



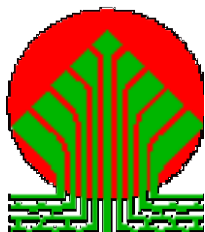
**Instytut Geofizyki
Polskiej Akademii Nauk**

ZAKŁAD FIZYKI ATMOSFERY

**MONITORING CAŁKOWITEJ ZAWARTOŚCI OZONU W
ATMOSFERZE ORAZ NATEŻENIA PROMIENIOWANIA UV-B
NA STACJI BELSK
W LATACH 2010 – 2013
RAPORT O STANIE WARSTWY OZONOWEJ W 2011 ROKU**



Praca wykonana na zamówienie nr 48/2010/F
Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska.



Praca finansowana wyłącznie ze środków **Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej** na podstawie umowy nr 590/2010/WN-7/MN-BD/D z 29.10.2010r. wraz z aneksem do niej nr 1/92 z dnia 29.03.2011r. o dofinansowanie w formie przekazania środków na cele nieinwestycyjne, realizowanej jako zadanie 1.

Kierownik pracy
prof. dr hab. Janusz Borkowski

Dyrektor IGF PAN
prof. dr hab. Paweł Rowiński

Warszawa, maj 2012

SPIS TREŚCI

	str.
Wstęp	1
1. Całkowita zawartość ozonu i jego rozkład pionowy	
1.1 Całkowita zawartość ozonu uzyskana przy pomocy spektrofotometru Dobsona, B. Rajewska-Więch, J.W. Krzyścin	3
1.2 Całkowita zawartość ozonu uzyskana przy pomocy spektrofotometru Brewera, J. Jarosławski, B. Rajewska-Więch	13
1.3 Rozkład pionowy ozonu mierzony metodą Umkehr, B. Rajewska-Więch, J.W. Krzyścin	16
2. Zawartość dwutlenku siarki, ozonu i dwutlenku azotu oraz tlenu węgla przy powierzchni Ziemi	
2.1 Dwutlenek siarki, J. Jarosławski	23
2.2 Ozon przyziemny i dwutlenek azotu, J. Jarosławski	26
2.3 Tlenek węgla, J. Jarosławski	31
2.4 Omówienie wybranych aspektów dotyczących zmienności zanieczyszczeń gazowych zmierzonych na stacji COG PAN w Belsku w 2011 roku i w latach poprzednich, B. Kopcewicz	34
3. Nadfioletowe promieniowanie słoneczne UV-B, A. Pietruczuk, J. Podgórski, P. Sobolewski	49
4. Zmiany całkowitej zawartości ozonu atmosferycznego w 2011 roku, J.W. Krzyścin, B. Rajewska-Więch, M. Degórska	59
A mathematical model for seasonal variability of vitamin D due to solar radiation, J.W. Krzyścin, J. Jarosławski, P.S. Sobolewski	

Załącznik 1. Wyniki pomiarów całkowitej zawartości ozonu zmierzonej spektrofotometrem Dobsona na stacji IGF PAN w Belsku 01.01.2011 - 31.12.2011

Załącznik 2. Wyniki pomiarów stężeń gazowych zanieczyszczeń powietrza na stacji IGF PAN w Belsku 01.01.2011 - 31.12.2011

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 2011r. do 31 grudnia 2011r. zrealizowano wszystkie zadania zgodnie ze szczegółowym zakresem prac stanowiącym załącznik nr 1 do umowy nr 48/2010/F.

W ramach poszczególnych zadań w 2011 roku w Centralnym Obserwatorium Geofizycznym Polskiej Akademii Nauk w Belsku wykonano:

1. Całkowita zawartość ozonu i jego rozkład pionowy.
 - 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.

- 1.3 Wykonano 131 serii pomiarowych przy pomocy spektrofotometru Dobsona pozwalających wyznaczyć pionowy rozkład ozonu metodą Umkehr (w tym 32 pomiarów zwanych „krótki Umkehr”). 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.
2. W Centralnym Obserwatorium Geofizycznym PAN w Belsku w 2011 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.
3. W 2011 roku wykonywano w Belsku pomiary zawartości ozonu, SO₂, CO i NO₂ 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)
4. Wyniki pomiarów całkowitej zawartości ozonu w atmosferze oraz natężenia promieniowania UV-B przekazywano do GIOŚ w trybie miesięcznym.
5. Wyniki pomiarów całkowitej zawartości ozonu i natężenia promieniowania UV-B przekazano do Głównego Urzędu Statystycznego.
6. W przypadku spadku całkowitej zawartości ozonu o więcej niż 20% średniej wieloletniej informację przekazywano do GIOŚ.

7. Dane o całkowitej zawartości ozonu i jego rozkładzie pionowym przekazywano do Światowego Centrum Danych Ozonowych w Toronto, Kanada.
8. 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
9. 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

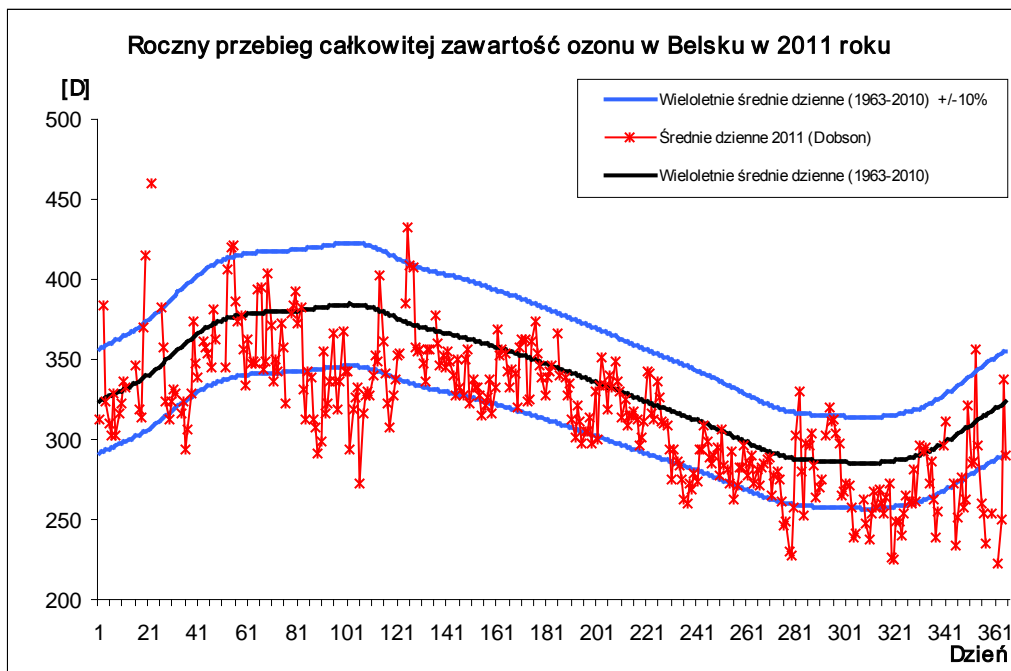
1.1 Całkowita zawartość ozonu uzyskana z pomiaru spektrofotometrem Dobsona

Bonawentura Rajewska-Więch, Janusz W. Krzyścin

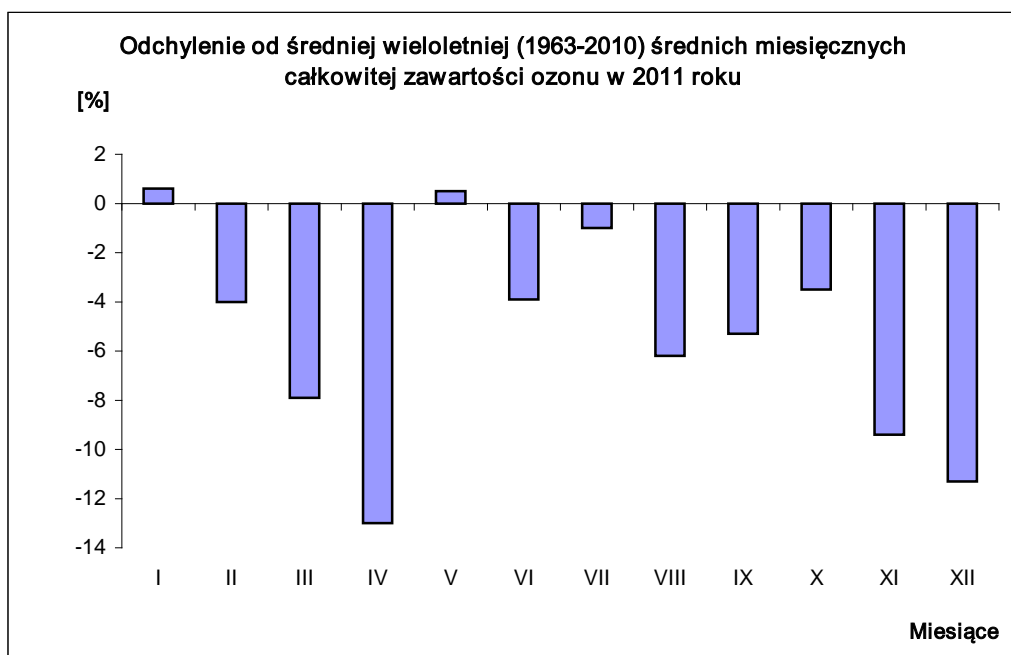
Całkowita zawartość ozonu jest wielkością, od której w znacznej mierze zależy dopływ do powierzchni Ziemi słonecznego promieniowania ultrafioletowego UV-B. Miarą jej jest grubość warstwy ozonu w atmosferze po sprowadzeniu go do warunków standardowych ciśnienia i temperatury. Średnio w atmosferze znajduje się 8×10^{18} cząsteczek ozonu w słupie powietrza o podstawie 1 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 2011 wartości całkowitej zawartości ozonu w Belsku, poza styczniem i majem, były niższe od średniej wieloletniej z lat 1963-2010 (Tab.1.1.1, Rys.1.1.1). Odchylenia procentowe średnich miesięcznych całkowitej zawartości ozonu od odpowiednich średnich wieloletnich przedstawia Rys.1.1.1a.

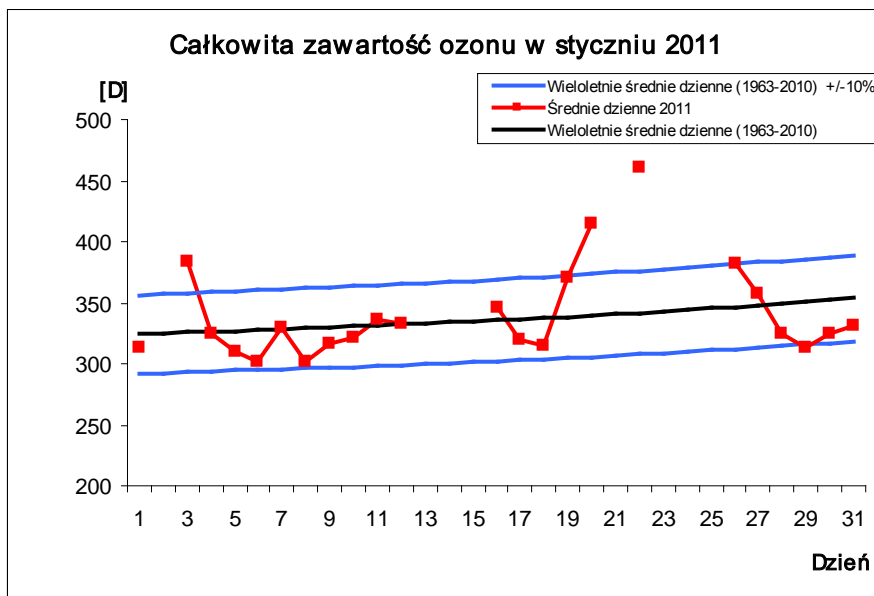
Jak widać ujemne odchylenia średniej miesięcznej całkowitej zawartości ozonu od średniej wieloletniej zaobserwowano lutym 4,0%, marcu 7,9% kwietniu 13,0%, czerwcu 3,9%, lipcu 1,0%, sierpniu 6,2%, wrześniu 5,3%, październiku 3,5%, listopadzie 9,4% i grudniu 11,3%.



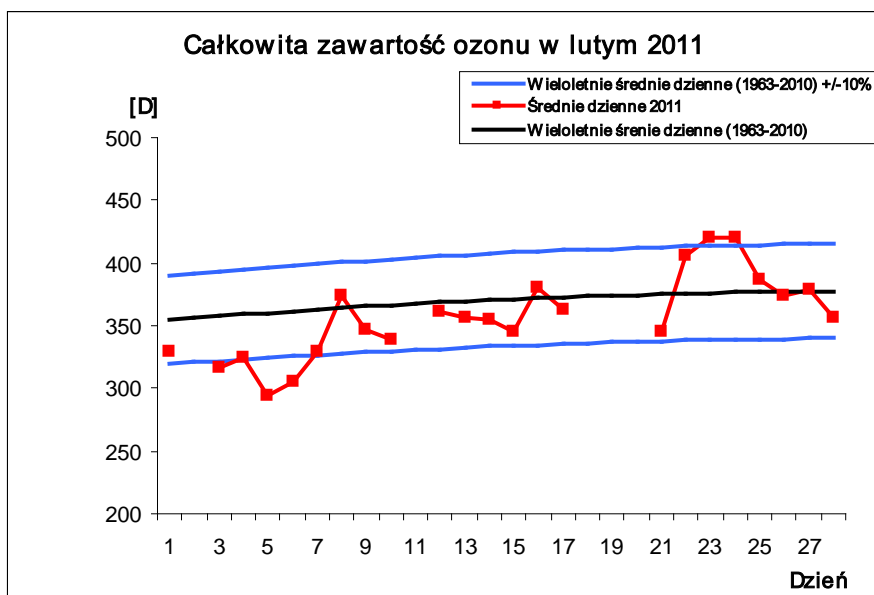
Rys. 1.1.1



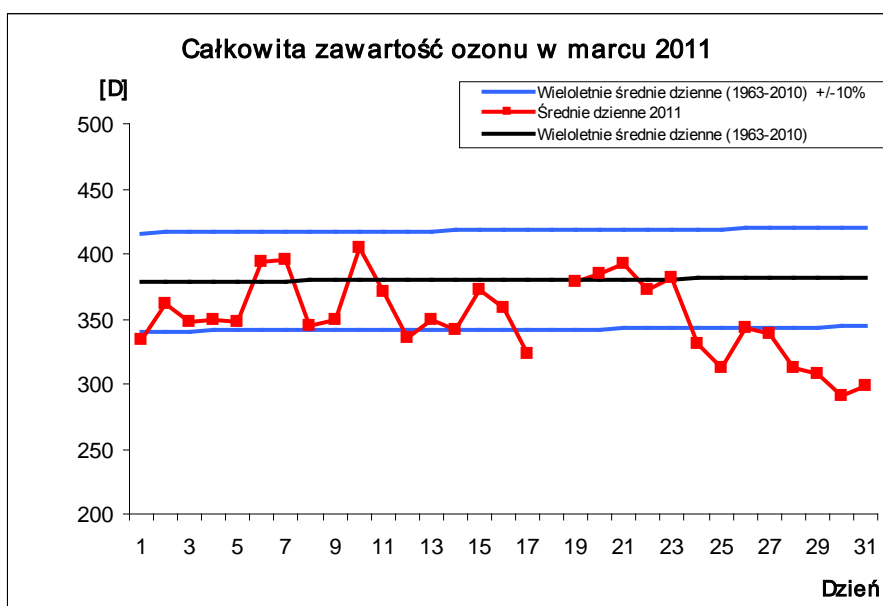
Rys. 1.1.1a



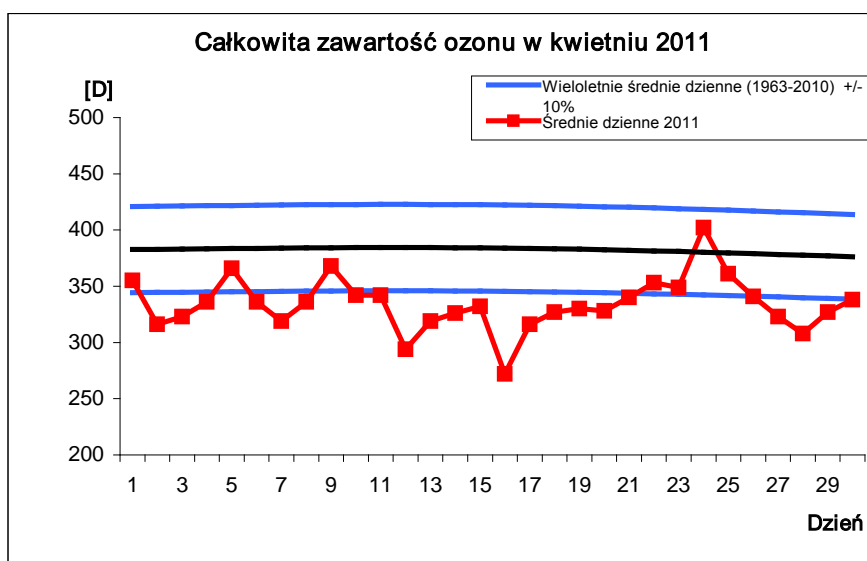
Rys. 1.1.2



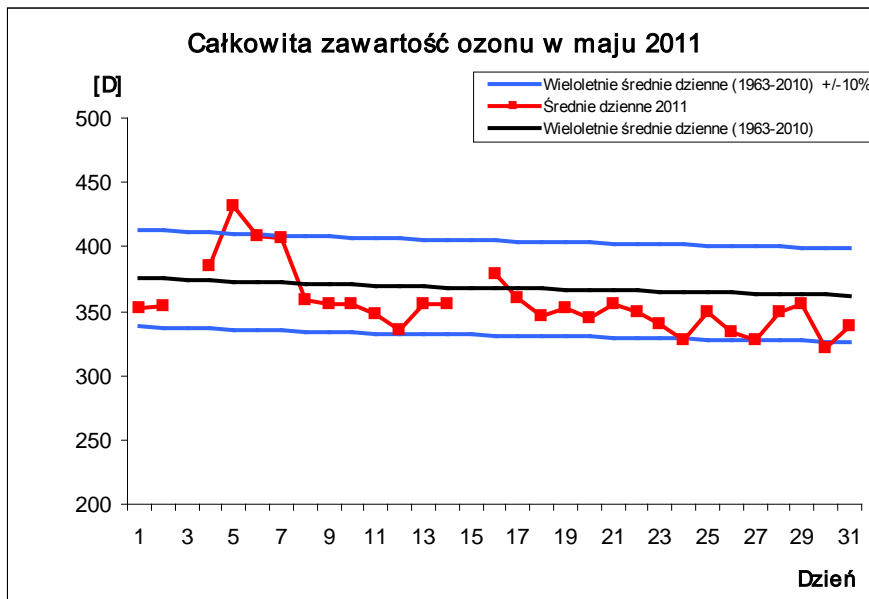
Rys.1.1.3



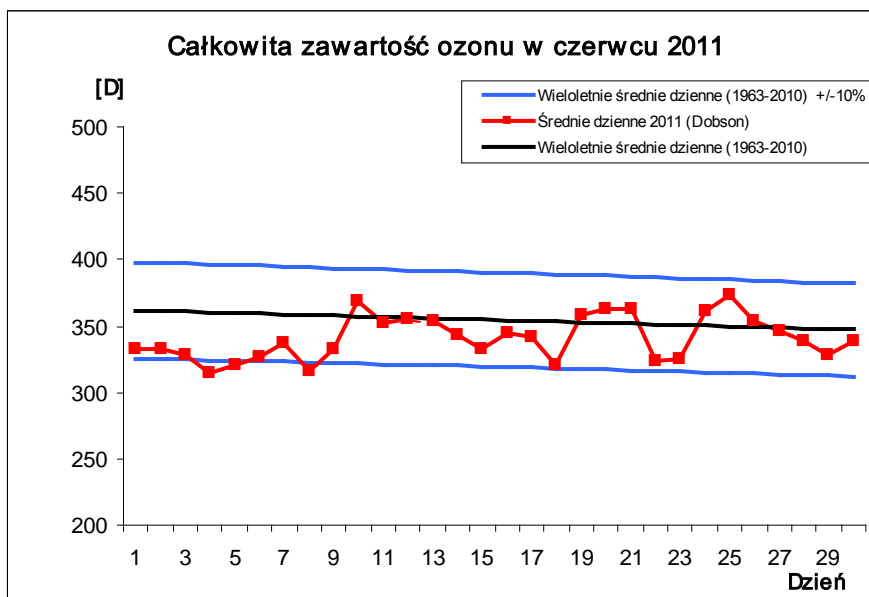
Rys.1.1.4



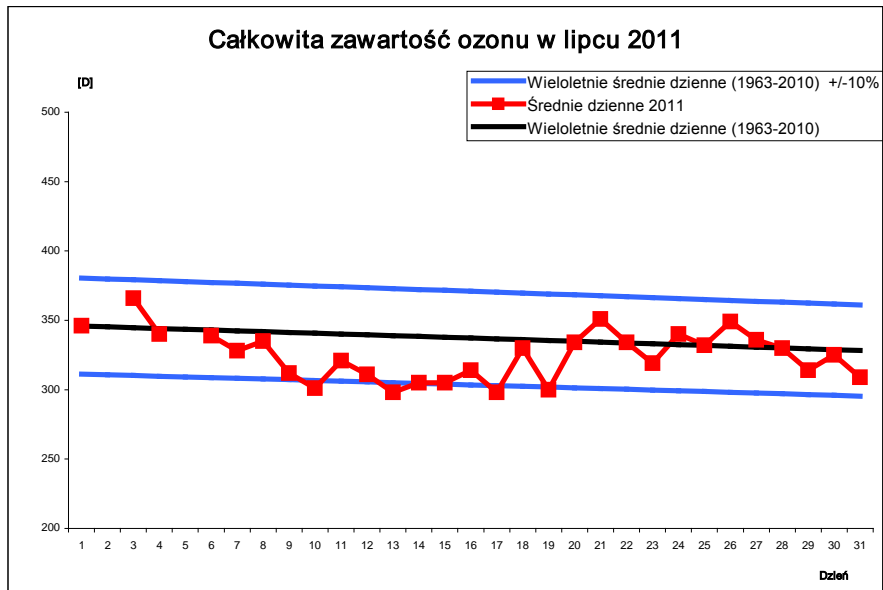
Rys.1.1.5



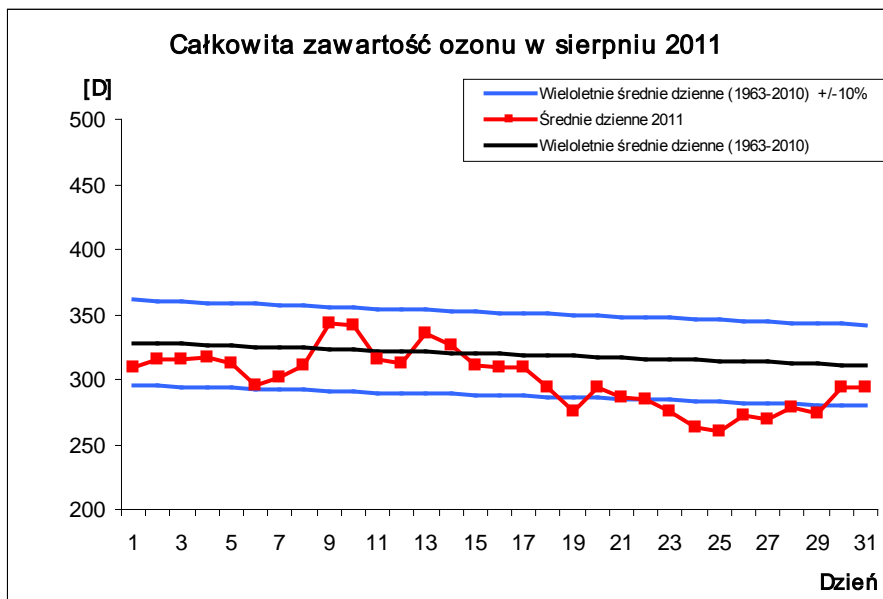
Rys.1.1.6



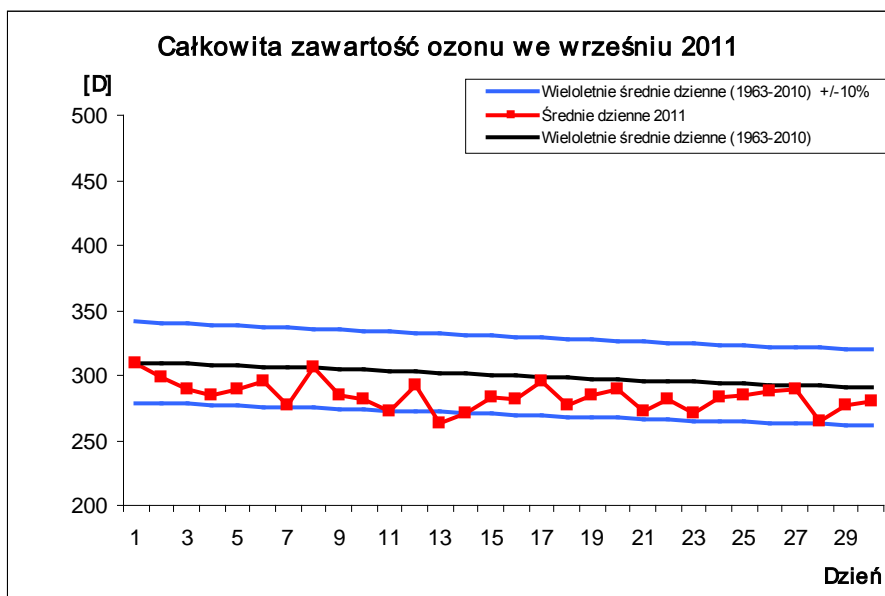
Rys.1.1.7



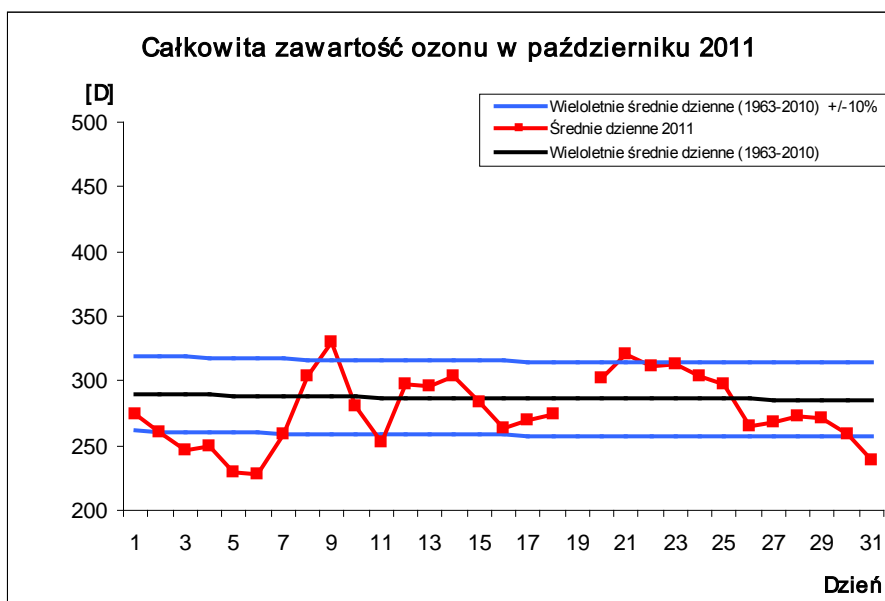
Rys.1.1.8



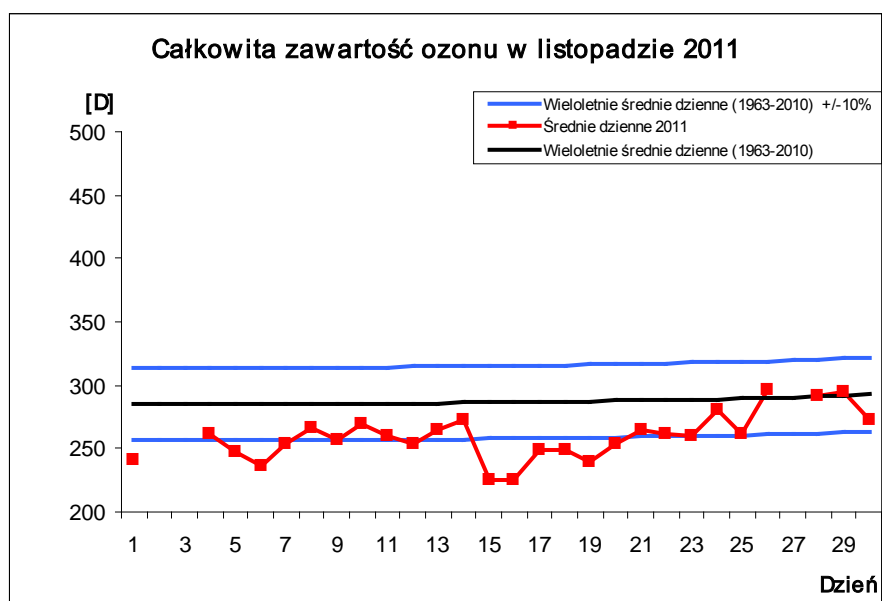
Rys.1.1.9



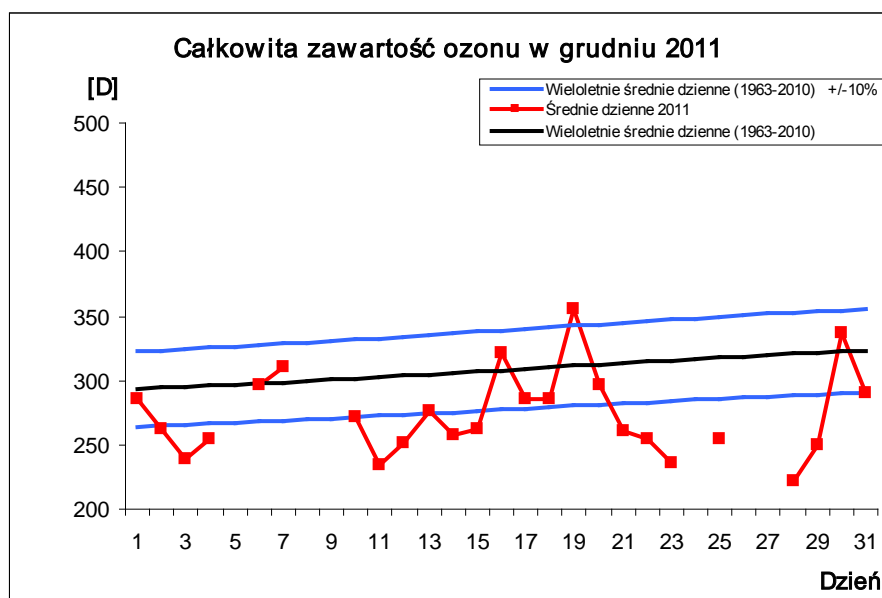
Rys.1.1.10



Rys.1.1.11



Rys.1.1.12



Rys.1.1.13

Tabela 1.1.1. Średnie miesięczne całkowitej zawartości ozonu [D] w 2011 roku i ich odstępstwa od średnich wieloletnich 1963-2010.

