie miesięczne poziomy stężeń  $\text{SO}_2$  zawierają się pomiędzy 3 a  $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .



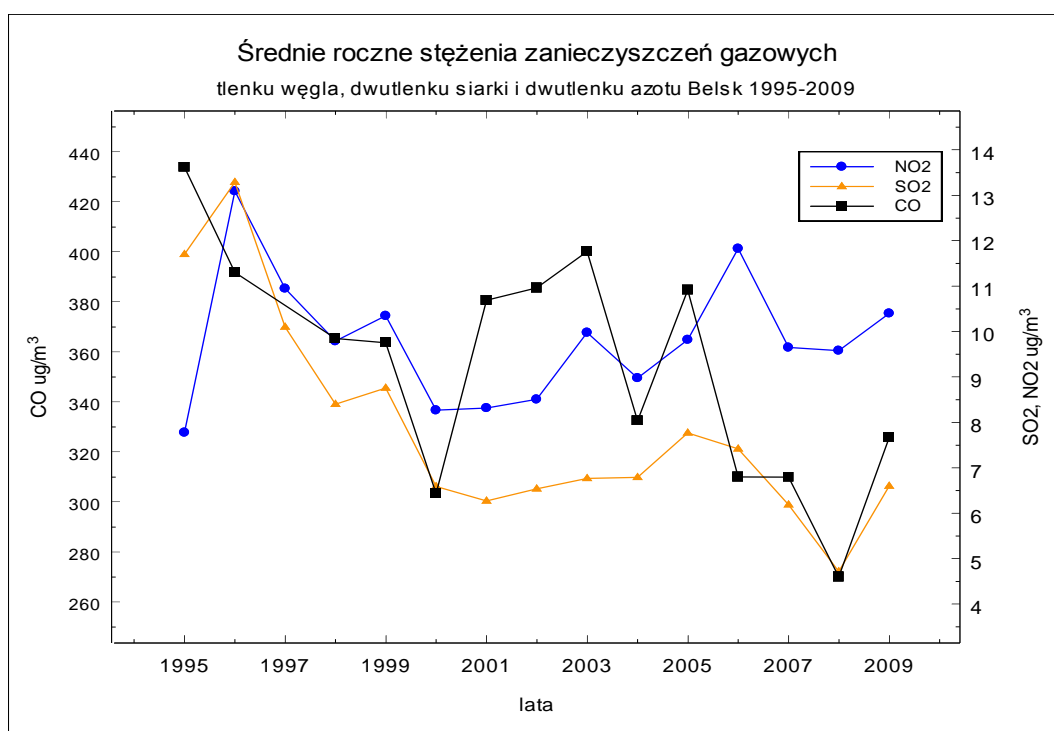
Rys.2.1.2.

Należy podkreślić, że w roku 2009 mieliśmy do czynienia ze wzrostami stężeń  $\text{SO}_2$  w stosunku do roku 2008, wynikało to z rekordowo niskich wartości  $\text{SO}_2$  występujących w rejonie Belska w roku 2008. W miesiącach zimowych po okresie ujemnego trendu stężeń  $\text{SO}_2$  w latach 1995-1999 w latach 2000-2006 obserwowano niewielkie wzrosty średniomiesięcznych stężeń  $\text{SO}_2$ , jednakże w roku 2009 występowały nadal duże spadki stężeń  $\text{SO}_2$  w miesiącach zimowych, tak, że w



połączeniu z niskimi stężeniami w lecie typowy dla lat ubiegłych przebieg roczny z minimum w lecie i maksimum w zimie był obniżony o kilka  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Rys. 2.1.2).

Średnia roczna wartość stężenia  $\text{SO}_2$  w roku 2009 była wyższa od zmierzonej w roku 2008 i była na poziomie wartości stężeń z lat 2000-2006 (Rys. 2.1.3). Od roku 1995 średnie roczne stężenia  $\text{SO}_2$  wynosiły: 11.7 (1995), 13.6 (1996), 10.1 (1997), 8.4 (1998), 8.8 (1999), 6.6 (2000), 6.3 (2001), 6.5 (2002), 6.8 (2003)  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 6.8 (2004)  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 7.8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (2005) 7.4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (2006), 6.2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (2007), 4.7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (2008) oraz 6.6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (2009). Przebieg średniorocznych stężeń  $\text{SO}_2$  od roku 1995 przedstawia Rys.2.1.3.



Rys.2.1.3.

Maksymalne wartości chwilowe (śr. 60-min) stężeń dwutlenku siarki w poszczególnych miesiącach roku 2009 charakteryzowały się dużą zmiennością szczególnie w miesiącach zimowych, ale generalnie były zbliżone do zmierzonych w roku 2008. Najwyższe chwilowe stężenie  $\text{SO}_2$  zmierzone w roku 2009 wyniosło 91  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (w październiku) i było o 21  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  niższe od maksymalnego stężenia  $\text{SO}_2$  z mierzonego w roku 2008. Wartości chwilowe (średnie 60-min) stężeń  $\text{SO}_2$  przedstawiają rysunki dołączone do wydruku danych na końcu raportu (Załącznik 2).

Wartości średnich miesięcznych wraz z wartościami maksymalnymi SO<sub>2</sub> przedstawia Tabela 2.1.1.

Tabela 2.1.1 Średnie miesięczne i wartości maksymalne koncentracji SO<sub>2</sub> w przyziemnej warstwie atmosfery w Belsku w roku 2009 (µg/m<sup>3</sup>).

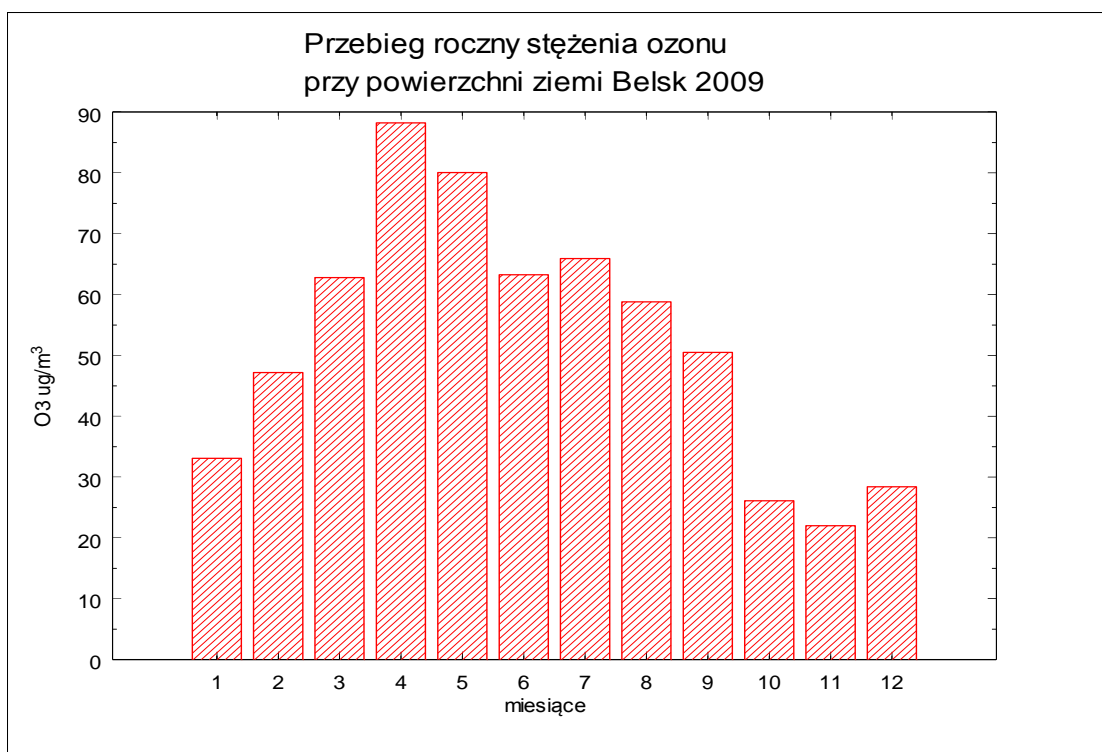
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Śr.	15,8	8,7	7,1	6,8	4,1	4,5	3,9	4,3	4,9	4,3	6,2	8,5
max.	80,8	39,9	65,0	32,9	25,9	49,5	15,9	31,4	81	91,3	26,6	51,6

## 2.2 Ozon przyziemny i dwutlenek azotu

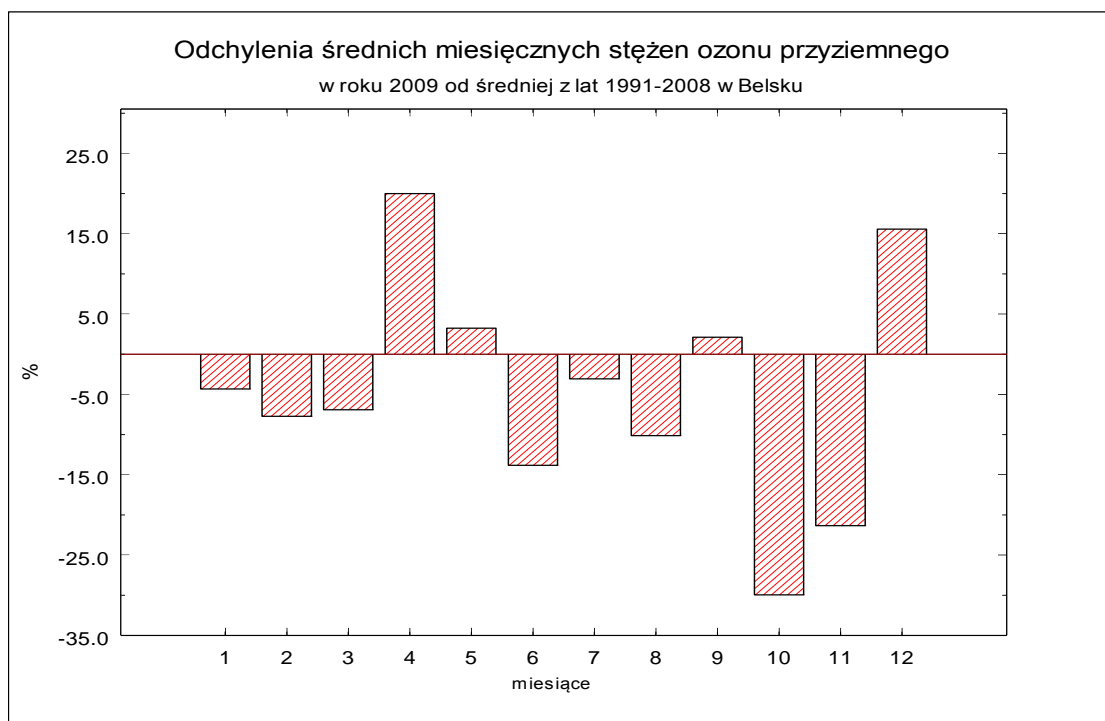
### Janusz Jarosławski

Rok 2009 był kolejnym rokiem pomiarów koncentracji ozonu oraz dwutlenku azotu na stacji w Belsku. Pomiary wykonywane były analizatorami firmy Monitor Europe model 9811 oraz firmy API Model 200AU (tlenki azotu). Analizator ozonu był w ciągu roku wzorcowany przy pomocy kalibratora posiadającego atest zgodności z czeskim krajowym wzorcem referencyjnym zgodnym z NIST znajdującym się w Pradze (Czechy). Wyniki pomiarów koncentracji ozonu pozwalają stwierdzić, że w roku 2009 przebieg cyklu rocznego był zbliżony do średniego przebiegu rocznego z ostatnich piętnastu lat. Maksimum roczne (średnia miesięczna) wystąpiło w kwietniu (średnia miesięczna wartość stężeń ozonu 88.2 µg/m<sup>3</sup>). Było o ok. 3 µg/m<sup>3</sup> wyższe od maksimum z roku 2008. Odchylenia średnich miesięcznych stężeń ozonu od wartości średnich z okresu 1991-2008 były dla większości miesięcy ujemne - do -30% w październiku, natomiast w dwóch miesiącach, kwietniu i w grudniu zaobserwowano znaczące wzrosty stężeń ozonu w stosunku do średniej wieloletniej (do +20%). Przebieg roczny stężenia ozonu w przyziemnej warstwie atmosfery (średnie miesięczne) przedstawia Rys. 2.2.1., a odchylenia od średnich miesięcznych z lat 1991-2005 przedstawia Rys. 2.2.2.

W roku 2009 wartości chwilowe stężeń ozonu nie odbiegały od obserwowanych w ubiegłych latach. Maksymalne stężenie chwilowe ozonu (śr. 60-min) wyniosło 165 µg/m<sup>3</sup> i zostało zmierzone w kwietniu. Wartości chwilowe stężeń



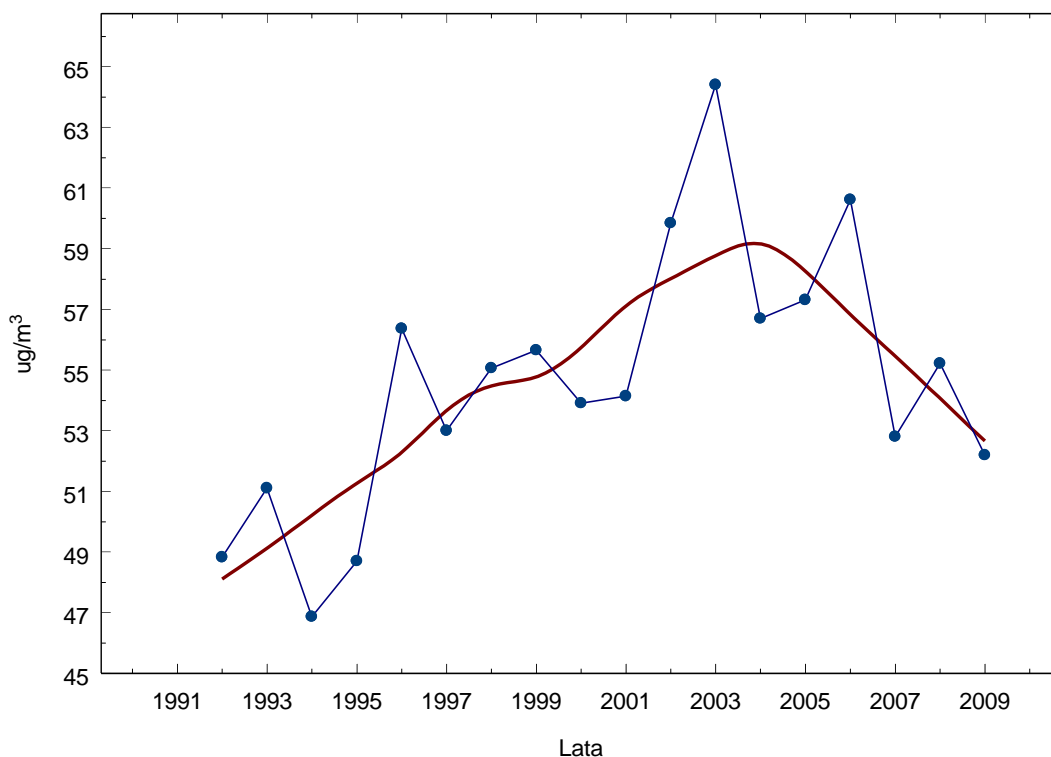
Rys. 2.2.1



Rys. 2.2.2

ozonu przedstawiają rysunki dołączone do wydruku danych na końcu raportu (Załącznik 2). Średnie roczne stężenie ozonu w przyziemnej warstwie atmosfery w roku 2009 wyniosło  $52,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  i było o około 20% niższe od najwyższej w całej serii pomiarowej wartości zmierzonej w roku 2003 ( $64,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Można wręcz powiedzieć, że poziomy stężenie były porównywalne do tych, jakie mierzono w Belsku pod koniec lat 90-tych. Jest to kolejny rok spadku średnich rocznych stężeń ozonu i wydaje się, że może to być początek zmiany obserwowanego od kilkunastu lat długookresowego trendu wzrostowego stężeń ozonu w Belsku wynoszącego poprzednio średnio 2 % rocznie. Przebieg średnich rocznych stężeń ozonu w latach 1992-2009 przedstawia Rys. 2.2.3. Wartości średnich miesięcznych wraz z wartościami maksymalnymi ozonu w roku 2009 przedstawia Tabela 2.2.1. Odchylenia średnich miesięcznych wartości stężeń ozonu przyziemnego w Belsku w roku 2009 od średnich z lat 1991-2008 przedstawia Rys. 2.2.2.

**Średnie roczne stężenia ozonu Belsk 1992-2009**



Rys. 2.2.3

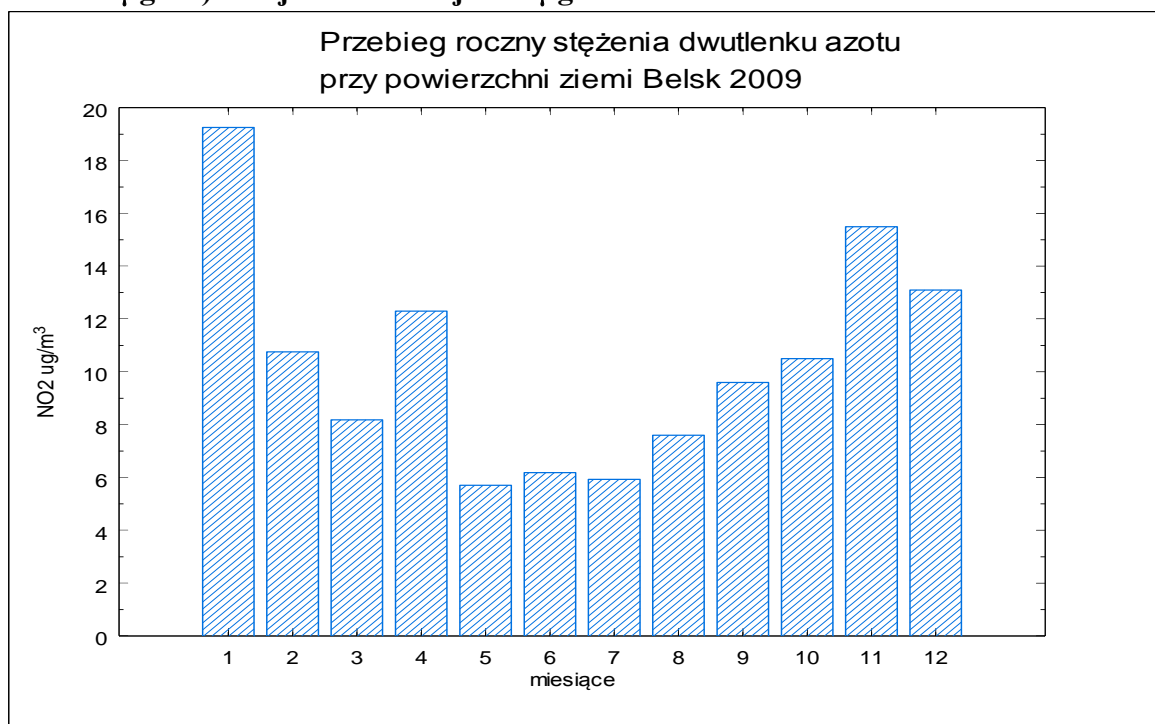
Tabela 2.2.1 Średnie miesięczne i wartości maksymalne koncentracji ozonu w przyziemnej warstwie atmosfery w Belsku w roku 2009 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
śr.	33,1	47,2	62,8	88,2	80,0	63,3	65,9	58,8	50,5	26,1	22,0	28,4
Max.	70,9	99,3	111,9	164,5	148,8	123,9	141,4	145,5	131	75,7	68,0	67,5

Stężenie dwutlenku azotu w roku 2009 w Belsku osiągało podobne wartości jak w latach ubiegłych (od roku 2000), nieco wyższe od tych w roku 2008. Odwrotnie niż w przypadku dwutlenku siarki nie wystąpił wyraźnie typowy kształt przebiegu sezonowych zmian stężeń  $\text{NO}_2$ , tylko w wybranych miesiącach (styczeń, kwiecień, listopad, grudzień) zmierzono wartości znacząco wyższe niż w pozostałych. W styczniu i w kwietniu odchylenie średniego miesięcznego stężenia  $\text{NO}_2$  od średniej z lat 1995-2008 sięgnęło 30%, jednakże w pozostałych miesiącach odchylenia były zmienne (od -25% do +25%) W okresie od maja do lipca średnie miesięczne stężenia  $\text{NO}_2$  pozostawały praktycznie na tym samym poziomie – (Rys. 2.2.4) ok.  $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  – nieco niższym jak w analogicznym okresie w latach ubiegłych (od roku 2000).

Rys.2.2.4.

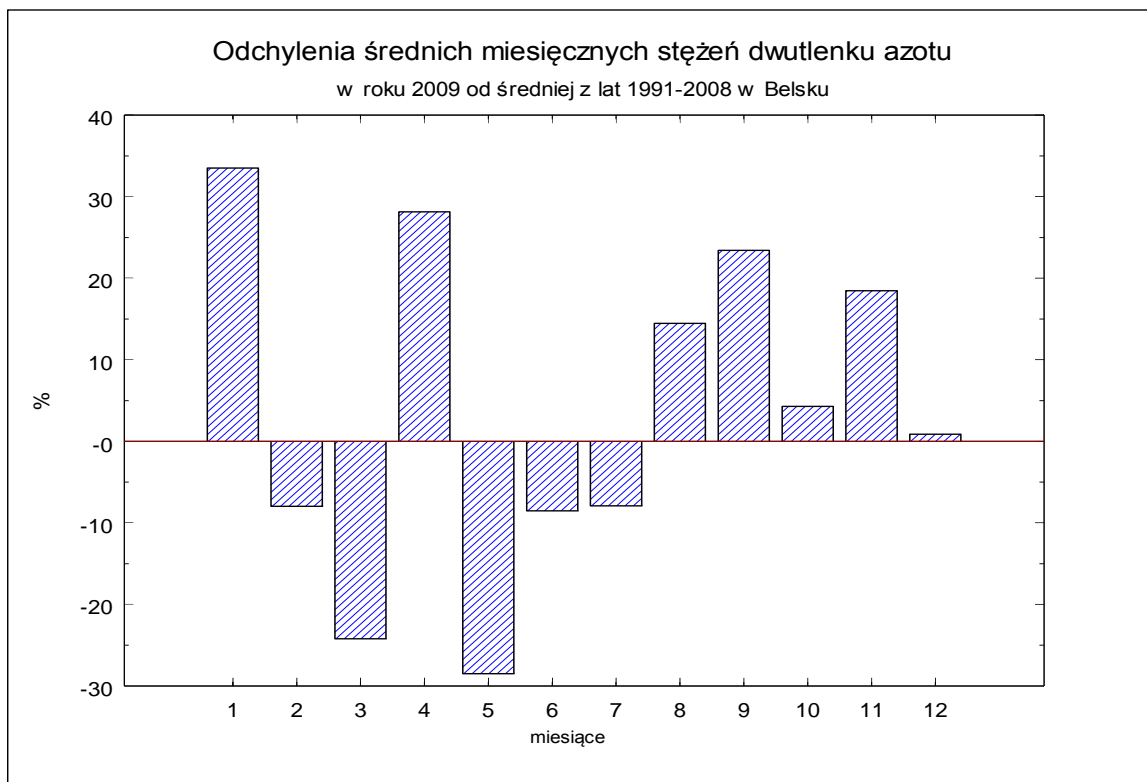
Najwyższe w roku 2009 średnie miesięczne stężenie dwutlenku azotu zmierzono w styczniu ( $19.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$  – wyższe od wartości maksymalnej z roku 2008 o ok.  $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) a najniższe w maju  $5.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  – nieco niższe niż w roku 2008. Przebieg



średnich miesięcznych stężeń dwutlenku azotu w roku 2009 przedstawia Rys. 2.2.4, a odchylen od średnich stężeń z okresu 1995-2008 Rys. 2.2.5. Maksymalne wartości chwilowe dwutlenku azotu były porównywalne z przeciętnymi w całej dotychczasowej serii pomiarowej (od 1995 roku). Wartość maksymalna – śr. 60-min wyniosła  $69 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (w styczniu).

Średnie roczne stężenie dwutlenku azotu w przyziemnej warstwie atmosfery w roku 2009 wyniosło  $10.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  i było wyższe o  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  niż zmierzone w roku 2008. Od roku 2000 obserwowany jest stopniowy wzrost średniorocznych stężeń  $\text{NO}_2$ , sięgający w sumie 20% wartości z roku 2000 ( $2-3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

Wartości chwilowe stężeń dwutlenku azotu przedstawiają rysunki dołączone do wydruku danych na końcu raportu (Załącznik 2). Wartości średnich miesięcznych wraz z wartościami maksymalnymi dwutlenku azotu przedstawia Tabela 2.2.2.



**Rys 2.2.5**

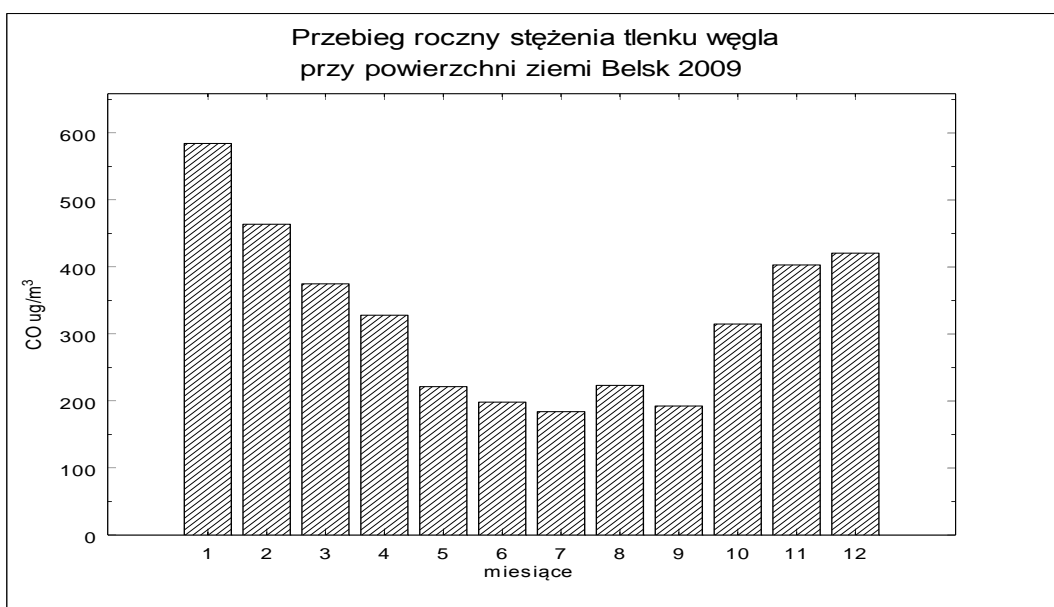
Tabela 2.2.2 Średnie miesięczne i wartości maksymalne koncentracji NO<sub>2</sub> w przyziemnej warstwie atmosfery w Belsku w roku 2009 (µg/m<sup>3</sup>).

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
śr.	19,3	10,8	8,2	12,3	5,7	6,2	5,9	7,6	9,6	10,5	15,5	13,1
Max.	68,8	53,0	35,4	65,7	50,7	28,9	24,1	27,5	35	31,9	36,5	41,0

### 2.3. Tlenek Węgla

Janusz Jarosławski

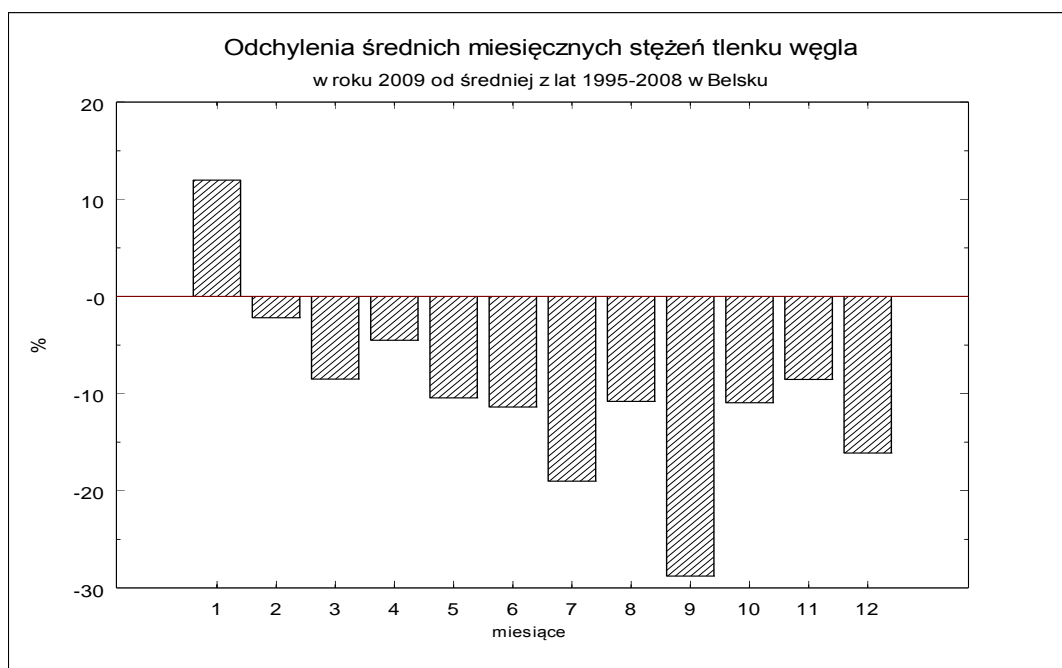
W roku 2009 wykonywano w Belsku pomiary stężeń tlenku węgla w przyziemnej warstwie atmosfery. Pomiar wykonywany był przyrządem firmy Monitor Europe ML9830 działającym w oparciu o zjawisko absorpcji promieniowania podczerwonego przez tlenek węgla. Z powodu specyficznych warunków (stacja pozamiejska) stężenia tlenku węgla w rejonie Belska osiągają często niskie wartości szczególnie w okresie letnim (wieloletnia średnia miesięczna w okresie od maja do sierpnia jest na poziomie ok. 200 - 250  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), zbliżając się do progu wykrywalności analizatora (szacowanego na ok. 100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), co powoduje czasem konieczność odrzucania pewnej części wyników jako obarczonych zbyt dużym błędem pomiarowym.



Rys.2.3.1.

W roku 2009 przebieg roczny stężenia CO był stosunkowo wyraźny, z wartościami średniomiesięcznymi poniżej 200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  dla trzech miesięcy. Dla wszystkich miesięcy roku 2009 z wyjątkiem stycznia odchylenia stężeń w stosunku do średniej wieloletniej były ujemne. Wartości odchyień od średnich miesięcznych stężeń tlenku węgla dla poszczególnych miesięcy oscylowały w granicach od -5% do -28% wartości średnich z lat 1995-2008 (Rys. 2.3.2). Średnie roczne stężenie tlenku węgla było wyższe od najniższego z całej serii pomiarowej (z roku 2008) od roku 1995 i wyniosło 326  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Maksimum roczne średnich miesięcznych stężeń tlenku węgla wystąpiło w zimie (styczeń) i wyniosło 584  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Najwyższe wartości chwilowe stężeń tlenku węgla (średnie 60-min) zmierzono również w zimie (patrz Tabela 2.3.1). Maksymalne stężenie chwilowe w roku wyniosło 1665  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (w styczniu) było o 200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  wyższe od maksymalnych wartości z roku 2008. Przebieg roczny stężenia CO w Belsku w roku 2009 (średnie miesięczne) przedstawia Rys 2.3.1, a wartości średnich miesięcznych i chwilowych wartości maksymalnych przedstawia Tabela 2.3.1





Rys.2.3.2.

Tabela 2.3.1 Średnie miesięczne i wartości maksymalne koncentracji CO w przyziemnej warstwie atmosfery w Belsku w roku 2009 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
śr.	584,3	463,9	374,9	328,0	221,7	198,4	184,1	223,4	192,5	315,0	403,0	420,7
max	1665	1144	1020,0	813,0	681,0	442,0	475,0	1081,0	446	909,6	913,0	1401,0

Wybrane wyniki pomiarów stężeń zanieczyszczeń powietrza w roku 2009 (średnich 1-godz i średnich kroczących 8 godz. przedstawione są w Tabelach 2.3.2. i 2.3.3

Tabela 2.3.2 Wybrane wyniki pomiarów zanieczyszczeń gazowych powietrza- średnie 1-godz.

Parametr	Jednostki	SO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	NO <sub>2</sub>	CO
Kompletność serii pomiarowej	%	99%	99%	99%	99%
Percentyle z serii pomiarowej	S10	2,6	13,6	3,2	122,0
	S50	4,5	49,3	8,3	287,0
	S90	11,8	94,1	19,7	591,5
	S98	28,2	121,2	32,1	877,8
	S99,8	57,3	144,7	54,9	1343,2
Wartość najwyższa	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	91,3	164,5	68,8	1665,0
Liczba wyników pomiarów		0	0	0	0

przewyższających poziom informowania				
--------------------------------------	--	--	--	--

Tabela 2.3.3 Wybrane wyniki pomiarów zanieczyszczeń gazowych powietrza- średnie 8-godz krocząco oraz wskaźnik ozonowy AOT 40.

Parametr	Jednostki	O <sub>3</sub>	CO
Kompletność serii pomiarowej	%	99%	99%
Percentyle z serii pomiarowej	S <sub>10</sub>	15,3	128,0
	S <sub>50</sub>	50,4	285,6
	S <sub>90</sub>	90,8	582,4
	S <sub>98</sub>	114,8	853,5
	S <sub>99,8</sub>	135,0	1369,9
Wartość najwyższa	µg/m <sup>3</sup>	151,5	1530,9
Liczba wyników pomiarów przewyższających wartość dopuszczalną		147	0
Wartość wskaźnika ozonowego AOT 40 µg/m <sup>3</sup> *godz		13088	

Wszystkie analizatory zanieczyszczeń powietrza pracujące na stacji C.O.G. PAN w Belsku podlegały przeglądowi serwisowemu wykonanemu przez autoryzowaną przez producenta firmę MLU na podstawie zleceń serwisowych. Ponadto przez cały rok realizowany był harmonogram czynności kontrolnych (kontrole parametrów i kontrole typu zero-span, kalibracje wielopunktowe, wymiany zużywających się materiałów eksploatacyjnych), mających na celu zapewnienie jakości otrzymywanych danych.

#### **2.4. Omówienie wybranych aspektów dotyczących zmienności zanieczyszczeń gazowych zmierzonych na stacji C.O.G. PAN w Belsku w roku 2009 i w latach poprzednich**

##### **Barbara Kopcewicz**

Jak wiadomo, ozon w przyziemnej warstwie atmosfery powstaje w procesach fotochemicznych, na drodze utleniania tlenków azotu (NO<sub>x</sub>) i lotnych związków organicznych (VOC) i wykazuje nieliniową zależność od ich koncentracji. W celu zracjonalizowania wydatków związanych z koniecznością zmniejszenia emisji prekursorów ozonu przyziemnego rozpoczęto badania zmierzające do ustalenia rodzaju zależności koncentracji ozonu od w/w prekursorów. Jak

wiadomo, w pewnych warunkach proces tworzenia się ozonu jest całkowicie kontrolowany przez NO<sub>x</sub> i prawie nie zależy od VOC, w innych zaś, produkcja ozonu rośnie wraz ze wzrostem VOC i nie zależy od koncentracji NO<sub>x</sub> (a czasami nawet zmniejsza się). Jest konieczne określenie dla każdego obszaru oddzielnie rodzaju zależności od NO<sub>x</sub> i VOC, a także innych związków chemicznych mających wpływ na stan zanieczyszczenia atmosfery.

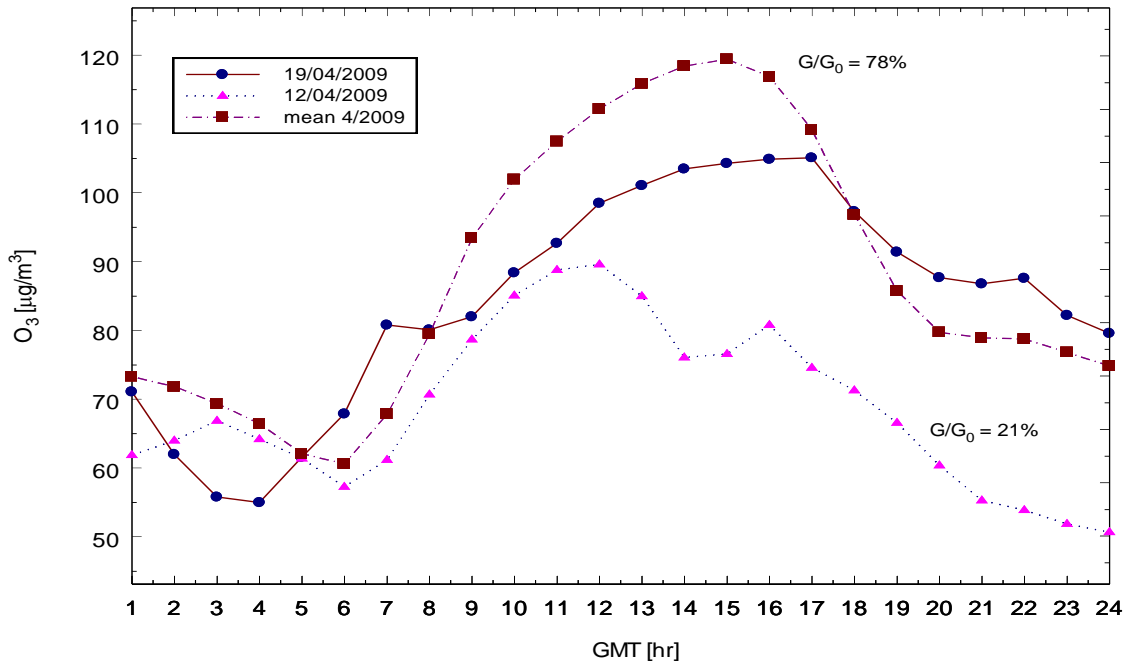
Nieliniowa zależność O<sub>3</sub> od NO<sub>x</sub> przejawia się w tym, że w zależności od tego czy jesteśmy w obszarze wysokiego NO<sub>x</sub> czy niskiego NO<sub>x</sub>, wzrost emisji NO<sub>x</sub> ogranicza produkcję O<sub>3</sub>, lub, odpowiednio, promuje powstawanie O<sub>3</sub>. Obszary wysokiego NO<sub>x</sub> i niskiego NO<sub>x</sub> są definiowane nie poprzez bezwzględną wartość emisji NO<sub>x</sub> (ENox) ale poprzez względną wielkość produkcji rodników (S) i emisji NO<sub>x</sub>. Jeżeli  $S > ENox$  to mamy do czynienia z obszarem niskiego NO<sub>x</sub>, natomiast w przypadku gdy  $S < ENox$ , mamy do czynienia z obszarem wysokiego NO<sub>x</sub>. Przebieg reakcji chemicznych w troposferze i wynikający z tego jej stan chemiczny zależy, przy tym samym poziomie emisji NO<sub>x</sub>, od S i czynników wpływających na wielkość S. Wielkość S zależy od sezonu, a więc związanego z tym natężenia promieniowania dochodzącego do powierzchni ziemi, grubości warstwy granicznej, temperatury i wilgotności, także nakładających się na to stanów zachmurzenia i aerozolu.

Wygodnym sposobem badania czynników kontrolujących koncentrację ozonu przyziemnego jest obserwowanie przebiegów dobowych, zarówno ozonu jak i jego prekursorów. Przykładem tego jest Rys.2.4.1, na którym porównuje się średnie przebiegi dobowe dla kwietnia 2009 roku z przebiegiem dobowym koncentracji O<sub>3</sub> (a) i NO<sub>x</sub> (b) dla dwóch dni, przy czystym niebie ( $G/G_0 = 78\%$ ) oraz zachmurzonym ( $G/G_0 = 21\%$ ). Wskaźnikiem braku chmur jest stosunek obserwowanego natężenia globalnego promieniowania przy powierzchni ziemi, G, do wielkości tego promieniowania na granicy atmosfery ziemskiej, G<sub>0</sub>. Tak więc  $G/G_0$  jest indeksem przezroczystości atmosfery. Biorąc pod uwagę rozpraszanie na molekułach powietrza i aerozolu atmosferycznym stosunek ten nie przekracza wartości 80% latem a 65% zimą. Przy wysokim NO<sub>x</sub> źródło wolnych rodników jest niewystarczające by reagować i usunąć całe NO<sub>x</sub> i dla  $G/G_0 = 21\%$  koncentracja NO<sub>x</sub> w ciągu dnia jest większa niż dla  $G/G_0 = 78\%$ . Jeżeli atmosfera znajduje się w obszarze niskiego NO<sub>x</sub> ( $G/G_0 = 78\%$ ) (Rys. 2.4.1 b) potencjał utleniania systemu chemicznego jest wysoki i w tym przypadku obserwujemy większą koncentrację

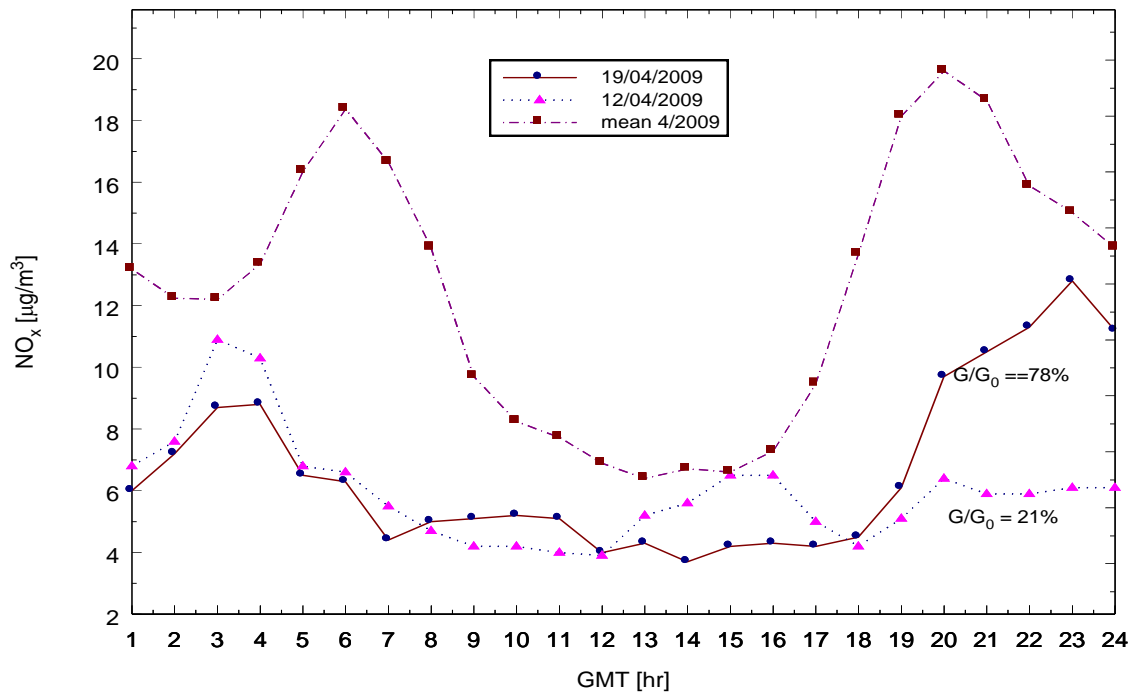
ozonu (Rys. 2.4.1 a). Rysunek 2.4.1 c przedstawia charakterystyczne maksimum w koncentracji NO w godzinach porannych, spowodowane wzrostem intensywności czynników antropogenicznych (np. ruchu samochodowego). Wydajność produkcji ozonu w troposferze zależy w istotny sposób od koncentracji NO; w przypadku wysokiej koncentracji NO przeważa reakcja rodników HO<sub>2</sub> z NO, w wyniku której powstaje NO<sub>2</sub>, a to z kolei prowadzi do wzrostu O<sub>3</sub> (Rys. 2.4.1.d). W przypadku niskiej koncentracji NO większą rolę odgrywa reakcja konkurencyjna HO<sub>2</sub> z O<sub>3</sub>, w wyniku której obserwowany jest rozpad ozonu. Rysunki 2.4.2 i 2.4.3 (a,b,c,d,e,f) przedstawiają średnie miesięczne zmiany dobowe ozonu, NO<sub>2</sub>, NO, CO, SO<sub>2</sub> oraz NO<sub>x</sub> w sezonie letnim (sierpień) i zimowym (grudzień) w okresie od 1996 do 2009 roku. W okresie 1996 – 2009 średni przebieg dobowy ozonu w sierpniu (Rys. 2.4.2 .a ) charakteryzował się małą zmiennością z roku na rok (wyjątek stanowią lata 2002 i 2003 z dużymi wartościami koncentracji ozonu), podczas, gdy w zimie (w grudniu) wahania poziomu stężeń ozonu przy braku zmienności dobowej są bardzo duże (Rys. 2.4.3 a). W roku 2009 średni przebieg dobowy koncentracji ozonu był najwyższy w kwietniu (Rys. 2.4.4 a). Rysunek 2.4.4 b przedstawia maksymalne średnie miesięczne przebiegi dobowe koncentracji ozonu w latach 1996 – 2009. W poszczególnych latach maksymalne wartości obserwowane były w różnych miesiącach. Najwyższą, wyjątkowo wysoką koncentrację ozonu przyziemnego zarejestrowano w sierpniu 2002 roku. W 2009 roku maksymalna wartość koncentracji ozonu była rejestrowana w kwietniu i była ona jedną z wyższych wartości rejestrowanych w latach poprzednich. Z dobowych przebiegów koncentracji ozonu rejestrowanych w latach 1996 – 2009 (Rys. 2.4.4 b) wynika, że coraz częściej maksymalne wartości ozonu przyziemnego rejestrowane są na wiosnę (kwiecień, maj) co mogłoby świadczyć o udziale ozonu pochodzącego z wyższych warstw atmosfery. Rysunek 2.4.4. c przedstawia średnie miesięczne zmiany dobowe ozonu w kwietniu w okresie od 1996 do 2009 roku. Najwyższa, wyjątkowo wysoka koncentracja ozonu przyziemnego była zarejestrowana w 2009 roku. Towarzystwo temu wysoka wartość dwutlenku azotu (Rys. 2.4.4.d).

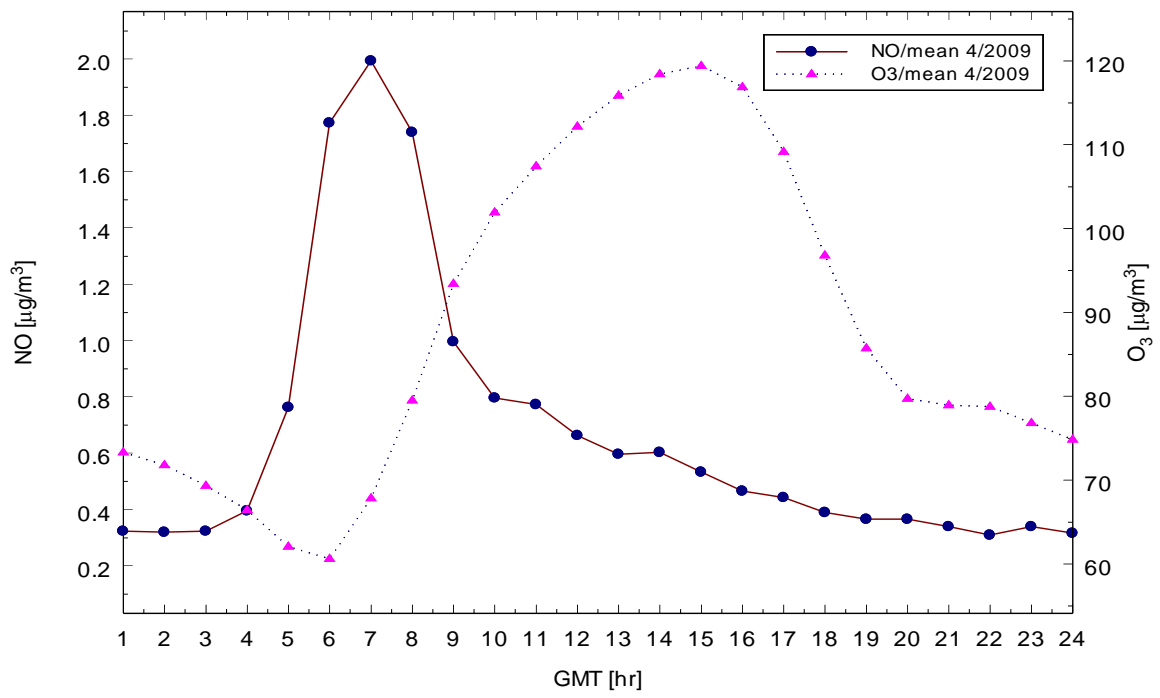
Przebiegi dobowe NO<sub>2</sub> są , zgodnie z przewidywaniami teoretycznymi, ujemnie skorelowane z przebiegami dobowymi ozonu wykazując niemal dwukrotnie większą amplitudę zmian z roku na rok w zimie niż w lecie (Rys 2.4.2 b i 2.4.3 b). Rysunki 2.4.2 c oraz 2.4.3 c przedstawiają przebiegi koncentracji NO. W średnich przebiegach dobowych powtarza się na tle wyrównanych niskich stężeń

występowanie maksimum w godzinach rannych 7 GMT w lecie i przedpołudniowych (10 GMT) w zimie (Rys 2.4.2 c i 2.4.3 c). Przebiegi dobowe tlenku węgla wykazują dość regularny przebieg w miesiącach zimowych (podwójne maksimum – rano i w nocy) oraz brak zmienności dobowej w lecie (Rys. 2.4.2 d, 2.4.3 d, 2.4.5 a). Odwrotna sytuacja zachodzi w przypadku zmienności dobowej dwutlenku siarki – w okresie letnim mamy tu do czynienia z maksimum występującym w godzinach przedpołudniowych (Rys. 2.4.2 e) oraz z brakiem wyraźnej zmienności dobowej w okresie zimowym (Rys. 2.4.3 e, 2.4.5 b). W roku 2009 zaobserwowano nieznaczny wzrost koncentracji CO i SO<sub>2</sub> w sezonie zimowym w stosunku do wartości rejestrowanych w 2008 roku (Rys. 2.4.3 d oraz 2.4.3 e). Koncentracja tlenku węgla oraz dwutlenku siarki również w sezonie letnim była wyższa od tej rejestrowanej w 2008 roku. Koncentracja dwutlenku siarki i tlenku węgla w 2008 roku, zarówno w sezonie letnim i zimowym, była najniższą jaką obserwowano w Belsku w okresie pomiarowym od 1996 roku. W roku 2009 stan ten uległ nieznacznemu pogorszeniu.