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Śr. wiel. 1963-2010	338	372	381	384	368	355	338	320	300	287	287	309
Śr. mieś. 2011	340	357	351	334	370	341	335	300	284	277	260	274
Różnica w %	0,6	-4,0	-7,9	-13,0	0,5	-3,9	-1,0	-6,2	-5,3	-3,5	-9,4	-11,3

W miesiącach letnich, kiedy promieniowanie ultrafioletowe osiąga maksymalne natężenie, ze względu na dominującą zależność od wysokości Słońca, odchylenia średnich miesięcznych wartości ozonu w odniesieniu do średnich wieloletnich wynosiły 0,5% w maju, -3,9% w czerwcu, -1,0% w lipcu i -6,2% 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 2011 roku, linia czarna – wieloletnia (1963-2010) 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 marcu, kwietniu, sierpniu, listopadzie i grudniu. W styczniu (Rys.1.1.2) średnie dzienne wartości całkowitej zawartości ozonu z wyjątkiem dziesięciu dni były poniżej średniej wieloletniej. W lutym (Rys.1.1.3) i w marcu (Rys.1.1.4) średnie dzienne całkowitej zawartości ozonu z wyjątkiem odpowiednio sześciu dni w każdym z nich były niższe od średniej wieloletniej 1963-2010. W kwietniu (Rys.1.1.5) tylko jednego dnia (24.04.2011) średnia dzienna całkowitej zawartości ozonu była powyżej średniej wieloletniej dla tego dnia. W skali miesiąca niedobory całkowitej zawartości ozonu wynosiły 13% wobec średniej wieloletniej. Niedobory całkowitej zawartości ozonu w miesiącach letnich (maj, czerwiec, lipiec, sierpień) w stosunku do średniej wieloletniej mogą stanowić potencjalne zagrożenie wzmocnionym dopływem promieniowania ultrafioletowego. Średnie dzienne wartości ozonu w maju i w czerwcu (Rys.1.1.6, Rys.1.1.7) za wyjątkiem odpowiednio pięciu i siedmiu dni były poniżej wieloletniej średniej dziennej (1963-2010). W lipcu i sierpniu 2011 roku średnie dzienne wartości całkowitej zawartości

ozonu z wyjątkiem odpowiednio pięciu i czterech dni w każdym z tych miesięcy były poniżej średniej wieloletniej (Rys.1.1.8, Rys.1.1.9). We wrześniu ani jednego dnia średnia dzienna całkowitej zawartości ozonu nie przekroczyła średniej wieloletniej (Rys.1.1.10). W październiku za wyjątkiem jedenastu dni obserwowano w Belsku wartości ozonu poniżej średniej wieloletniej (Rys.1.1.11). W listopadzie i grudniu odpowiednio zanotowano dwa i cztery dni kiedy to średnie dzienne wartości ozonu były powyżej średniej wieloletniej dla tych dni (Rys.1.1.12, Rys.1.1.13). Średnie miesięczna wartość całkowitej zawartości ozonu dla tych miesięcy była odpowiednio o 9,4% i 13,1% niższa od średniej wieloletniej. Znaczne spadki całkowitej zawartości ozonu, przekraczające $\pm 10\%$ średniej wieloletniej obserwowano w lutym, marcu, kwietniu, sierpniu, październiku, listopadzie i grudniu. Rok 2011 był jednym z najbardziej „ubogich” w ozon jakie obserwowano w COG Belsk na przestrzeni prawie pięćdziesięciu lat.

Przebieg zmienności z dnia na dzień całkowitej zawartości ozonu w Belsku w 2011 roku w odniesieniu do przebiegu średnich wieloletnich (1963-2010) i ich odchyłeń $\pm 10\%$ 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 (GO₃OS), 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 2011 roku.

1.2 Całkowita zawartość ozonu uzyskana z pomiaru spektrofotometrem Brewera

Janusz Jarosławski, Bonawentura Rajewska-Więch

Przez cały 2011 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

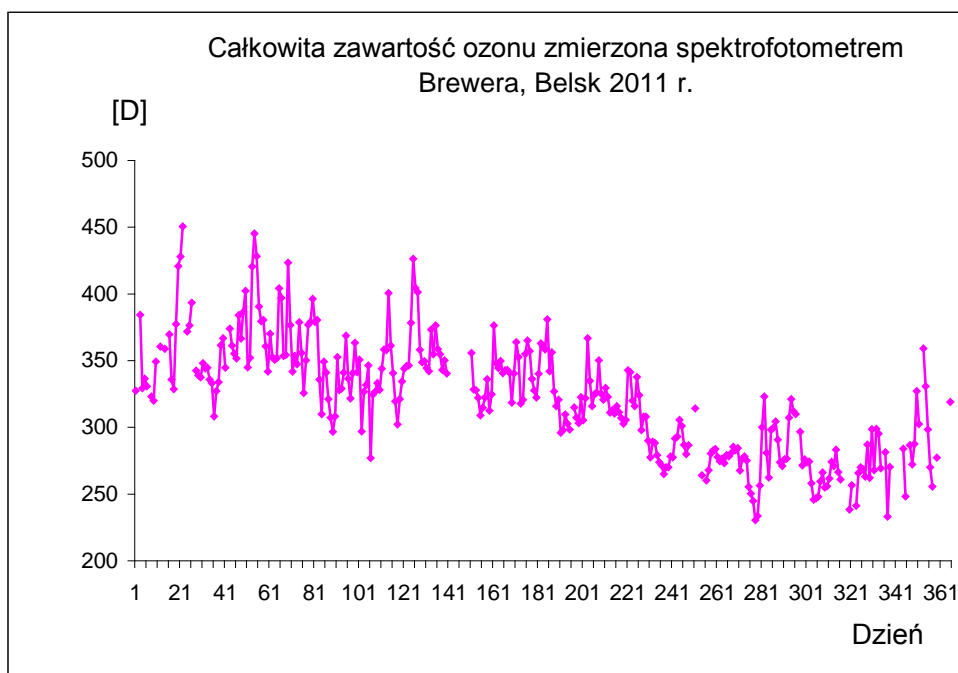
W dniach od 21.05.2011 do 30.05.2011 spektrofotometr Brewera uczestniczył w międzynarodowym porównaniu w Hydrometeorological Institute Solar and Ozone Observatory, Hradec Kralove, Czechy. Podczas porównania wykonano wzorcowanie oraz przegląd części optycznej i elektronicznej spektrofotometru Brewera, przez kanadyjskiego eksperta, pana Kena Lamba.

Spektrofotometr Brewera został bardzo starannie sprawdzony i wykalibrowany. Jednocześnie wykonano pomiary porównawcze całkowitej zawartości ozonu ze spektrofotometrami kanadyjskim (standard światowy), czeskim, słowackim i węgierskim. Wyniki pomiarów porównawczych świadczą o tym, że poziom kalibracji jest zgodny ze wzorcowym spektrofotometrem kanadyjskim w granicach 0,5%.

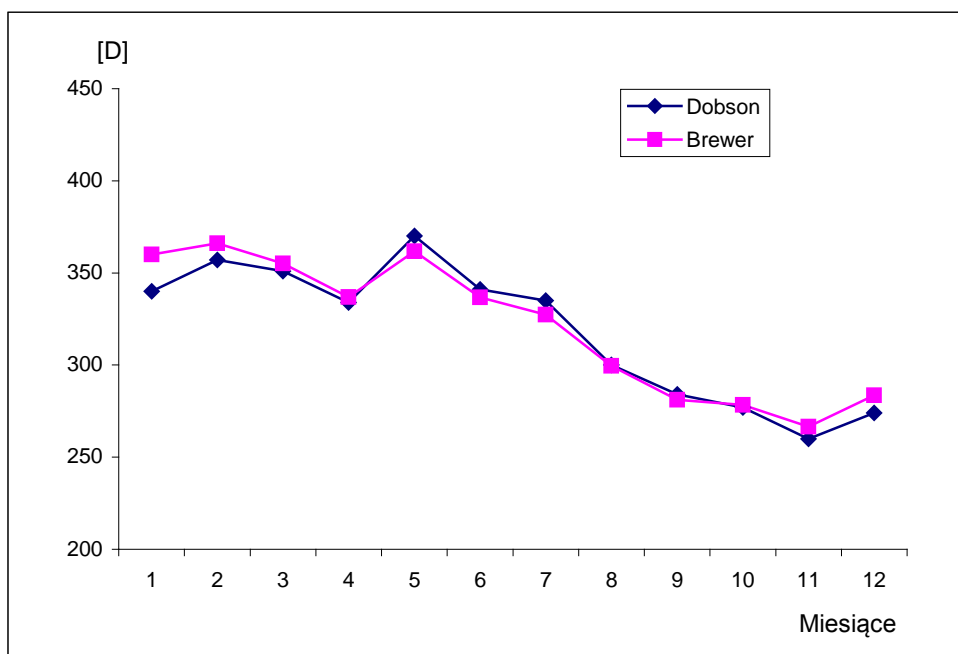
Zgodność danych o całkowitej zawartości ozonu uzyskanych ze spektrofotometru Brewera z danymi otrzymanymi przy pomocy spektrofotometru Dobsona może być oceniona jako dobra. Różnica średnich miesięcznych całkowitej zawartości ozonu uzyskanych za pomocą spektrofotometru Dobsona i Brewera

Tabela 1.2.1. Średnie dzienne wartości całkowitej zawartości ozonu uzyskane z pomiaru spektrofotometrem Brewera w Belsku w 2011 roku.

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1	327,5	344,2	341,9	352,6	344,1	328,5	363,0	311,1	305,7	275,1	246,9	-
2	392,0	344,6	370,1	327,8	346,0	327,9	360,4	312,8	301,0	255,5	248,1	281,4
3	384,4	335,9	352,6	329,1	346,5	322,1	358,3	310,5	287,0	250,5	259,6	233,2
4	329,3	333,3	350,6	341,2	378,3	309,0	381,0	316,0	279,9	244,9	266,3	270,3
5	336,5	308,3	351,8	368,7	426,3	314,7	342,0	311,3	286,6	230,5	255,0	-
6	330,9	327,3	404,3	336,6	404,4	322,4	356,3	307,0	-	233,6	255,9	316,4
7	348,9	333,9	397,1	321,6	401,3	336,2	326,9	302,6	-	256,4	261,7	334,4
8	323,2	361,5	353,5	340,7	358,1	312,5	316,0	305,7	314,2	300,2	274,1	-
9	319,9	366,7	354,3	363,4	348,7	324,7	320,6	342,8	-	323,2	271,0	-
10	349,4	344,6	423,4	341,3	349,5	376,3	296,0	341,4	-	281,0	283,3	283,9
11	-	-	376,7	350,8	344,5	348,1	298,0	320,0	264,2	262,4	266,5	248,2
12	360,5	373,9	341,9	297,0	342,0	344,5	309,7	315,9	-	298,1	260,9	-
13	369,5	361,3	353,5	326,8	373,3	349,7	302,7	337,8	260,3	299,5	-	286,6
14	358,9	355,3	347,3	331,7	354,7	340,6	298,5	324,1	267,9	304,5	-	272,3
15	3825,5	351,6	378,9	346,4	376,3	342,9	-	297,8	280,3	290,7	-	287,7
16	369,6	384,1	355,8	277,1	358,7	343,1	314,9	307,9	282,8	273,9	238,4	327,3
17	335,9	366,6	325,7	324,6	354,7	340,9	307,3	308,1	283,8	271,1	256,7	302,4
18	328,6	386,5	350,2	326,6	343,0	318,6	303,1	290,0	277,8	276,0	-	336,8
19	3377,4	402,4	377,0	333,2	350,3	340,5	322,6	277,6	274,6	276,5	241,2	359,2
20	420,7	345,0	379,0	328,1	340,5	363,8	305,3	289,3	276,6	307,3	265,7	330,9
21	427,9	352,2	396,3	344,1	-	352,7	321,9	288,4	273,1	321,1	270,1	298,5
22	450,5	420,6	379,0	358,4	-	317,9	366,7	279,1	279,3	312,2	268,6	270,1
23	-	445,4	380,4	358,0	-	320,8	335,0	274,0	278,3	310,0	263,2	255,7
24	371,9	428,2	335,8	400,6	-	355,0	315,8	271,5	280,6	-	287,2	-
25	376,4	390,6	310,0	361,3	-	365,1	324,7	265,0	285,5	296,7	262,2	277,3
26	393,4	379,6	349,2	340,6	-	357,3	326,0	270,0	283,0	271,6	298,7	-
27	377,3	380,5	341,1	319,5	-	336,4	350,3	270,0	284,4	276,1	267,9	-
28	342,5	360,9	321,3	302,2	-	327,7	325,2	278,3	267,6	273,9	298,8	199,6
29	339,0		307,3	321,3	-	322,4	320,7	277,6	276,4	274,3	295,3	-
30	337,5		296,6	334,3	-	340,1	329,7	291,6	278,3	258,0	269,4	-
31	348,0		308,3		355,7		322,8	293,2		245,9		319,0



Rys.1.2.1



Rys.1.2.2

mieści się w granicach 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 (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, to jednak możliwość kontynuacji pomiarów i analiz porównawczych obu przyrządów jest niezwykle ważna, chociażby ze względu na zapewnienie ciągłości serii pomiarów.

1.3 Rozkład pionowy ozonu metodą Umkehr

Bonawentura Rajewska-Więch, Janusz W. Krzyściń

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.

W tabeli 1.3.1 przedstawiono wyniki pomiarów rozkładu pionowego ozonu (rano –A, popołudniu- P) w dziesięciu warstwach atmosfery o grubości 5 km. Do wyznaczenia rozkładu pionowego ozonu konieczna jest znajomość jego całkowitej zawartości O_3 .

Tabela 1.3.1 Zawartości ozonu w poszczególnych warstwach umkehrwskich

Data	Zawartość Ozonu w warstwach [D]										O ₃ [D]
	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
10 02 2011 A	1,54	4,01	10,30	20,7	35,0	62,6	82,8	59,1	32,3	29,2	338
14 02 2011 A	1,50	3,71	9,12	17,9	30,3	58,3	91,2	71,0	38,4	30,4	352
14 02 2011 P	1,39	2,93	6,37	14,2	37,1	71,8	85,8	61,7	35,7	30,7	348
15 02 2011 A	1,47	3,51	8,41	16,9	31,6	65,0	92,3	63,1	33,2	28,6	344
24 02 2011 P	1,52	4,07	11,14	21,5	31,8	55,2	91,1	98,9	64,6	36,9	417
25 02 2011 A	1,45	3,53	9,05	18,7	29,9	49,9	81,0	93,2	65,2	39,0	392
25 02 2011 P	1,49	3,87	10,38	20,7	32	56,6	92,4	82,5	46,5	31,7	378
28 02 2011 P	1,47	3,73	10,14	21,6	35,2	58,2	79,4	67,8	41,0	33,3	353
1 03 2011 A	1,45	3,62	9,55	19,5	31,5	53,1	77,3	64,9	36,7	32,9	332
1 03 2011 P	1,47	3,78	10,31	21,3	34,4	58,0	80,1	61,8	33,9	30,3	336
2 03 2011 A	1,46	3,66	9,55	18,8	31,1	58,2	88,4	74,5	43,0	32,6	362
2 03 2011 P	1,47	3,77	10,18	20,7	33,8	60,6	88,8	71,1	39,7	30,7	361
3 03 2011 A	1,46	3,67	9,63	19,0	30,9	54,8	81,6	68,7	38,7	32,4	342
3 03 2011 P	1,51	4,18	12,05	23,6	35,2	57,2	79,3	67,0	39,6	32,3	353
4 03 2011 A	1,46	3,71	10,03	20,5	33,5	59,1	84,1	67,2	38,1	31,6	350
4 03 2011 P	1,47	3,84	10,82	23,0	37,2	61,4	80,8	61,9	34,6	29,8	345
7 03 2011 A	1,48	4,02	11,8	23,8	34,2	55,3	84,5	87,5	57,6	36,3	397
8 03 2011 P	1,45	3,76	10,5	21,9	37,2	66,3	82,9	57,4	31,2	28,3	341
9 03 2011 A	1,43	3,61	10,08	21,7	35,1	56,5	77,6	67,8	40,7	33,3	349
9 03 2011 P	1,46	3,88	11,18	23,0	35,6	58,2	78,5	66,2	39,8	33,0	352
21 03 2011 A	1,44	3,96	12,22	24,2	34,8	58,8	90,2	83,4	49,8	33,1	392
25 03 2011 A	1,30	2,88	7,87	20,5	38,2	52,8	64,4	55,1	32,8	34,8	312
27 03 2011 A	1,34	3,18	8,86	18,8	29,8	49,6	77,1	73,2	41,8	34,0	339
29 03 2011 P	1,27	2,72	7,10	17,2	32,8	38,8	67,1	57,7	34,6	41,9	304
30 03 2011 A	1,31	3,00	8,02	16,4	27,1	45,7	67,6	58,2	30,1	34,7	294
30 03 2011 P	1,30	2,92	7,80	17,4	31,7	52,3	67,5	52,1	26,8	32,1	293
18 04 2011 A	1,22	2,68	8,20	24,5	42,6	58,7	70,3	57,7	33,5	31,5	332
19 04 2011 A	1,22	2,66	8,03	23,2	42,2	60,6	72,4	55,5	30,4	29,3	325
19 04 2011 P	1,24	2,86	8,98	23,2	38,4	56,1	71,2	61,9	37,0	33,5	336
20 04 2011 A	1,25	2,96	9,24	22,2	38,3	60,7	73,3	55,0	29,8	29,6	322
20 04 2011 P	1,25	2,97	9,36	22,8	38,7	59,5	72,8	57,5	31,9	30,5	328
21 04 2011 A	1,22	2,73	8,37	22,2	38,2	54,9	71,1	66,2	41,6	35,6	344

Tabela 1.3.1 cd. Zawartości ozonu w poszczególnych warstwach umkehrwskich

Data	Zawartość Ozonu w warstwach [D]										O ₃
	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	[D]
21 04 2011 P	1,23	2,81	8,81	23,5	40,3	58,3	70,0	58,7	35,0	32,7	333
22 04 2011 A	1,19	2,48	6,96	18,4	38,0	58,6	73,8	67,6	42,5	35,7	347
22 04 2011 P	1,27	3,11	10,30	24,8	40,6	63,6	79,2	64,4	37,2	30,4	355
23 04 2011 A	1,24	2,87	9,06	23,3	41,0	63,2	77,5	62,1	35,3	30,1	346
27 04 2011 A	1,24	3,01	9,76	22,3	35,5	54,7	70,1	59,9	35,2	34,1	328
29 04 2011 A	1,22	2,87	9,48	23,5	35,7	54,0	65,0	57,8	37,9	37,7	329
4 05 2011 A	1,22	2,94	9,94	23,7	36,5	56,2	78,8	79,1	50,5	35,3	375
9 05 2011 A	1,19	2,73	9,32	25,7	42,3	61,3	74,4	61,4	35,5	30,6	345
9 05 2011 P	1,22	2,99	10,57	25,3	38,4	58,8	76,7	68,2	40,7	32,4	356
11 05 2011 A	1,2	2,85	9,76	23,7	38,0	59,2	76,0	64,2	36,8	31,5	344
11 05 2011 P	1,18	2,69	9,06	24,3	39,8	58,2	71,8	62,8	38,2	33,4	343
12 05 2011 A	1,18	2,74	9,16	22,7	37,0	63,4	87,0	57,8	28,2	25,8	334
23 05 2011 P	1,18	2,8	10,05	24,5	37,5	56,9	73,6	62,2	35	31,2	336
24 05 2011 P	1,13	2,42	7,97	23,4	43,2	60,9	69,1	55,9	32,7	31,9	330
26 05 2011 A	1,14	2,54	8,65	23,8	40,2	58,7	70,6	59,7	35,5	32,8	335
26 05 2011 P	1,13	2,49	8,39	23,9	42,5	60,6	69,7	56,7	34,1	32,9	334
30 05 2011 A	1,15	2,66	9,28	23,3	38,8	58,2	68,3	54,4	30,4	31,2	318
30 05 2011 P	1,14	2,53	8,70	24,3	43,3	61,9	67,9	50,7	27,8	29,1	317
31 05 2011 P	1,13	2,53	8,68	23,6	42,3	61,4	69,3	55,1	32,1	31,6	329
3 06 2011 A	1,14	2,58	9,20	25,9	43,6	60,7	68,2	54,0	30,8	30,1	327
3 06 2011 P	1,13	2,52	8,70	23,5	40,9	58,9	66,5	52,2	29,9	31,9	317
4 06 2011 A	1,11	2,39	8,15	24,5	42,1	56,6	64,1	51,3	28,8	31,3	311
5 06 2011 A	1,13	2,52	8,74	23,5	39,1	56,5	66,8	54,9	31,5	32,4	318
6 06 2011 A	1,14	2,63	9,31	23,8	38,9	57,4	68,0	55,4	31,4	31,7	320
14 06 2011 P	1,13	2,59	9,16	23,8	41,4	65,4	77,3	61,2	35,3	30,3	348
27 06 2011 A	1,14	2,69	9,94	25,1	37,3	56,5	75,4	65,3	37,2	31,5	343
29 06 2011 A	1,14	2,68	9,70	25,1	41,4	62,2	72,0	55,4	31,1	29,8	331
7 07 2011 P	1,12	2,52	8,99	26,6	42,7	59,2	69,2	56,5	34,9	33,2	337
12 07 2011 P	1,15	2,72	9,87	26,0	40,8	57,8	66,7	51,5	28,5	29,9	315
16 07 2011 A	1,13	2,48	8,04	21,1	37,7	56,7	65,3	50,2	27,6	31,9	303
1 08 2011 P	1,17	2,66	8,57	22,5	39,1	58,7	67,5	49,3	26,5	29,9	306
2 08 2011 P	1,16	2,59	8,38	23,6	39,8	57,1	66,0	50,7	29,1	32,3	312

Tabela 1.3.1 cd. Zawartości ozonu w poszczególnych warstwach umkehrwskich

Data	Zawartość Ozonu w warstwach [D]										O ₃
	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	[D]
3 08 2011 A	1,18	2,75	8,87	22,1	36,2	54,4	68,2	56,8	33,4	34,6	321
3 08 2011 P	1,17	2,66	8,57	23,1	39,9	58,9	68,5	51,3	28,3	30,4	313
4 08 2011 A	1,18	2,70	8,56	21,8	39,2	61,3	70,0	50,1	27,0	29,3	311
4 08 2011 P	1,17	2,68	8,58	22,6	39,3	59,1	68,4	50,7	27,8	30,4	311
5 08 2011 A	1,18	2,67	8,33	21,1	38,2	59,1	67,7	49,9	27,3	31,0	307
5 08 2011 P	1,17	2,59	8,05	22,2	41,9	62,3	68,6	48,9	26,6	29,0	311
16 08 2011 P	1,22	2,84	8,86	22,4	36,8	54,0	65,9	52,4	30,0	33,3	309
18 08 2011 P	1,21	2,79	8,51	22,0	37,3	54,8	64,0	46,9	24,7	30,3	293
20 08 2011 P	1,24	2,95	9,06	21,7	36,4	54,9	62,1	43,7	22,9	30,9	287
22 08 2011 P	1,24	2,98	9,27	23,2	38,3	54,9	60,4	40,6	20,5	28,4	280
26 08 2011 A	1,25	2,93	8,89	22,6	36,5	51,1	55,8	39,0	20,6	32,3	273
26 08 2011 P	1,21	2,63	7,40	20,1	38,0	52,1	54,9	37,5	19,7	33,1	269
27 08 2011 A	1,26	3,02	9,08	21,9	36,6	52,0	55,9	37,3	19,0	30,6	268
29 08 2011 A	1,25	2,92	8,38	20,0	34,7	51,2	57,9	40,0	20,7	32,8	272
31 08 2011 A	1,25	2,86	8,18	20,9	37,9	57,3	64,8	45,3	24,2	30,6	294
1 09 2011 A	1,27	3,02	9,05	22,9	37,3	55,9	67,4	50,6	28,5	31,9	309
6 09 2011 P	1,30	3,14	9,19	22,3	37,6	58,3	68,8	46,5	23,7	27,7	298
13 09 2011 A	1,31	3,10	8,62	20,8	36,2	52,8	57,3	35,6	17,5	29,0	263
13 09 2011 P	1,31	3,13	8,67	20,4	36,1	53,6	57,1	35,5	17,8	30,0	265
14 09 2011 P	1,36	3,53	10,46	23,4	37,3	56,7	62,8	39,3	19,5	26,9	281
17 09 2011 P	1,35	3,34	9,51	22,4	37,5	57,6	65,1	41,1	20,4	27,0	285
21 09 2011 A	1,37	3,41	9,33	20,4	33,8	52,8	61,0	39,0	19,3	29,7	271
21 09 2011 P	1,35	3,24	8,82	21,1	38,3	55,7	58,0	36,3	18,5	29,0	271
24 09 2011 A	1,38	3,48	9,60	21,2	34,2	52,6	63,7	43,0	21,6	29,5	281
25 09 2011 A	1,37	3,40	9,36	21,5	35,2	53,1	62,5	43,0	22,5	30,9	284
26 09 2011 A	1,36	3,25	8,63	20,2	35,4	54,9	64,0	43,7	23,1	31,2	287
26 09 2011 P	1,36	3,26	8,91	22,8	39,6	56,8	62,6	41,0	21,2	28,3	286
27 09 2011 A	1,36	3,26	8,78	21,5	37,3	54,3	60,7	41,4	22,6	32,0	285
29 09 2011 P	1,38	3,36	8,83	19,9	35,7	58,0	64,9	40,2	20,1	28,3	281
30 09 2011 P	1,38	3,38	9,04	21,9	41,1	63,8	62,0	34,2	16,9	24,4	277
1 10 2011 P	1,40	3,48	9,35	21,4	36,9	56,4	61,9	37,9	18,8	27,5	275
3 10 2011 A	1,41	3,50	8,99	18,3	29,2	45,3	55,0	32,7	15,7	32,5	245

Tabela 1.3.1 cd. Zawartości ozonu w poszczególnych warstwach umkehrowskich

Data	Zawartość Ozonu w warstwach [D]										O ₃ [D]
	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
16 10 2011 P	1,46	3,65	9,19	19,3	34,0	58,1	64,1	33,1	15,1	24,2	261
17 10 2011 A	1,44	3,54	8,76	18,7	32,1	52,1	64,6	38,7	18,1	27,8	266
17 10 2011 P	1,47	3,78	9,65	20,0	33,3	54,0	63,3	37,6	18,0	27,6	269
18 10 2011 A	1,48	3,78	9,52	19,1	30,7	50,7	66,3	42,2	20,3	29,2	274
18 10 2011 P	1,49	3,94	10,16	20,4	31,8	51,0	65,3	41,3	19,8	28,4	274
25 10 2011 A	1,49	3,79	9,63	20,6	32,9	52,0	68,7	49,7	26,4	31,2	297
25 10 2011 P	1,51	3,94	10,02	20,4	32,5	53,5	70,4	47,8	24,3	29,4	294
4 11 2011 A	1,52	3,88	9,47	19,6	34,0	55,0	61,4	34,2	16,2	26,7	262
4 11 2011 P	1,49	3,64	8,53	17,5	31,1	52,2	63,2	36,4	17,1	28,4	260
5 11 2011 P	1,50	3,70	8,59	17,2	31,6	55,5	60,7	29,5	13,4	25,4	247
7 11 2011 P	1,51	3,72	8,8	18,4	33,7	54,5	59,2	31,1	14,6	26,5	252
8 11 2011 A	1,52	3,78	8,67	16,4	28,4	55,6	72,4	37,3	16,5	25,2	265
8 11 2011 P	1,49	3,53	8,03	16,3	29,2	50,5	67,4	40,6	18,8	28,7	265
12 11 2011 A	1,50	3,58	8,01	15,8	29,1	51,6	62,9	35,4	16,6	29,5	255

Na Rys.1.3.1 przedstawiono interesujące przykłady zmian zawartości ozonu w poszczególnych umkehrowskich warstwach atmosfery. Jak widać zmiany te w odniesieniu do średniej wieloletniej 1963-2010 (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.