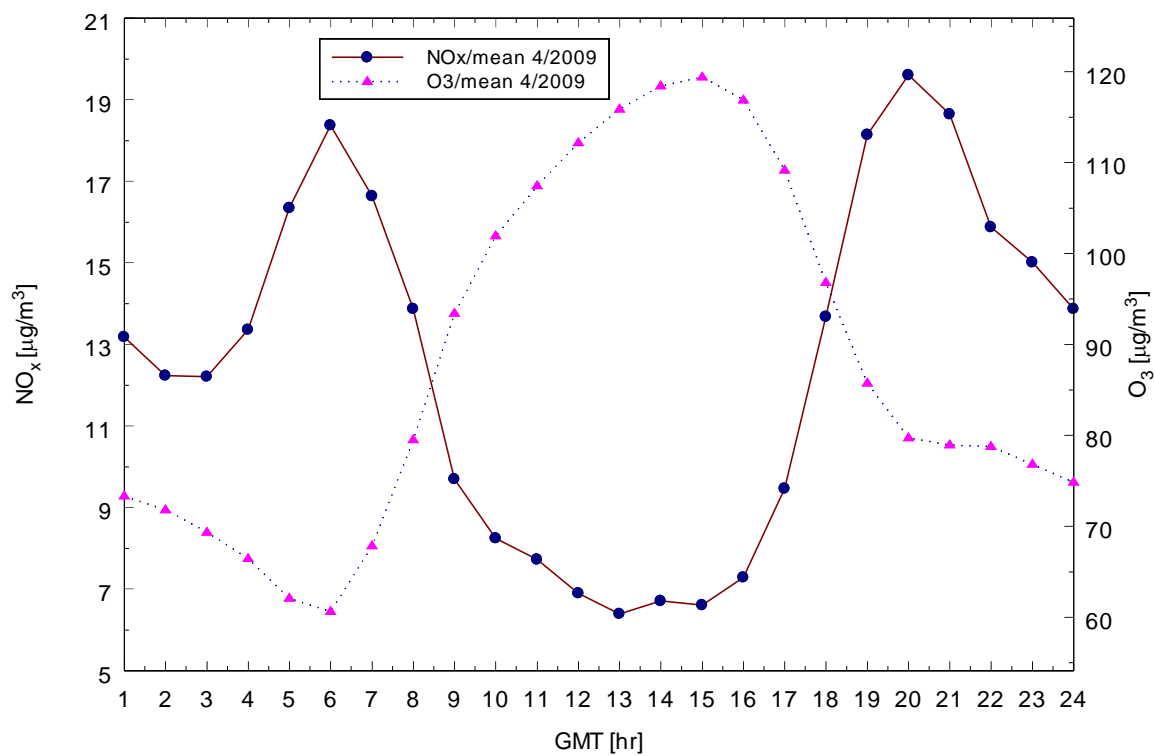
Rys.2.4.1.a





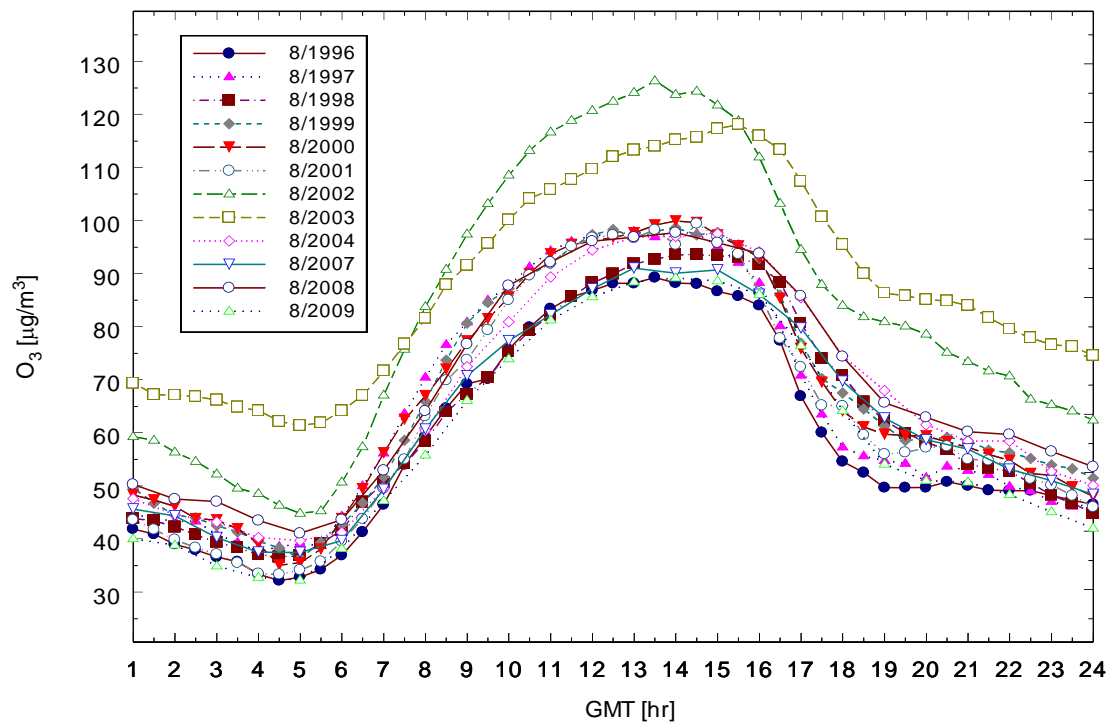
**Rys.2.4.1.b**

Rys 2.4.1 c

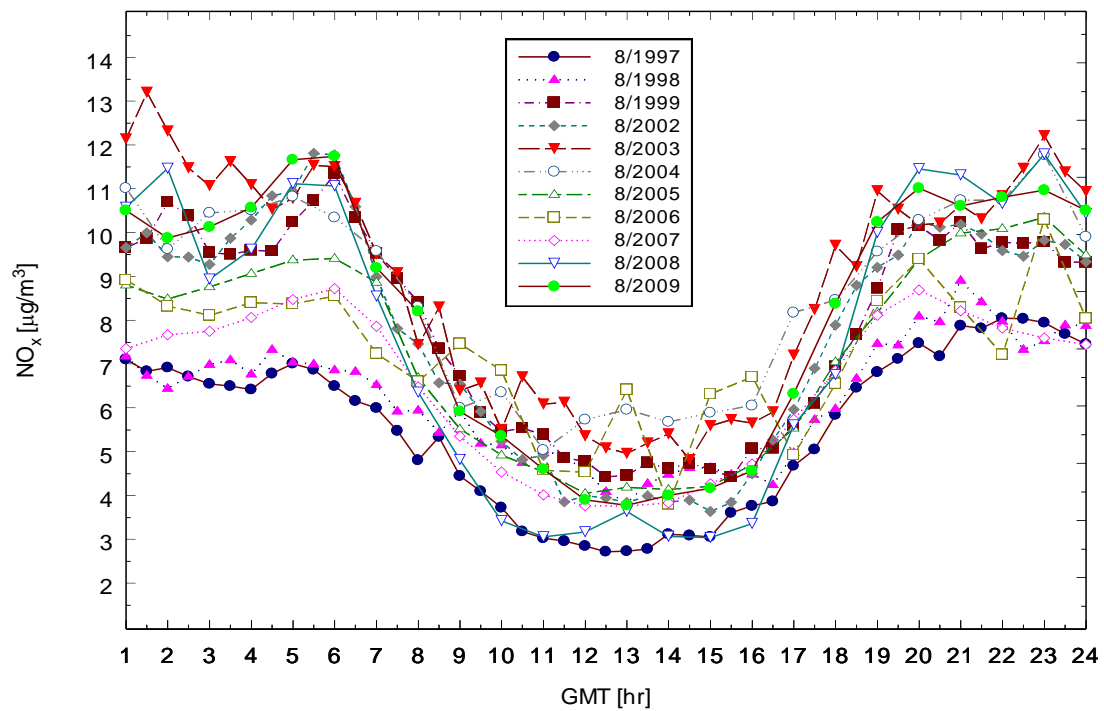


Rys 2.4.1.d

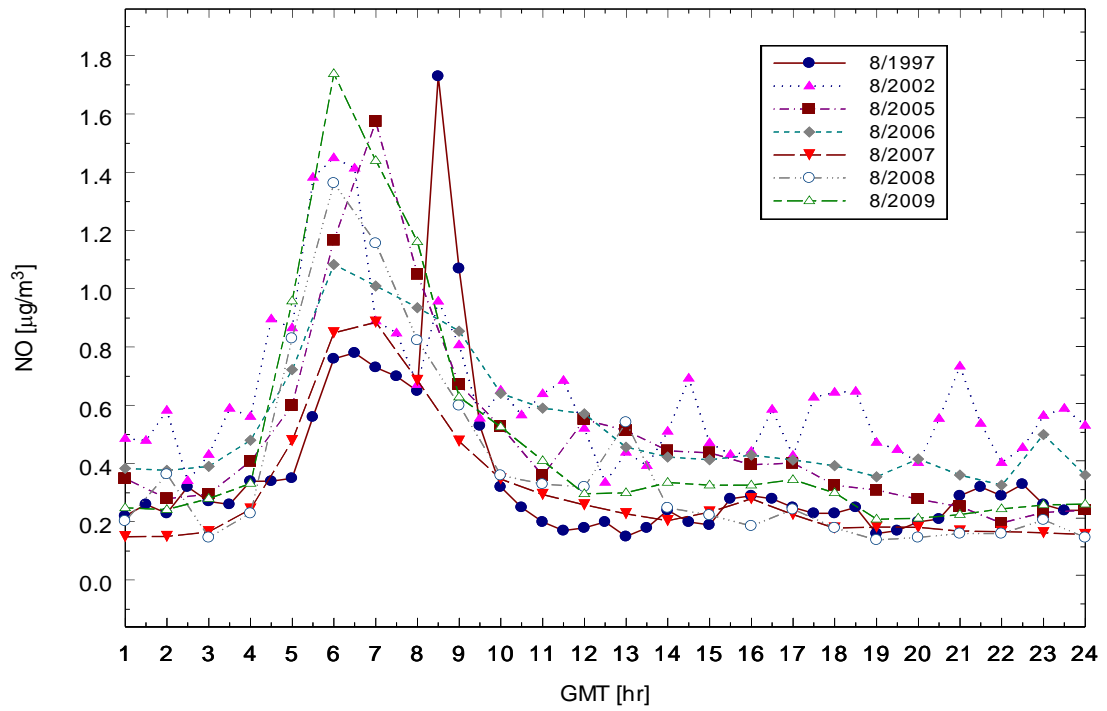




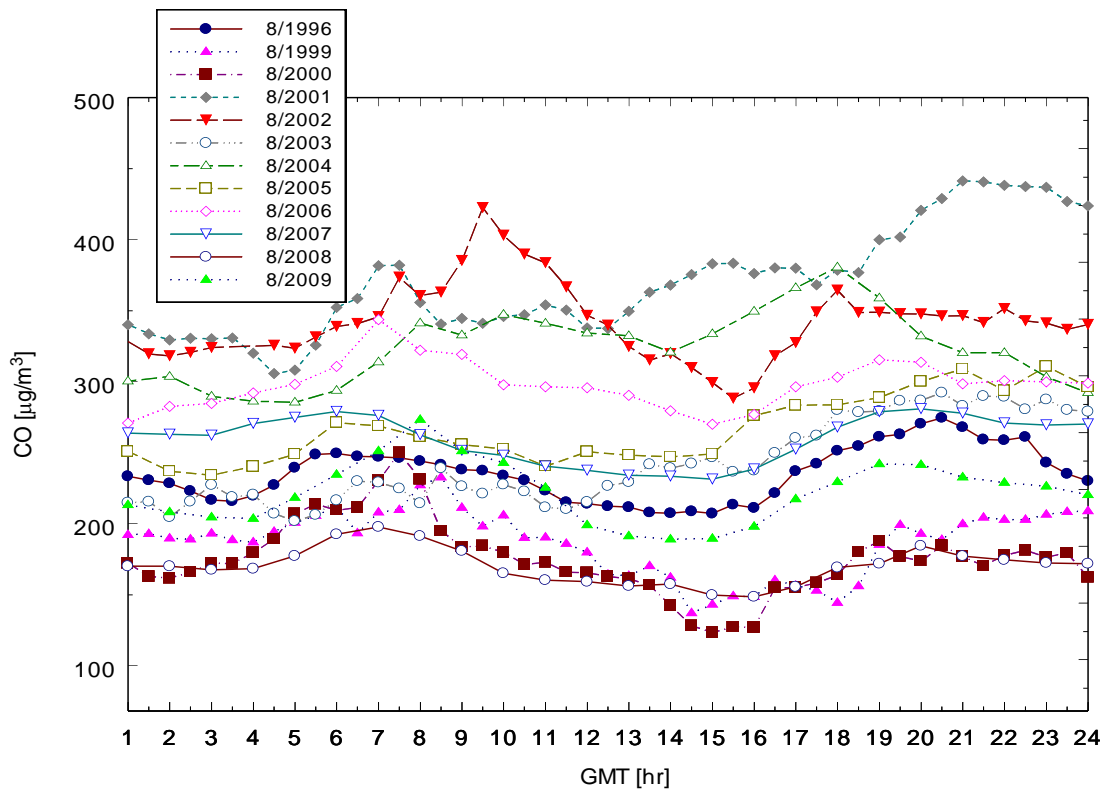
Rys. 2.4.2. a



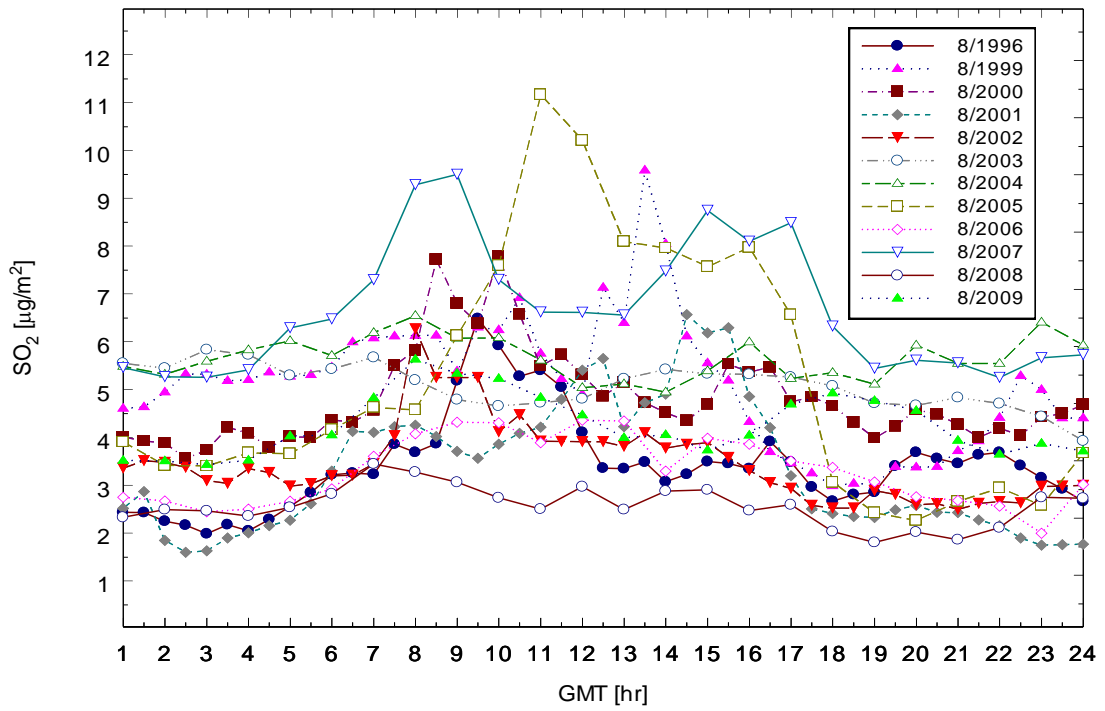
Rys 2.4.2 b



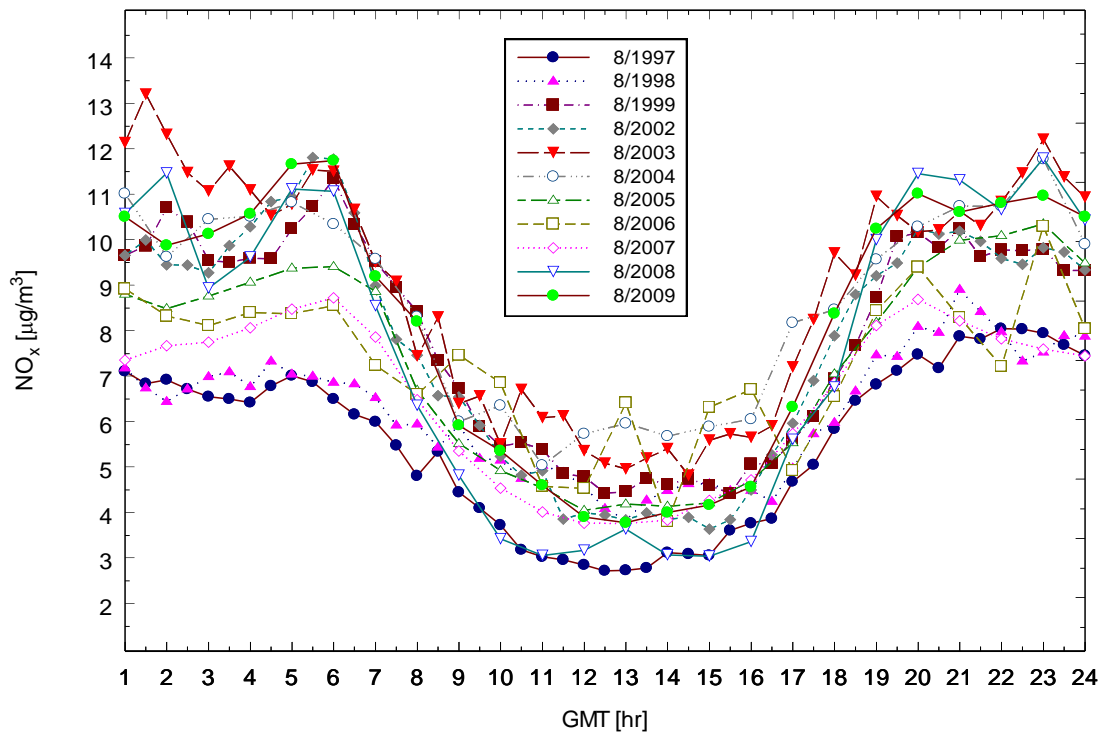
Rys. 2.4.2. c



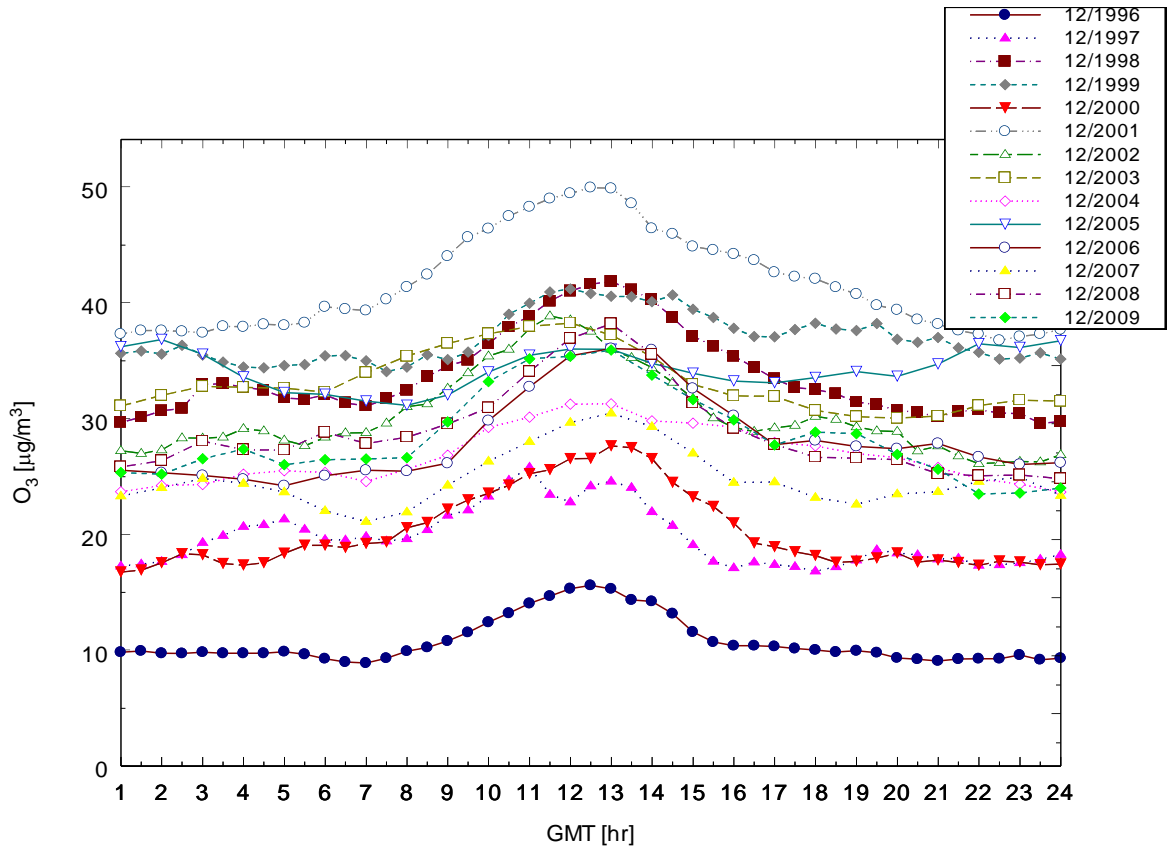
Rys 2.4.2. d



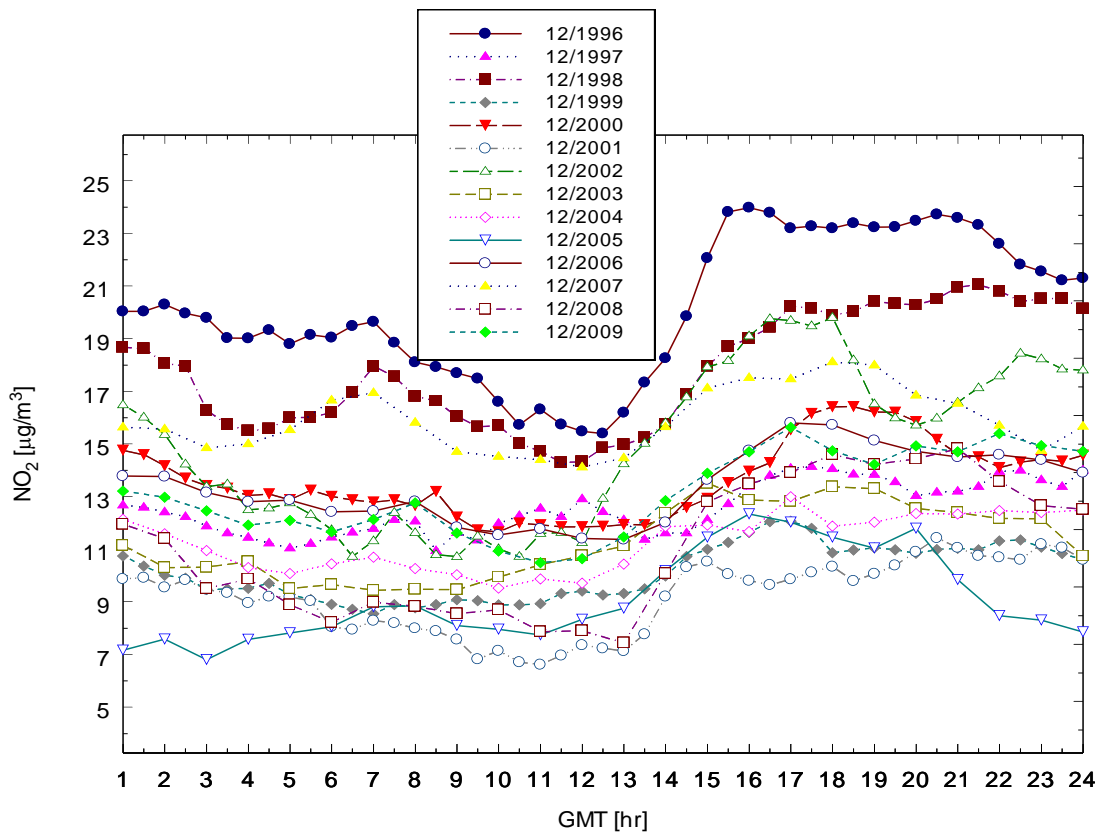
Rys 2.4.2. e



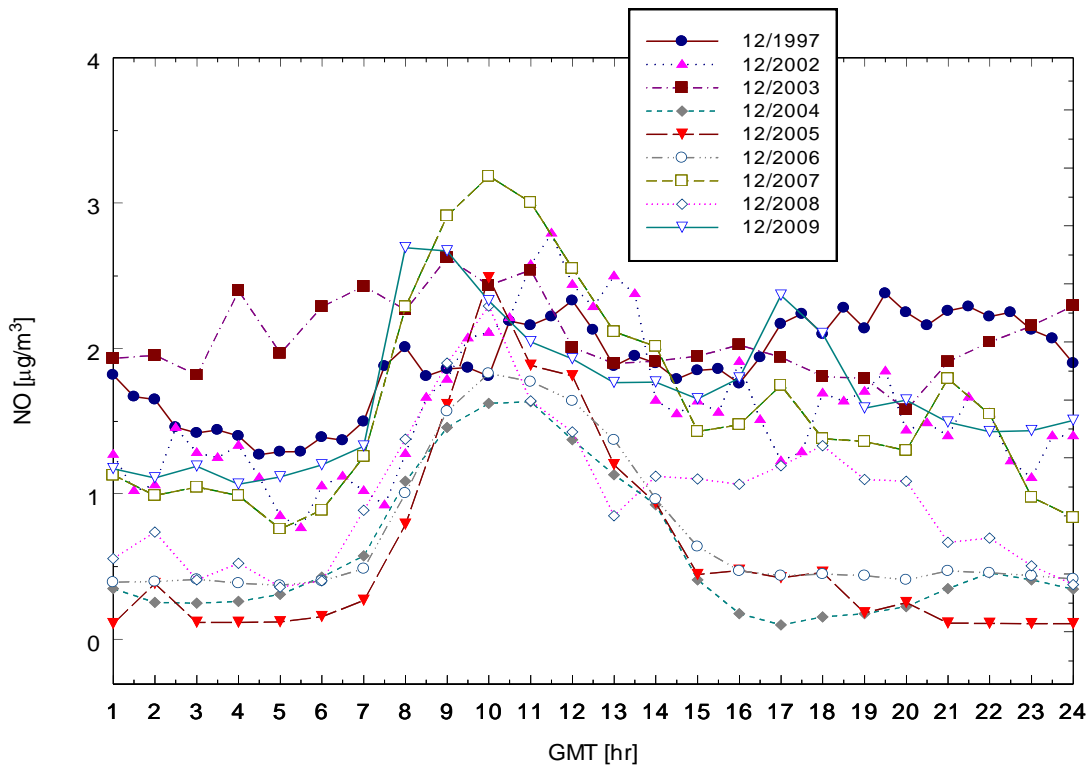
Rys. 2.4.2. f



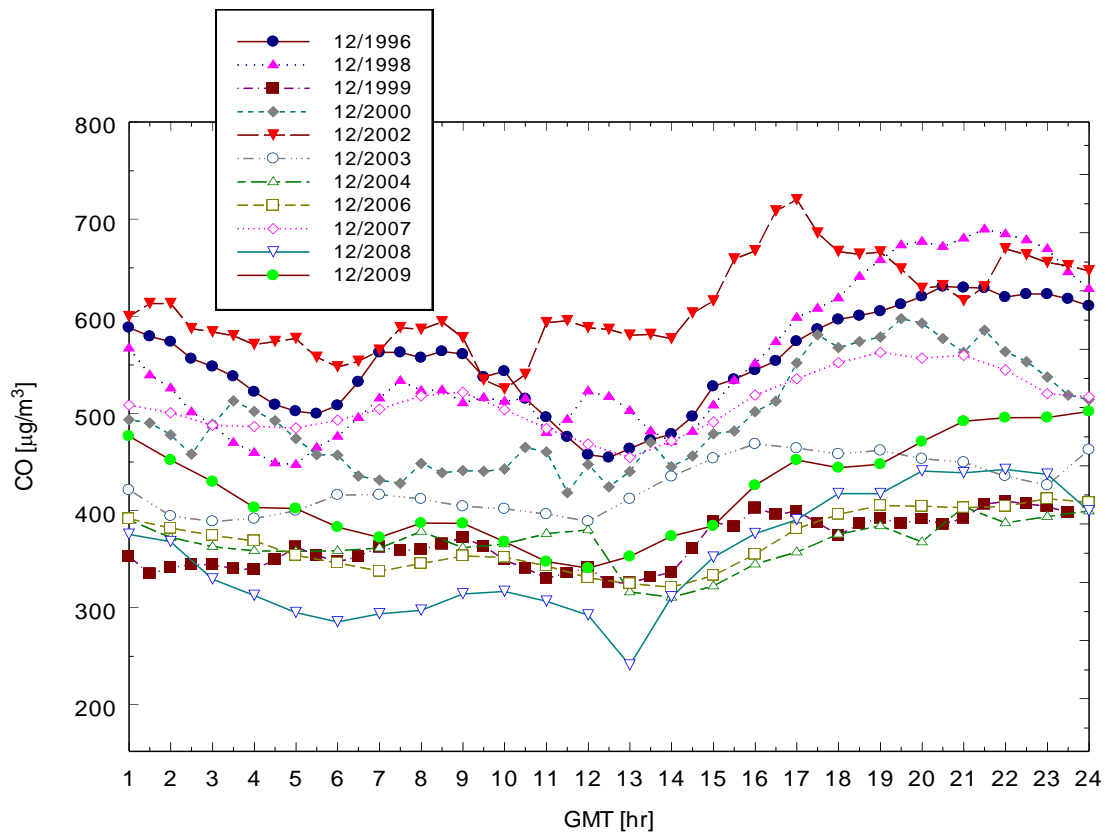
Rys. 2.4.3. a



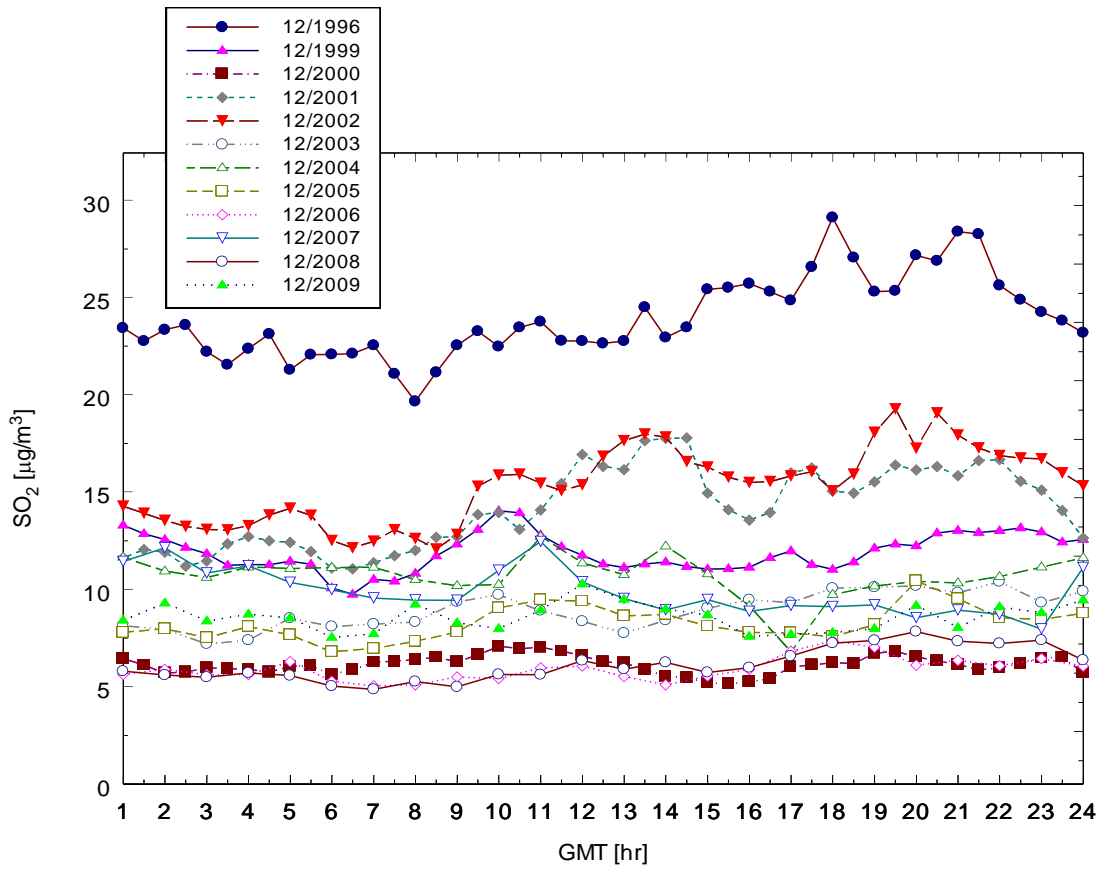
Rys. 2.4.3.b



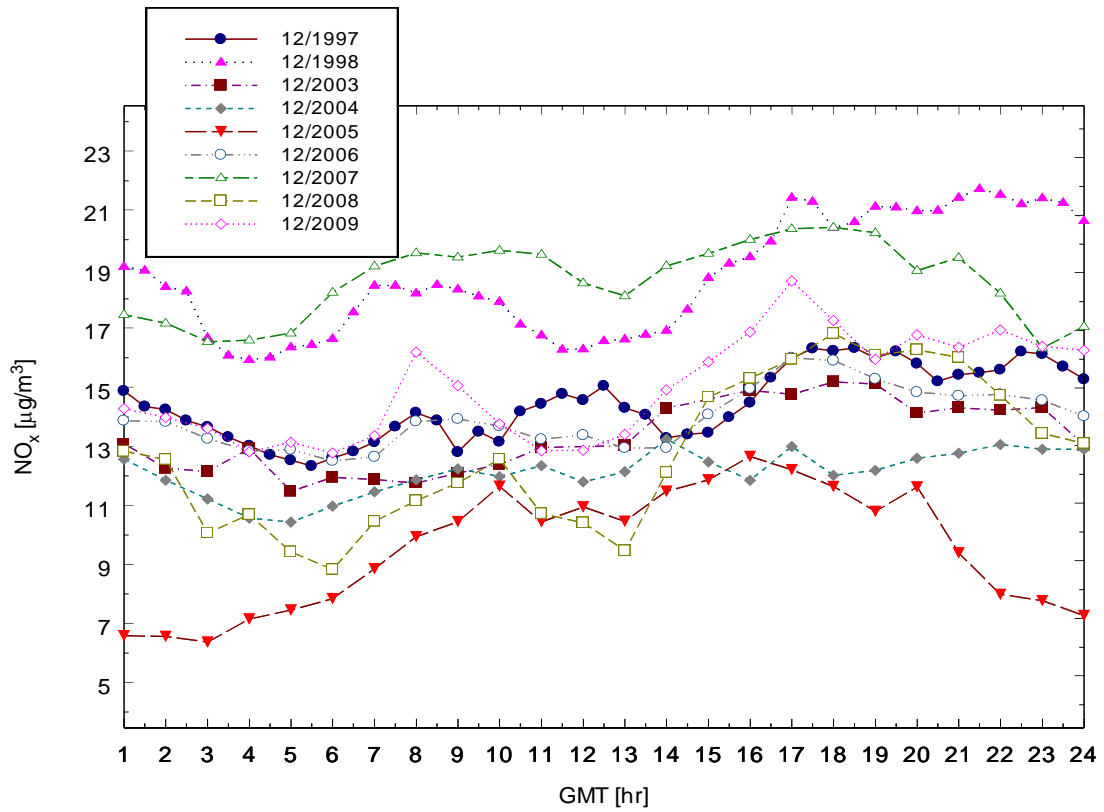
Rys. 2.4.3. c



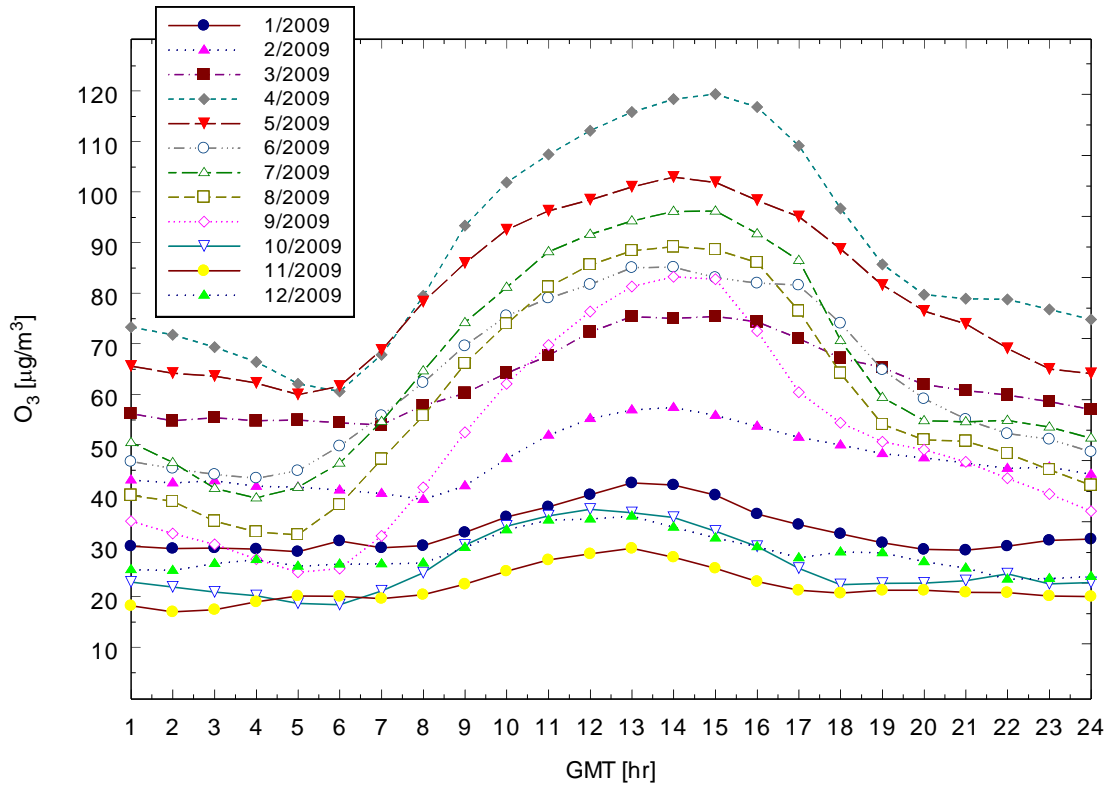
Rys 2.4.3.d



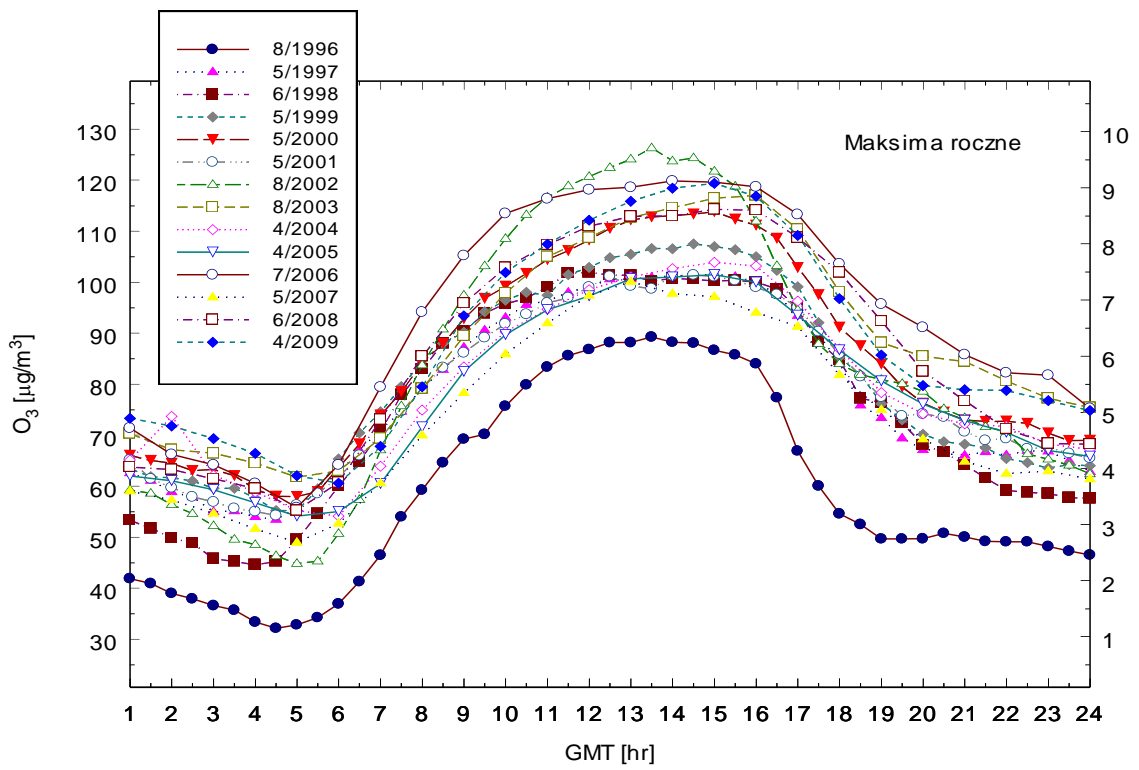
Rys. 2.4.3. e



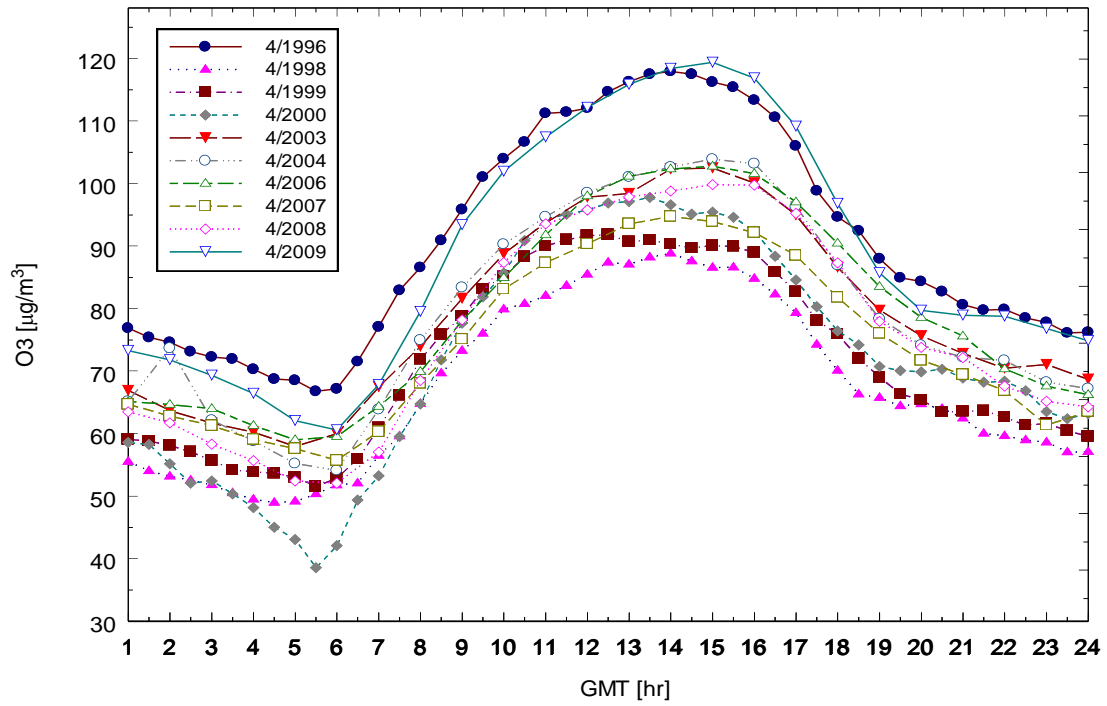
Rys 2.4.3. f



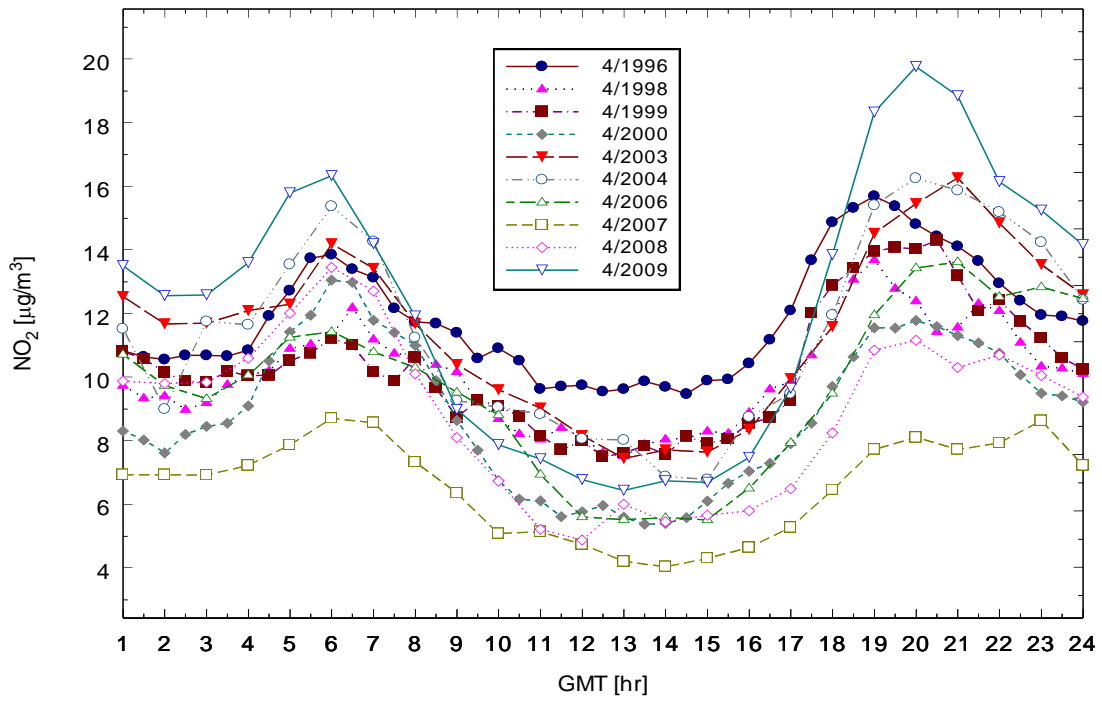
Rys. 2.4.4. a



Rys. 2.4.4. b

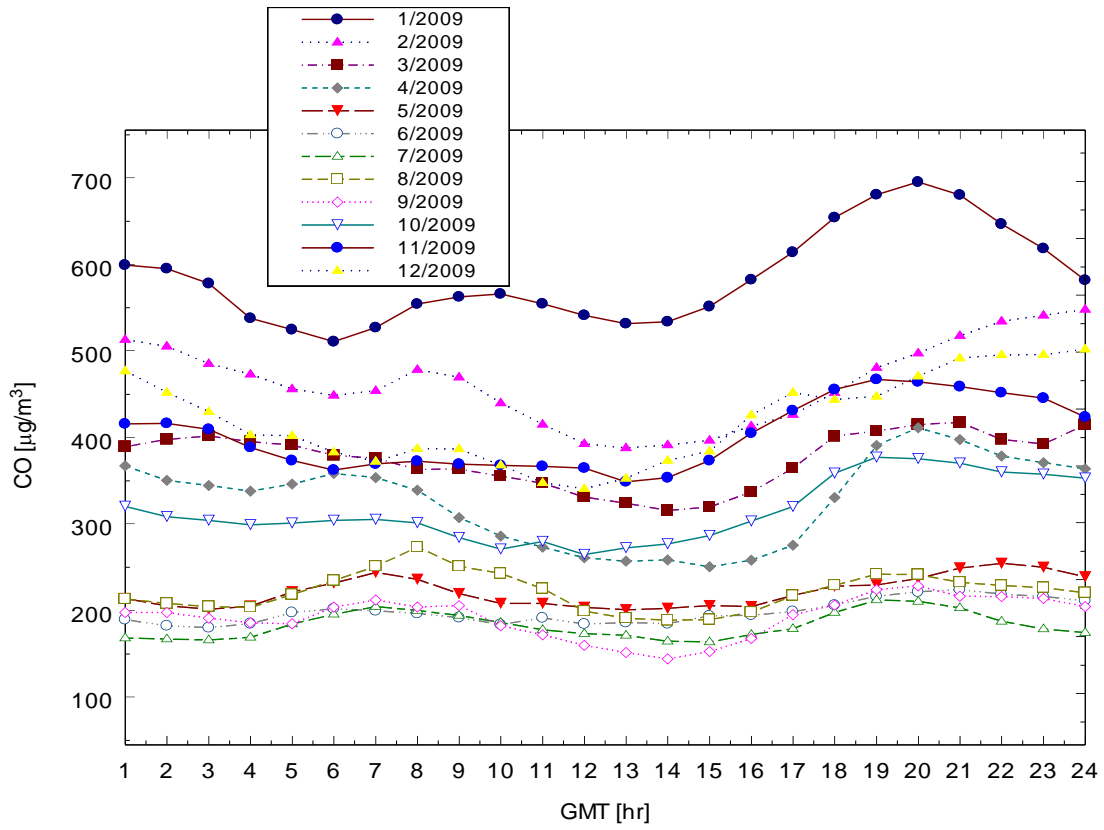


Rys. 2.4.4.c

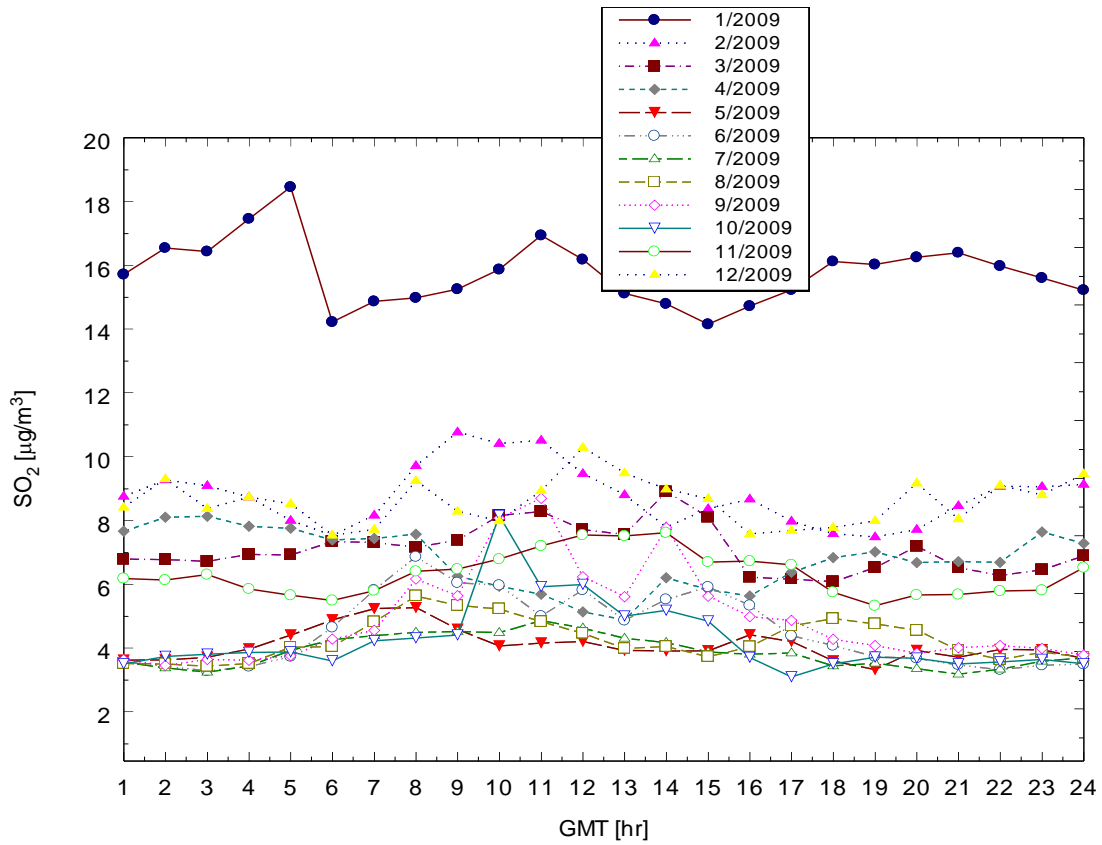


Rys. 2.4.4. d

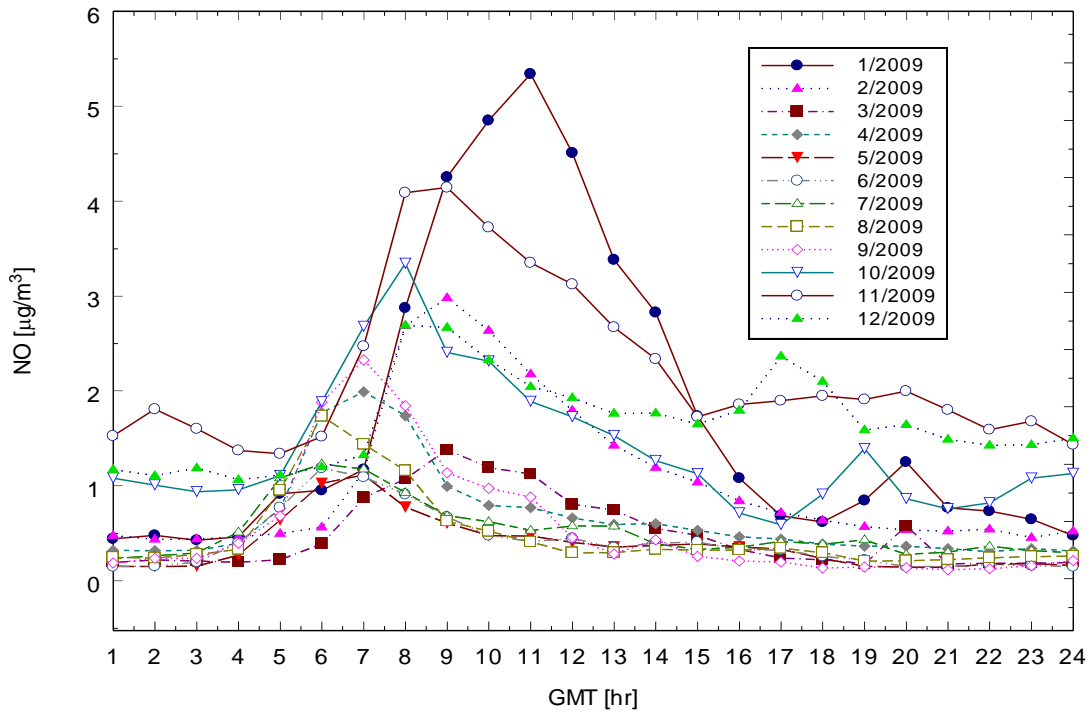




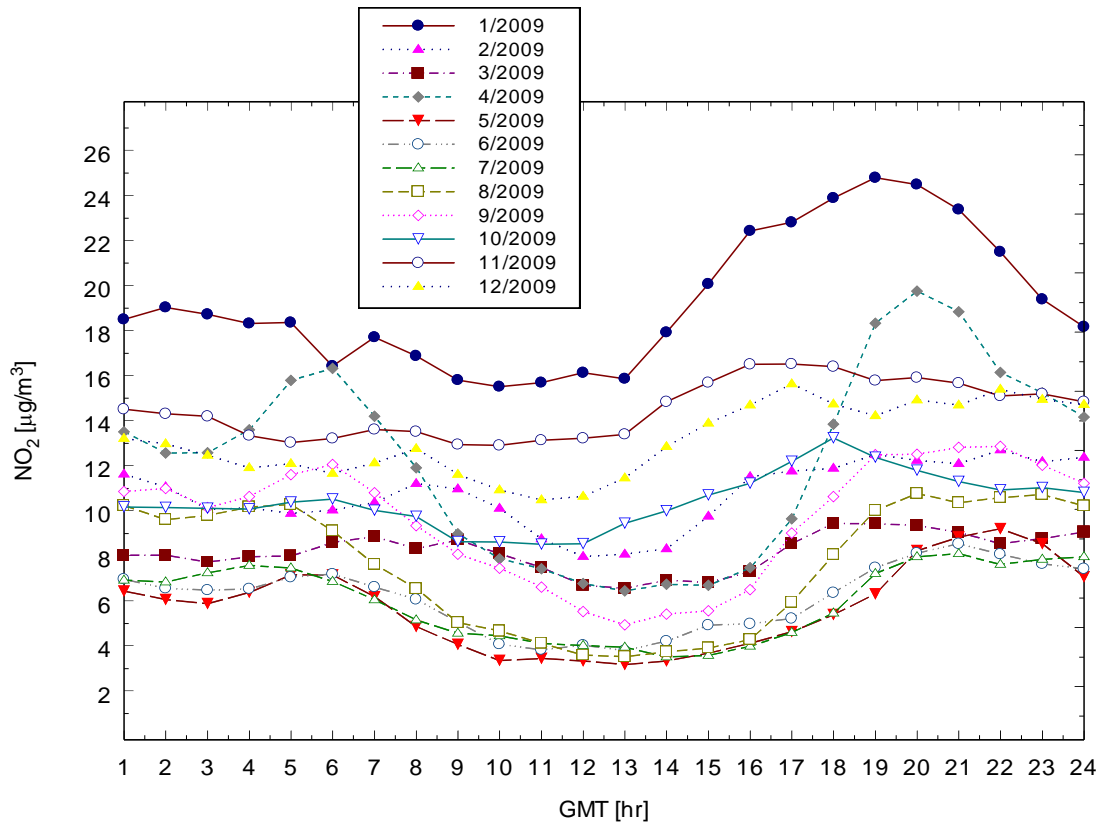
Rys. 2.4.5. a



Rys. 2.4.5 b



Rys. 2.4.5. c



Rys. 2.4.5. d

### **3. Nadfioletowe promieniowanie słoneczne UV-B**

**Aleksander Pietruczuk, Jerzy Podgórski, Piotr Sobolewski**

W roku 2009 w Centralnym Obserwatorium Geofizycznym w Belsku kontynuowano monitoring promieniowania ultrafioletowego Słońca w zakresie erytemalnym (UV-B) oraz usłonecznienia. Wykonane pomiary były podstawą do wyznaczenia dawek dobowych promieniowania z zakresu UV-B oraz indeksu UV, który określa maksymalną moc promieniowania UV zarejestrowaną danego dnia.

Pomiary promieniowania słonecznego w zakresie ultrafioletu prowadzone są w obserwatorium w Belsku od połowy lat siedemdziesiątych. W latach 1976 – 1994 pomiary te wykonywane były przy pomocy miernika Robertsona-Bergera (R-B). Od roku 1993 monitoring promieniowania UV-B prowadzony jest przy pomocy mierników firmy Solar Light Co., Filadelfia, USA. Jeden rok wspólnej pracy miernika R-B i UV-biometru firmy Solar Light (SL) posłużył do zapewnienia ciągłości i homogeniczności serii pomiarowej. Obecnie w Obserwatorium w Belsku najstarszy miernik firmy SL jest zastępowany miernikiem firmy Kipp & Zonnen. Używanie dwóch UV-biometrów pozwala to na zapewnienie ciągłości pomiarów i równoczesnej kalibracji i konserwacji przyrządów.