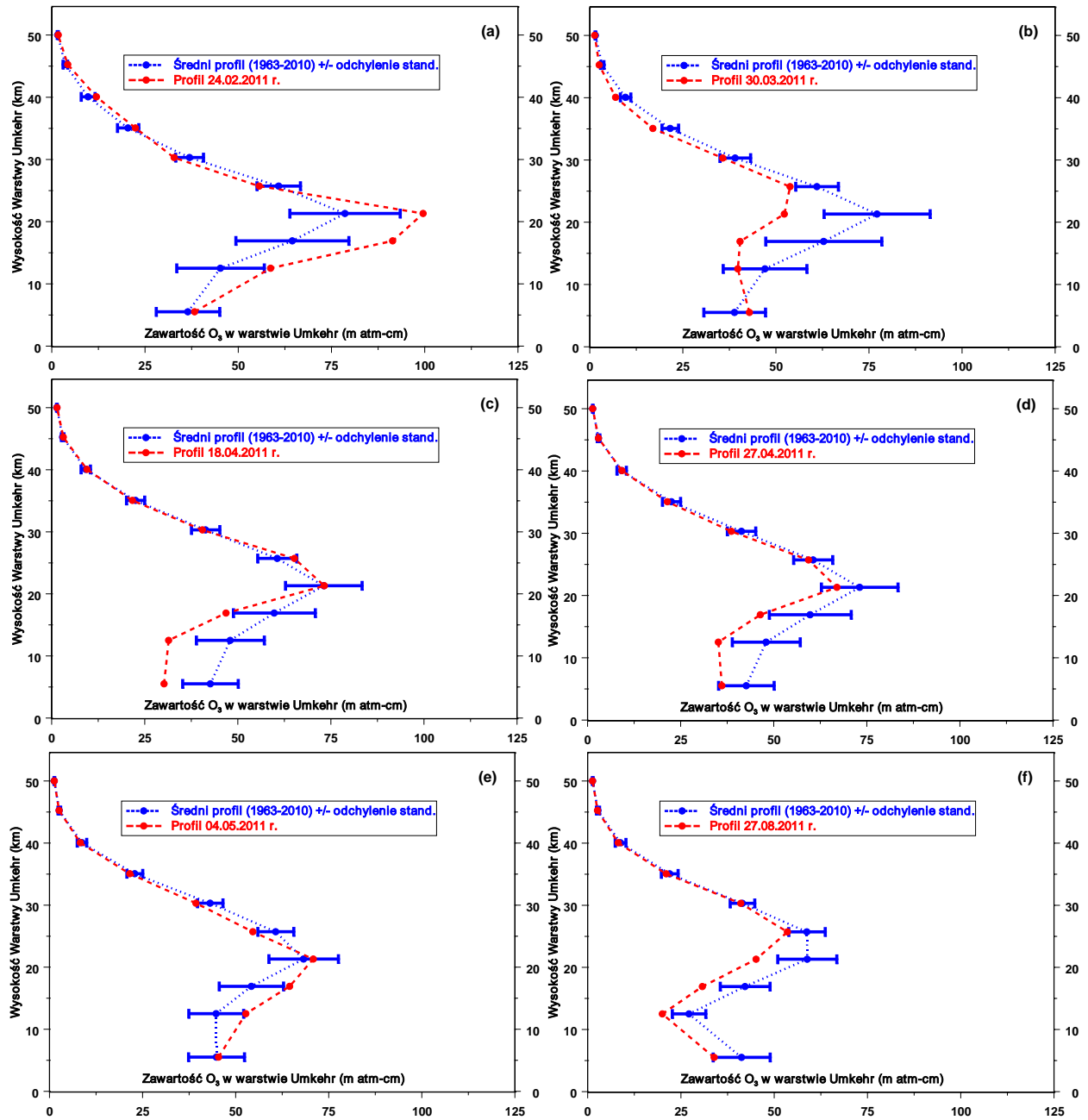
Tabela 1.3.2 Średnie miesięczne zawartości ozonu w poszczególnych warstwach umkehrwskich w 2011 roku

Miesiąc	Średnia zawartość ozonu w warstwie [D]											O ₃ [D]
	2011	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
AVE	1,48	3,67	9,4	19,0	32,9	59,7	87,0	74,7	44,6	32,5	8	365,2
SD	0,05	0,36	1,5	2,6	2,6	6,7	5,4	15,1	13,3	2,9		27,7
AVE	1,42	3,56	9,9	20,6	33,6	55,4	78,8	66,4	38,3	33,0	18	341,9
SD	0,08	0,43	1,5	2,4	2,8	6,2	7,7	9,3	7,2	2,9		28,5
AVE	1,23	2,83	8,9	22,8	39,1	58,6	72,2	60,4	35,6	32,6	12	335,4
SD	0,02	0,18	0,9	1,6	2,3	3,2	3,7	4,1	4,0	2,8		10,3
AVE	1,17	2,68	9,2	24,0	40,0	59,7	73,3	60,6	35,2	31,5	13	338,2
SD	0,03	0,18	0,7	0,8	2,5	2,1	5,4	7,3	5,9	2,3		15,4
AVE	1,13	2,58	9,1	24,4	40,6	59,3	69,8	56,2	32,0	31,3	8	326,9
SD	0,01	0,10	0,6	0,9	2,0	3,3	4,6	4,7	2,8	0,9		13,1
AVE	1,13	2,57	9,0	24,6	40,4	57,9	67,1	52,7	30,3	31,7	3	318,3
SD	0,02	0,13	0,9	3,0	2,5	1,2	2,0	3,3	4,0	1,7		17,2
AVE	1,21	2,78	8,6	22,0	38,0	56,1	63,9	46,5	25,2	31,1	17	296,3
SD	0,04	0,14	0,4	1,0	1,8	3,5	5,1	5,8	4,1	1,7		18,0
AVE	1,35	3,29	9,1	21,5	36,8	55,8	62,5	40,7	20,9	29,1	15	281,6
SD	0,03	0,15	0,5	1,1	1,9	3,0	3,4	4,4	3,0	2,1		11,0
AVE	1,46	3,71	9,5	19,8	32,6	52,6	64,4	40,1	19,6	28,6	9	272,8
SD	0,04	0,18	0,5	1,0	2,2	3,7	4,4	5,9	3,7	2,4		15,9
AVE	1,50	3,69	8,6	17,3	31,0	53,6	63,9	34,9	16,2	27,2	7	258,0
SD	0,01	0,12	0,5	1,3	2,2	2,1	4,6	3,8	1,7	1,7		6,9

AVE – średnia arytmetyczna, SD – odchylenie standardowe, n – Ilość obserwacji Umkehr w miesiącu, O₃ – średnia całkowitej zawartości ozonu z dni kiedy wykonywano pomiar Umkehr

Należy dodać, że zmiany profilu ozonu przy ustalonej całkowitej zawartości ozonu są jednym z czynników wpływających na wielkość natężenia promieniowania 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 najważniejszych analizach statystycznych i metodycznych.



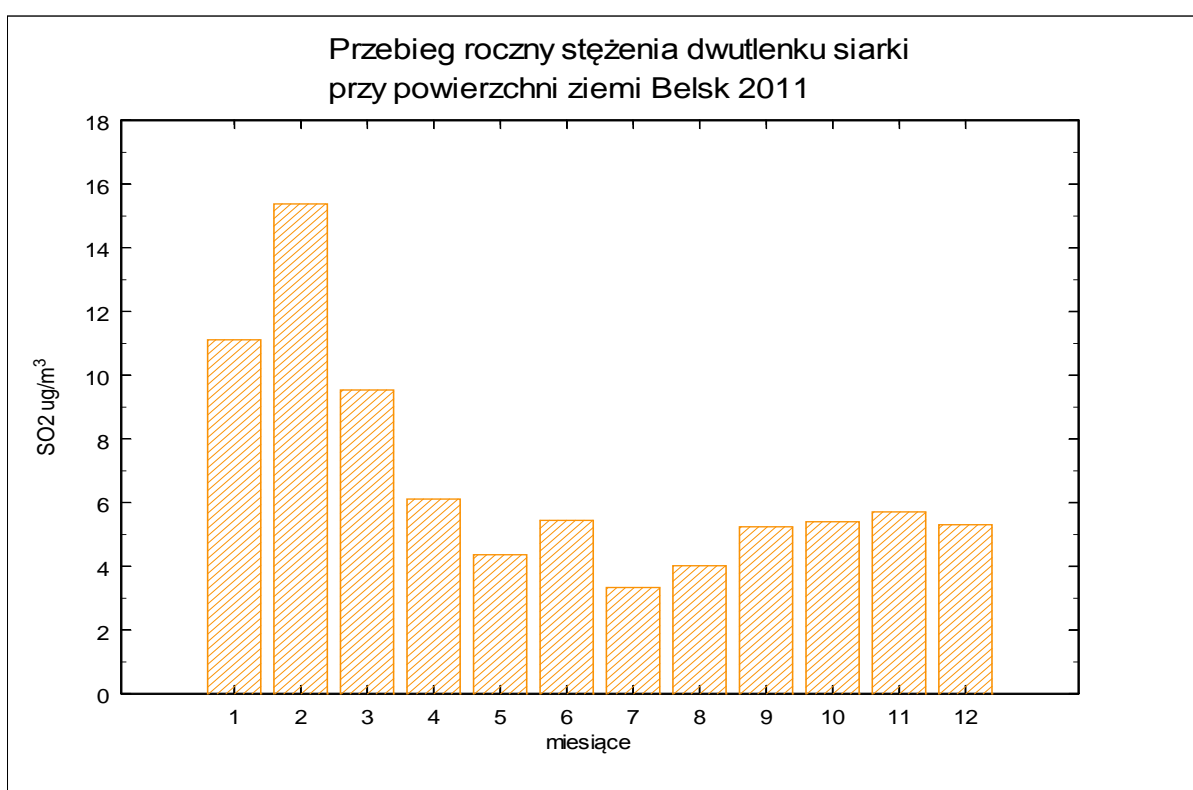
Rys.1.3.1

2. Zawartość dwutlenku siarki, ozonu i dwutlenku azotu przy powierzchni ziemi w Centralnym Obserwatorium Geofizycznym PAN Belsku w 2011 r.

2.1 Dwutlenek siarki

Janusz Jarosławski

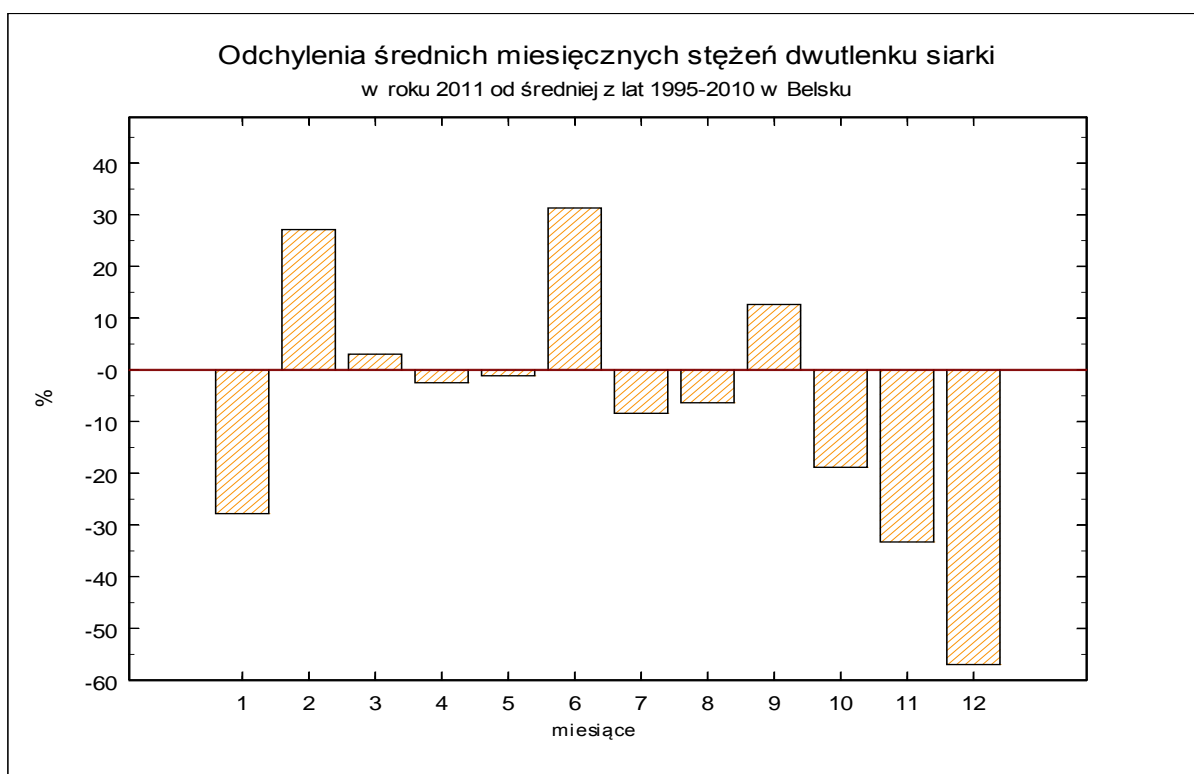
Rok 2011 był kolejnym rokiem systematycznych pomiarów stężeń dwutlenku siarki na stacji w Belsku. Pomiar wykonywany był przyrządem firmy Monitor Europe ML9850 działającym w oparciu o zjawisko fluorescencji SO_2 w promieniowaniu UV. Wyniki ciągłych pomiarów w postaci średnich 60-min obejmują okres od stycznia do grudnia.



Rys.2.1.1.

Przebieg roczny średnich miesięcznych stężeń SO_2 charakteryzował się występowaniem stosunkowo niskich poziomów stężeń o wartości ok. $4\text{-}6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ w miesiącach od kwietnia do grudnia oraz nieco wyższych poziomów stężeń ($9\text{-}16 \mu\text{g}/\text{m}^3$) w pozostałym okresie roku (Rys 2.1.1.). Maksymalne średnie miesięczne stężenie SO_2 w roku 2011 zostało zmierzone w lutym ($15,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$) i było nieznacznie niższe niż maksymalne średnie miesięczne stężenie SO_2

zmierzone w roku 2010 (w grudniu). Dla większości miesięcy roku 2011 z wyjątkiem lutego, czerwca i września średnie miesięczne stężenia SO_2 były niższe od zmierzonych w okresie 1995-2010 aż do ok. 60%; spadek dotyczył szczególnie miesięcy zimowych. Najniższe średniomiesięczne stężenie SO_2 w ciągu roku zmierzono w lipcu (średnia miesięczna – $3,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$) – wyższe o $1,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ od najniższej wartości średniomiesięcznej stężeń z roku 2010. W roku 2011 mieliśmy do czynienia z nietypowym sezonowym przebiegiem stężeń – pod koniec roku utrzymywały się one na poziomie typowym dla wiosny i jesieni. Prawdopodobną przyczyną takiego zjawiska były warunki meteorologiczne sprzyjające niskiej emisji SO_2 – opóźnione nadejście zimy. W sezonie letnim od wielu lat średnie miesięczne poziomy stężenie SO_2 w Belsku nie zmieniają się i zawierają się pomiędzy 2 a $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$. W roku 2011 były nieznacznie, o ok. $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ wyższe. Przy tak małych wartościach nawet niewielkie zmiany stężeń dają duże odchylenia procentowe dlatego trudno

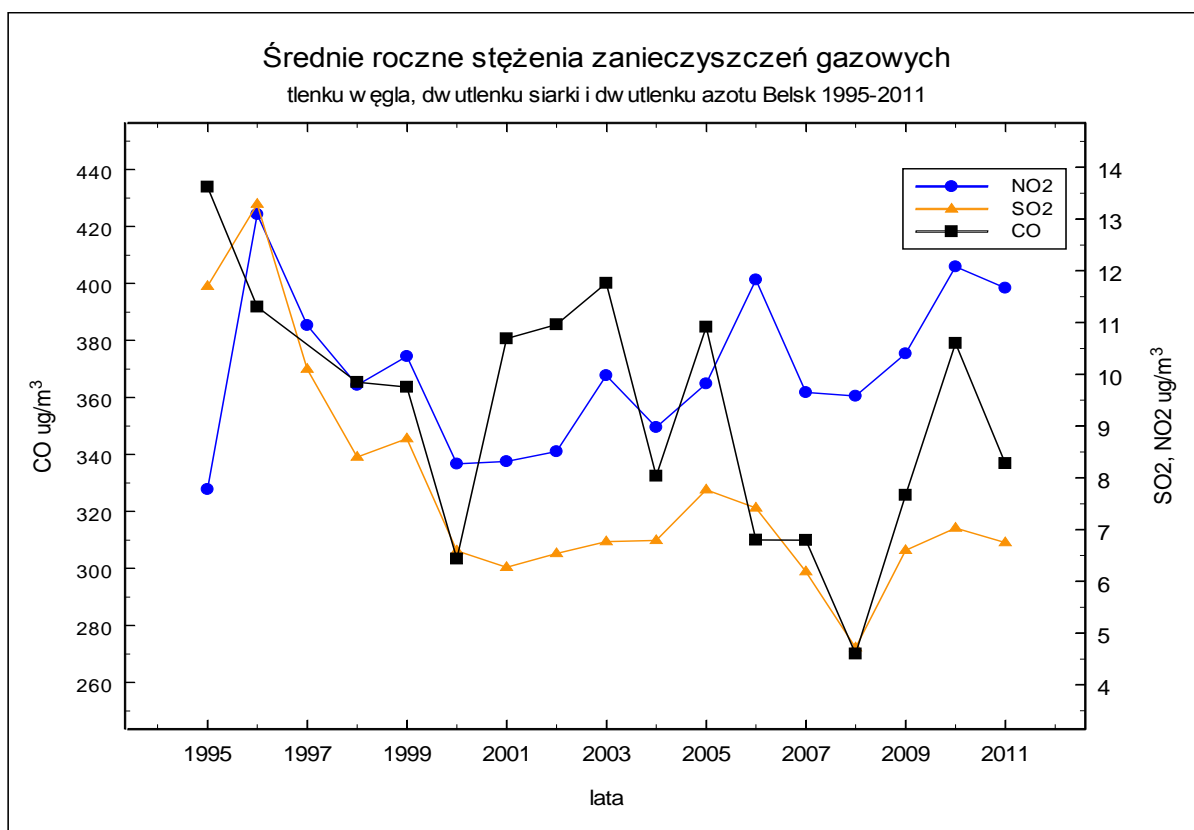


mówić tutaj o jakichś zdecydowanych zmianach.

Rys.2.1.2

Pomimo, że dla większości miesięcy zanotowano ujemne odchylenia od średnich wieloletnich wartości SO_2 , średnia roczna wartość stężenia SO_2 w roku 2011 była nieco niższa od zmierzonej w roku 2010 i była również zbliżona do wartości średniorocznych stężeń z lat 2000-2008 (Rys. 2.1.3). Od roku 1995 średnie roczne stężenia 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) 6.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (2009), 7.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (2010) oraz 6.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Przebieg średniorocznych stężeń SO_2 od roku 1995 przedstawia Rys.2.1.3.

Maksymalne wartości chwilowe (śr. 60-min) stężeń dwutlenku siarki w poszczególnych miesiącach roku 2011 charakteryzowały się tradycyjnie dużą zmiennością szczególnie w miesiącach zimowych i były zbliżone do zmierzonych w latach ubiegłych. Najwyższe chwilowe stężenie SO_2 zmierzone w roku 2011 wyniosło 153 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (w marcu) i było o 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ wyższe od maksymalnego stężenia SO_2 z mierzonego w roku 2010. Wartości chwilowe (średnie 60-min) stężeń SO_2 przedstawiają rysunki dołączone do wydruku danych na końcu raportu. Wartości średnich miesięcznych wraz z wartościami maksymalnymi SO_2 przedstawia Tabela 2.1.1.



Rys. 2.1.3.

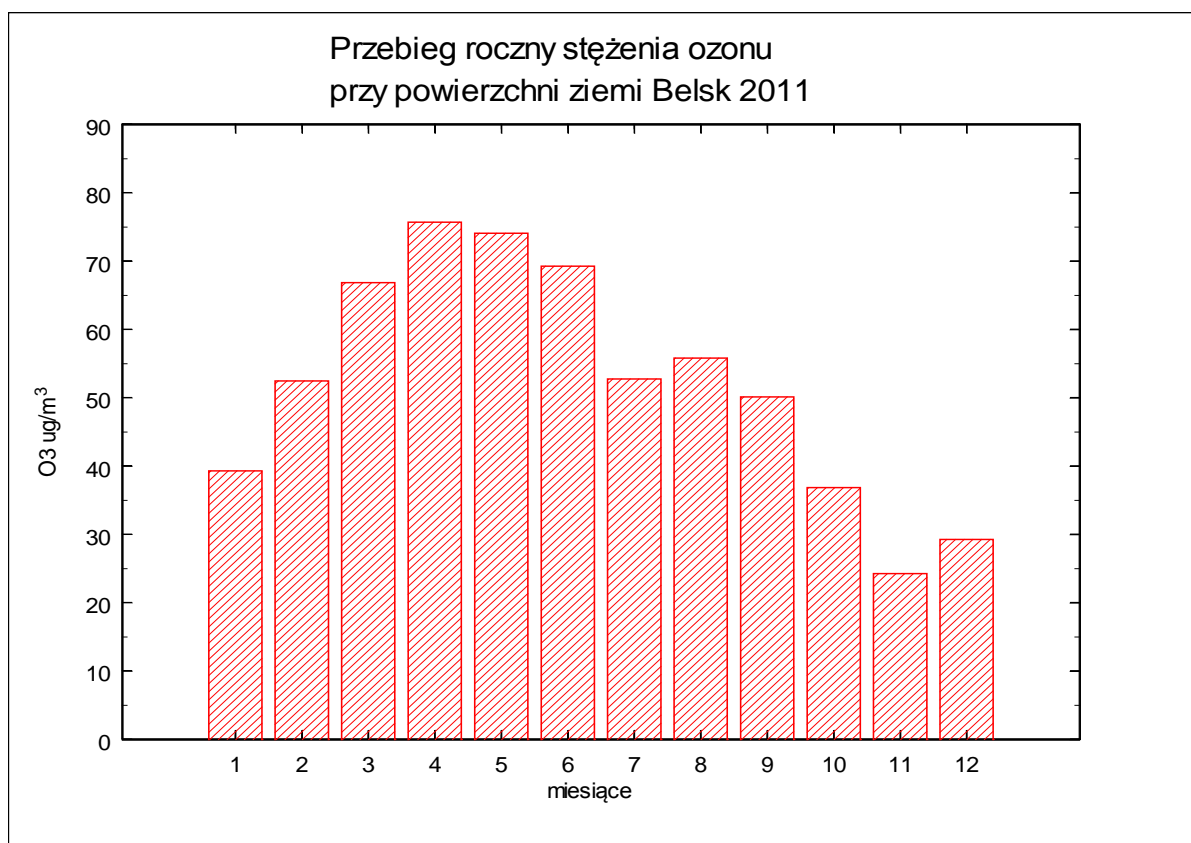
Tabela 2.1.1

Średnie miesięczne i wartości maksymalne koncentracji SO₂ w przyziemnej warstwie atmosfery w Belsku w roku 2011 (µg/m³).