Wyniki pomiarów dokonanych w roku 2009 dla poszczególnych miesięcy przedstawiono w Tabeli 3.1 w postaci dawek dobowych oraz indeksu UV. Dawki dobowe wyrażone są w jednostkach MED. 1 MED jest minimalną dawką energii promieniowania nadfioletowego Słońca potrzebną do wytworzenia rumienia na skórze ludzkiej. 1 MED jest równy  $209,88 \text{ J/m}^2$  promieniowania efektywnego erytemalnie, tzn. zmierzonego detektorem o charakterystyce spektralnej zbliżonej do charakterystyki czułości skóry ludzkiej. Indeks UV jest iloczynem maksymalnej mocy promieniowania UV [ $\text{W/m}^2$ ] zmierzonej danego dnia i czynnika  $40 \text{ [m}^2/\text{W}]$ . Jest to bezwymiarowy parametr określający maksymalną zarejestrowaną moc promieniowania UV-B a jego wartość zawiera się w przedziale od 0 do 16.

Tabela 3.1. Dawki dzienne promieniowania UV – B i indeks UV, Belsk 2009

Miesiąc	I		II		III	
Dzień	UV - B [ MED ]	Indeks UV	UV - B [ MED ]	Indeks UV	UV - B [ MED ]	Indeks UV
1	0,5	0,3	0,8	0,5	2,8	1,5
2	0,3	0,2	1,1	0,5	3,7	1,7
3	0,6	0,3	0,6	0,3	0,9	0,4
4	0,6	0,4	0,4	0,3	1,8	1,2
5	0,6	0,4	0,3	0,2	2,6	1,7
6	0,6	0,4	0,5	0,3	1,3	0,8
7	0,6	0,3	1,2	0,6	1,0	0,8
8	0,8	0,4	0,6	0,5	0,8	0,4
9	0,5	0,3	1,1	0,6	1,5	1,4
10	0,3	0,1	1,2	0,6	1,4	1,1
11	0,6	0,4	0,5	0,4	2,2	1,7
12	0,9	0,5	0,4	0,2	2,0	1,3
13	0,9	0,5	0,8	0,5	2,4	1,4
14	0,4	0,3	1,0	0,5	3,3	1,9
15	0,6	0,4	1,2	0,8	3,6	1,7
16	0,8	0,5	1,8	1,0	0,6	0,5
17	0,4	0,3	1,4	1,1	1,2	0,8
18	0,4	0,3	1,2	0,5	2,6	1,3
19	0,4	0,3	1,3	0,8	1,9	1,3
20	0,9	0,4	2,0	1,0	1,5	1,0
21	0,6	0,4	2,3	1,1	5,1	2,3
22	0,3	0,2	2,4	1,3	1,4	0,8
23	0,2	0,1	1,4	0,9	3,4	2,4
24	0,3	0,2	1,7	1,0	2,9	2,0
25	0,8	0,4	1,9	1,3	4,0	2,5
26	0,6	0,4	1,2	0,8	5,5	2,6
27	0,2	0,1	0,9	0,5	2,9	1,7
28	1,0	0,5	2,3	1,5	4,4	2,3
29	0,8	0,6	0,0	0,0	2,8	1,8
30	0,4	0,2			3,0	2,3
31	0,6	0,4			5,6	2,6
Średnia	0,56	0,3	1,16	0,7	2,58	1,5
SD	-10%		-16%		-25%	

Miesiąc	IV		V		VI	
Dzień	UV - B [ MED ]	Indeks UV	UV - B [ MED ]	Indeks UV	UV - B [ MED ]	Indeks UV
1	6,7	2,9	13,5	5,0	10,7	5,2
2	8,9	3,7	11,6	4,4	7,9	5,3
3	8,1	3,3	13,6	5,1	9,4	5,5
4	8,0	3,3	11,9	4,7	11,4	5,5
5	7,2	3,2	7,4	4,7	10,4	5,6
6	8,1	3,3	5,4	3,9	14,9	6,1
7	7,1	3,0	14,5	5,5	8,8	5,2
8	6,7	2,9	12,2	5,2	14,9	6,2
9	4,7	2,7	13,6	5,4	14,0	6,0
10	8,4	3,6	11,0	5,0	12,3	6,5
11	3,3	2,7	11,0	5,2	15,2	6,0
12	3,6	2,6	10,1	4,2	12,8	6,2
13	4,8	2,8	10,1	5,1	3,3	1,7
14	8,2	3,4	13,0	5,0	16,5	6,2
15	10,2	4,1	14,6	5,3	15,8	7,0
16	10,7	4,3	2,9	2,0	4,5	2,3
17	5,8	3,6	12,1	6,6	13,1	6,0
18	4,4	2,5	16,0	6,2	14,9	7,0
19	10,7	4,1	6,7	3,2	7,4	5,2
20	11,3	4,4	17,0	6,1	9,5	4,6
21	10,5	4,5	10,2	5,5	10,5	5,8
22	11,7	4,5	8,6	4,4	2,7	1,4
23	9,3	3,9	8,4	5,3	14,9	6,5
24	12,1	4,8	14,3	6,2	6,3	4,0
25	11,9	4,5	15,5	5,9	13,6	6,6
26	12,2	4,6	16,7	5,9	8,3	4,2
27	11,1	4,8	6,5	4,6	5,3	2,4
28	12,7	4,8	9,6	5,7	11,8	5,3
29	11,5	4,4	4,4	3,1	17,1	6,3
30	8,6	3,2	4,4	2,4	16,3	6,2
31			7,9	4,6		
Średnia	8,62	3,7	10,80	4,9	11,15	5,3
SD.	35%		0%		-12%	

Miesiąc	VII		VIII		IX	
Dzień	UV - B [ MED ]	Indeks UV	UV - B [ MED ]	Indeks UV	UV - B [ MED ]	Indeks UV
1	16,7	5,9	15,7	5,8	12,2	4,7
2	14,2	6,1	15,2	5,5	11,2	4,5
3	17,1	6,7	11,3	5,7	7,6	3,8
4	16,1	6,7	5,2	2,8	3,9	2,7
5	11,3	6,2	9,9	5,0	4,0	3,0
6	14,6	6,6	13,1	6,2	6,3	4,1
7	11,4	6,1	14,9	5,9	7,9	4,2
8	8,2	5,4	14,7	6,1	9,4	4,1
9	11,8	6,5	14,5	5,8	9,1	3,8
10	12,1	5,8	14,0	5,4	8,2	3,3