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Śr.	11,1	15,4	9,5	6,1	4,4	5,5	3,3	4,0	5,3	5,4	5,7	5,3
max.	132	153	117	88	45	63	48	53	61	100	127	107

2.2 Ozon przyziemny i dwutlenek azotu

Janusz Jarosławski

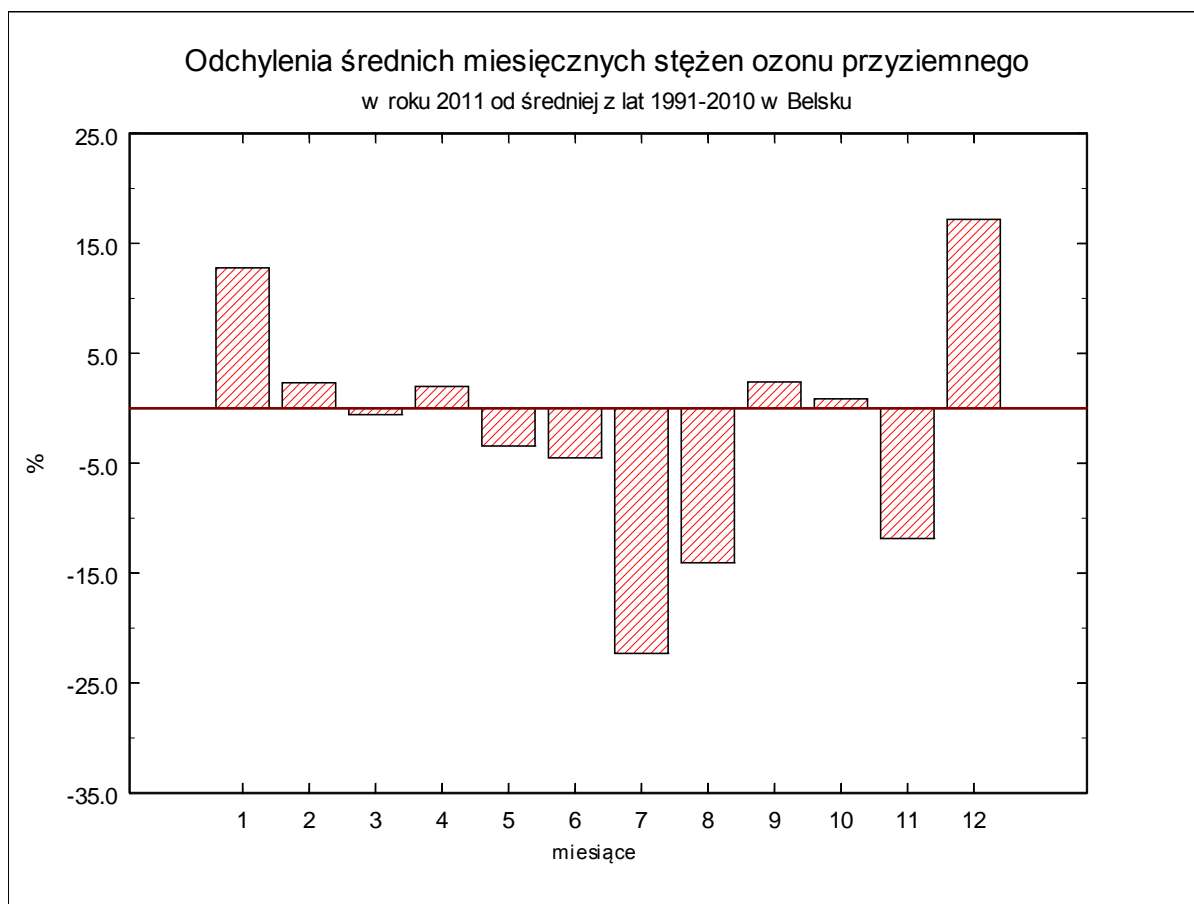


Rys. 2.2.1

Rok 2011 był kolejnym rokiem pomiarów koncentracji ozonu oraz dwutlenku azotu na stacji w Belsku. Pomiarzy wykonywane były analizatorami

firmy Thermo 49i (ozon) 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 2011 przebieg cyklu rocznego był bardzo zbliżony do średniego przebiegu rocznego z ostatnich siedemnastu lat. Maksimum roczne (średnia miesięczna) wystąpiło w kwietniu (średnia miesięczna wartość stężeń ozonu $75,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Było o ok. $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ wyższe od maksimum z roku 2010. Odchylenia średnich miesięcznych stężeń ozonu od wartości średnich z okresu 1991-2010 były dla większości miesięcy ujemne, szczególnie w lecie - do -25% w lipcu, natomiast w miesiącach, zimowych (styczeń, grudzień) zaobserwowano znaczące wzrosty stężeń ozonu w stosunku do średniej wieloletniej (do +15%). Przebieg roczny stężenia ozonu w przyziemnej warstwie atmosfery (średnie miesięczne) przedstawia Rys. 2.2.1., a odchylenia od średnich miesięcznych z lat 1991-2010 przedstawia Rys. 2.2.2.

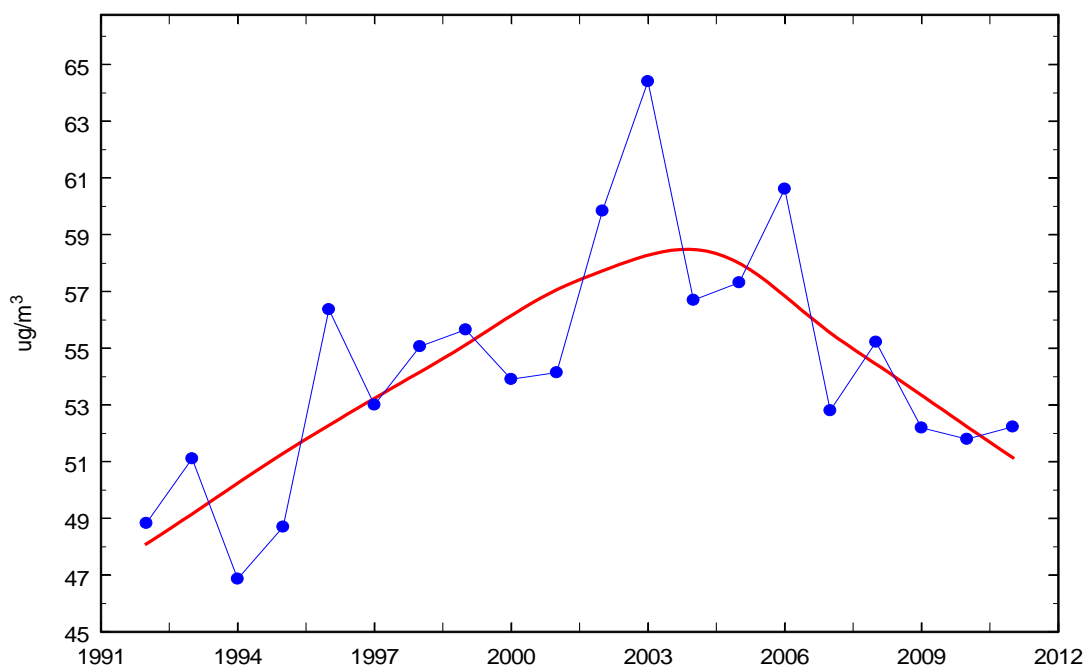
W roku 2011 wartości chwilowe stężeń ozonu były znacząco niższe od obserwowanych w ubiegłych latach. Maksymalne stężenie chwilowe ozonu (śr. 60-min) wyniosło $142 \mu\text{g}/\text{m}^3$ i zostało zmierzone w kwietniu. Wartości chwilowe stężeń



Rys. 2.2.2

ozonu przedstawiają rysunki dołączone do wydruku danych na końcu raportu. Średnie roczne stężenie ozonu w przyziemnej warstwie atmosfery w roku 2011 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 w połowie lat 90-tych. Jest to kolejny rok utrzymywania się niskich średnich rocznych stężeń ozonu i wydaje się, że może to być zmiana obserwowanego od kilkunastu lat długookresowego trendu wzrostowego stężeń ozonu w Belsku wynoszącego poprzednio średnio 2 % rocznie. Przebieg średnich rocznych stężeń ozonu w latach 1992-2011 przedstawia Rys. 2.2.3.

Średnie roczne stężenia ozonu Belsk 1992-2011



Wartości średnich miesięcznych wraz z wartościami maksymalnymi ozonu w roku 2011 przedstawia Tabela 2.2.1. Odchylenia średnich miesięcznych wartości stężeń ozonu przyziemnego w Belsku w roku 2011 od średnich z lat 1991-2010 przedstawia Rys. 2.2.2.

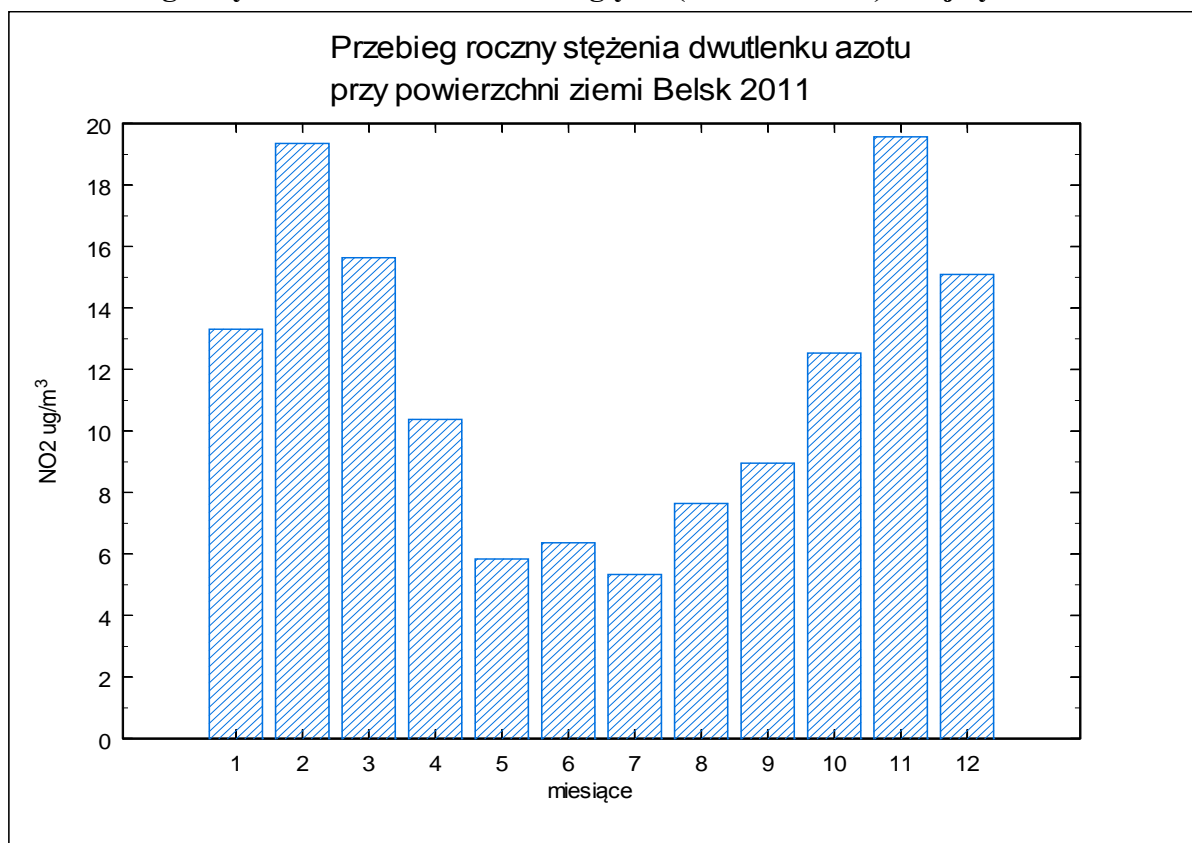
Rys. 2.2.3

Tabela 2.2.1 Średnie miesięczne i wartości maksymalne koncentracji ozonu w przyziemnej warstwie atmosfery w Belsku w roku 2011 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
śr.	39,3	52,5	66,8	75,7	74,1	69,3	52,7	55,8	50,1	36,9	24,3	29,3
Max.	80	95	128	142	133	129	114	118	124	115	73	64

Stężenie dwutlenku azotu w roku 2011 w Belsku osiągało podobne wartości jak w latach ubiegłych (od roku 2000), nieco niższe od tych w roku 2010. Podobnie jak w przypadku dwutlenku siarki wystąpił typowy kształt przebiegu sezonowych zmian stężeń NO_2 – najwyższe wartości w miesiącach jesienno-zimowych a najniższe w letnich. W przypadku 3 z 12 miesięcy odchylenie średniego miesięcznego stężenia NO_2 od średniej z lat 1995-2010 było znacząco dodatnie i sięgało 50-60%. W okresie od maja do września średnie miesięczne stężenia NO_2 pozostawały praktycznie na tym samym poziomie – (Rys. 2.2.4) ok. $6\text{-}8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ – wyższym o $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ niż w Rys. 2.2.4

analogicznym okresie w latach ubiegłych (od roku 2000). Najwyższe w roku

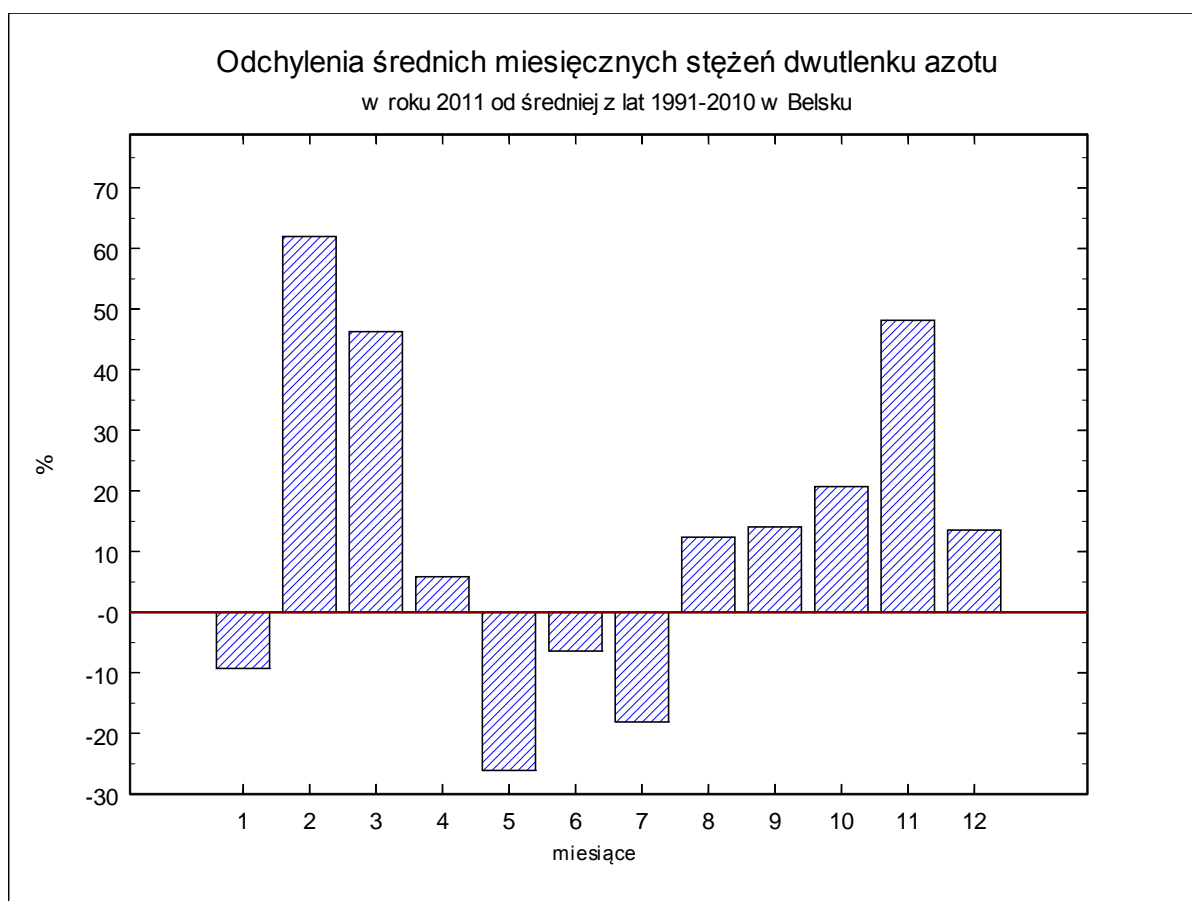


2011 średnie miesięczne stężenie dwutlenku azotu zmierzono w listopadzie ($19,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ – prawie takie samo jak w 2010 roku) a najniższe w lipcu ($5,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ – niższe niż w roku 2010 o ok. $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Przebieg średnich miesięcznych stężeń dwutlenku azotu w roku 2011 przedstawia Rys. 2.2.4, a odchyień od średnich stężeń z okresu 1995-2010 Rys. 2.2.5. Maksymalne wartości chwilowe dwutlenku azotu były wyższe od dotychczas występujących w całej

dotychczasowej serii pomiarowej (od 1995 roku). Wartość maksymalna – śr. 60-min wyniosła $89 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (w lutym).

Średnie roczne stężenie dwutlenku azotu w przyziemnej warstwie atmosfery w roku 2011 wyniosło $11,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ i było niższe o $0,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ niż zmierzone w roku 2010. Od roku 2000 obserwowany jest stopniowy wzrost średniorocznych stężeń NO_2 . Wartość z roku 2011, chociaż niższa od tej z roku 2010, była jedną z najwyższych od roku 1996.

Wartości chwilowe stężeń dwutlenku azotu w roku 2011 szczególnie w okresie zimowym (luty i marzec) odbiegały wysokością od obserwowanych w latach ubiegłych. Najwyższe stężenie chwilowe NO_2 wystąpiło w lutym i wyniosło $89 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Wartości chwilowe stężeń dwutlenku azotu przedstawiają rysunki dołączone do wydruku danych na końcu raportu. 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_2 w przyziemnej warstwie atmosfery w Belsku w roku 2011 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

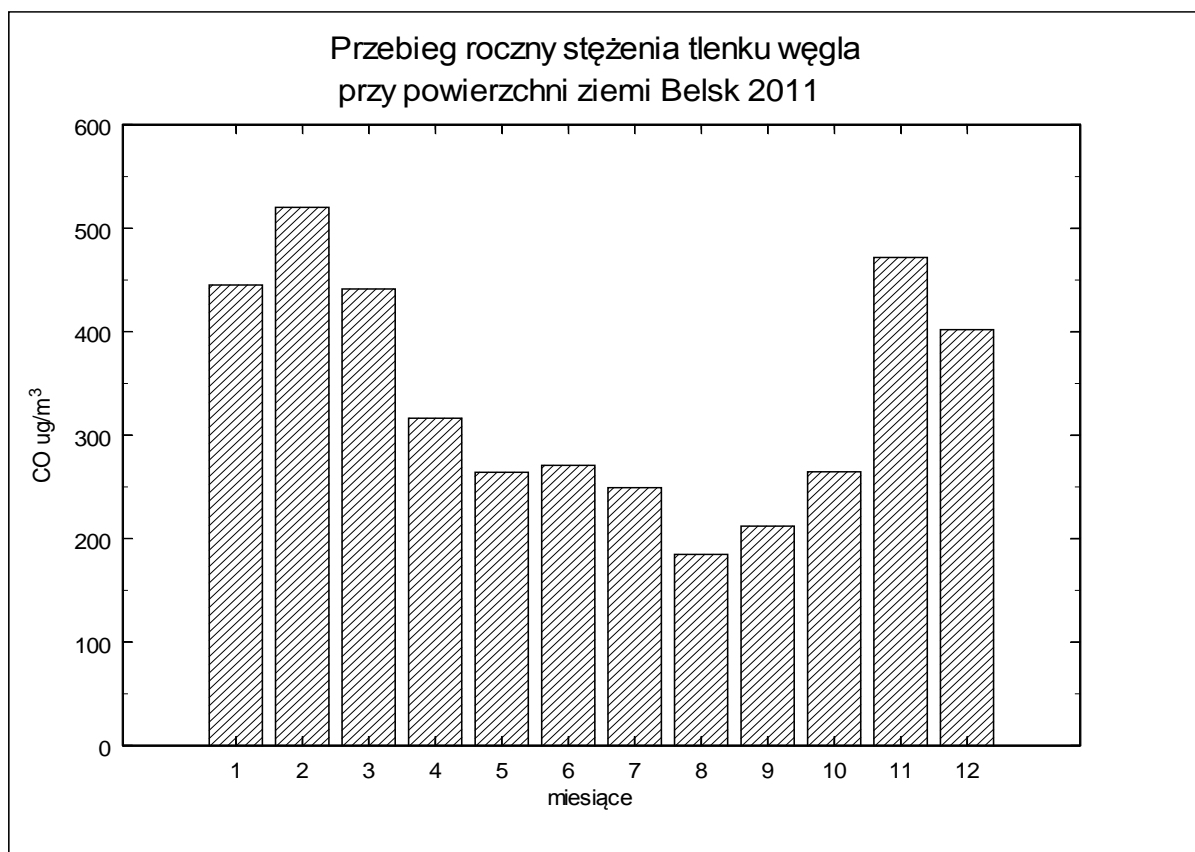
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
śr.	13,3	19,4	15,6	10,4	5,8	6,4	5,3	7,7	9,0	12,5	19,6	15,1
Max.	57	89	74	40	20	24	25	46	28	55	60	59

2.3. Tlenek Węgla

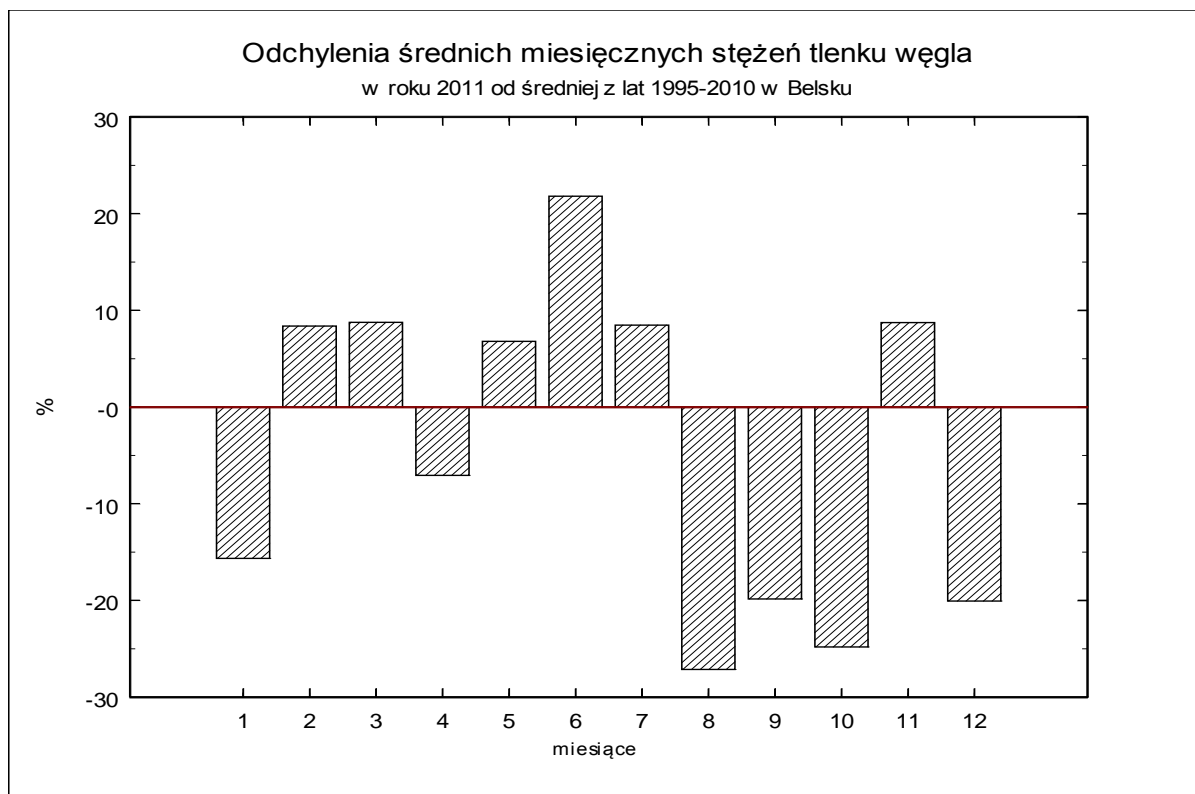
Janusz Jarosławski

W roku 2011 wykonywano w Belsku pomiary stężeń tlenu 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 tlenu 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 - 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 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.

W roku 2011 przebieg roczny stężenia CO charakteryzował się wyraźną zmiennością sezonową, z wartościami średniomiesięcznymi 200-300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dla miesięcy od kwietnia do października oraz 400-520 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ w pozostałych miesiącach. Odchylenia stężeń w stosunku do średniej wieloletniej były zmienne w ciągu roku, najwyższe odchylenia do ok. -25% obserwowano dla miesięcy od sierpnia do grudnia, a ok. 25% w czerwcu. (Rys. 2.3.2). Średnie roczne stężenie tlenu węgla było niższe od tego z roku 2010 i zbliżone do średniej wieloletniej - wyniosło 337 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Warto podkreślić, że podobny spadek w stosunku do roku 2010 zaobserwowano w stężeniach dwutlenku azotu i dwutlenku siarki. Najwyższe wartości chwilowe stężeń tlenu węgla (średnie 60-min) zmierzono w listopadzie (patrz Tabela 2.3.1). Maksymalne stężenie chwilowe w roku wyniosło 1613 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ było o 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ niższe od maksymalnych wartości z roku 2010. Przebieg roczny stężenia CO w Belsku w roku 2011 (średnie miesięczne) przedstawia Rys 2.3.1, a wartości średnich miesięcznych i chwilowych wartości maksymalnych przedstawia Tabela 2.3.1



Rys.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 2011 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
śr.	445	520	441	316	264	271	250	185	212	265	472	402
max	1251	1557	1181	828	983	798	681	873	680	918	1613	1254

Wybrane wyniki pomiarów stężeń zanieczyszczeń powietrza w roku 2011 (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 ₂	O ₃	NO ₂	CO
Kompletność serii pomiarowej	%	96%	99%	96%	92%
Percentyle z serii pomiarowej	S10	1,7	19,8	3,5	103,0
	S50	4,4	49,5	9,0	311,0
	S90	14,3	88,0	23,7	636,0
	S98	28,9	110,5	38,6	911,8
	S99,8	54,9	130,3	58,0	1273,6
Wartość najwyższa	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	96,1	142,4	88,8	1613,0
Liczba wyników pomiarów		0	0	0	0

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

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

Parametr	Jednostki	O ₃	CO
Kompletność serii pomiarowej	%	99%	93%
Percentyle z serii pomiarowej	S ₁₀	21,1	114,2
	S ₅₀	50,3	312,1
	S ₉₀	84,5	626,6
	S ₉₈	103,8	876,7
	S _{99,8}	120,5	1233,9
Wartość najwyższa	µg/m ³	133,0	1641,1
Liczba wyników pomiarów przewyższających wartość dopuszczalną		20	0
Wartość wskaźnika ozonowego AOT 40 µg/m ³ *godz		9637	

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 2011 i w latach poprzednich

Barbara Kopcewicz

Jak wiadomo, ozon powstaje w procesach fotochemicznych, na drodze utleniania tlenków azotu (NO_x) i lotnych związków organicznych (VOC) i wykazuje nieliniową zależność od ich koncentracji. W celu zrationalizowania 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_x i prawie nie

zależy od VOC, w innych zaś, produkcja ozonu rośnie wraz ze wzrostem VOC i nie zależy od koncentracji NO_x (a czasami nawet zmniejsza się). Jest konieczne określenie dla każdego obszaru oddzielnie rodzaju zależności od NO_x i VOC, a także innych związków chemicznych mających wpływ na stan zanieczyszczenia atmosfery.