11	11,5	6,7	3,9	2,5	7,5	3,3
12	12,7	5,6	8,6	5,5	4,2	3,0
13	11,5	6,6	9,4	5,2	6,8	3,3
14	17,7	7,1	12,1	5,2	6,6	3,4
15	17,5	6,6	12,9	5,5	6,9	2,9
16	12,7	6,7	13,7	5,2	6,8	2,9
17	15,4	6,2	11,8	4,6	3,8	2,7
18	16,8	6,0	11,5	5,1	8,5	3,9
19	3,7	2,3	13,0	5,4	9,0	3,9
20	15,2	6,2	13,5	5,1	8,8	3,8
21	11,0	5,4	13,1	5,0	7,2	3,2
22	8,8	5,2	7,1	3,9	6,3	2,8
23	15,1	5,8	8,6	4,4	6,9	3,0
24	13,6	6,7	13,6	5,3	5,5	2,9
25	10,2	6,0	12,3	4,8	5,2	2,9
26	10,0	5,9	10,4	4,5	6,2	2,9
27	16,6	6,3	7,1	3,9	6,2	2,8
28	14,3	6,1	12,2	5,2	5,3	2,5
29	11,9	6,2	2,7	2,3	2,9	2,3
30	15,0	5,6	10,7	4,6	4,7	2,6
31	13,3	5,7	10,8	4,3		
Średnia	13,16	6,0	11,21	4,9	6,84	3,3
SD.	6%		14%		19%	

Miesiąc	X		XI		XII	
Dzień	UV - B [ MED ]	Indeks UV	UV - B [ MED ]	Indeks UV	UV - B [ MED ]	Indeks UV
1	2,8	2,2	1,8	1,1	0,5	0,4
2	3,7	2,3	1,9	1,0	0,3	0,3
3	4,7	2,4	1,7	1,0	0,6	0,4
4	3,0	1,7	0,8	0,5	0,4	0,3
5	5,7	2,7	0,8	0,4	0,3	0,2
6	4,0	2,7	1,3	0,8	0,3	0,2
7	3,1	2,5	0,4	0,3	0,1	0,1
8	3,3	2,3	0,6	0,4	0,2	0,2
9	4,4	2,3	0,2	0,2	0,1	0,1
10	3,8	2,0	0,3	0,2	0,3	0,2
11	0,8	0,4	0,2	0,2	0,1	0,1
12	1,7	1,3	0,5	0,3	0,2	0,2
13	1,5	1,1	0,5	0,5	0,2	0,2
14	1,0	0,5	1,0	0,6	0,2	0,2
15	1,2	0,6	0,3	0,2	0,2	0,1
16	1,3	1,1	0,5	0,4	0,3	0,2
17	1,3	1,0	0,4	0,3	0,4	0,2
18	1,5	1,1	0,9	0,6	0,6	0,4
19	2,5	1,5	0,3	0,3	0,5	0,3
20	0,6	0,5	1,2	0,6	0,4	0,2
21	0,9	0,5	0,8	0,5	0,2	0,2
22	1,0	0,5	0,6	0,3	0,5	0,3
23	0,4	0,3	0,6	0,4	0,2	0,1
24	1,3	1,0	0,8	0,5	0,2	0,1
25	1,3	0,8	0,5	0,3	0,2	0,2
26	1,1	0,8	0,8	0,5	0,2	0,1
27	1,2	0,6	0,9	0,5	0,4	0,2
28	2,0	1,3	0,8	0,4	0,2	0,2
29	1,7	1,0	0,6	0,4	0,3	0,2
30	0,6	0,4	0,5	0,3	0,4	0,2
31	2,2	1,1			0,2	0,1
Średnia	2,12	1,3	0,75	0,5	0,30	0,2
SD.	-21%		-12%		-27%	

Tabela 3.2. Średnie miesięczne wartości dziennych

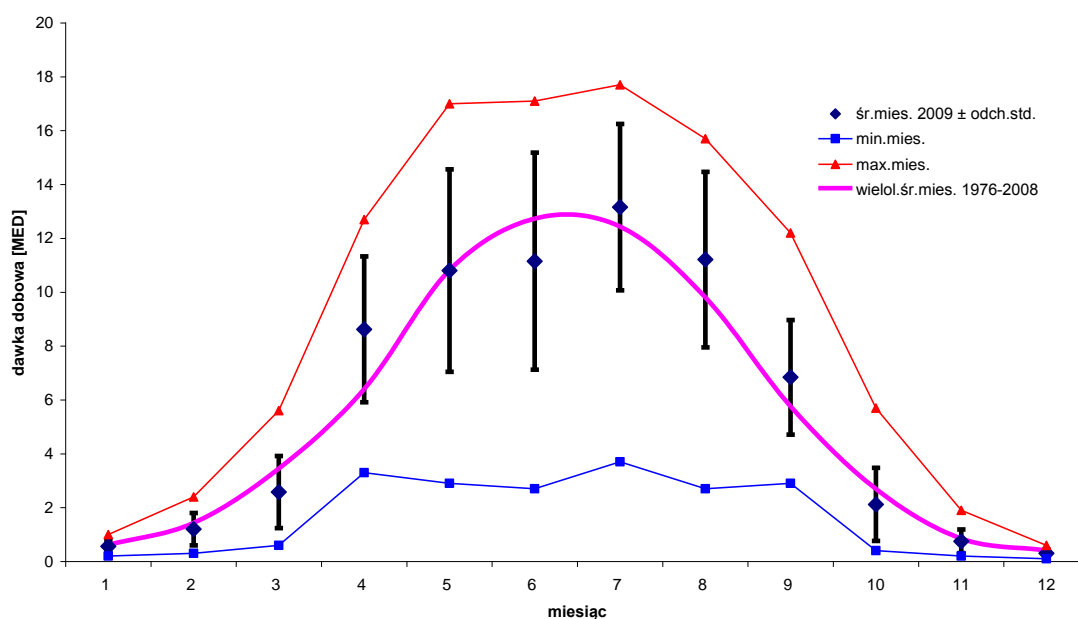
	UV-B	UV-B	UV-B	Indeks	US	OZON	UV-B	d [%]
							1976-08	
2009:	[MED]	[MED]	[MED]	UV	[GODZ.]	[D]	[MED]	
miesiąc	średnia	min.	max.	średnia	średnia	średnia	średnia	
1	0,56	0,2	1,0	0,3	1,5	325	0,62	-10
2	1,20	0,3	2,4	0,7	1,2	408	1,43	-16
3	2,58	0,6	5,6	1,5	2,2	388	3,45	-25
4	8,62	3,3	12,7	3,7	8,6	351	6,40	35
5	10,80	2,9	17,0	4,9	7,4	354	10,82	0
6	11,15	2,7	17,1	5,3	4,6	349	12,73	-12
7	13,16	3,7	17,7	6,0	7,3	325	12,44	6
8	11,21	2,7	15,7	4,9	8,2	308	9,81	14
9	6,84	2,9	12,2	3,3	6,4	294	5,76	19
10	2,12	0,4	5,7	1,3	1,8	298	2,69	-21
11	0,75	0,2	1,9	0,5	1,5	277	0,85	-12
12	0,30	0,1	0,6	0,2		318	0,41	-27

Tabela 3.2 zawiera średnie i ekstremalne wartości UV-B, usłonecznienia i ozonu dla poszczególnych miesięcy. Kolumny 2 do 4 zawierają odpowiednio średnią, maksymalną i minimalną wartość dawek dobowych promieniowania UV, kolumna 5 zawiera średnią wartość indeksu UV, kolumna 6 - usłonecznienia, kolumna 7 - średnie miesięczne całkowitej zawartości ozonu, kolumna 8 - średnie wieloletnie (1976-2008) dawek promieniowania UV-B, kolumna 9 - odstępstwo (w %) dawek promieniowania w bieżącym roku od średniej wieloletniej.