Nieliniowa zależność O₃ od NO_x przejawia się w tym, że w zależności od tego czy jesteśmy w obszarze wysokiego NO_x czy niskiego NO_x, wzrost emisji NO_x ogranicza produkcję O₃, lub, odpowiednio, promuje powstawanie O₃. Obszary wysokiego NO_x i niskiego NO_x są definiowane nie poprzez bezwzględną wartość emisji NO_x (ENox) ale poprzez względną wielkość produkcji rodników (S) i emisji NO_x. Jeżeli $S > ENox$ to mamy do czynienia z obszarem niskiego NO_x, natomiast w przypadku gdy $S < ENox$, mamy do czynienia z obszarem wysokiego NO_x. Przebieg reakcji chemicznych w troposferze i wynikający z tego jej stan chemiczny zależy, przy tym samym poziomie emisji NO_x, 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 w maju 2011 roku z przebiegiem dobowym koncentracji O₃ (a) i NO_x (b) dla dwóch dni, przy czystym niebie ($G/G_0=73\%$) oraz zachmurzonym ($G/G_0=7\%$). Wskaźnikiem braku chmur jest stosunek obserwowanego natężenia globalnego promieniowania przy powierzchni ziemi, G, do wielkości tego promieniowania na granicy atmosfery ziemskiej, G₀. 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_x źródło wolnych rodników jest niewystarczające by reagować i usunąć całe NO_x i dla $G/G_0 = 7\%$ koncentracja NO_x w ciągu dnia jest większa niż dla $G/G_0 = 73\%$. Jeżeli atmosfera znajduje się w obszarze niskiego NO_x ($G/G_0 = 73\%$) (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

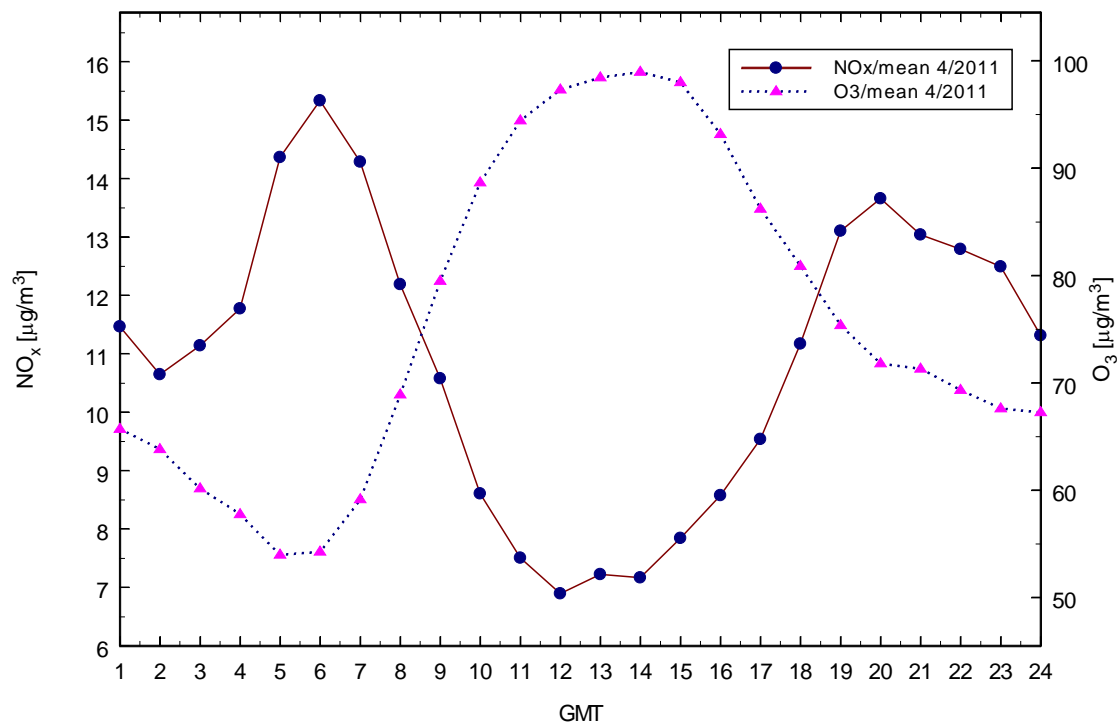
maksimum w koncentracji NO w godzinach porannych, spowodowane wzrostem intensywności czynników antropogenicznych (poranny szczyt w ruchu samochodowym). Wydajność produkcji ozonu w troposferze, przy założeniu wysokiej produkcji rodników (S), zależy w istotny sposób od koncentracji NO - w przypadku wysokiej koncentracji przeważa reakcja rodników HO₂ z NO, w wyniku powstaje NO₂, a to z kolei prowadzi do wzrostu NO_x a w konsekwencji do wzrostu O₃ (Rys. 2.4.1.d). W przypadku niskiej koncentracji NO większą rolę odgrywa reakcja konkurencyjna HO₂ z O₃, w wyniku której obserwowany jest rozpad ozonu.

Rysunki 2.4.2.a i 2.4.2.b przedstawiają, odpowiednio, średnie miesięczne zmiany dobowe ozonu w sezonie letnim (sierpień) i zimowym (grudzień) w okresie od 1996 do 2011 roku. W okresie tym 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 nieznacznej zmienności dobowej są bardzo duże (Rys. 2.4.2.b). Porównując wyniki pomiarów ozonu przyziemnego rejestrowanych w 2011 roku z wartościami otrzymywanymi w latach 1996 – 2010 stwierdzono, że w sierpniu 2011 roku średnie miesięczne wartości koncentracji ozonu przyziemnego były jedne z najniższych. W roku 2011 średni miesięczny przebieg dobowy był najwyższy w kwietniu i maju (Rys. 2.4.3.a). Rysunek 2.4.3 b przedstawia maksymalne średnie miesięczne przebiegi dobowe koncentracji ozonu w latach 1996 – 2011. W poszczególnych latach maksymalne wartości obserwowane były w różnych miesiącach. Najwyższą, wyjątkowo wysoką koncentrację ozonu przyziemnego zarejestrowano w sierpniu 2002 roku. W 2011 roku maksymalna wartość koncentracji ozonu była rejestrowana w kwietniu i była ona jedną z niższych wartości rejestrowanych w latach poprzednich. Z dobowych przebiegów koncentracji ozonu rejestrowanych w latach 1996 – 2011 (Rys. 2.4.3 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. a przedstawia średnie miesięczne zmiany dobowe ozonu w kwietniu w okresie od 1996 do 2011 roku. Najwyższa, wyjątkowo wysoka koncentracja ozonu przyziemnego była zarejestrowana w 2009 roku. Towarzyszyła temu wysoka wartość dwutlenku azotu (Rys. 2.4.4.b). W 2011 roku koncentracja ozonu w

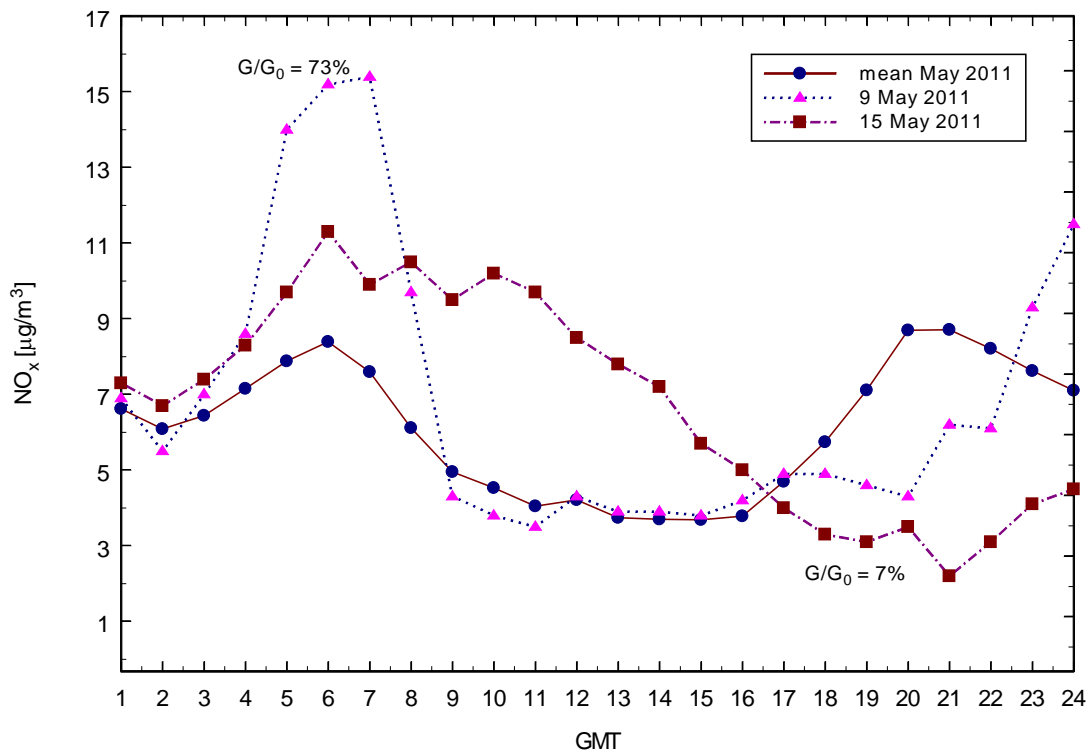
kwietniu była niższa niż maksymalne wartości obserwowane w tym miesiącu w latach poprzednich.

Rysunki 2.4.5 i 2.4.6 przedstawiają średnie miesięczne zmiany dobowe NO₂, NO, CO oraz SO₂, odpowiednio w sezonie letnim (sierpień) i zimowym (grudzień), w okresie od 2004 do 2011 roku.

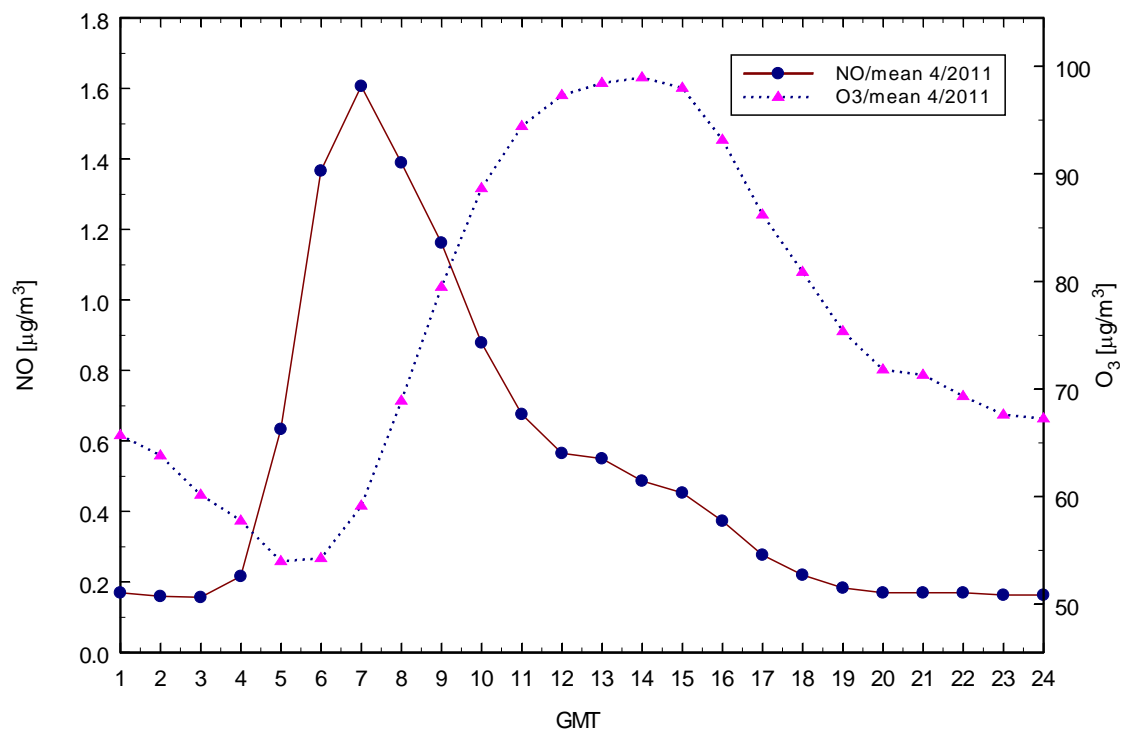
Przebiegi dobowe NO₂ są, zgodnie z przewidywaniami teoretycznymi, ujemnie skorelowane z przebiegami dobowymi ozonu wykazując niemal dwukrotnie większą amplitudę zmian z roku na rok w zimie niż w lecie (Rys 2.4.5 a i 2.4.6 a). Rysunki 2.4.5 b oraz 2.4.6 b przedstawiają przebiegi koncentracji NO. W średnich przebiegach dobowych latem powtarza się, na tle wyrównanych niskich stężeń w ciągu dnia, występowanie maksimum w godzinach rannych 7 GMT. (Rys. 2.4.5.b). Zimą (Rys. 2.4.6b) maksima nie są tak ostre jak latem, występują około dwie godziny później (10 GMT), również wieczorem. Przebiegi dobowe tlenku węgla wykazują dość regularny przebieg w miesiącach zimowych (podwójne maksimum – rano i w nocy) oraz brak zmienności dobowej w lecie (Rys. 2.4.5.c, 2.4.6.c oraz Rys.2.4.7.a). Odwrotna sytuacja zachodzi w przypadku zmienności dobowej dwutlenku siarki – w okresie letnim mamy tu do czynienia z maksimum występującym w godzinach przedpołudniowych (Rys. 2.4.5.d) oraz z brakiem wyraźnej zmienności dobowej w okresie zimowym (Rys. 2.4.6.d oraz Rys. 2.4.7.b). W roku 2011 zaobserwowano spadek koncentracji CO i SO₂ w sezonie zimowym w stosunku do wartości rejestrowanych w 2010 roku (Rys. 2.4.6.c oraz 2.4.6.d). Koncentracja tlenku węgla oraz dwutlenku siarki również w sezonie letnim była niższa od tej rejestrowanej w 2010 roku. Koncentracje dwutlenku siarki i tlenku węgla w 2011 roku, zarówno w sezonie letnim i zimowym, miały wartość jedną z najniższych jakie obserwowano w Belsku w okresie pomiarowym od 1996 roku. Rysunki 2.4.7 (a, b, c, d,e) przedstawiają zmiany dobowe koncentracji, odpowiednio, CO, SO₂, NO, NO₂ oraz NO_x w poszczególnych miesiącach 2011 roku.



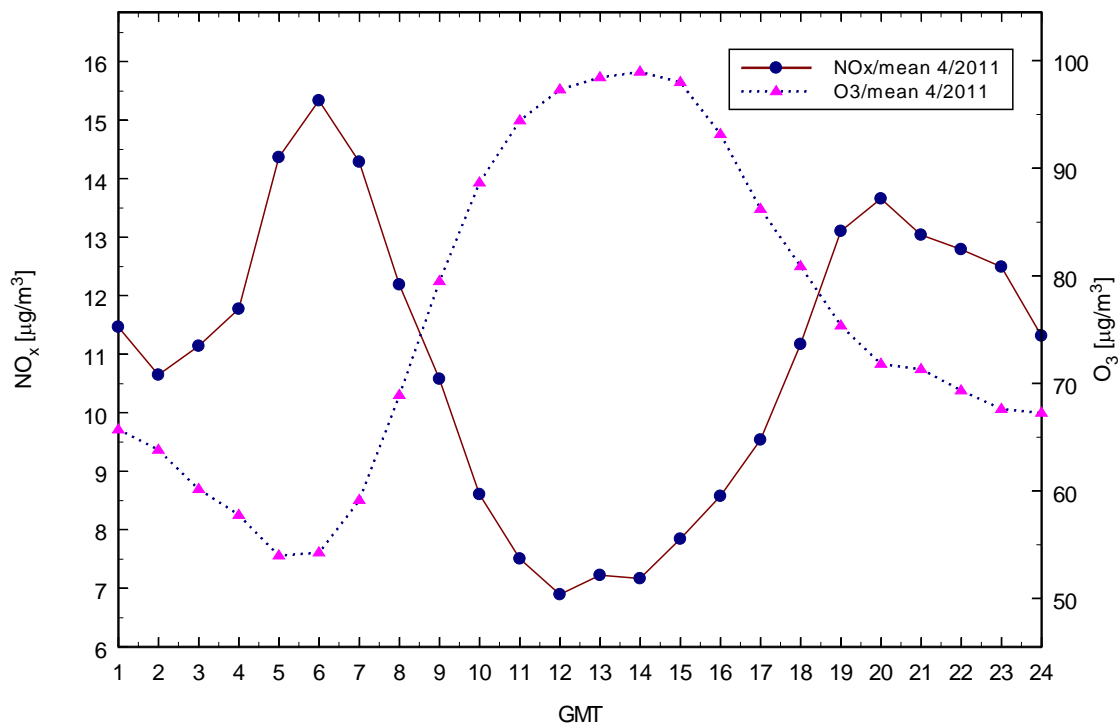
Rys.2.4.1.(a) Średni przebieg dobowy O₃ i NO_x w maju 2011



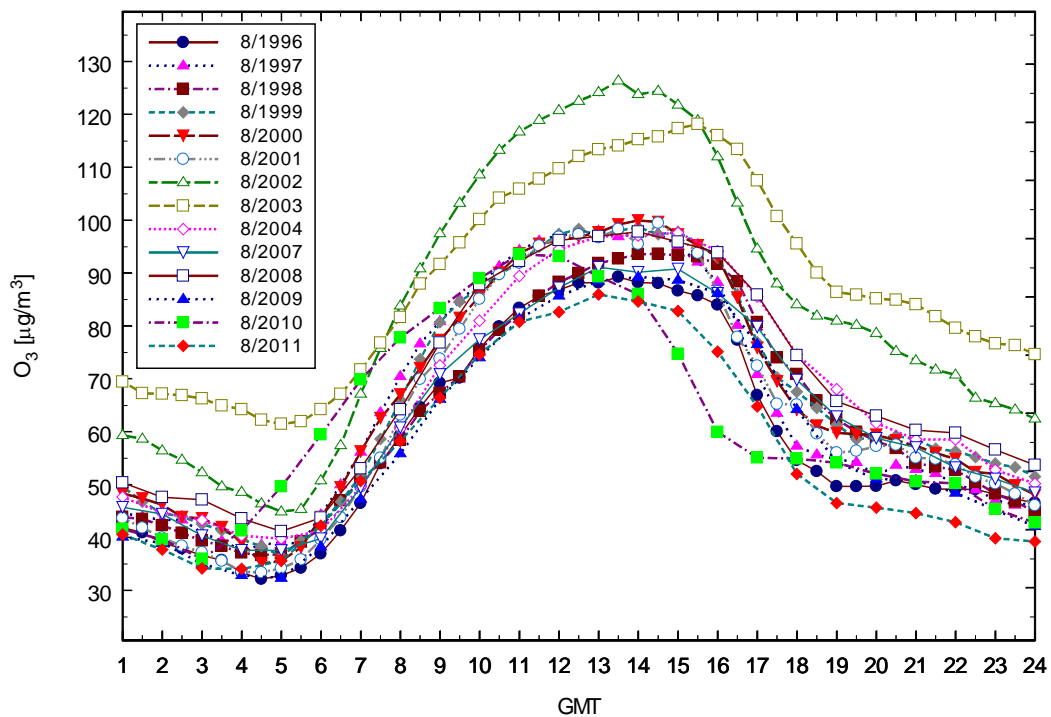
Rys. 2.4.1.(b) Przykłady przebiegów dobowych NO_x przy czystym i zachmurzonym niebie



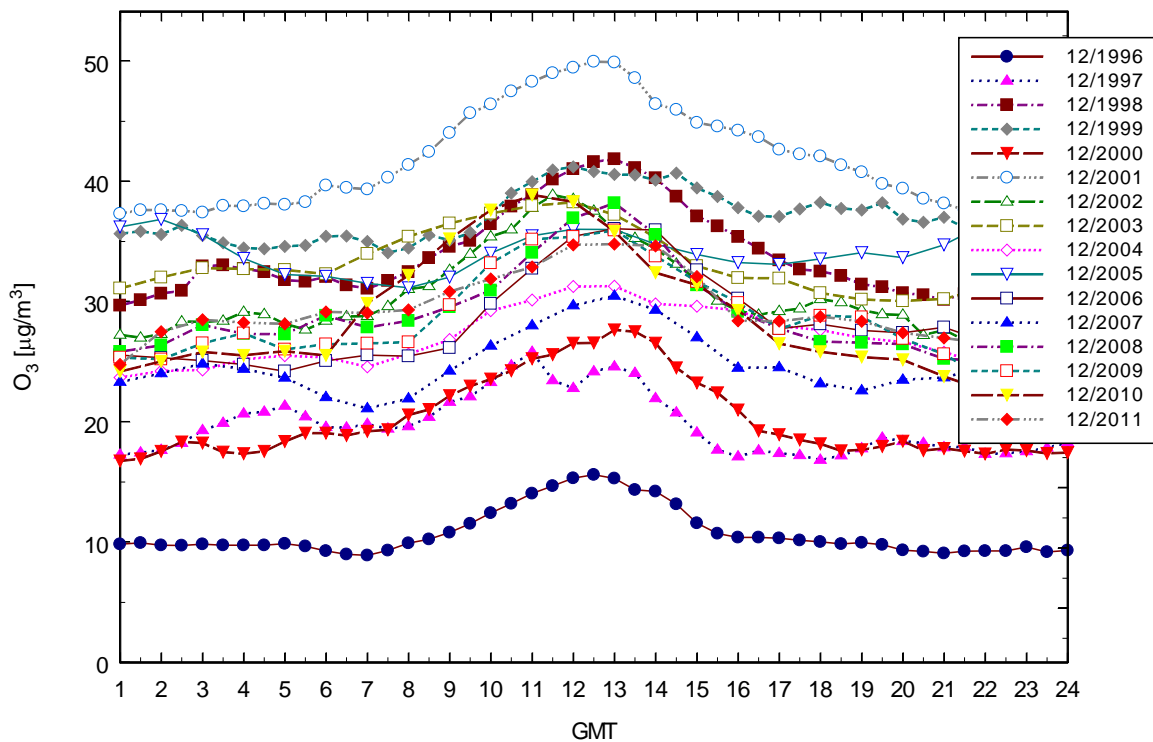
Rys. 2.4.1. (c) Średni przebieg dobowy O₃ i NO w kwietniu 2011



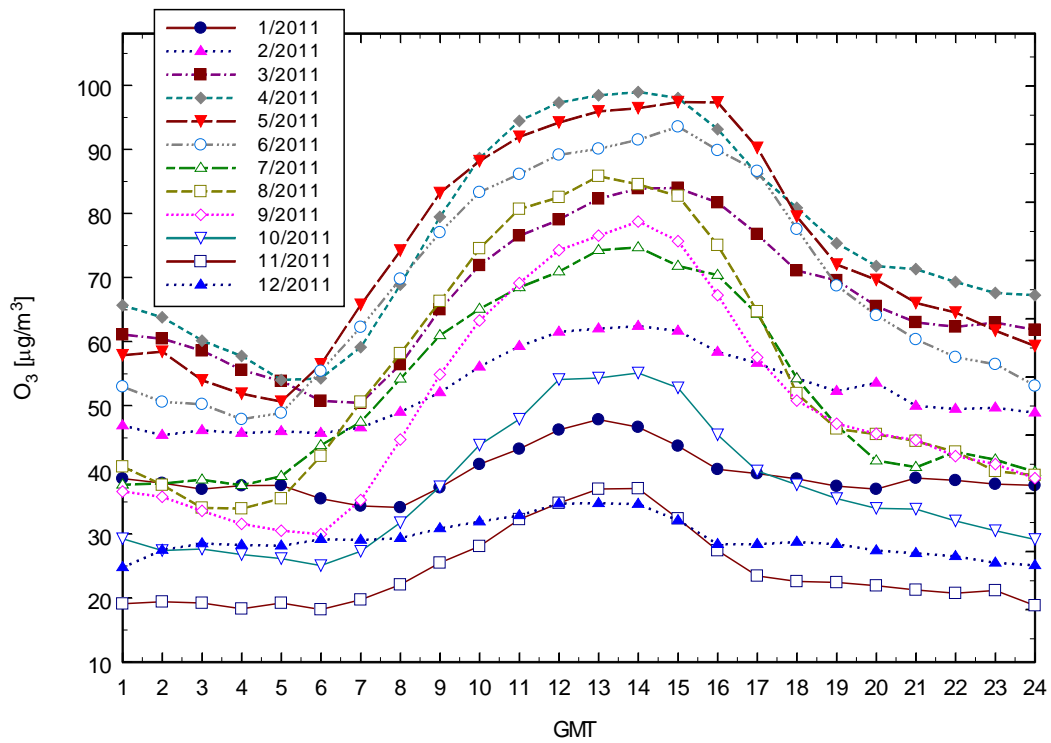
Rys. 2.4.1. (d) Średni przebieg dobowy O₃ i NO_x w kwietniu 2011



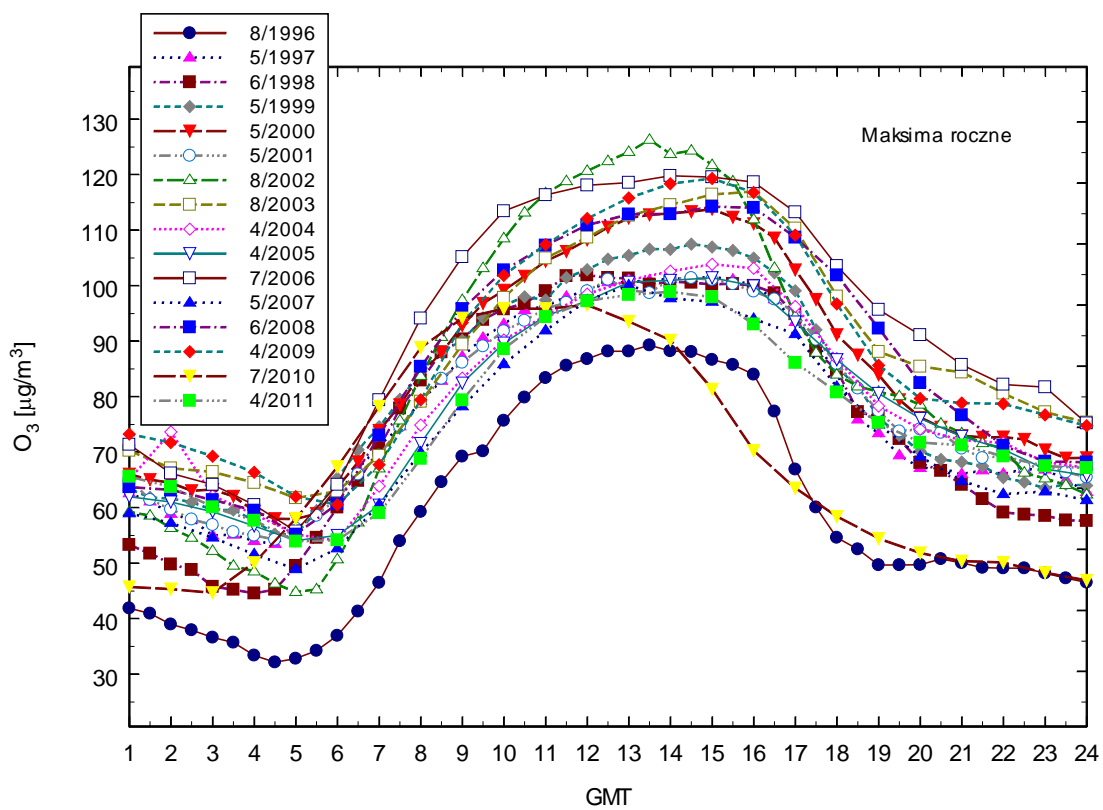
Rys. 2.4.2 (a) Średni przebieg dobowy O_3 w sierpniu w latach 1996-2011



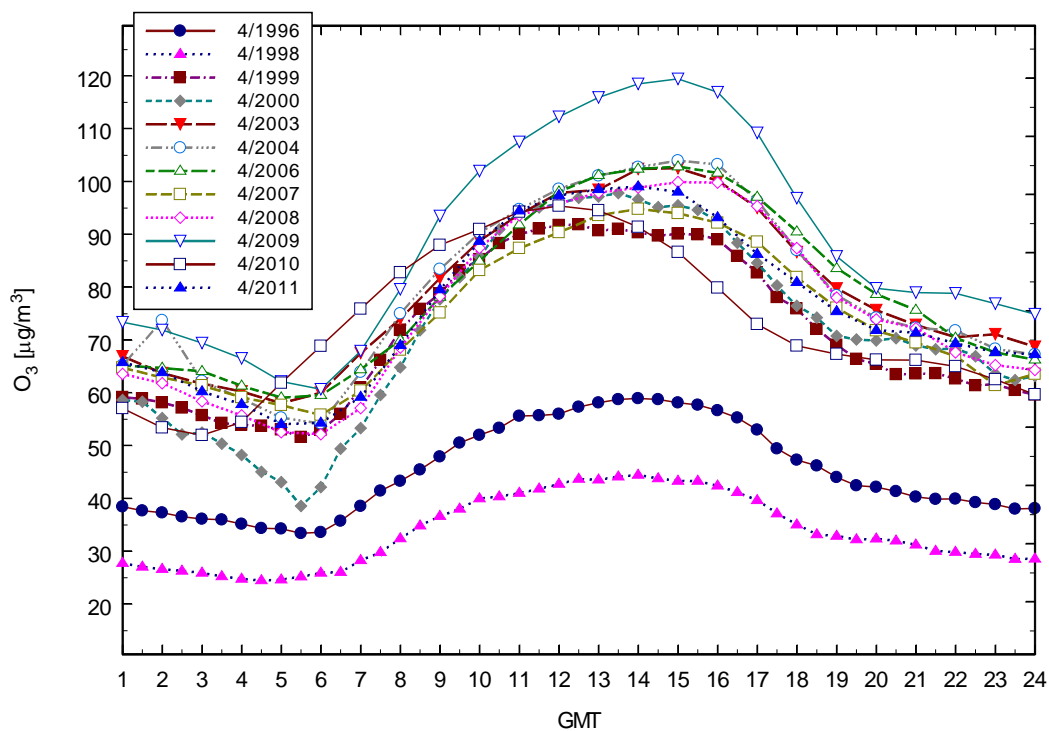
Rys. 2.4.2 (b) Średni przebieg dobowy O_3 w grudniu w latach 1996-2011