Na Rys.3.1 przedstawiono średnie miesięczne dawek dobowych promieniowania UV-B w 2009 roku wraz z odchyleniami standardowymi w odniesieniu do średnich wieloletnich oraz maksymalne i minimalne wartości dawek dobowych promieniowania UV-B, zarejestrowanych w kolejnych miesiącach roku. Na Rys.3.2 przedstawione zostały odchylenia procentowe zarejestrowanych w 2009 roku średnich w miesiącu dawek dobowych promieniowania UV-B od średniej wieloletniej (1976-2008) dawek dobowych promieniowania UV-B w kolejnych miesiącach roku. Na tym samym rysunku przedstawiono także odchylenia procentowe zarejestrowanych w roku 2009

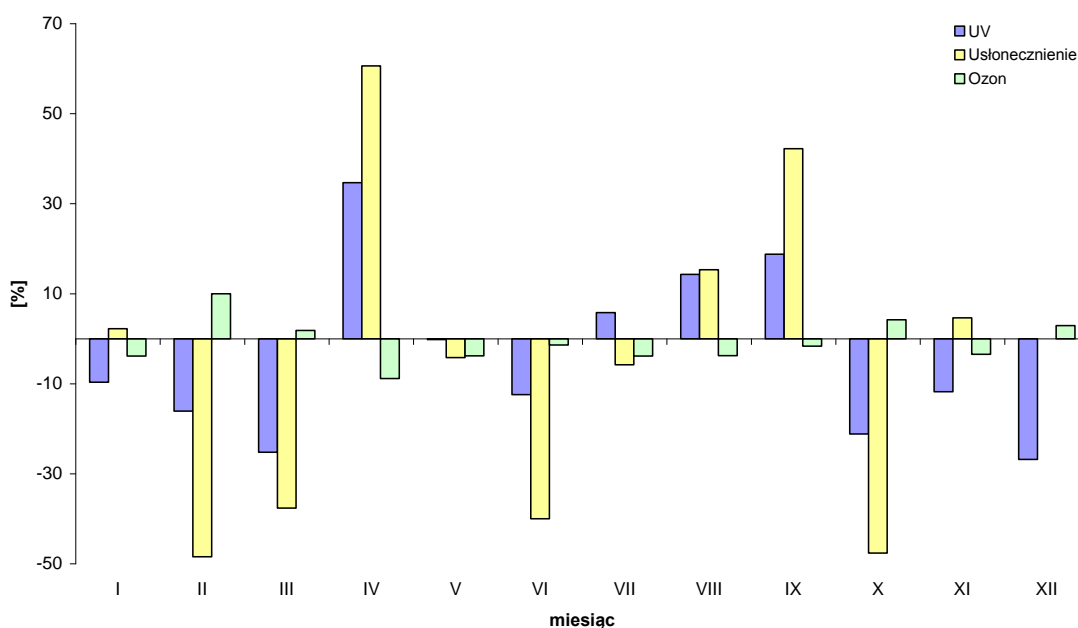


średnich miesięcznych wartości usłonecznienia i koncentracji ozonu od ich średnich wieloletnich.



Rys.3.1. Średnie miesięczne dawek dobowych promieniowania UV oraz największe i najmniejsze wartości zarejestrowane danego miesiąca.

Niedobór promieniowania UV-B wystąpił w miesiącach zimowych (grudzień, styczeń) oraz wiosną i jesienią (marzec, październik i listopad). Maksymalne niedobory, przekraczające -20%, notowano w miesiącach: marzec, październik i grudzień. Nadwyżki promieniowania UV-B wystąpiły w miesiącach letnich (lipiec, sierpień, wrzesień) oraz w kwietniu, kiedy zaobserwowano najwyższą wartość wynoszącą 35 %.

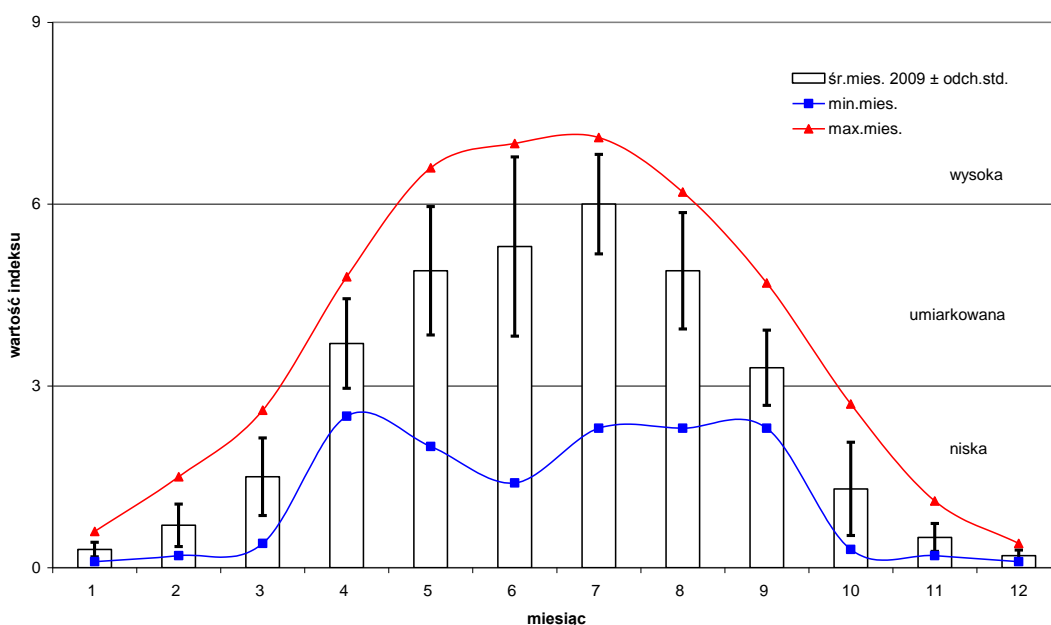


Rys.3.2. Odchylenie od średniej wieloletniej dawek dobowych promieniowania UV-B, usłonecznienia oraz koncentracji ozonu.

Największy wpływ na dopływ promieniowania UV-B do powierzchni Ziemi mają absorpcja promieniowania przez gazowe składniki atmosfery, głównie ozon, i zanieczyszczenia pyłowe oraz zachmurzenie. Można zaobserwować korelację między odchyleniami od średniej dawek promieniowania UV z wartością usłonecznienia przy niewielkich odchyleniach od średniej koncentracji ozonu. Efekt ten występował w miesiącach: marzec, kwiecień, czerwiec oraz od sierpnia do października. Jest to związane z ograniczaniem dopływu promieniowania słonecznego do powierzchni Ziemi, w tym promieniowania UV-B, przez chmury. Duże zachmurzenie znajduje odzwierciedlenie w niskich wartościach usłonecznienia rejestrowanych w Belsku. Antykorelację między odchyleniami od średniej dopływu promieniowania UV a wartością usłonecznienia można zaobserwować w styczniu, lipcu i listopadzie. Jedynie w lipcu zwiększony dopływ promieniowania UV-B do powierzchni Ziemi można tłumaczyć niedoborem w koncentracji ozonu. Natomiast w styczniu i listopadzie mimo niedoborów ozonu i nieco większego od średniej usłonecznienia obserwowano niedobory promieniowania UV. Fakt ten należy tłumaczyć wpływem aerozolu na ograniczanie dopływu promieniowania słonecznego do powierzchni Ziemi. Szczególnie w styczniu jest to związane ze zwiększoną w okresie zimy produkcją absorbującego

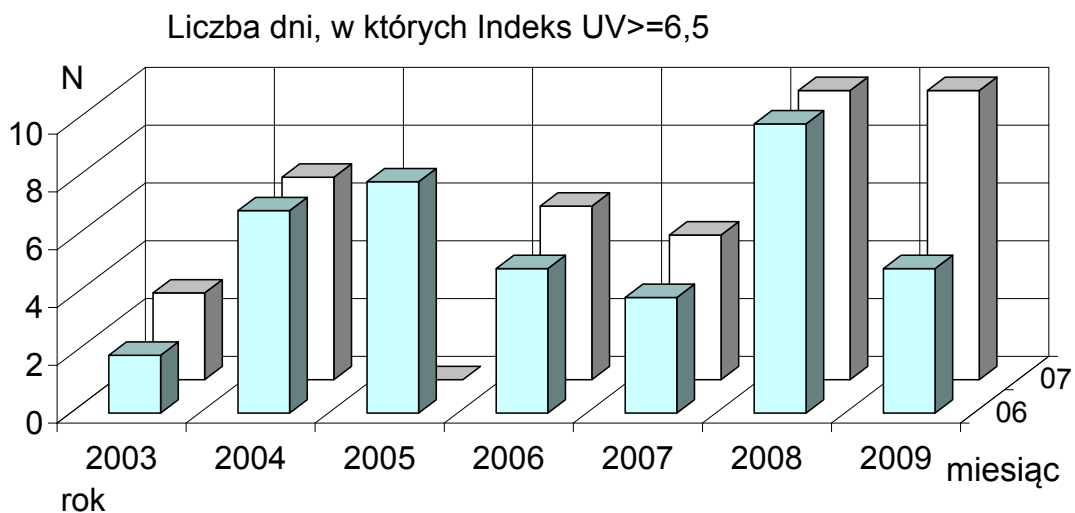
promieniowanie słoneczne aerozolu pochodzenia antropogenicznego, który powstaje podczas spalania węgla (głównego źródła ciepła w Polsce).

Na Rys. 3.3 przedstawiono średnie miesięczne indeksu UV wraz odchyleniami standardowymi oraz wartości ekstremalne zarejestrowane w danym miesiącu. Największe wartości indeksu UV zanotowano w miesiącach letnich co wiąże się oczywiście z małymi kątami zenitalnymi Słońca. Jednak już w maju obserwowano wartości indeksu, które należy uznać za stosunkowo wysokie. Średnie wartości miesięczne dla całego roku 2009 należy uznać za umiarkowane. Największą wartość zanotowano 14 sierpnia i wynosiła ona 7,1. kolejną wysoką wartość 7 zanotowano 15 i 18 lipca.



Rys.3.3. Średnie miesięczne indeksu UV oraz największe i najmniejsze wartości zarejestrowane danego miesiąca.

Na Rys.3.4 przedstawiono liczbę dni w czerwcu i w lipcu, dla których indeks UV przekroczył 6,5, co odpowiada mocy 2,8 MED/godz. Liczba dni z indeksem powyżej 6,5 w czerwcu jest znacznie mniejsza niż w roku 2008 i podobna do liczby dni obserwowanych w latach 2006 – 2007. Natomiast w lipcu 2009 obserwowano taką samą liczbę dni z wysokim indeksem UV jak w lipcu 2008, który był od tym względem rekordowy.



Rys.3.4 Liczba dni danego miesiąca, w których indeks UV przekracza wartość 6,5

Podsumowując, w roku 2009 kontynuowano monitoring promieniowania słonecznego z zakresu UV-B w Centralnym Obserwatorium Geofizycznym w Belsku. W trzech pierwszych i trzech ostatnich miesiącach średnie miesięczne promieniowania UV-B były niższe od średniej wieloletniej. Wiąże się to głównie z ograniczeniem dopływu promieniowania słonecznego przez chmury i wpływem aerozolu. Jedynie w lipcu niewielką nadwyżkę promieniowania UV można tłumaczyć wpływem ozonu. Największą wzrost w dopływie promieniowania UV zanotowano w kwietniu.

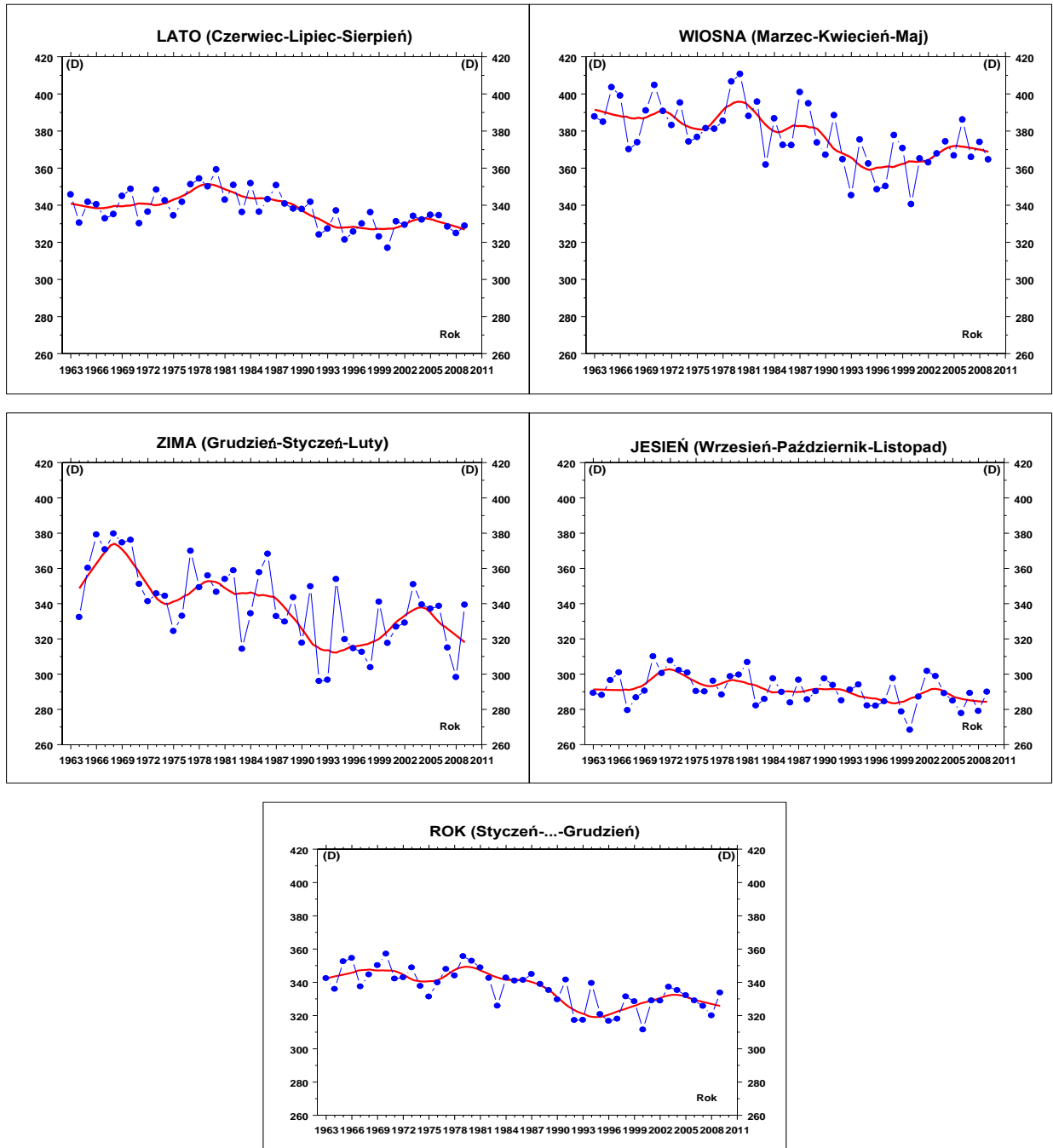
#### **4. Zmiany całkowitej zawartości ozonu atmosferycznego w 2009 roku**

**Janusz Krzyścin, Bonawentura Rajewska-Więch, Małgorzata Degórska**

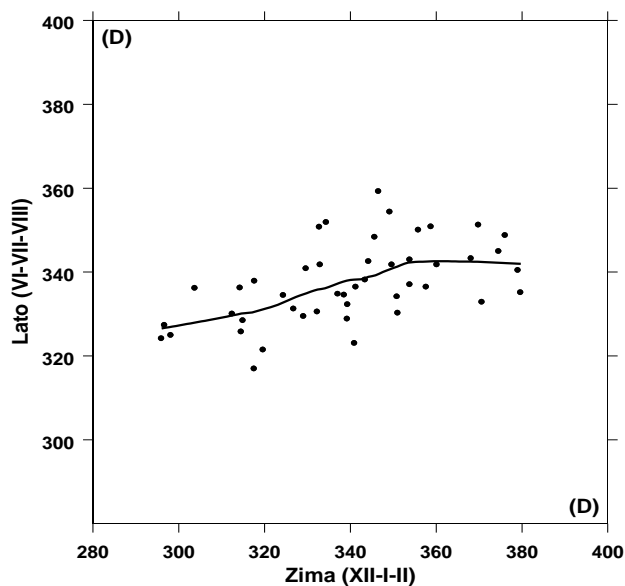
W Centralnym Obserwatorium Geofizycznym w Belsku w 2009 roku za wyjątkiem lutego, marca, października i grudnia obserwowano niskie wartości średnich miesięcznych całkowitej zawartości ozonu. W pozostałych miesiącach 2009 roku, średnie miesięczne wartości całkowitej zawartości ozonu (Rys. 1.1.1a) nie przekroczyły odpowiednich średnich wieloletnich (1963-2008), zaś wartości odchyłek średnich dziennych od średnich wieloletnich często sięgały lub przekraczały -10% (Rys.1.1.1). Szczególnie wyraźnie wystąpiło to w miesiącach letnich. Analizując długookresowe zmiany średnich sezonowych całkowitej zawartości ozonu w Belsku (krzywe o kolorze czerwonym na Rys.4.1 reprezentujące wygładzone metodą lokalnej regresji przebiegi średnich sezonowych) stwierdzamy, że w ostatnich kilku latach (od ~2002 r.) pojawiła się ponownie tendencja zmniejszenia zawartości ozonu w atmosferze nad Belskiem. Jest to szczególnie widoczne w przebiegach całorocznych. Jedynie w sezonie wiosennym nie zaznacza się wyraźny kierunek zmian w warstwie ozonowej.

Niskie wartości całkowitej zawartości ozonu (c.z.o) w sezonie letnim często występują w sytuacji, gdy wcześniej zimą obserwowano też niskie wartości c.z.o. (Rys.4.2). Korelacja między zimowymi i letnimi wartościami c.z.o. nie występuje, gdy zimowa średnia wartość c.z.o. przekracza poziom ~350 D. Wystąpienie niskich wartości c.z.o. zimą jest sygnałem osłabienia wielkoskalowej wymiany południkowej w stratosferze (tzw. cyrkulacji Brewera-Dobsona obejmującej całą półkulę północną), która w zimie prowadzi do akumulacji ozonu w średnich i wysokich szerokościach geograficznych. Niedobory c.z.o., które wystąpiły w okresie zimowym nie zostaną w późniejszych miesiącach odbudowane, gdyż deficyt c.z.o. pojawia się w skali całej półkuli w strefie pozarównikowej. Jeżeli zimą całkowita zawartość ozonu jest większa od 350 D, to latem poziom c.z.o. może być zarówno powyżej jak i poniżej normy. Mieszanie (mniej lub bardziej intensywne) zachodzące między strefą podzwrotnikową (strefa zawsze uboga w ozon, z całkowitą zawartością ozonu poniżej 300 D) i strefą średnich szerokości geograficznych (duże wartości c.z.o. szczególnie po zimie z silną cyrkulacją Brewera-Dobsona) prowadzi do zaniku korelacji między zimowymi i letnimi wartościami c.z.o. W ostatnich kilku latach występowały niskie wartości c.z.o. nad Belskiem w okresie zimowym, co przełożyło się na niskie wartości c.z.o. w lecie. W 2009 średnia sezonowa dla

zimy była nieco powyżej 340 D, a letnia średnia 330D tj. kilka procent poniżej średniej wieloletniej. Mogło to przyczynić się do wzrostu dopływu promieniowania UV do powierzchni Ziemi w sezonie letnim



Rys. 4.1. Średnie sezonowe całkowitej zawartości ozonu uzyskane z pomiarów spektrofotometrem Dobsona w COG IGF PAN, Belsk, w okresie 1963-2009.



Rys.4.2. Średnia całkowitej zawartości ozonu w Belsku w sezonie letnim (czerwiec-lipiec-sierpień) w funkcji średniej w poprzedzającym sezonie zimowym (grudzień-styczeń-luty).

Niedobory c.z.o. obserwowane w ostatnich latach w Belsku mogą stanowić pewne zaskoczenie, gdyż od połowy lat 90-tych XX wieku w średnich i wysokich szerokościach geograficznych półkuli północnej stwierdzono zahamowanie spadku całkowitej zawartości ozonu. Pojawiły się nawet obszary (Arktyka) z dodatnim trendem. Takie zmiany wiążano ze zmniejszającym się zanieczyszczeniem atmosfery substancjami niszczącymi warstwę ozonową. Protokół Montrealski z 1987 (i jego późniejsze poprawki) dotyczące ochrony warstwy ozonowej wprowadziły szereg ograniczeń w produkcji takich substancji. Od połowy lat 90-tych ubiegłego wieku koncentracja w atmosferze substancji niszczących warstwę ozonową zaczyna maleć. W związku z tym oczekiwano zatrzymania, a następnie odwrócenia spadkowej tendencji w zawartości ozonu w atmosferze.

W opublikowanej w 2009 r. pracy (Krzyścin i Rajewska-Więch, 2009a) przeprowadzono analizę zmienności całkowitej zawartości ozonu z pomiarów spektrofotometrem Dobsona w Belsku w okresie 1963-2008 ze szczególnym zbadaniem sytuacji w ostatnich kilkunastu latach. Stwierdzono, że tempo regeneracji warstwy ozonowej nad Belskiem uległo osłabieniu w ostatnich kilku latach (od 2002r.) zwłaszcza w sezonie zimowym, w którym procesy dynamiczne doprowadziły do mechanicznego (dynamicznego) usunięcia ozonu ze stratosfery ponad stacją. Możliwie jest także zwiększenie częstotliwości napływu mas z obszarów ubogich w ozon ze strefy

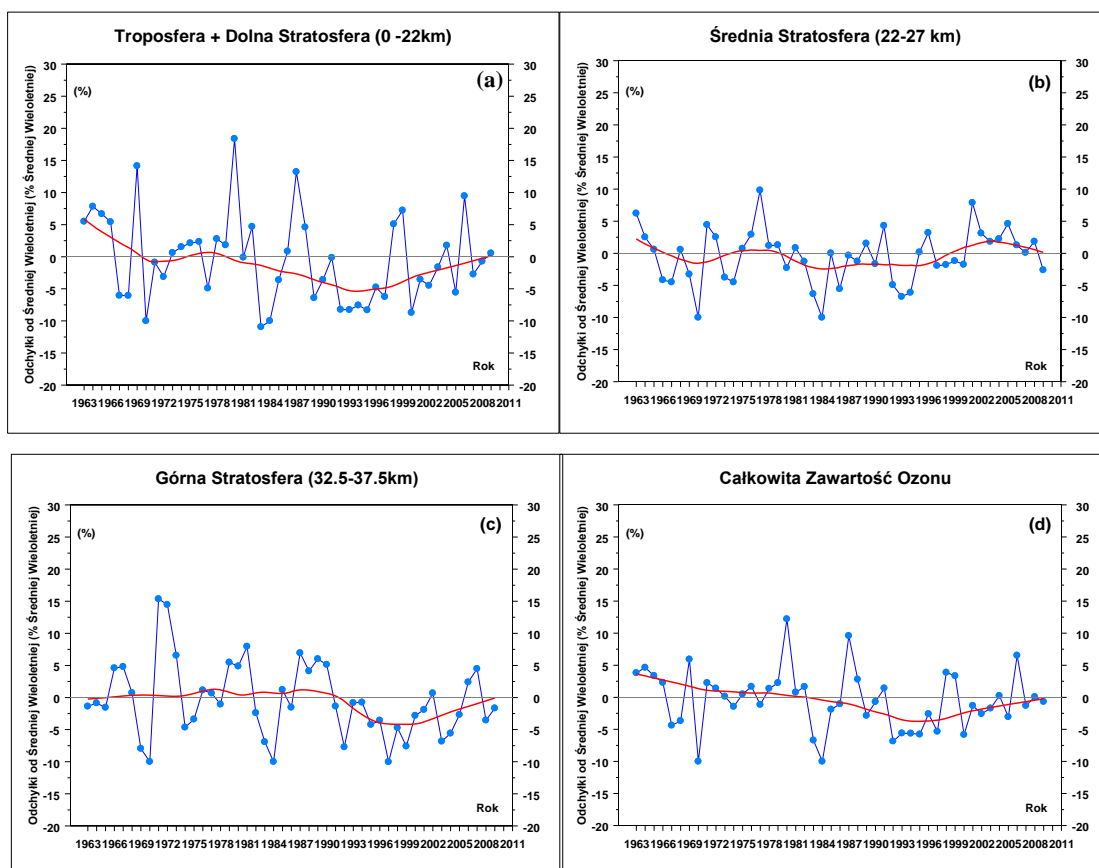
podzwrotnikowej. Długookresowe zmiany w dynamice atmosfery (np. może to być wzrastający transport z rejonów ubogich w ozon i zmniejszona akumulacja ozonu w dolnej stratosferze nad Belskiem) działają obecnie w przeciwnym kierunku niż zmiany indukowane przez procesy chemiczne w sytuacji zmniejszającego się zanieczyszczenia atmosfery substancjami niszczącymi warstwę ozonową. Procesy chemiczne i dynamiczne nadal działają w tym samym kierunku w sezonie wiosennym powodując stopniowy wzrost c.z.o. Wydaje się, że takie zachowanie warstwy ozonowej ma odwracalny charakter i pojawi się przeciwna tendencja sprzyjająca regeneracji, która miała już miejsce w końcu XX wieku. Tak więc, aby z całym przekonaniem stwierdzić postępującą naprawę warstwy ozonowej musimy dysponować znacznie dłuższymi seriami pomiarowymi.

Obecnie w literaturze światowej toczy się dyskusja nad tempem powrotu warstwy ozonowej do stanu nie zaburzonego działalnością człowieka. W seriach czasowych całkowitej zawartości ozonu w atmosferze i na wybranych poziomach w stratosferze poszukiwane są sygnały początku zmiany kierunku trendu z ujemnego na dodatni. Takiej zmiany należałoby oczekiwać wraz z obserwowanym spadkiem zawartości w troposferze i stratosferze substancji niszczących warstwę ozonową. Badanie zmienności trendu w profilu pionowym ozonu jest szczególnie interesujące bowiem uważa się, że naprawa warstwy ozonowej rozpocznie się od obszarów w wysokiej stratosferze, gdzie zmiany w procesach chemicznej destrukcji ozonu są najłatwiejsze do zaobserwowania, wobec ograniczonego wpływu zmian w dynamice atmosfery i jej składzie chemicznym (wzrost CO<sub>2</sub>) na koncentrację ozonu na tych wysokościach (Newchurch i inni, 2003).

Na Rys.4.3 przedstawiono przebiegi średnich sezonowych (marzec-kwiecień-maj) zawartości ozonu w wybranych warstwach atmosfery (troposfera+dolna stratosfera, środkowa stratosfera, górna stratosfera) uzyskane w Belsku z pomiarów spektrofotometrem Dobsona metodą Umkehr. Profile ozonu na Rys.4.3 wyznaczono stosując nową udoskonaloną procedurę liczenia rozkładu pionowego ozonu metodą Umkehr, *UMK04*, która jest zalecana przez Centrum Danych Ozonowych w Toronto (Kanada). Przebiegi wygładzonych zmian otrzymane metodą lokalnej regresji wskazują na brak tendencji spadkowej od połowy lat 90-tych XX w sezonie wiosennym we wszystkich analizowanych warstwach stratosfery tzn. w górnej (32,5-37,5 km), środkowej stratosferze (22-27 km) i dolnych warstwach atmosfery (0-22km). Wydaje się, że w ostatnich kilkunastu latach (od ~1995) pojawia się wzrost zawartości ozonu zwłaszcza w górnej stratosferze i w dolnej warstwie atmosfery (0-22 km). Krzyżcin i Rajewska (2009b) analizowali długookresową zmienność w profilu ozonu nad Belskiem w okresie 1963-



2008. Stwierdzono, że w wysokiej stratosferze wzrasta zawartość ozonu po 1995 r. Dodatkowo trendy są istotne statystycznie i występują we wszystkich sezonach. Ponieważ o zmienności ozonu w

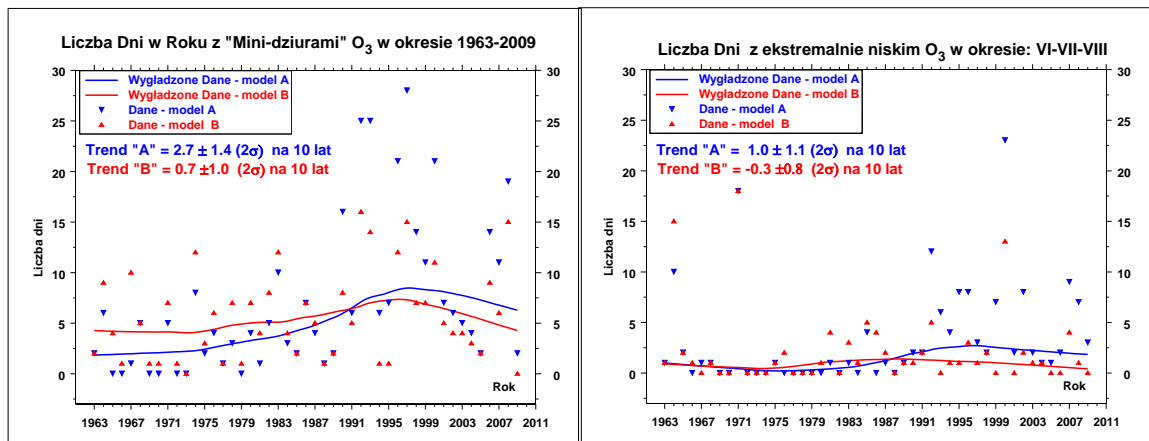


Rys 4.3. Odchyłki średnich wiosennych (marzec-kwiecień-maj) od średniej wieloletniej zawartości ozonu w wybranych warstwach atmosfery z pomiarów Umkehr spektrofotometrem Dobsona w Belsku (1963-2009). Profil ozonu wyznaczono stosując algorytm *UMK04*

wysokich warstwach atmosfery decydują przede wszystkim procesy chemiczne, więc wzrostowy trend w tych warstwach potwierdza skuteczność ograniczeń w produkcji substancji niszczących warstwę ozonową wprowadzonych przez Protokół Montrealski z 1987 r. Duża zmienność zawartości ozonu z roku na rok w niższych warstwach atmosfery indukowana głównie przez procesy dynamiczne nie pozwala jednoznacznie stwierdzić kierunku zmian w zawartości ozonu po 1995. Istotny statystycznie ujemny trend, który istniał w latach 1980-1995, został zatrzymany po 1995 roku.

Głębokie lokalne spadki c.z.o. w średnich szerokościach geograficznych trwające zwykle kilka dni i związane ze zmianami cyrkulacji atmosfery w górnej troposferze i dolnej stratosferze zwane są „mini-dziurami” ozonowymi. Nie należy ich mylić ze rozległą „dziurą ozonową” nad Antarktydą, która od połowy lat 1980-tych pojawia się corocznie wczesną wiosną nad tym kontynentem. W 2002 roku opublikowano w *International Journal of Climatology* artykuł na temat długookresowych zmian częstości występowania

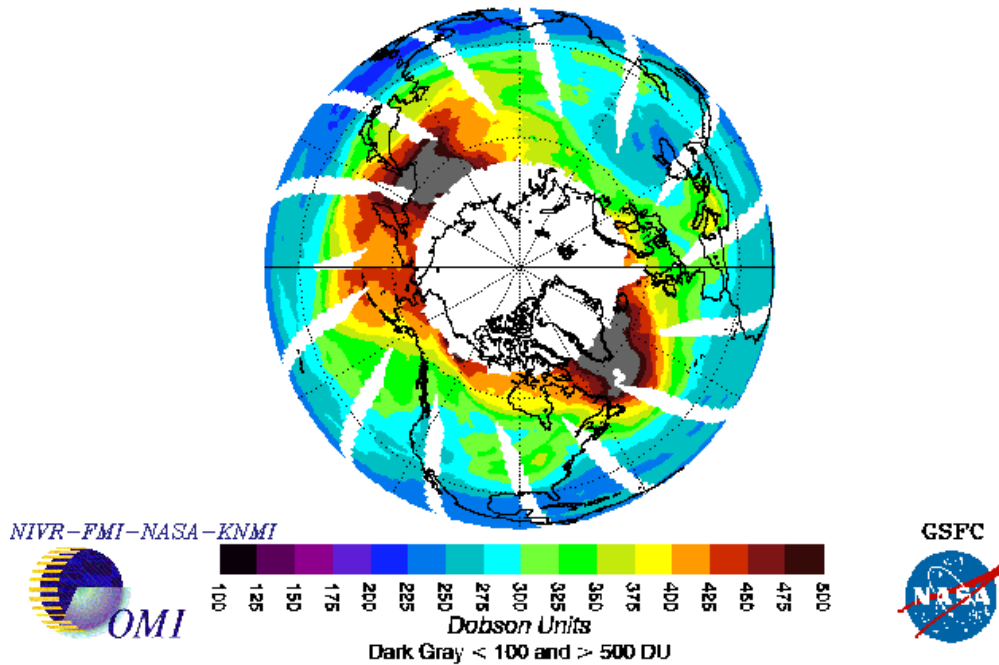
mini-dziur na półkuli północnej (Krzyściń, 2002). W nawiązaniu do tej pracy wykonano analizę przypadków mini-dziur w Belsku w latach 1963-2009, której wyniki przedstawia Rys.4.4 (rysunek po lewej stronie). W 2009 r. znaleziono tylko dwa dni z „mini-dziurami” stosując model **A**. Natomiast nie znaleziono takich dni posługując się modelem **B** wyszukiwania „mini dziur” w serii czasowej całkowitej zawartości ozonu z Belska. Częstotliwość występowania „mini-dziur” w rok 2009 była ekstremalnie niska w porównaniu z częstotliwością w ostatnich kilkunastu latach. Różnica między



Rys.4.4. Liczba dni w roku z „mini-dziurami ozonowymi nad Belskiem w latach 1963-2009 (lewa strona rysunku) i liczba dni w okresie czerwiec-sierpień z deficytem całkowitej zawartości ozonu >10% normy.

modelami **A** i **B** polega na zastosowaniu różnych kryteriów przy określeniu dni w których występują „mini dziury”. Poziom c.z.o. w tych dniach z założenia powinien być co najmniej o 20% poniżej ważonej średniej kroczącej (model **B**) lub wieloletniej 1963-2008 średniej dziennej (model **A**).

### OMI Total Ozone for Jan 28, 2009



Rys.4.5. Rozkład całkowitej zawartości ozonu nad półkulą północną z pomiarów spektrofotometrem OMI na platformie satelitarnej Aura w dniu 28 stycznia 2009.

W dniu 28 i 29 stycznia 2009 obserwowano „mini dziurę” nad Europą z centrum we wschodniej części morza Czarnego. Rys.4.5 przedstawia dane satelitarne ilustrujące rozkład całkowitej zawartości ozonu na półkuli północnej dla 28 stycznia 2009 tj. w dniu maksymalnych niedoborów c.z.o. w Belsku (-21% według modelu **A**, -19% według modelu **B**). Polska w tych dniach znajdowała się na krawędzi „mini-dziury”. W ciągu następnych 2-3 dni „mini-dziura” odsunęła się z terytorium Polski i szybko zanikła.

Wyglądzone przebiegi czasowe (1963-2009) liczby dni z „mini-dziurami” ozonowymi (Rys.4.4 –lewa strona) wskazują, że obecnie znajdujemy się w fazie spadkowej tendencji w częstotliwości mini dziur, który wystąpił po okresie wzrostu trwającym do połowy lat 90-tych. Dla całego okresu pomiarów w Belsku 1963-2009 model **A** przewiduje stopniowy wzrost liczby dni z „mini-dziurami”, tj. wzrost o 3 dni na 10 lat (patrz wartość trendu na Rys.4.4), ale te oszacowanie jest na poziomie istotności  $1\sigma$ . Natomiast model **B** sugeruje, że liczba „mini-dziur” jest na niezmiennym poziomie. Modele **A** i **B** w różny sposób identyfikują „mini-dziury”. Model **B** wyznacza odchylenia od bieżącej normy (niższej w ostatnich latach ze względu na obniżenie ozonu w latach 80 i

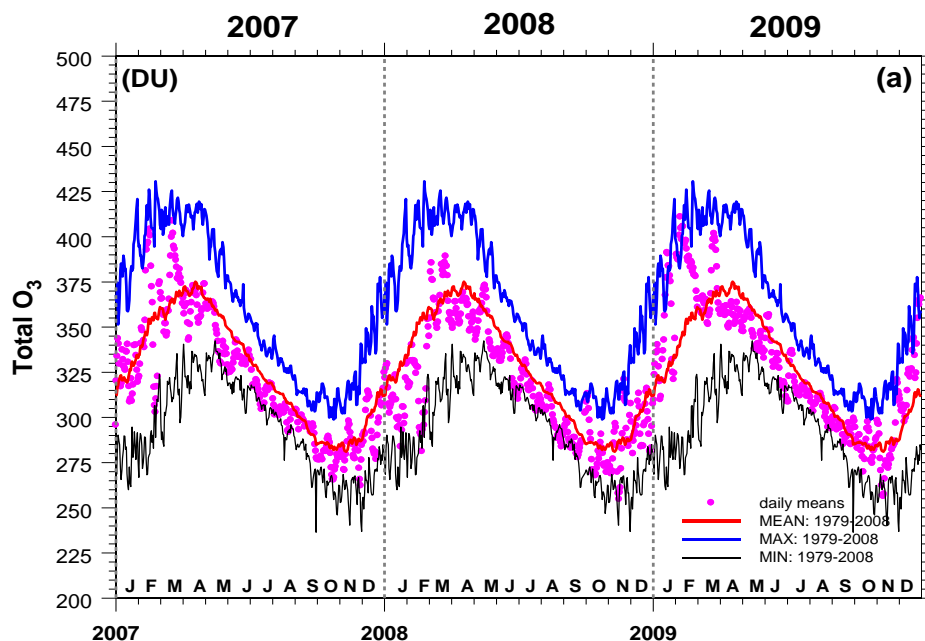
90-tych XX wieku). Norma dla modelu **A** jest wyższa. Wyniki, przy przyjętym modelu **B** sugerują, że procesy dynamiczne prowadzące do pojawiania się dni z ekstremalnie małymi zawartościami ozonu nie uległy zasadniczo zmianie w analizowanym okresie. Przyjęcie modelu **A** sugeruje wzrastającą częstotliwość pojawienia się „mini-dziur” w całym okresie pomiarowym w Belsku, ale może to być efektem nałożenia się chwilowych dynamicznych spadków ozonu na obniżoną już średnią strefową i przekroczenia bariery  $-20\%$  normy, wyznaczonej z całego okresu pomiarowego, są tym samym częstsze. „Mini-dziury” występują nad Belskiem w okresie od początku listopada do końca marca. W tym czasie dzienne dawki promieniowania UV mierzone przy powierzchni Ziemi są niewielkie (niska wysokość Słońca) i spodziewany duży wzrost poziomu UV w czasie przemieszczania się „mini-dziur ozonowych” nad Belskiem nie jest szczególnie niebezpieczny. W tym okresie ludzie na ogół przebywają w pomieszczeniach i rzadko korzystają z kąpeli słonecznych.

Wyznaczenie zmian w częstotliwości pojawienia się ekstremalnie niskich wartości c.z.o. jest szczególnie ważne w sezonie letnim, kiedy wysoki poziom promieniowania UV może stanowić zagrożenie dla zdrowia. W tym czasie dni z  $20\%$  odchyłkami od normy nie występują. Tak więc arbitralnie przyjęto próg  $10\%$  deficytu c.z.o. do wyznaczenia okresów z ekstremalnie niskim poziomem c.z.o. W tej sytuacji erytemalna dawka promieniowanie UV byłaby  $\sim 10\%$  wyższa od normy, gdyby nie występowało zachmurzenie.

Przeprowadzono obliczenia analogicznie do sytuacji dotyczącej „mini-dziur”, ale zastosowano nową wartość progową. Wyniki przedstawiono na Rys.4.4 (prawa strona rysunku). Nie stwierdzono trendów w częstotliwości pojawiania się ekstremalnie niskich zawartości ozonu w okresie czerwiec-sierpień. W ciągu ostatnich lat takich dni było zaledwie kilka w sezonie letnim, wtedy należało bezwzględnie ograniczyć czas przebywania na Słońcu. W 2009 r. znaleziono 3 dni z ekstremalnie niskim ozonem w sezonie letnim według oszacowania z zastosowaniem modelu **A**. Model **B** nie zidentyfikował takich dni.

Zmiany całkowitej zawartości ozonu wyznaczone z pomiarów spektrofotometrem Dobsona w Belsku korespondują z tymi jakie znaleziono w seriach pomiarów satelitarnych całkowitej zawartości ozonu nad Europą. Dienne wartości całkowitej zawartości ozonu w okresie 1.01.2007 - 31.12.2009 uśrednione nad Europą w strefie średnich szerokości:  $35^{\circ}\text{N}$ ,  $10^{\circ}\text{W}$ - $40^{\circ}\text{E}$  przedstawiono na Rys.4.6. Dane pochodzą z globalnej bazy danych zawierającej wyniki satelitarnych pomiarów całkowitej zawartości ozonu w okresie od października 1978 do grudnia 2004 (baza NIWA obejmująca homogenizowane pomiary ozonu z satelity NIMBUS 7, Earth Probe i NOAA-16) i pomiary OMI na satelicie AURA

(styczeń 2005-grudzień 2009). Dodatkowo na Rys.4.6 zaznaczono wieloletnie (1979-2008) średnie dzienne, wartość maksymalną i minimalną dla danego dnia. Skala zmian w średnich szerokościach geograficznych jest znacznie mniejsza niż w obszarach polarnych.

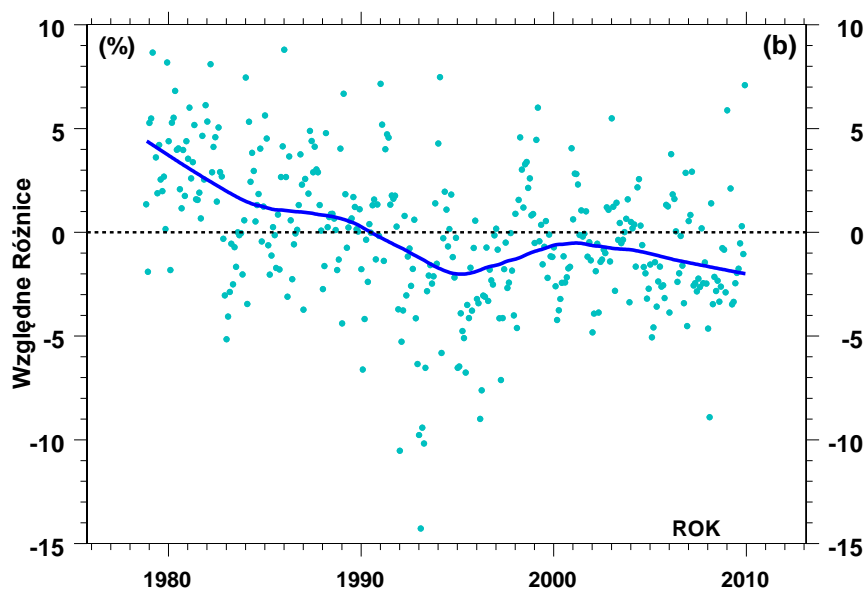


Rys.4.6. Dienne wartości całkowitej zawartości ozonu w okresie 01.01.2007 - 31.12.2009 uśrednione w strefie 35°N-65°N nad Europą - jasno fioletowe punkty. Wieloletnie strefowe średnie dzienne z lat 1979-2008 - krzywa czerwona. Maksymalne wartości strefowych średnich dziennych (1979-2008) krzywa niebieska. Minimalne wartości w tym okresie -krzywa czarna.

Zmiany c.z.o. uśrednione po całym kontynencie europejskim rzadko przekraczają 10% wieloletniej normy. W styczniu i lutym c.z.o. nad Europą była powyżej średniej wieloletniej z lat 1979-2008. W dniach 21 stycznia i 7 lutego zanotowano ekstremalnie wysokie wartości c.z.o w całym okresie pomiarów satelitarnych tj. około 20% powyżej normy. Na początku lata (23.06-04.07) deficyt ozonu osiągnął rekordowe w serii wartości sięgające -7%. Ponownie rekordowe niskie wartości c.z.o. pojawiły się między 7 i 11 listopadem i dochodziły do -10%. Koniec grudnia obfitował w ozon i nadwyżka ponad normę przekraczała 10% od 20 grudnia do końca roku z ekstremalną wartością 31 grudnia 17%.

Długookresowe zmiany całkowitej zawartości ozonu nad Europą przedstawiono na Rys.4.7. Tendencje zmian wyznaczono dopasowując krzywą gładką (metodą lokalnej regresji typu LOWESS) do miesięcznych odchylek całkowitej zawartości

ozonu od wieloletnich (1979 - 2008) średnich miesięcznych. W serii czasowej można wyróżnić następujące stadia: gwałtowny spadek c.z.o. (do 1995), szybki wzrost (1995-2000), stabilizacja (2000-2003), a następnie ponowny spadek (2003-2009). Obecny poziom ozonu jest ~7% niższy niż w końcu lat 70-tych XX wieku i bliski

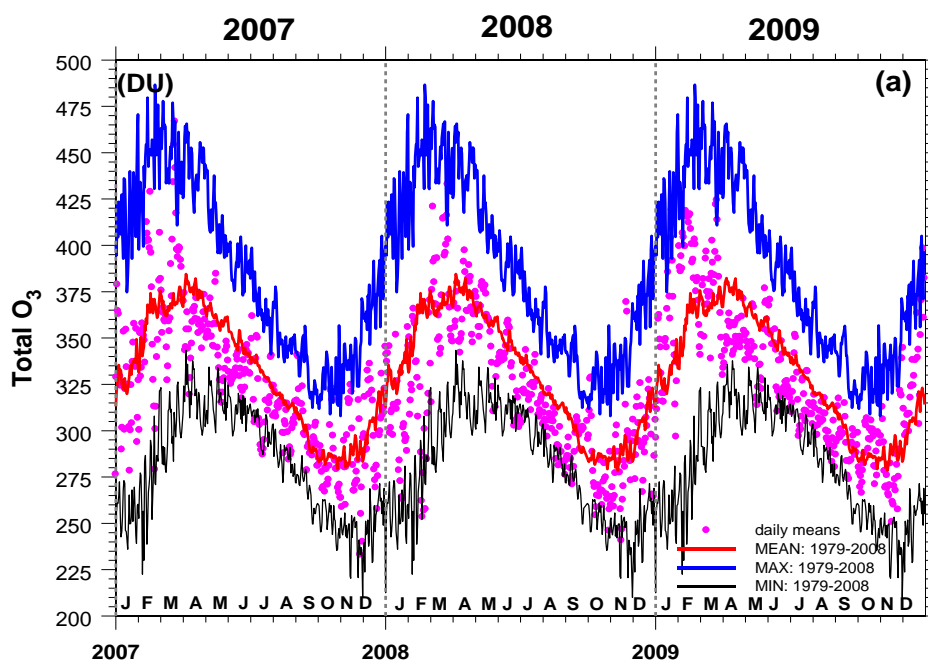


Rys.4.7. Odchyłki średnich miesięcznych całkowitej zawartości ozonu w strefie 35°N-65°N nad Europą od wieloletnich 1979-2008 średnich miesięcznych. Ciągła linia przedstawia wygładzone dane z zastosowaniem lokalnej regresji – LOWESS.

temu jaki zanotowano w momencie odwrócenia się kierunku trendu tj. około 1994 r. Należy dodać, że w 2009r. średni poziom c.z.o. zbliżył się do ekstremalnie niskich wartości w całej serii pomiarowej, które zanotowano na początku lat 90-tych XX wieku. W tym momencie nie można ocenić jak długo tendencja spadkowa będzie się utrzymywać i jak głęboki będzie dalszy spadek c.z.o.

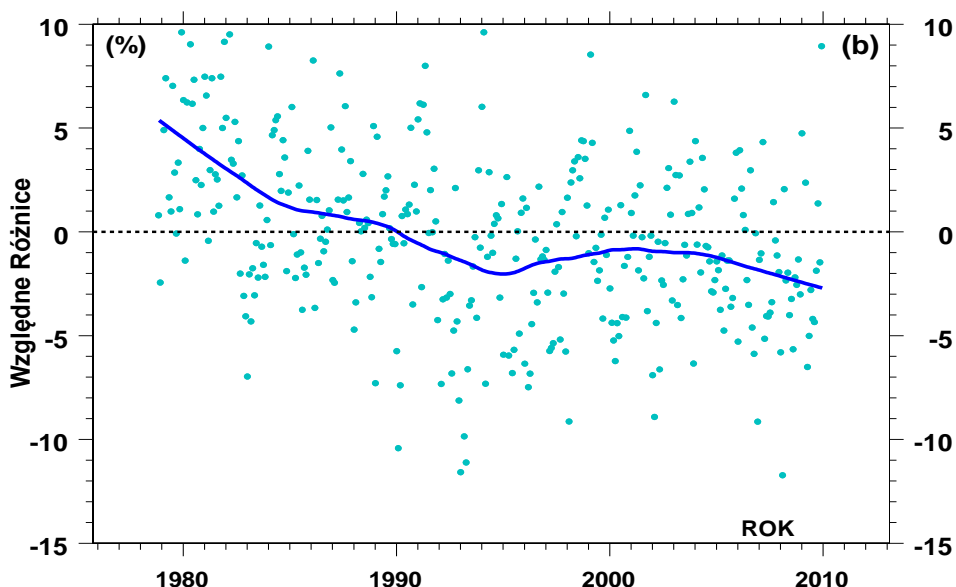
Zmiany w ozonie atmosferycznym nad Europą środkową w obszarze 40°N-55°N i 10°E-25°E obejmującym Polskę, wschodnie Niemcy, Czechy, Słowację, Austrię, Węgry i częściowo Włochy i Rumunię przedstawiono na Rys.4.8. Wykorzystane dane stanowią podzbiór tych które zastosowano wcześniej (Rys.4.6) do wyznaczenia zmienności nad całą Europą w średnich szerokościach geograficznych. Ozon nad Europą Środkową cechował się dużą zmiennością w 2009 r. W styczniu i lutym na ogół zanotowano nadwyżki c.z.o. dochodzące do 20% powyżej normy z ekstremalną wartością zanotowaną 25 stycznia +25%. Natomiast 28 i 29 stycznia obserwowano niedobór ozonu (-15%) związany z mini-dziura ozonową (patrz Rys. 4.5). Ponowne wyraźne spadki dochodzące do -10% pojawiły

się na początku kwietnia i w końcu maja. Zaniepokojenie może budzić pojawienie się znacznych niedoborów ozonu niemal w całym sezonie letnim 2009 z ekstremalnie



Rys.4.8. Tak jak Rys. 4.6 ale dane dla Środkowej Europy (45N°-55°N, 10E°-25°E).

niskimi wartościami c.z.o. poniżej -10% w dniach 14 lipca i 28 sierpnia. Jesień cechowała się dużą zmiennością ozonu ze znacznymi skokami np. 22 listopada zanotowano -11% odchyłkę poniżej normy natomiast 2 grudnia obserwowano 21% nadwyżkę (tj. ekstremalnie wysoką w całej serii pomiarowej). Ponownie wysokie wartości c.z.o. zanotowano w końcu roku z ekstremalną wartością +21% w dniu 31 grudnia.