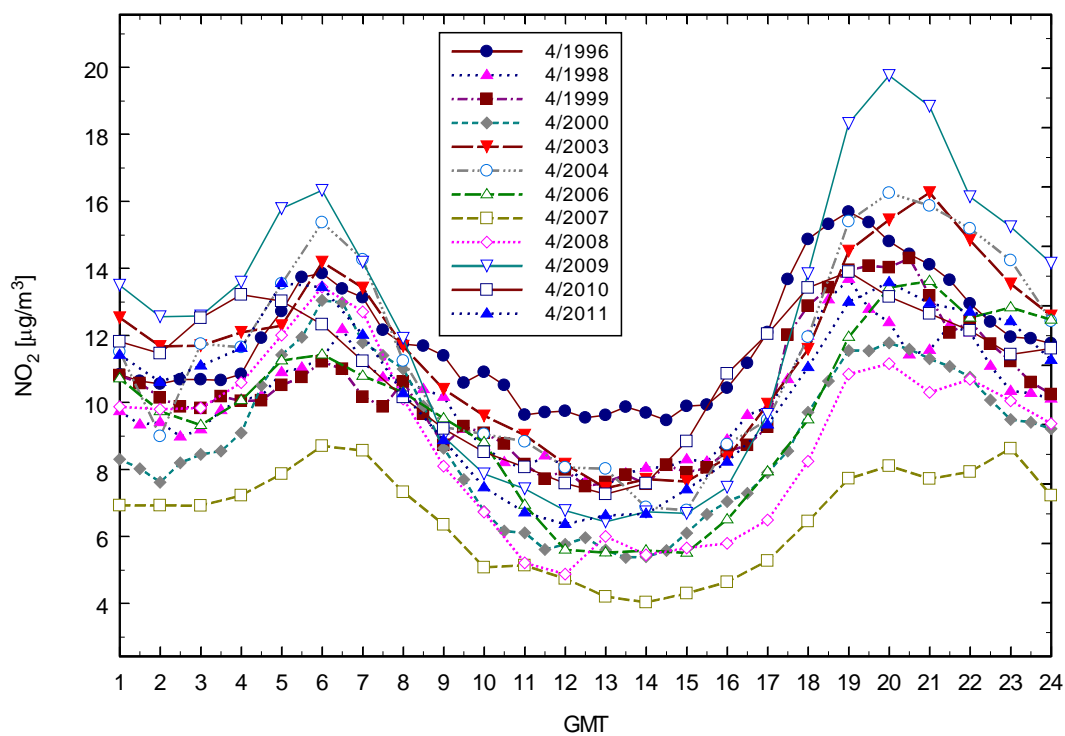
Rys. 2.4.3 (a) Średni przebieg dobowy O₃ w poszczególnych miesiącach 2011



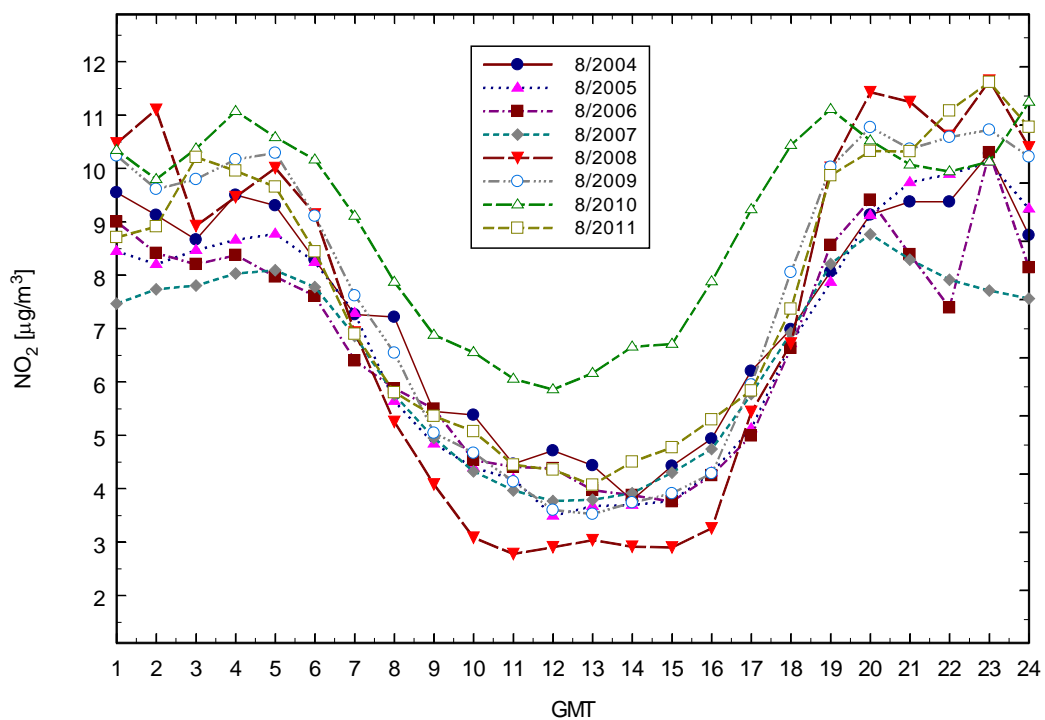
Rys. 2.4.3 (b)) Średnie przebiegi dobowe O_3 w miesiącach max. roczne w latach 1996-2011



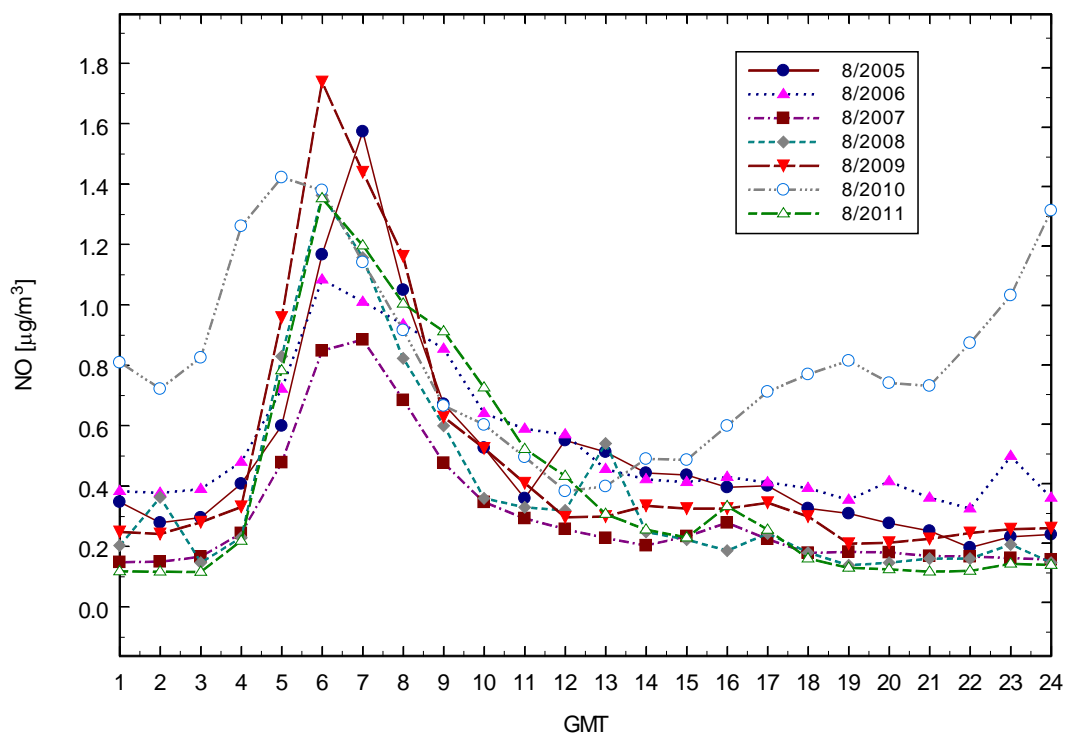
Rys. 2.4.4 (a) Średni przebiegi dobowe O₃ w kwietniu w latach 1996-2011



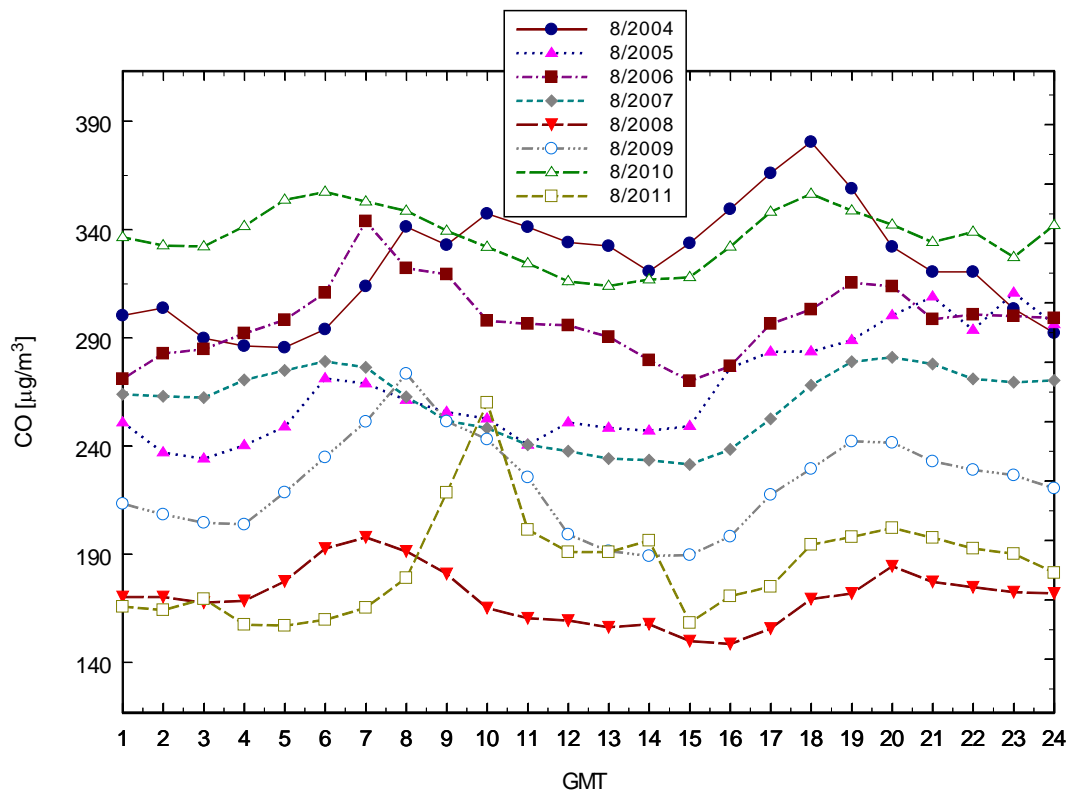
Rys. 2.4.4. (b) Średnie przebiegi dobowe NO₂ w kwietniu w latach 1996-2011



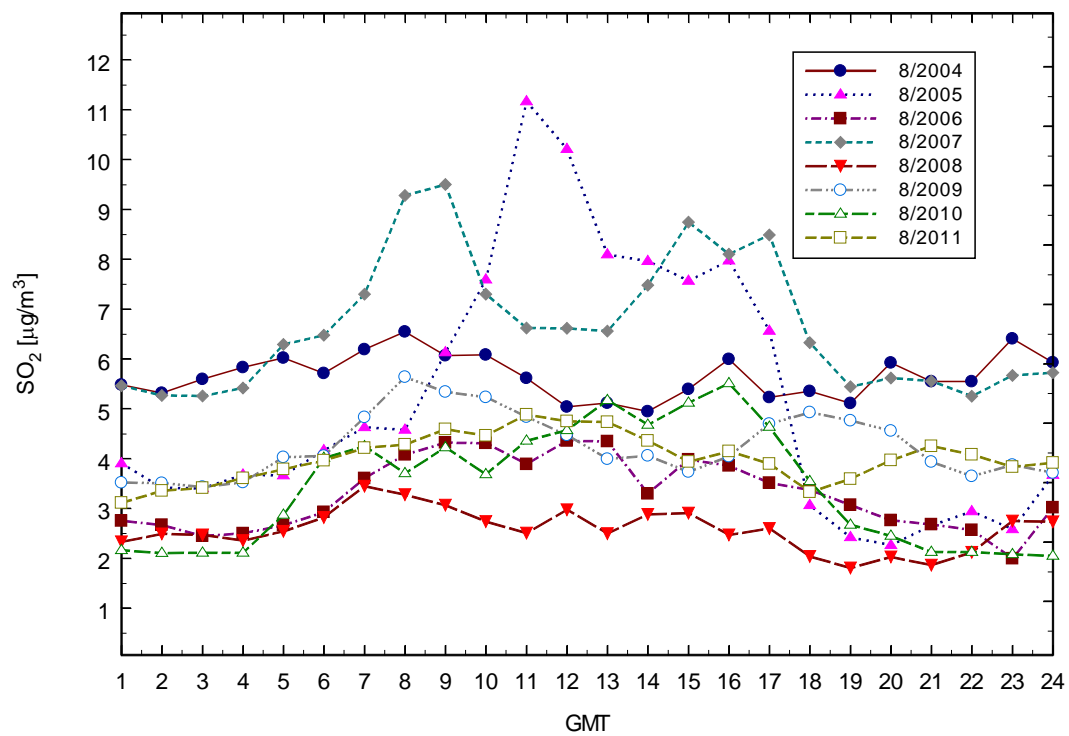
Rys. 2.4.5 (a) Średnie przebiegi dobowe NO₂ w sierpniu w latach 2004-2011



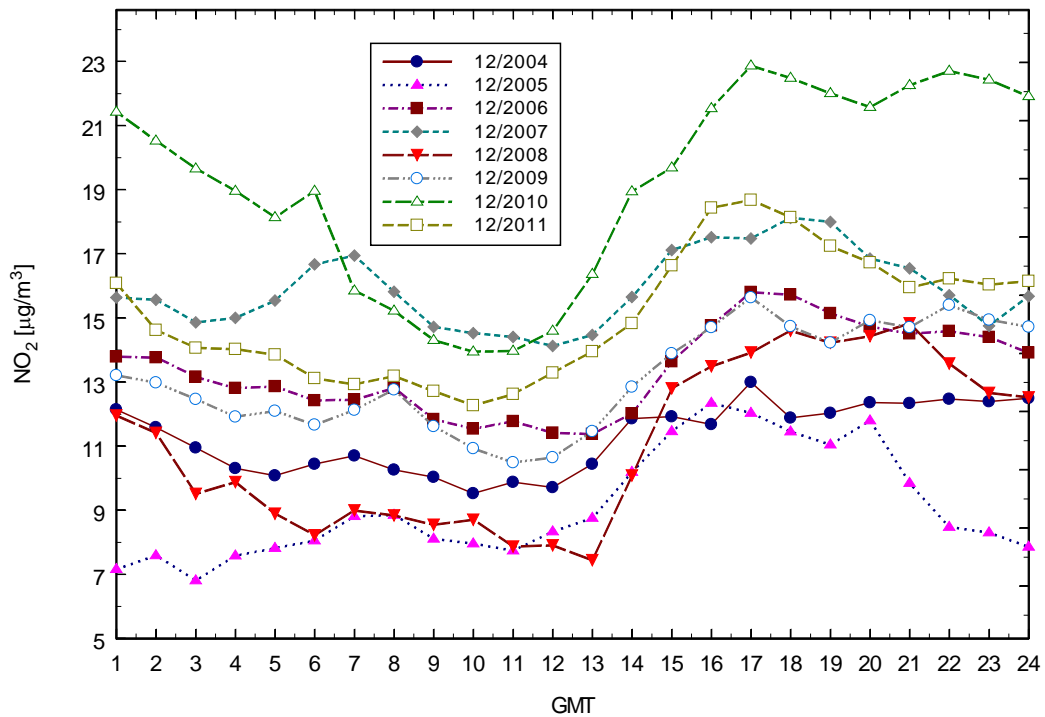
Rys. 2.4.5 (b) Średnie przebiegi dobowe NO w sierpniu w latach 2004-2011



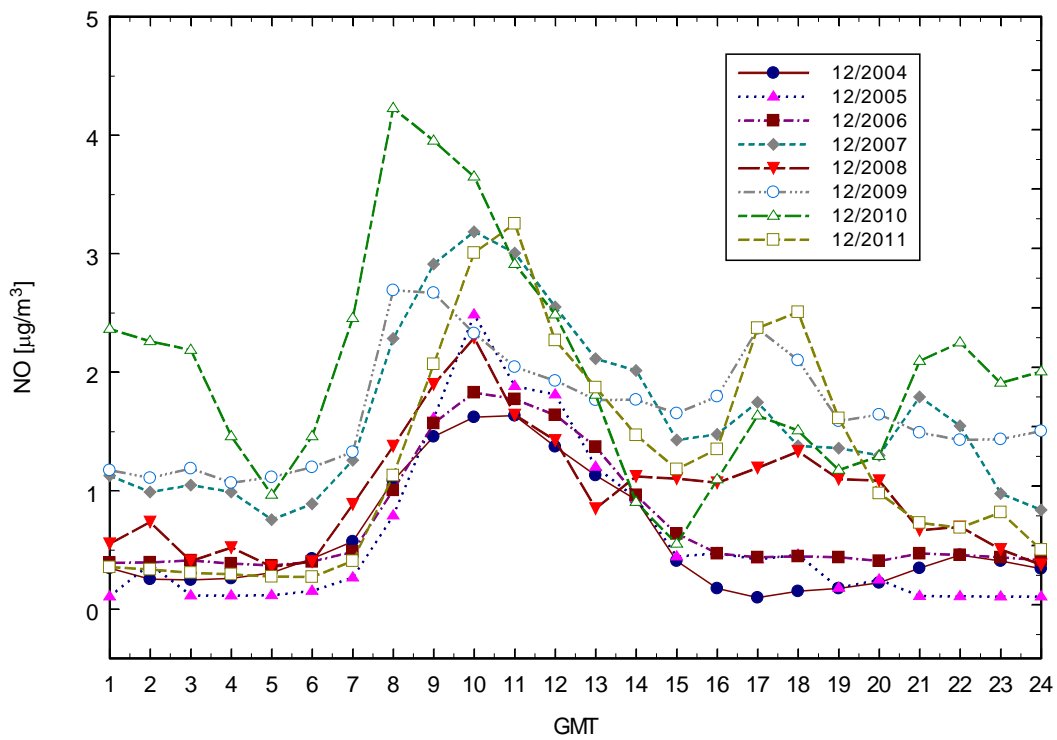
Rys. 2.4.5 (c) Średnie przebiegi dobowe CO w sierpniu w latach 2004-2011

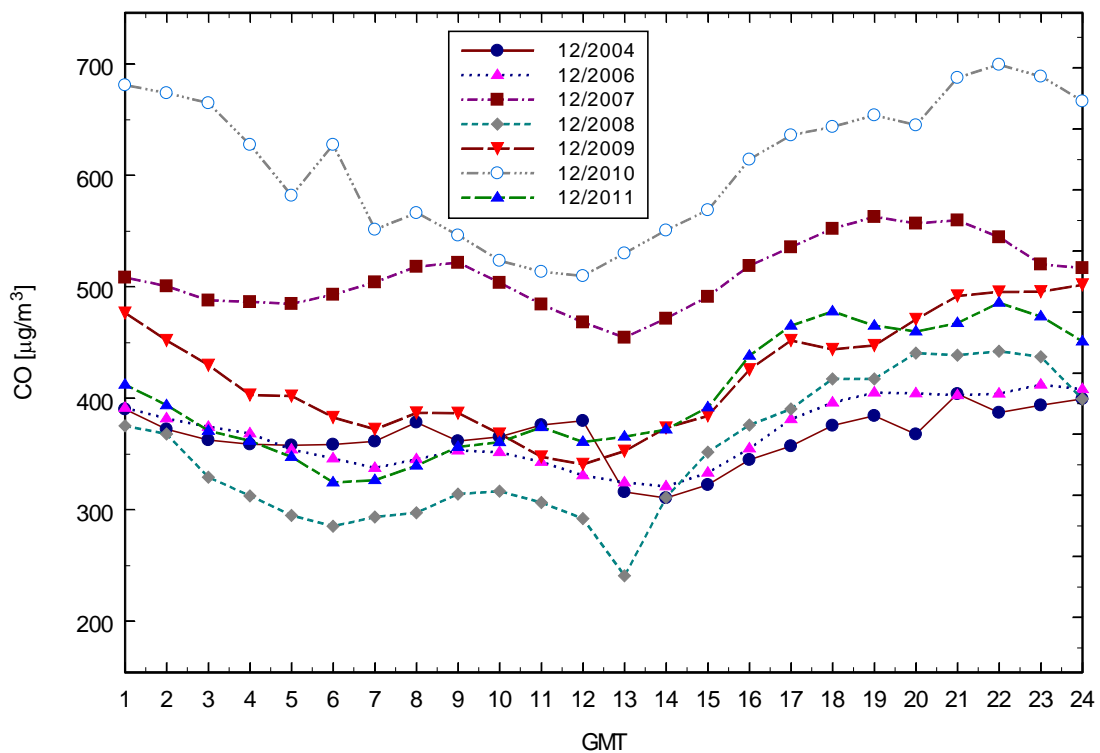


Rys. 2.4.5 (d)) Średnie przebiegi dobowe SO₂ w sierpniu w latach 2004-2011



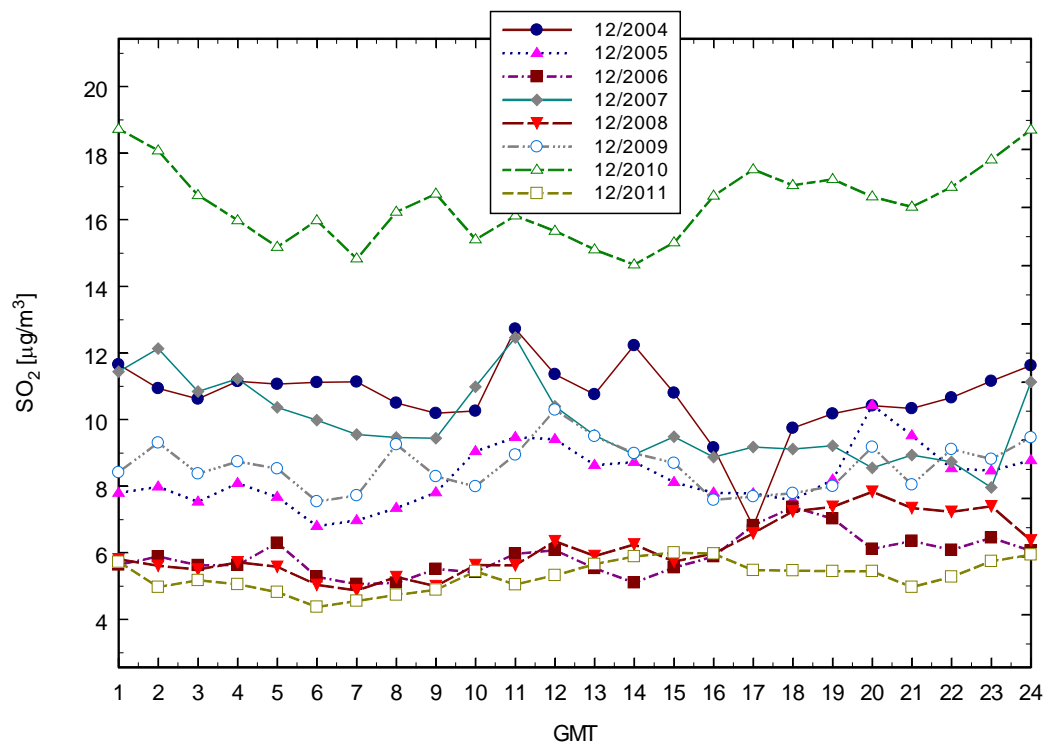
Rys. 2.4.6 (a) Średnie przebiegi dobowe NO₂ w grudniu w latach 2004-2011



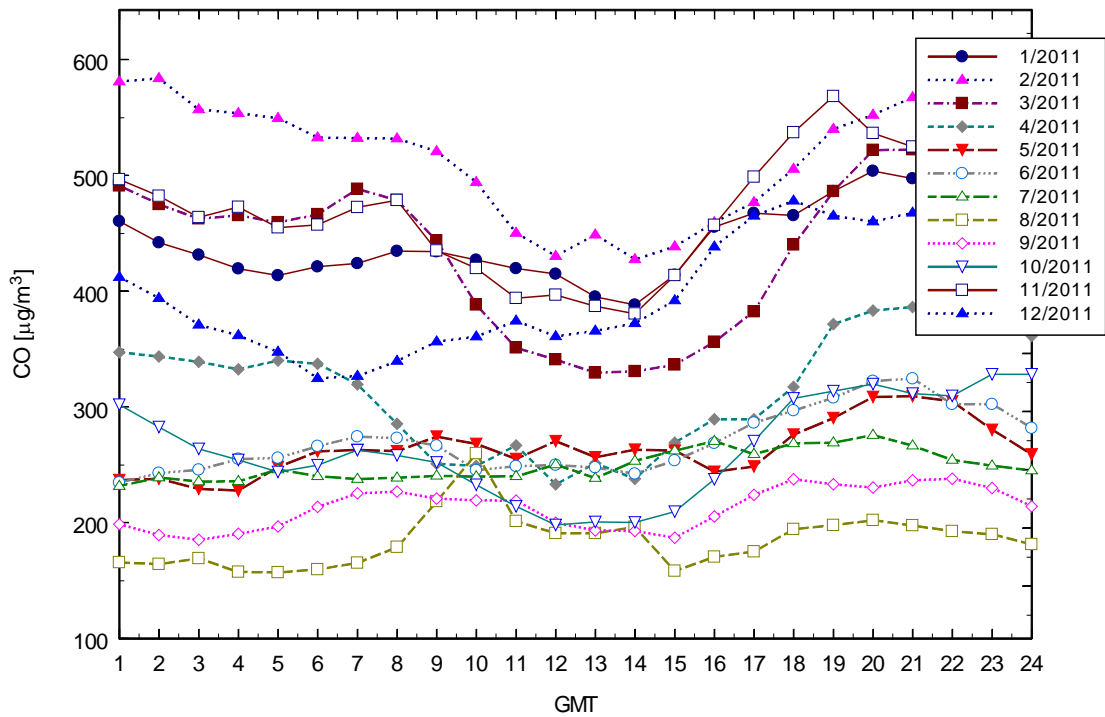


Rys. 2.4.6 (b)) Średnie przebiegi dobowe NO w grudniu w latach 2004-2011

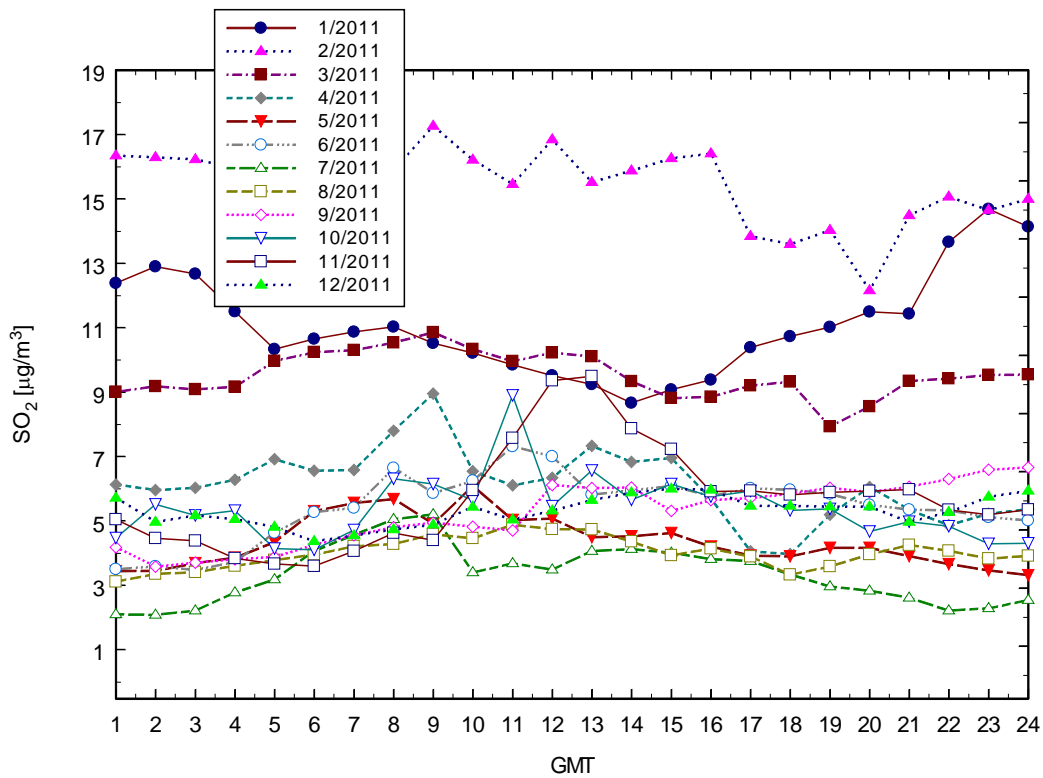
Rys. 2.4.6 (c)) Średnie przebiegi dobowe CO w grudniu w latach 2004-2011



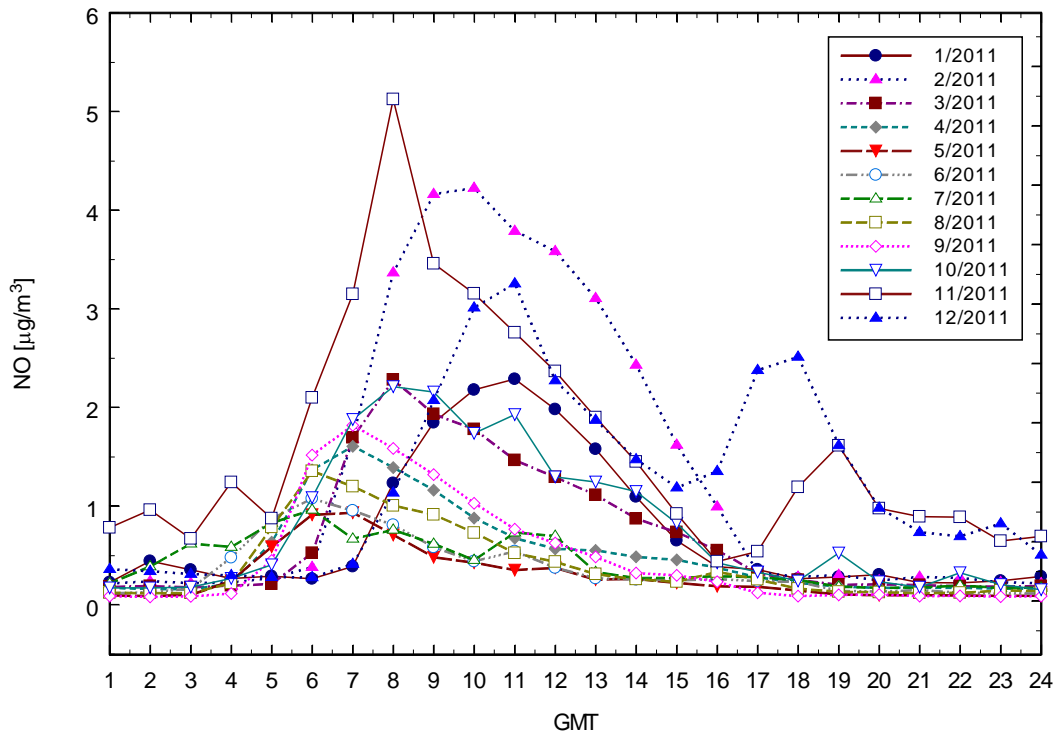
Rys. 2.4.6. (d) Średnie przebiegi dobowe SO₂ w grudniu w latach 2004-2011



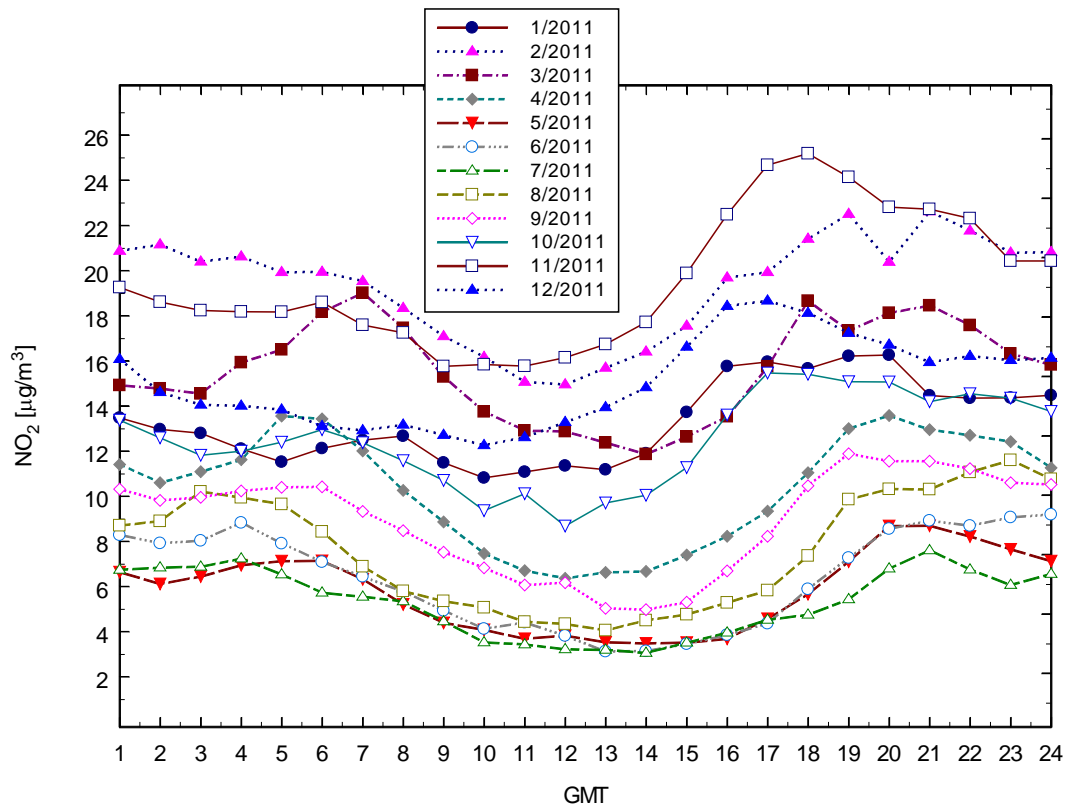
Rys. 2.4.7 (a) Średnie przebiegi dobowe CO w poszczególnych miesiącach 2011



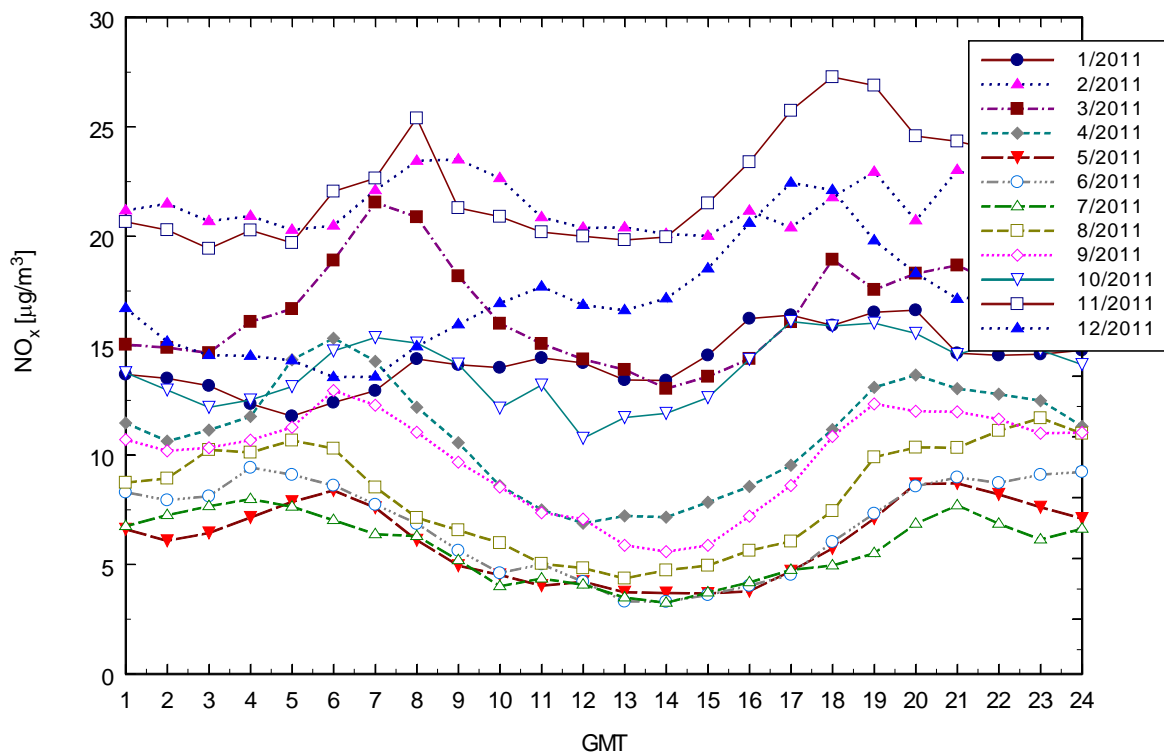
Rys. 2.4.7 (b)) Średnie przebiegi dobowe SO₂ w poszczególnych miesiącach 2011



Rys. 2.4.7 (c)) Średnie przebiegi dobowe NO w poszczególnych miesiącach 2011



Rys. 2.4.7 (d)) Średnie przebiegi dobowe NO₂ w poszczególnych miesiącach 2011



Rys. 2.4.7 (e)) Średnie przebiegi dobowe NO_x w poszczególnych miesiącach 2011

3. Nadfioletowe promieniowanie słoneczne UV-B

Aleksander Pietruczuk, Jerzy Podgórski, Piotr Sobolewski

W roku 2011 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 na zapewnienie ciągłości pomiarów i równoczesnej kalibracji i konserwacji przyrządów.

Wyniki pomiarów dokonanych w roku 2011 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 [W/m^2] zmierzonej danego dnia i czynnika 40 [m^2/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 2011

Miesiąc	I		II		III	
Dzień	UV - B [MED]	Indeks UV	UV - B [MED]	Indeks UV	UV - B [MED]	Indeks UV
1	0.3	0.2	0.5	0.5	3.8	1.8
2	0.3	0.3	0.6	0.4	3.3	1.6
3	0.3	0.2	1.0	0.8	3.7	1.7
4	0.6	0.4	0.9	0.6	3.3	1.6
5	0.6	0.3	0.5	0.4	1.9	1.5
6	0.8	0.4	0.9	0.5	2.4	1.5
7	0.4	0.3	0.5	0.3	3.2	1.6
8	0.5	0.3	1.0	0.6	3.4	1.7
9	0.6	0.4	1.1	0.6	4.0	1.8
10	0.4	0.2	1.6	0.9	1.7	1.1
11	0.2	0.1	0.3	0.2	3.2	1.8
12	0.3	0.3	1.2	0.9	4.4	2.0
13	0.2	0.1	1.8	1.0	4.3	2.0
14	0.3	0.2	1.9	1.0	4.2	2.0
15	0.1	0.1	1.9	1.0	1.8	1.0
16	0.4	0.3	1.6	0.9	3.3	1.8
17	0.5	0.3	1.2	0.6	2.4	1.4
18	0.4	0.4	1.0	0.5	1.0	0.5
19	0.3	0.3	1.0	0.5	1.6	1.4
20	0.5	0.3	2.4	1.2	3.8	2.5
21	0.4	0.3	2.7	1.3	4.4	2.3
22	0.5	0.2	2.0	1.0	5.1	2.4
23	0.5	0.4	1.7	0.9	5.4	2.4
24	0.8	0.4	2.2	1.0	4.3	2.9
25	0.5	0.3	2.7	1.3	3.4	3.3
26	0.9	0.5	2.3	1.3	5.0	2.7
27	0.3	0.3	2.4	1.3	6.5	3.1
28	0.9	0.5	3.4	1.6	7.0	3.1
29	1.1	0.5	0.0	0.0	7.5	3.3
30	1.1	0.8			8.3	3.6
31	0.8	0.4			7.0	2.9
Średnia	0.51	0.3	1.46	0.8	4.02	2.1
Odch. od śr. wieloletniej	-16%		6%		17%	

Miesiąc	IV		V		VI	
Dzień	UV - B [MED]	Indeks UV	UV - B [MED]	Indeks UV	UV - B [MED]	Indeks UV
1	5.1	3.0	4.5	2.5	13.6	5.5
2	7.0	3.3	6.6	2.8	14.5	5.5
3	8.1	3.4	4.1	1.9	18.0	6.1
4	6.5	3.1	11.9	4.8	18.7	6.9
5	6.6	3.2	7.7	4.1	18.9	6.8
6	5.5	2.8	9.6	4.3	17.3	6.1
7	4.4	3.2	8.0	4.6	9.7	4.6
8	5.4	3.8	12.5	5.1	13.0	5.8
9	4.0	2.6	14.4	5.2	8.5	5.4
10	5.4	4.1	14.1	5.3	3.4	1.5
11	5.1	2.8	14.5	5.3	16.0	6.0
12	9.6	4.8	13.6	5.3	12.3	5.8
13	4.2	2.7	7.4	4.3	16.7	5.8
14	6.7	4.0	12.3	5.4	12.1	5.7
15	0.0	3.9	1.8	1.2	14.1	6.1
16	12.7	5.5	11.2	5.1	12.6	5.6
17	6.0	2.6	7.9	4.2	9.3	5.9
18	11.1	4.5	11.9	5.5	9.4	4.8
19	11.8	4.5	14.3	5.2	9.7	4.5
20	12.2	4.6	13.5	5.2	7.4	5.7
21	10.8	4.2	14.0	5.0	13.5	6.5
22	10.4	4.1	11.9	5.3	16.4	6.3
23	6.6	3.7	12.8	6.1	17.9	7.1
24	5.2	2.8	14.9	6.0	13.7	6.2
25	8.2	3.9	14.3	6.1	13.8	5.9
26	12.2	4.7	17.4	6.0	15.1	6.1
27	11.4	4.3	11.5	5.4	16.6	6.7
28	10.0	4.3	4.6	2.2	16.0	6.5
29	10.8	4.1	14.5	5.8	11.7	6.6
30	11.5	4.8	17.8	6.1	10.5	5.4
31			16.8	5.7		
Średnia	7.82	3.8	11.36	4.7	13.35	5.8
Odch. od śr. wieloletniej	25%		6%		5%	

Miesiąc	VII		VIII		IX	
Dzień	UV - B [MED]	Indeks UV	UV - B [MED]	Indeks UV	UV - B [MED]	Indeks UV
1	2.6	1.4	11.5	6.5	10.0	4.3
2	5.7	4.5	12.7	6.0	7.3	4.3
3	4.7	2.9	15.8	6.3	11.3	4.5
4	5.7	4.4	15.7	5.8	11.3	4.4
5	11.2	5.9	15.6	5.7	8.5	3.7
6	3.2	1.7	10.7	5.7	10.1	4.4
7	10.8	5.9	12.8	5.7	5.5	3.7
8	12.2	6.0	9.8	5.9	4.1	3.3
9	17.8	6.3	11.1	5.3	6.2	4.1
10	4.3	2.8	7.3	4.2	7.6	4.3
11	16.0	6.8	8.1	5.0	9.8	4.1
12	16.4	6.9	11.1	5.2	8.3	3.8
13	17.8	6.8	9.9	5.0	10.0	4.5
14	10.5	6.2	12.3	5.3	8.1	4.3
15	4.8	4.5	10.3	5.9	6.8	3.4
16	15.5	6.5	9.9	5.5	6.1	3.6
17	17.0	6.6	12.3	5.2	8.4	3.4
18	7.1	3.6	11.7	4.8	7.1	3.4
19	15.4	6.0	11.6	5.5	3.4	1.8
20	10.1	5.3	14.6	5.7	2.9	1.6
21	8.4	4.4	13.2	5.3	7.2	3.1
22	6.5	4.1	12.1	5.2	3.3	1.7
23	8.4	4.4	13.7	5.5	5.9	3.0
24	8.7	4.6	9.6	5.1	6.7	3.2
25	7.6	6.6	6.3	3.1	6.8	3.0
26	9.0	5.1	11.7	4.5	6.2	2.8
27	5.0	2.8	11.7	4.6	5.9	2.6
28	10.0	5.6	11.8	5.2	5.2	2.3
29	13.0	5.8	12.3	5.2	6.1	2.9
30	4.2	2.7	9.5	4.5	6.3	2.9
31	7.0	5.2	10.0	4.8		
Średnia	9.57	4.9	11.51	5.3	7.08	3.4
Odch. od śr. wieloletniej	-23%		17%		23%	

Miesiąc	X		XI		XII	
Dzień	UV - B [MED]	Indeks UV	UV - B [MED]	Indeks UV	UV - B [MED]	Indeks UV
1	6.1	2.7	1.3	0.8	0.4	0.2
2	5.5	3.1	0.8	0.4	0.6	0.3
3	6.0	2.9	1.3	0.8	0.5	0.4
4	5.2	2.7	1.9	1.0	0.5	0.3
5	4.5	2.7	1.9	1.0	0.2	0.2
6	5.8	3.2	1.7	1.1	0.4	0.3
7	1.9	1.1	1.8	1.0	0.4	0.3
8	2.5	2.3	1.5	0.9	0.1	0.1
9	2.6	1.8	0.9	0.5	0.2	0.2
10	2.7	1.7	0.9	0.6	0.5	0.4
11	2.7	1.6	1.5	0.9	0.8	0.5
12	3.1	1.9	1.5	0.9	0.3	0.2
13	3.2	1.9	0.3	0.1	0.6	0.4
14	2.8	1.8	0.4	0.4	0.4	0.3
15	2.5	1.3	0.4	0.3	0.6	0.3
16	3.8	1.9	1.4	0.9	0.5	0.3
17	4.0	1.8	0.6	0.4	0.2	0.1
18	3.6	1.7	0.2	0.1	0.4	0.3
19	1.3	1.0	0.8	0.4	0.5	0.3
20	1.5	0.9	1.1	0.6	0.5	0.3
21	2.3	1.4	0.8	0.4	0.5	0.3
22	2.3	1.3	1.1	0.5	0.4	0.3
23	1.0	0.6	1.1	0.5	0.6	0.4
24	1.2	0.8	0.4	0.3	0.2	0.1
25	2.4	1.2	0.8	0.5	0.5	0.3
26	1.9	1.2	0.4	0.3	0.2	0.2
27	2.2	1.2	0.4	0.3	0.2	0.2
28	2.3	1.2	0.8	0.4	0.5	0.3
29	1.8	1.1	0.8	0.4	0.3	0.3
30	1.5	0.8	0.6	0.5	0.2	0.2
31	1.9	1.5			0.2	0.2
Średnia	2.97	1.7	0.98	0.6	0.40	0.3
Odch. od śr. wieloletniej	11%		17%		-2%	

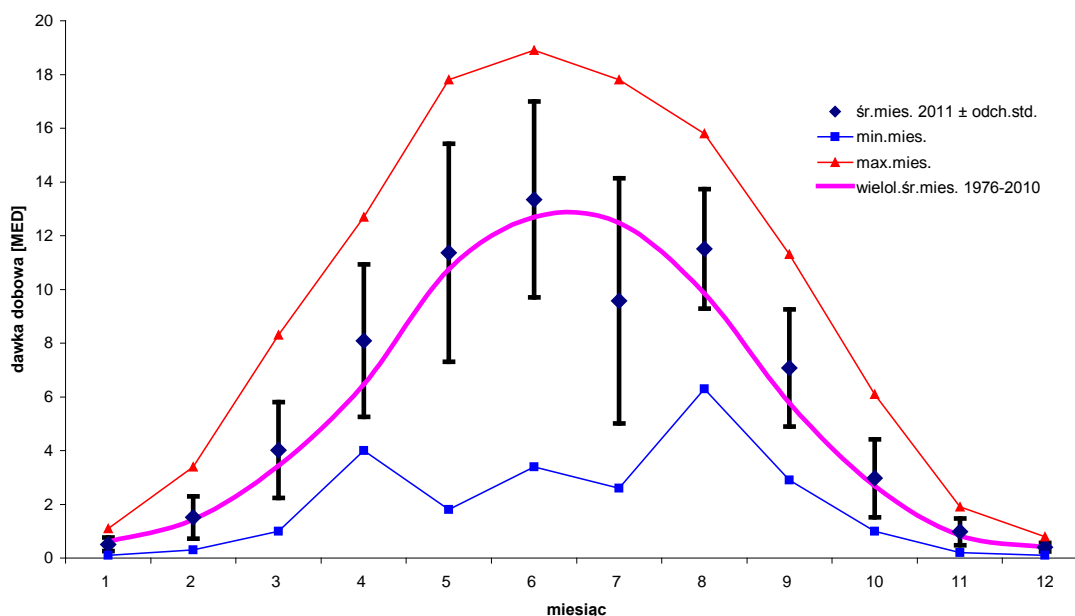
Tabela 3.2. Średnie miesięczne wartości dziennych

	UV-B	UV-B	UV-B	Indeks	US	OZON	UV-B	d [%]
							1976-10	
2011	[MED]	[MED]	[MED]	UV	[GODZ.]	[D]	[MED]	
M	średnia	min.	max.	średnia	średnia	średnia	średnia	
1	0.51	0.1	1.1	0.3	0.2	340	0.61	-16
2	1.51	0.3	3.4	0.8	2.9	357	1.43	6
3	4.02	1.0	8.3	2.1	5.2	351	3.43	17
4	8.09	4.0	12.7	3.8	6.8	334	6.47	25
5	11.36	1.8	17.8	4.7	8.2	370	10.74	6
6	13.35	3.4	18.9	5.8	8.2	341	12.70	5
7	9.57	2.6	17.8	4.9	3.8	335	12.48	-23
8	11.51	6.3	15.8	5.3	8.1	300	9.85	17
9	7.08	2.9	11.3	3.4	6.1	284	5.77	23
10	2.97	1.0	6.1	1.7	3.3	277	2.68	11
11	0.98	0.2	1.9	0.6	2.3	260	0.84	17
12	0.40	0.1	0.8	0.3		274	0.41	-2

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 (1976-2010) 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 2011 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 2011 roku średnich w miesiącu dawek dobowych promieniowania UV-B od średniej wieloletniej (1976-2010) dawek dobowych

promieniowania UV-B w kolejnych miesiącach roku. Na tym samym rysunku przedstawiono także odchylenia procentowe zarejestrowanych w roku 2011 średnich miesięcznych wartości usłonecznienia i koncentracji ozonu od ich średnich wieloletnich.



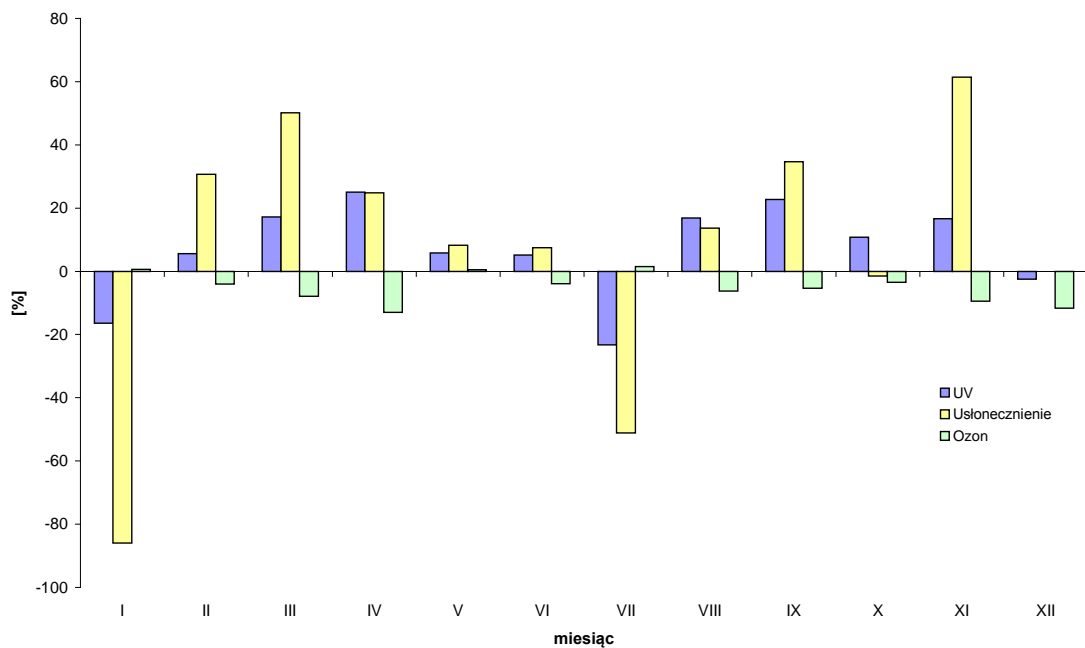
Rys. 3.1. Średnie miesięczne dawek dobowych promieniowania UV oraz największe i najmniejsze wartości zarejestrowane danego miesiąca.

Największe niedobory promieniowania UV-B zanotowano w styczniu i lipcu. Wynosiły one odpowiednio 17 i 23 procent. Niedobory te należy wiązać z dużym zachmurzeniem redukującym dopływ promieniowania słonecznego do powierzchni Ziemi co przejawia się usłonecznieniem znacznie mniejszym od średniej wieloletniej.

Nadwyżki promieniowania UV-B zanotowano wiosną (marzec, kwiecień) oraz jesienią (od sierpnia do listopada). Wiosenne nadwyżki wynosiły odpowiednio 17 i 25 procent. Wiązać je można z niedoborami ozonu (odpowiednio 8 i 13 procent) oraz z większym od średniej usłonecznieniem. Jesienne nadwyżki promieniowania UV-B również można wiązać z nieznacznymi niedoborami ozonu (od 5 do 9 procent). Duży wpływ na rejestrowane wartości miało również usłonecznienie, które było wyższe od średniej wieloletniej. Jedynie w październiku za nadwyżki promieniowania UV-

B odpowiadał wyłącznie niedobór ozonu. Na szczególną uwagę zasługuje listopad, w którym notowano niedobory ozonu około 9% i nadwyżkę usłonecznienia ponad 60%. Nie spowodowało to jednak drastycznych zmian w dopływie promieniowania UV-B, którego nadwyżka wynosiła zaledwie 16%. Spowodowane to było silną absorpcją promieniowania słonecznego w tym zakresie widmowym przez aerozol atmosferyczny. W tym czasie obserwowano podwyższone przez dłuższy czas stężenia pyłu PM10 w całym województwie Mazowieckim i na dużym obszarze Polski.