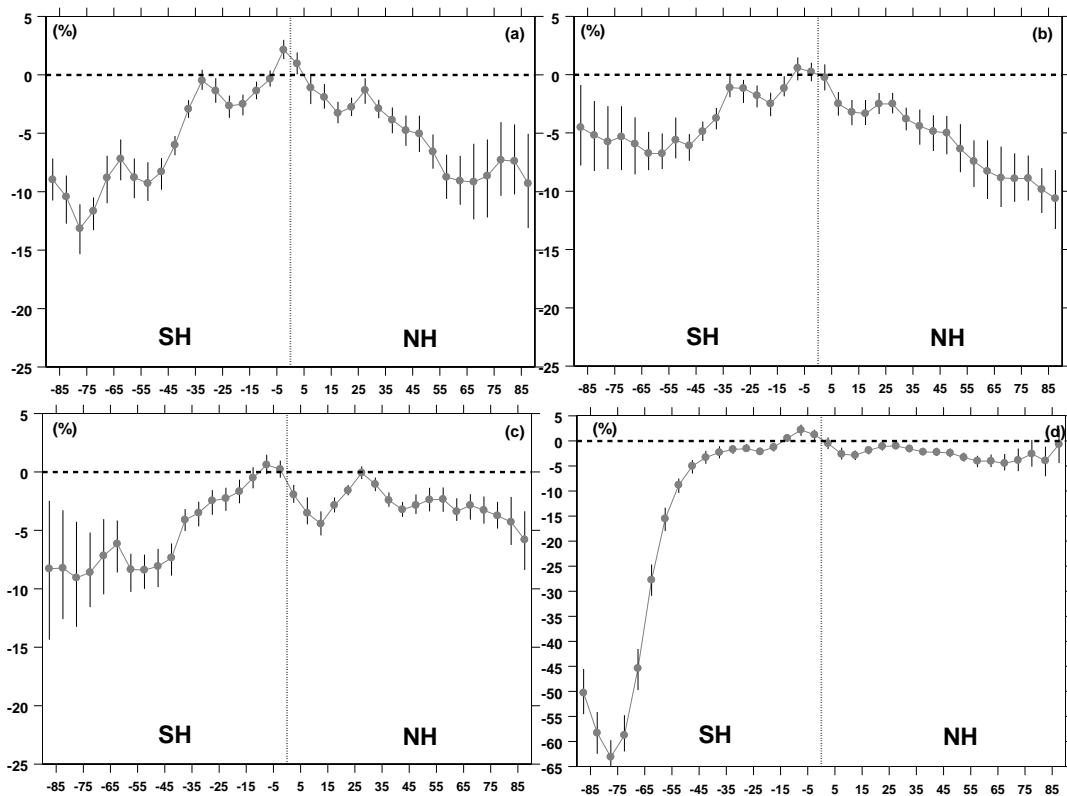


Rys.4.9. Tak jak Rys.4.7, ale dane dla środkowej Europy (45°N-55°N, 10°E-25°E).

Długookresowe zmiany w całkowitej zawartości ozonu nad Europą Środkową przedstawiono na Rys.4.9. Podobnie jak w przypadku zmian c.z.o. w skali całego kontynentu możemy stwierdzić występowanie podobnych etapów: gwałtowny spadek c.z.o. (do 1995), szybki wzrost (1995-2000), stabilizacja (2000-2003), a następnie ponowny spadek (2003-2009). Wydaje się, że w ostatnim etapie zmiany całkowitej zawartości ozonu są bardziej wyraźne nad Europą Środkową niż w skali całego kontynentu. W wygładzonej serii odchyłek ekstremalnie niskie wartości dla całego okresu pomiarowego występują na końcu serii, a nie jak tego oczekiwano w połowie lat 90-tych XX wieku, kiedy koncentracja substancji niszczących warstwę ozonową w stratosferze była największa. W następnych latach koncentracja substancji niszczących warstwę ozonową zaczęła maleć co wiązano z wprowadzeniem w życie ustaleń Protokołu Montrealskiego z 1987 dotyczącego ochrony warstwy ozonowej i zmniejszania produkcji tych substancji. Wydaje się, że spodziewana naprawa warstwy ozonowej w Europie Środkowej nie jest kontynuowana, a w ostatnich latach obserwujemy wyraźny powrót do spadkowej tendencji c.z.o. Taka nieoczekiwana zmiana może być wynikiem specyficznych lokalnych fluktuacji w dynamice atmosfery. Mamy nadzieję, że procesy te nie doprowadzą do znacznej i trwałej obniżki zawartości ozonu, a powrót do trwałych spadków c.z.o. z lat 80-tych i początku lat 90-tych jest mało prawdopodobny.

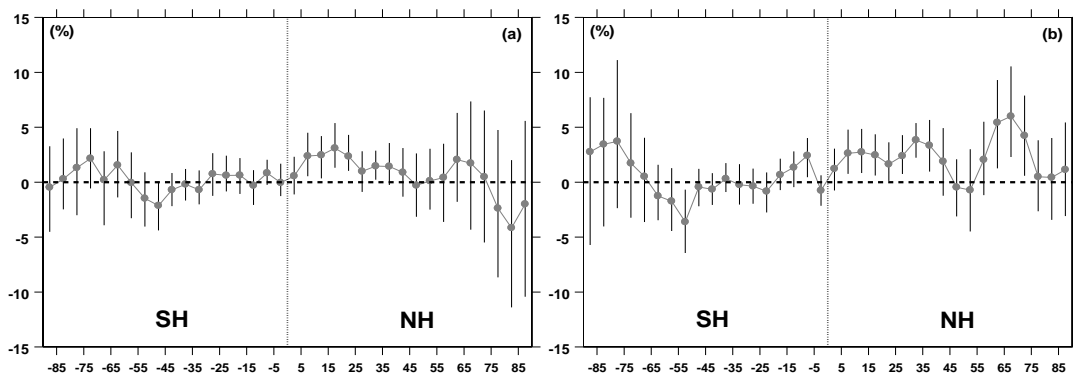
W skali globalnej zmiany warstwy ozonowej możemy ocenić analizując dane o c.z.o. uśrednione po 5<sup>0</sup> pasach szerokościowych od 90<sup>0</sup> szerokości południowej do 90<sup>0</sup> szerokości północnej. Dane z pomiarów naziemnych z lat 1963-2008 pochodzą ze światowej bazy danych ozonowych z Toronto. Trendy osobno w okresie 1979-1995 i 1996-2008 wyznaczono z zastosowaniem modelu długookresowych zmian w ozonie atmosferycznym rozwijanym od lat w IGF PAN w którym składowa trendu jest





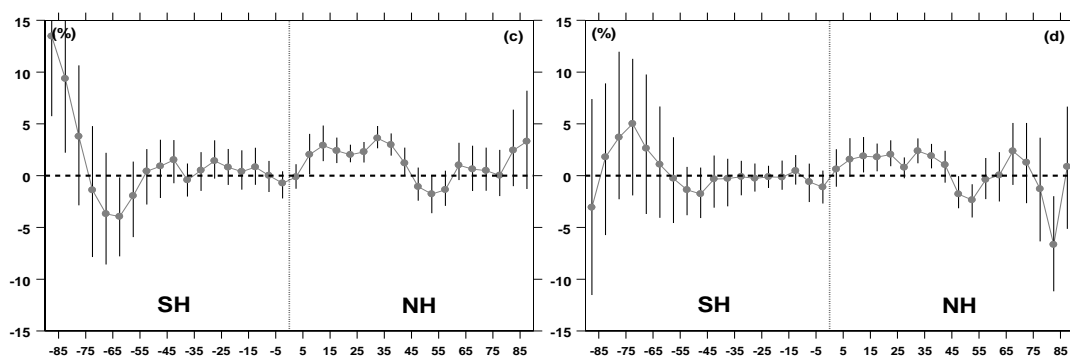
Rys.4.10. Zmiana poziomu całkowitej zawartości ozonu w latach 1980-1995 w wyniku procesów antropogenicznych: a-zima, b-wiosna, c –lato, d- jesień. SH i NH oznaczają odpowiednio sektor danych dla półkuli południowej i północnej. Pionowe kreski przedstawiają 95% przedziały ufności.

opisana przez gładką krzywą dopasowaną do danych, z których usunięto oscylacje związane z „naturalną” zmiennością w warstwie ozonowej indukowaną przez procesy dynamiczne. Rys.4.10 i Rys. 4.11 przedstawiają procentową zmianę w zawartości ozonu atmosferycznego uśrednionej po 5<sup>0</sup> pasach szerokościowych w stosunku do średniego poziomu zawartości ozonu w latach 1963-1978 odpowiednio w okresie 1979-1995 i 1996-2008 dla 4 sezonów: zima (XII-I-II), wiosna (III-IV-V), lato (VI-VII-VIII) i jesień (IX-X-XI).



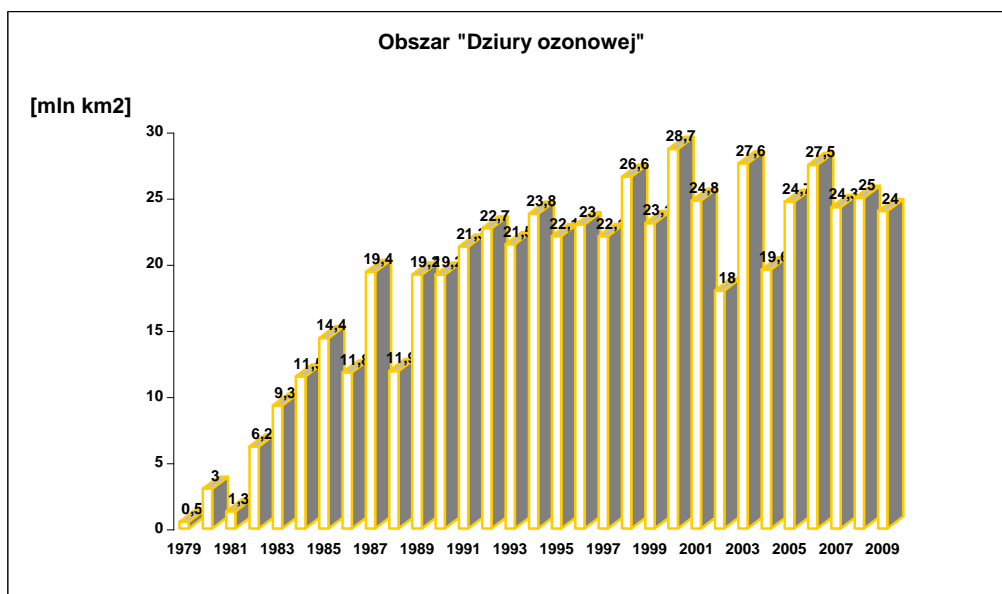
Rys.4.11. Tak jak Rys.4.10, ale zmiana poziomu ozonu jest dla okresu 1996-2008

Spadkową tendencją c.z.o. w okresie 1979-1995 wyznaczono dla wszystkich stref szerokościowych za wyjątkiem obszarów okołorównikowych. Najbardziej spektakularnym jest obniżenie poziomu zawartości ozonu o ~50% w stosunku do poziomu z lat 1963-1978 w obszarach polarnych na półkuli południowej w okresie IX-X-XI. O tej porze roku



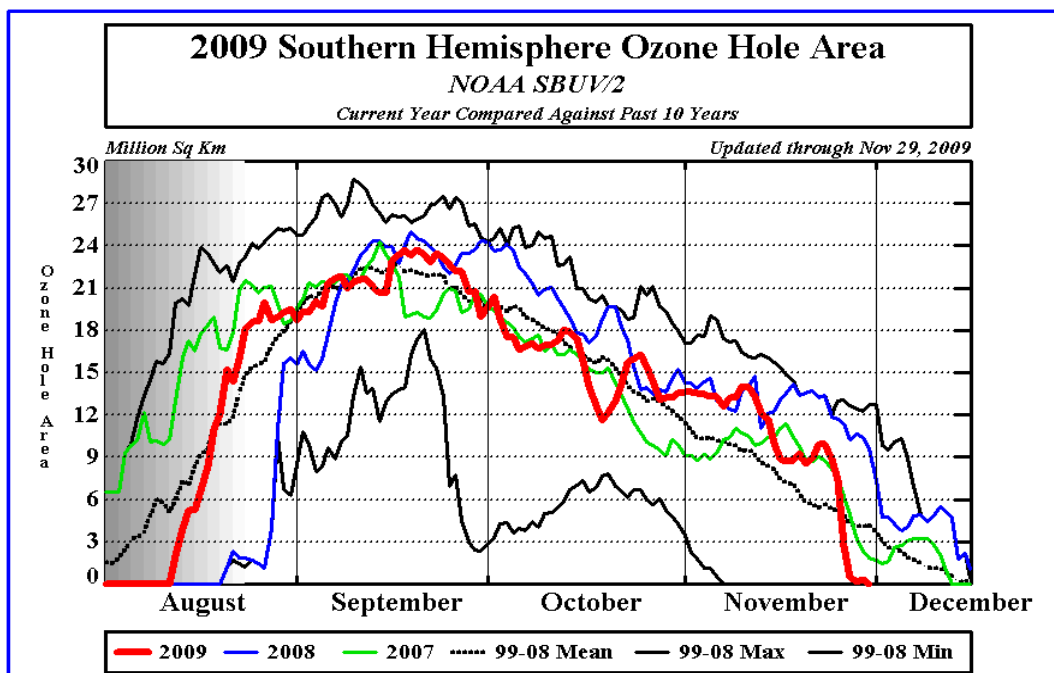
(wiosna na półkuli południowej) corocznie od końca lat 70-tych XX wieku pojawia się nad Antarktydą sławna „dziura ozonowa”, która zanika z końcem jesieni i odbudowuje się na wiosnę przyszłego roku. Dalszy spadek c.z.o. nie jest obserwowany w okresie 1996-2008, a nawet pojawiają się strefy z odwróconym, tj. dodatnim, kierunkiem zmian, np. średnie szerokości geograficzne półkuli północnej w sezonie (III-IV-V), strefa około równikowa na półkuli północnej dla wszystkich sezonów. Pierwszy etap regeneracji warstwy ozonowej, tj. zanik ujemnego trendu, występuje więc na całym globie. Drugi etap, tj. pojawienie się istotnie statystycznie dodatniego trendu w seriach pomiarowych, jest stwierdzony tylko w wybranych strefach i jego identyfikacja na całym globie i na wybranych stacjach jest utrudniona ze względu na dużą naturalną zmienność ozonu maskującą długookresową tendencję wzrostową w ozonie związaną ze zmniejszeniem koncentracji w atmosferze substancji niszczącej warstwę ozonową.

Zwyczajowo mówi się o występowaniu „dziury ozonowej” w sytuacji, gdy c.z.o. spada poniżej 220D. Taka sytuacja zdarza się regularnie w ostatnich 30 latach w okresie sierpień-grudzień nad obszarami polarnymi półkuli południowej. Przed 1979 nie notowano nad Antarktydą sytuacji z c.z.o. mniejszą od 220 D. Maksymalny obszar „dziury ozonowej” w 2001 roku osiągnął -29 mln km<sup>2</sup>. Na Rys.4.11



Rys.4.11. Obszar „dziury ozonowej” na półkuli południowej w milionach km<sup>2</sup> w okresie 1979-2009.

przedstawiono wartości maksymalnego obszaru „dziury ozonowej” w okresie 1979-2009. Od początku lat 90-tych XX wieku maksymalny obszar „dziury ozonowej” (występującej zwykle w połowie września) oscyluje wokół dwudziestu kilku milionów km<sup>2</sup>. Rok 2009 był rokiem typowym w rozwoju „dziury ozonowej” nad Antarktydą. Dziura pojawiła się w połowie sierpnia, osiągnęła maksymalną powierzchnię 24 mln km<sup>2</sup> 17 września, zanikła w końcu listopada nieco wcześniej niż normalnie, co na ogół ma miejsce w grudniu (Rys.4.12). Prowadzona przez NOAA antarktyczna stacja pomiaru ozonu. South Pole zarejestrowała w dniu 26 września 2009 roku najniższą średnią dzienną zawartość ozonu w ciągu roku, wynoszącą 98D.



4.12. Powierzchnia antarktycznej „dziury ozonowej” w mil km w 2009r. w 2008i 2007 r. krzywa, średnia w okresie 1999-2008, oraz maksymalna i minimalna w latach 1999-2008. (źródło: opracowanie NOAA, USA)

Pojawienie się – jak co roku w ostatnich dziesięcioleciach – rozległej i głębokiej dziury ozonowej umożliwiły warunki meteorologiczne panujące w stratosferze antarktycznej w czasie zimy (czerwiec-sierpień). Niska temperatura stratosfery umożliwiła tworzenie się tam chmur zwanych polarnymi chmurami stratosferycznymi (PSCs). Ilość pary wodnej w stratosferze jest bardzo niska – zaledwie 5 cząsteczek pary wodnej na milion cząsteczek powietrza. Toteż w warunkach normalnych w stratosferze chmury się nie pojawiają. Jednakże, kiedy temperatura jest wystarczająco niska zaczynają się tworzyć chmury zawierające mieszaninę wody i kwasu azotowego. Tego rodzaju chmury są nazywane polarnymi chmurami stratosferycznymi (PSCs) typu I. Na powierzchni cząstek tworzących te chmury zachodzą reakcje chemiczne, które zmieniają nieaktywne i nieszkodliwe dla ozonu związki halogenowe (np. HCl i HBr) w aktywne chlorki i bromki (np. ClO i BrO). Te aktywne formy chloru i bromu powodują w warunkach dopływu promieniowania słonecznego szybki rozpad cząsteczek ozonu w cyklu katalitycznym, w którym jedna cząsteczka ClO może rozłożyć tysiące cząsteczek ozonu, zanim ulegnie dezaktywacji spowodowanej reakcją z cząsteczką dwutlenku azotu (NO<sub>2</sub>). Kiedy temperatura spada jeszcze bardziej (rzędu -90°C) mogą tworzyć się chmury zawierające wyłącznie zamrożoną wodę. Te lodowe chmury nazywane są PSCs typu II. Cząstki obu typów chmur mogą rosnąć do takiej wielkości, że nie mogą już unosić się w powietrzu i

wypadają ze stratosfery. Zabierają wówczas ze sobą kwas azotowy. Stanowi on substancję rezerwuarową, która uwalnia dwutlenek azotu ( $\text{NO}_2$ ) w warunkach dopływu promieniowania słonecznego. Jeśli  $\text{NO}_2$  będzie usuwany ze stratosfery (tzw. proces denitryfikacji), aktywne cząsteczki chloru i bromu mogą spowodować rozkład dużo większej liczby cząsteczek ozonu zanim staną się nieaktywne. Tworzenie się chmur lodowych będzie prowadziło do dużo poważniejszych strat ozonu niż gdyby niedobory były spowodowane wyłącznie przez PSCs typu I, gdyż związki halogenowe będą bardziej wydajnie aktywowane na powierzchniach cząstek lodowych. Rozmiar i czas trwania dziury ozonowej zależy od zmienności z roku na rok temperatury i intensywności procesów dynamicznych w atmosferze. Dlatego tak trudno jest stwierdzić pojawienie się sygnałów powrotu warstwy ozonowej do stanu niezaburzonego. Stąd tak ważny jest stały monitoring warstwy ozonowej w skali globalnej.

Obecnie umocnił się pogląd, iż niszczące ozon antropogeniczne substancje są główną przyczyną niedoborów c.z.o. w minionych dziesięcioleciach. W ostatnim czasie przy prawie nie zmieniającej się zawartości tych gazów w atmosferze, głównie zmiany czynników meteorologicznych wpływały na stan warstwy ozonowej w obszarach polarnych i poza nimi ( $60^\circ\text{S}$ - $60^\circ\text{N}$ ). Mechanizmy te prawdopodobnie związane są ze zmianami w dynamice atmosfery w ostatnich kilkunastu latach częściowo związanymi ze wzrostem koncentracji gazów cieplarnianych w troposferze.

Modele klimatyczne długookresowych zmian w warstwie ozonowej uwzględniające współdziałanie procesów dynamicznych i chemicznych w atmosferze w sytuacji wzrostu koncentracji gazów cieplarnianych w atmosferze (w tym  $\text{CO}_2$ ) wskazują, że zmiany ozonu w XX i na początku XXI wieku w średnich szerokościach geograficznych były przede wszystkim związane ze zmianą koncentracji substancji niszczących warstwę ozonową, Waugh i inni (2009). Modele (Li i inni, 2009, Shepherd, 2008) wskazują, że wzrost koncentracji gazów cieplarnianych prowadzi do intensyfikacji cyrkulacji Brewera-Dobsona i spadku całkowitej zawartości ozonu w tropikach i wzrostu w średnich szerokościach geograficznych. Waugh i inni (2009) oceniają, że wzrost najsilniejszy był na półkuli północnej wzmocniając słabą wzrostową tendencję c.z.o. zaznaczającą się od połowy lat 90-tych ubiegłego wieku, która była wynikiem odwrócenia spadkowego trendu w koncentracji substancji niszczących ozon. Ostatnie obserwacje jednak nie potwierdzają znaczących zmian w cyrkulacji Brewera-Dobsona w ostatnich 30 latach, Engel i inni (2009). Wobec dużej niepewności takich obserwacji nie można wykluczyć zmian w globalnej cyrkulacji w dolnej stratosferze, które są sugerowane przez obecne fizyko-

chemiczne modele klimatu w związku ze wzrostem koncentracji gazów cieplarnianych. Wysoko w stratosferze przewiduje się obniżenie temperatury i tym samym osłabienie procesów chemicznej destrukcji ozonu, co prowadzi do znacznego globalnego wzrostu zawartości ozonu w tej warstwie w drugiej połowie XXI wieku (Shepherd and Jonsson, 2008).

Protokół Montrealski spełnia swe zadania: udowodniono spadek zawartości w atmosferze niszczących ozon substancji oraz pojawiły się pierwsze sygnały regeneracji ozonu w stratosferze. Dominującym czynnikiem spodziewanej regeneracji ozonu i powrotu jego zawartości do stanu sprzed lat 1980-tych jest spadek zawartości niszczących ozon substancji. Na to czy, kiedy i w jakim stopniu ten powrót nastąpi w różnych rejonach ziemi będą współdecydować zmiany klimatu. Najczęściej przyjętym oszacowaniem jest takie, że powrót c.z.o. do stanu sprzed lat 1980-tych w obszarze 60°S-60°N nastąpi około połowy XXI wieku. Niewypełnienie zadań wynikających z Protokołu Montrealskiego może opóźnić, a nawet uniemożliwić regenerację warstwy ozonowej. Prognozowanie poziomu zawartości ozonu w przyszłości wymaga wyjaśnienia powiązań między niedoborami ozonu i zmianami klimatu. Zmiany zawartości ozonu oddziałują na klimat, zaś zmiany klimatu powodują zmiany zawartości ozonu atmosferycznego.

#### Bibliografia

1. Borkowski J., Degórska M., Rajewska-Więch B., Jarosławski J., Krzyścin J., Kopcewicz B., Puchalski S., Podgórski J., Sobolewski P. „Monitoring całkowitej zawartości ozonu w atmosferze oraz natężenia promieniowania UV-B na stacji Belsk w latach 2008-2010” Raport o stanie warstwy ozonowej w 2008 roku, 2009, IGF PAN, zlecenie GIOŚ nr 40/2008/F.
2. Engel, A., Mobius, T., Bonisch, H., Schmidt, U., Heinz, R., Levin, I., Atlas, E., Aoki, S., Nakazawa, T., Sugawara, S., Moore, F., Hurst, D., Elkins, J., Schauffler, S., Andrews, A., and Boering, K.: Age of stratospheric air unchanged within uncertainties over the past 30 years, *Nature Geoscience.*, 2, 28–31, 2009.
3. Li, F., R.S. Stolarski, and P.A. Newman, Stratospheric ozone in the post\_CFC era, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9, 2207-2213, 2009.
4. Krzyścin, J.W., Long-term changes in ozone mini-hole event frequency over the northern hemisphere derived from ground-bases measurements, *Int. J. Climatol.* 22; 1425-1439, 2002.

5. Krzyścin, J.W., B. Rajewska-Więch, Ozone recovery as seen in perspective of the Dobson spectrophotometer measurements at Belsk (52°N, 21°E) in the period 1963-2008, *Atmospheric Environment* 43, 6369-6375, 2009a.
6. Krzyścin, J.W., B. Rajewska-Więch, Trends in the ozone vertical distribution from the Umkehr observations at Belsk, 1963-2007, *International Journal of Remote Sensing*, vol.30, 3917-3926, 2009b
7. Newchurch, M.J., Yang E.S., Cunnold D.M., Reinsel G.C., Zawodny J.C., Russel III J.M., Evidence for slowdown in stratospheric ozone loss: First stage of ozone recovery, *Journal of Geophysical Research*, vol.108, 4507, 2003.
8. Shepherd, T.G. and A.I. Jonsson. On the attribution of stratospheric ozone and temperature changes to changes in ozone-depleting substances and well-mixed greenhouse gases, *Atmos. Chem. Phys.* , 8, 1435-1444, 2008
9. Shepherd, T.G., Dynamics, stratospheric ozone, and climate change, *Atmosphere-Ocean*, 46(1) ,117-138, doi:10.3137/ao.460106, 2009
10. Waugh, D. W., L. Oman, S. R. Kawa, R. S. Stolarski, S. Pawson, A. R. Douglass, P. A. Newman, and J. E. Nielsen (2009), Impacts of climate change on stratospheric ozone recovery, *Geophysical Research Letter*, 36, L03805, doi:10.1029/2008GL036223, 2009.