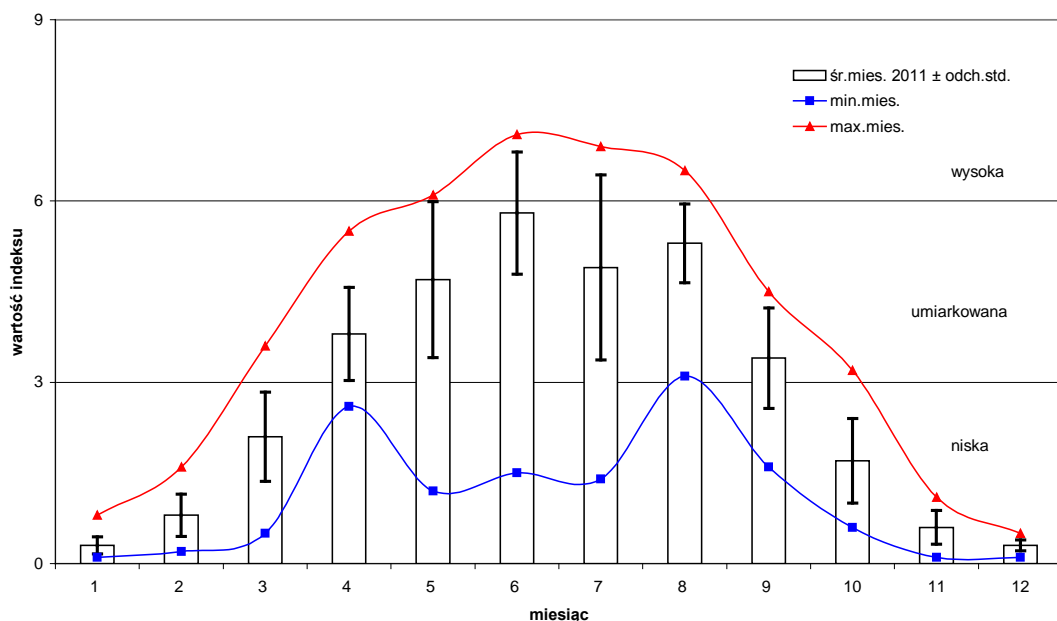
W pozostałych miesiącach odchylenia od średniej wieloletniej są niewielkie i trudno jest wskazać ich jednoznaczne przyczyny, szczególnie, że znaczącą rolę w dopływie promieniowania UV-B do powierzchni ziemi odgrywa aerozol, który nie jest ujęty w tym opracowaniu.



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

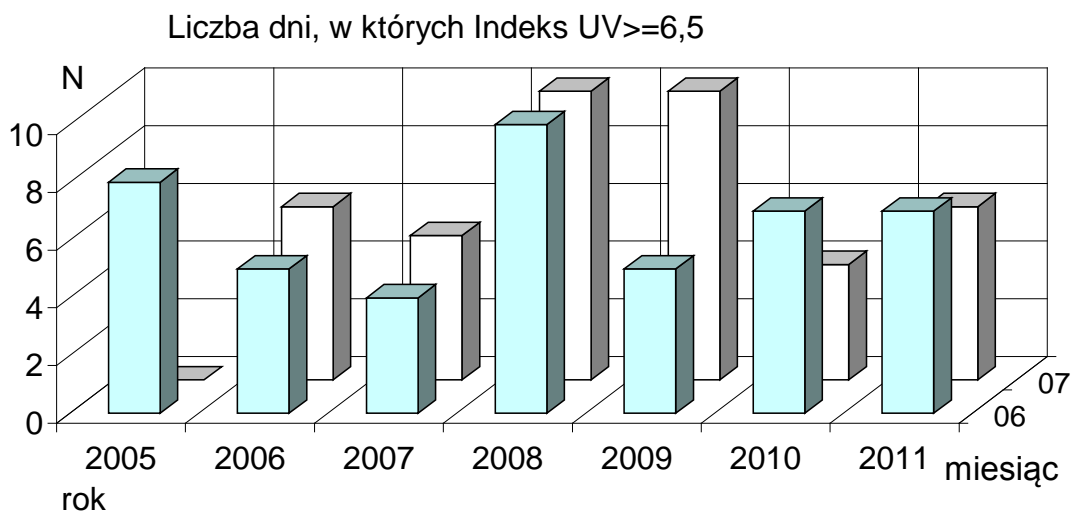
Na Rys. 3.3 przedstawiono średnie miesięczne indeksu UV wraz odchyleniami standardowymi oraz wartości ekstremalne zarejestrowane w danym

miesiącu. Największe wartości indeksu UV zanotowano w miesiącach letnich co wiąże się oczywiście z małymi kątami zenitalnymi Słońca. Od tego trendu odbiega jedynie lipiec, który był wyjątkowo pochmurnym miesiącem. Wartości indeksu UV dla tego miesiąca wahały się od 1.4 do 6.9. Największą wartość indeksu wynoszącą 7.1 zarejestrowano 23 czerwca. Zbliżone wartości zarejestrowano między 4 i 5 czerwca oraz między 11 i 13 lipca i wynosiły one 6.8 i 6.9. W sumie indeks o wartości 6.5 został przekroczony po 7 razy w czerwcu, 6 razy w lipcu oraz jeden raz w sierpniu. Jednak średnie wartości miesięczne dla całego roku 2011 należy uznać za umiarkowane.



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 jednakowa jak w roku 2010 i większa niż w roku 2009. W lipcu liczba dni z indeksem przekraczającym 6.5 jest większa niż w roku 2010 jednak mniejsza niż w latach 2008 i 2009.



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

Podsumowując, w roku 2011 kontynuowano monitoring promieniowania słonecznego z zakresu UV-B w Centralnym Obserwatorium Geofizycznym w Belsku. Niedobory promieniowania UV-B obserwowano głównie w styczniu i grudniu co wiązało się z osłabieniem dopływu promieniowania słonecznego przez zwiększone zachmurzenie. Efekt ten obserwowany był również w lipcu. Nadwyżki promieniowania od 11% do 25% obserwowano w miesiącach wiosennych i jesiennych. Wiazało się to z niedoborami ozonu i brakiem redukcji promieniowania słonecznego przez pokrywę chmur.

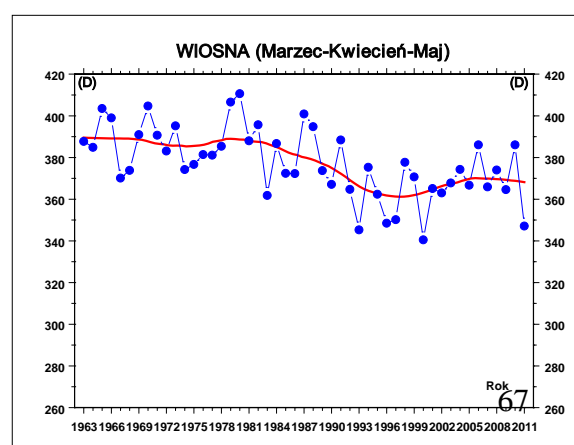
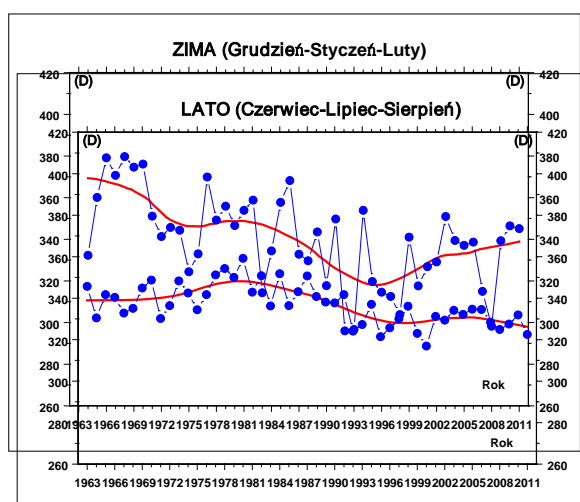
4. Zmiany całkowitej zawartości ozonu atmosferycznego w 2011 roku

Janusz Krzyścin, Bonawentura Rajewska-Więch, Małgorzata Degórska

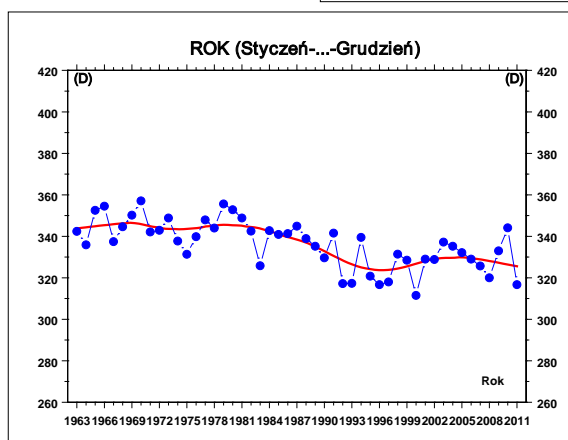
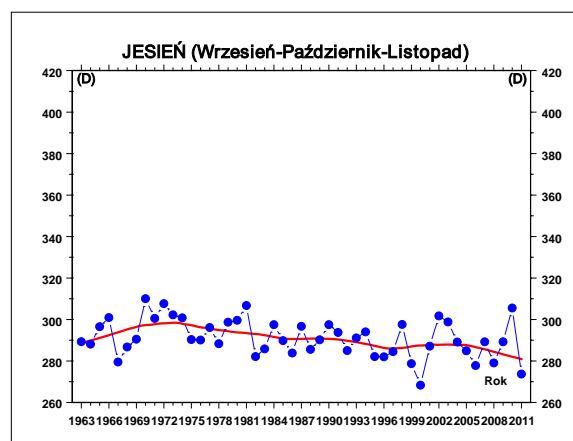
W Centralnym Obserwatorium Geofizycznym w Belsku w 2011 roku tylko w styczniu i maju obserwowano dodatnie wartości średnich miesięcznych całkowitej zawartości ozonu (CZO_3). W pozostałych miesiącach 2011 roku, średnie miesięczne wartości CZO_3 (Rys. 1.1.1a) były niższe od odpowiednich średnich wieloletnich (1963-2010). We wszystkich miesiącach 2011 roku

wartości odchyłek średnich dziennych od średnich wieloletnich często sięgały lub przekraczały -10% (Rys.1.1.1). Szczególnie wyraźnie wystąpiło to w kwietniu i grudniu. Analizując długookresowe zmiany średnich sezonowych CZO_3 w Belsku (krzywe o kolorze czerwonym na Rys.4.1 reprezentujące wygładzone metodą lokalnej regresji przebiegi średnich sezonowych) stwierdzamy, że od połowy lat 90-tych XX wieku następuje zmiana kierunku trendu w średnich sezonowych i w średniej rocznej CZO_3 . Wyraźna spadkowa tendencja, która pojawiła się z końcem lat 70-tych ubiegłego wieku została zatrzymana około 1996 r. i od tego momentu obserwujemy wzrostową tendencję widoczną w średnich zimowych (Rys.4.1). Wydaje się, że średnie wartości CZO_3 w tych sezonach od początku XXI wieku oscylują wokół pewnego ustalonego poziomu. Średnie sezonowe dla wiosny, lata i jesieni osiągnęły w 2011 r. najmniejsze wartości w XXI wieku.

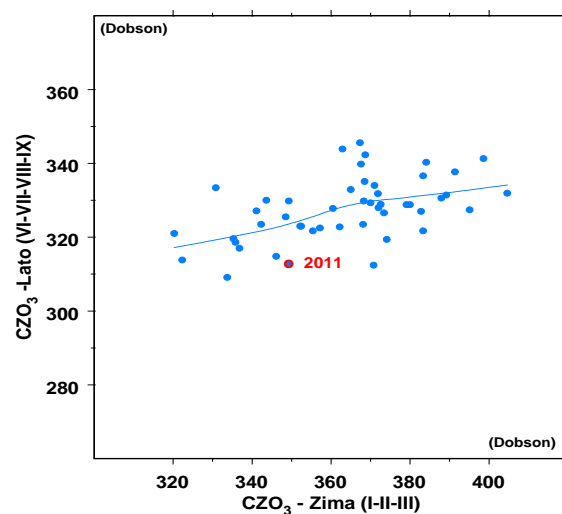
Niskie wartości CZO_3 w sezonie letnim często występują w sytuacji, gdy wcześniej zimą obserwowano też niskie wartości CZO_3 (Rys.4.2). Korelacja między zimowymi (styczeń-luty-marzec) i letnimi (czerwiec-lipiec-sierpień-wrzesień) wartościami CZO_3 nie występuje, gdy zimowa średnia przekracza poziom ~ 370 D. W 2011r. powyższa średnia wynosiła 349 D, zaś średnia dla lata 313 D i była czwartą najmniejszą wartością dla tego sezonu w historii 49 letnich pomiarów ozonu w Belsku. Wystąpienie niskich wartości CZO_3 zimą jest sygnałem osłabienia wielkoskalowej wymiany południkowej w stratosferze (tzw. cyrkulacji Brewer-Dobsona obejmującej całą półkulę północną), która w zimie prowadzi do akumulacji ozonu w średnich i wysokich szerokościach geograficznych. Niedobory CZO_3 , które wystąpiły w okresie zimowym nie zostaną w późniejszych miesiącach odbudowane, gdyż deficyt CZO_3 pojawia się w skali całej półkuli poza strefą równikową. Jeżeli zimą całkowita zawartość ozonu jest większa od 370 D, to latem poziom CZO_3 może być zarówno powyżej jak i poniżej normy.



Zmiany w warstwie ozonowej nad Belskiem obserwowane od połowy lat 90-tych XX wieku potwierdzają skuteczność ustaleń Protokołu Montrealskiego z 1987 r. Protokół Montrealski i jego późniejsze poprawki dotyczące ochrony warstwy ozonowej wprowadziły szereg ograniczeń w produkcji substancji niszczących warstwę ozonową. Od połowy lat 90-tych ubiegłego wieku koncentracja takich substancji w stratosferze zaczyna maleć. W związku z tym oczekiwano zatrzymania,

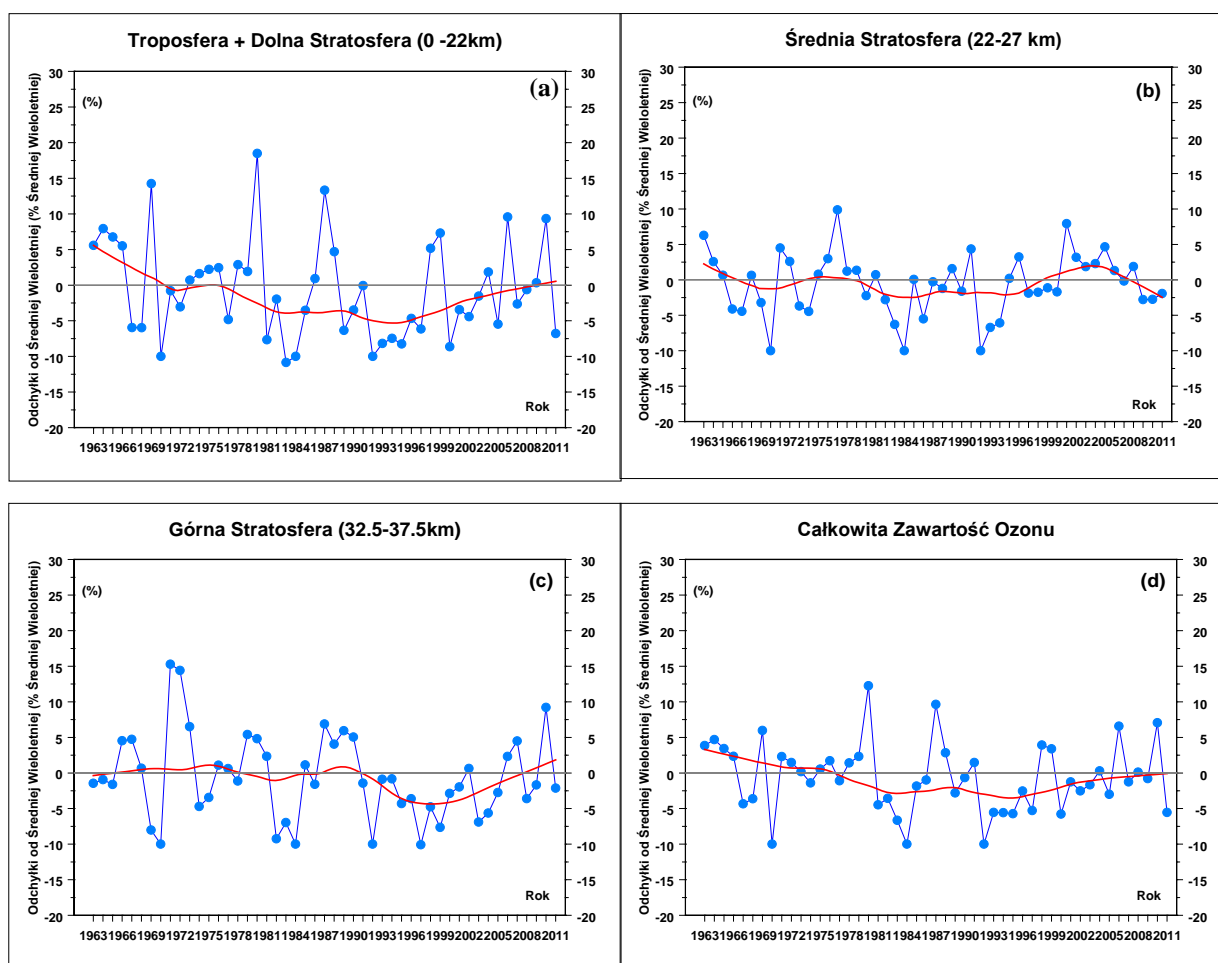


a następnie odwrócenia spadkowej tendencji w zawartości ozonu w atmosferze. Fakt ten został potwierdzony w licznych pracach między innymi także i w ostatnich pracach zespołu z IGF PAN (Krzyścin i Rajewska-Więch, 2009a, 2009b, Rajewska i Krzyścin, 2010, Krzyścin, 2012).



Rys.4.2. Średnia całkowitej zawartości ozonu w Belsku w sezonie letnim (czerwiec-lipiec-sierpień) w funkcji średniej w poprzedzającym sezonie zimowym (styczeń – luty - marzec). Czerwony punkt oznacza wartości w 2011 r.

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_2) na koncentrację ozonu na tych wysokościach (Newchurch i inni, 2003).

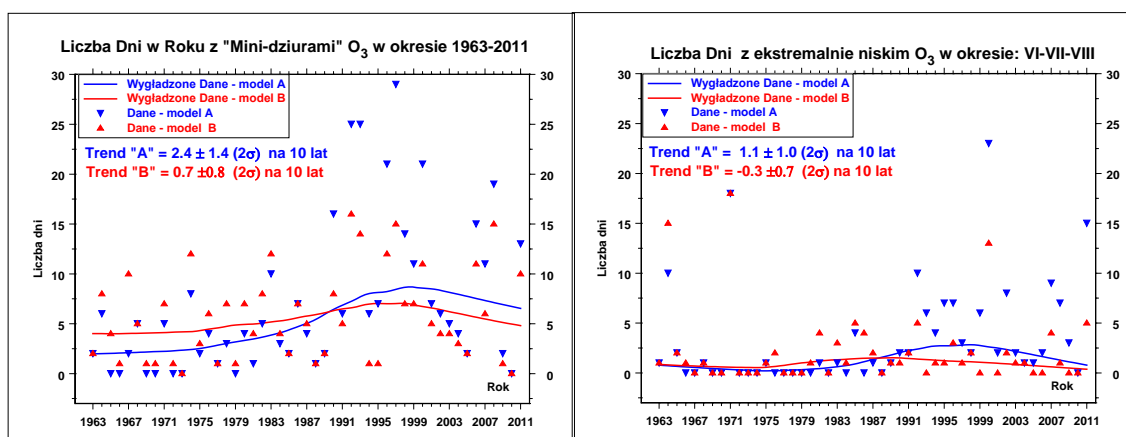


Rys.4.3. Odchyłki średnich wiosennych (marzec-kwiecień-maj) od średniej wieloletniej zawartości ozonu w wybranych warstwach atmosfery z pomiarów Umkehr spektrofotometrem Dobsona w Belsku (1963-2011). Profil ozonu wyznaczono stosując algorytm *UMK04*.

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 wyznaczania rozkładu pionowego ozonu metodą Umkehr, *UMK04*, która jest zalecana przez Centrum Danych Ozonowych w Toronto (Kanada). Długookresowa zmienność ozonu w wybranych warstwach atmosfery wyznaczona przy użyciu „starego” algorytmu, *UMK92*, jest praktycznie

taka sama jak ta uzyskana z zastosowaniem „nowego” algorytmu. Stanowi to potwierdzenie wyznaczonego kierunku zmian zawartości ozonu w tych warstwach.

Przebiegi wygładzonych zmian otrzymane metodą lokalnej regresji wskazują w sezonie wiosennym na wzrostową tendencję w zawartości ozonu od połowy lat 90-tych XX w górnych (32,5-37,5 km, Rys 4.3c) i dolnych warstwach atmosfery (0-22km, Rys 4.3a), a także w CZO₃ (Rys 4.3d). W środkowej stratosferze (22-27 km, Rys. 4.3b) kierunek zmian nie jest ustalony widoczna jest raczej długookresowa oscylacja o okresie ~15 lat niż zmiana o liniowym charakterze. 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 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.

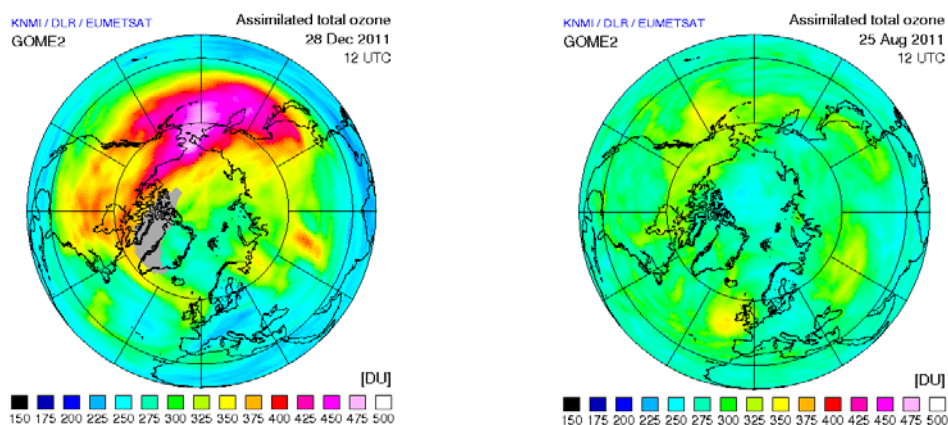


Rys. 4.4. Liczba dni w roku z „mini-dziurami ozonowymi nad Belskiem w latach 1963-2011 (lewa strona) i liczba dni w okresie czerwiec -sierpień z deficytem całkowitej zawartości ozonu >10% normy (prawa strona)

Głębokie lokalne spadki CZO₃ 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

(Krzyścin, 2002). Zastosowano dwa modele (oznaczone dalej jako **A** i **B**) do wyznaczenia dni z „mini-dziurami”. Poziom CZO₃ w tych dniach z założenia powinien być co najmniej o 20% poniżej ważonej średniej kroczącej (model **B**) lub wieloletniej 1963-2010 średniej dziennej (model **A**). W nawiązaniu do tej pracy przeprowadzona analizę liczby dni z „mini-dziurami” nad Belskiem w latach 1963-2011, której wyniki przedstawia Rys.4.4 (lewa strona). W serii obserwacji w 2011 r. znaleziono kilkanaście dni (13 i 10 odpowiednio według Modelu **A** i **B**) dla których zmierzona wartości CZO₃ przekraczała wartość progową dla pojawienia się „mini-dziury”. Liczba dni z „mini-dziurami” ozonowymi w 2011 r. jest powyżej średniej dla okresu 1996-2010 wynoszącej odpowiednio 7 i 6 dla Modelu **A** i **B**. Liczba dni z „mini dziurami” znacznie zmienia się z roku na rok. Dla przykładu w 2010 r. nie zanotowano żadnego dnia. Wcześniej taka sytuacja miała miejsce tylko w 1973 r.

Rys.4.5 (lewa strona) przedstawia dane satelitarne (z pomiaru spektrofotometrem GOME-2 na platformie satelitarnej MetOp) ilustrujące rozkład CZO₃ na półkuli północnej dla 28 grudnia 2011 r. tj. w dniu maksymalnego (~ 30% według pomiaru spektrofotometrem Dobsona) niedoboru ozonu w Belsku w 2011 r. Rys.4.5 (prawa strona) przedstawia dane satelitarne dla 25 sierpnia 2011 r, kiedy zanotowano w Belsku ~15% ubytek ozonu, który jest rekordowo niski w całej serii pomiarów w sezonach letnich od 1963 r.



Rys. 4.5. Rozkład CZO₃ nad półkulą północną z pomiarów spektrofotometrem GOME-2 na platformie satelitarnej MetOp w dniu 28 grudnia 2011 (lewa strona) i 25 sierpnia 2011 r. (prawa strona). Pomiar spektrofotometrem Dobsona w dniu 28.12.2011 pokazał ~30% ubytek ozonu w stosunku do średniej wieloletniej dla tego dnia, tj. maksymalny deficyt CZO₃ w 2011 r. 25.08.2011 zanotowano największy (~15%) ubytek ozonu w sezonie letnim od początku pomiarów ozonu w Belsku.

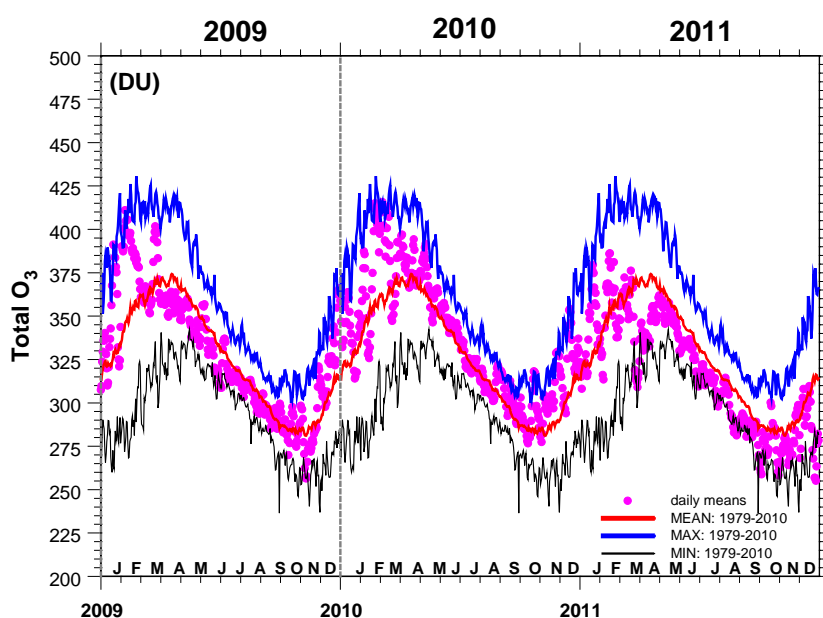
Wygładzone przebiegi czasowe (1963-2011) liczby dni z „mini-dziurami” ozonowymi (Rys.4.4 –lewa strona) wskazują, że obecnie znajdujemy się w fazie lekko spadkowej tendencji w częstotliwości pojawiania się „mini dziur”, który wystąpił po okresie wzrostu trwającym do połowy lat 90-tych. Dla całego okresu pomiarów w Belsku 1963-2011 model **A** przewiduje stopniowy wzrost liczby dni z „mini-dziurami”, tj. istotnie statystyczny (na poziomie istotności 2σ) wzrost o 2-3 dni na 10 lat (patrz wartość trendu na Rys.4.4). Natomiast model **B** sugeruje, że liczba „mini-dziur” jest na niezmiennym poziomie w okresie 1963-2011. 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, uzyskane z zastosowaniem modelu **B** sugerują, że krótkookresowe procesy w dynamice atmosfery 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 z natury niewielkie (niska wysokość Słońca) i spodziewany duży wzrost poziomu UV w stosunku do typowych wartości napromienienia UV nie jest szczególnie niebezpieczny. W tym okresie ludzie na ogół przebywają w pomieszczeniach i rzadko korzystają z kąpieli słonecznych.

Wyznaczenie zmian w częstotliwości pojawienia się ekstremalnie niskich wartości CZO_3 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. Arbitralnie przyjęto próg 10% deficytu CZO_3 do wyznaczenia okresów z ekstremalnie niskimi wartościami ozonu. W tej sytuacji erytemalna dawka napromienienia UV byłaby $\sim 10\%$ wyższa od normy napromienienia dla bezchmurnego nieba.

Przeprowadzono obliczenia analogicznie do sytuacji dotyczącej „mini-dziur”, ale zastosowano 10% wartość progową. Wyniki przedstawiono na Rys.4.4 (prawa strona rysunku). Nie stwierdzono trendów w częstotliwości pojawiania się

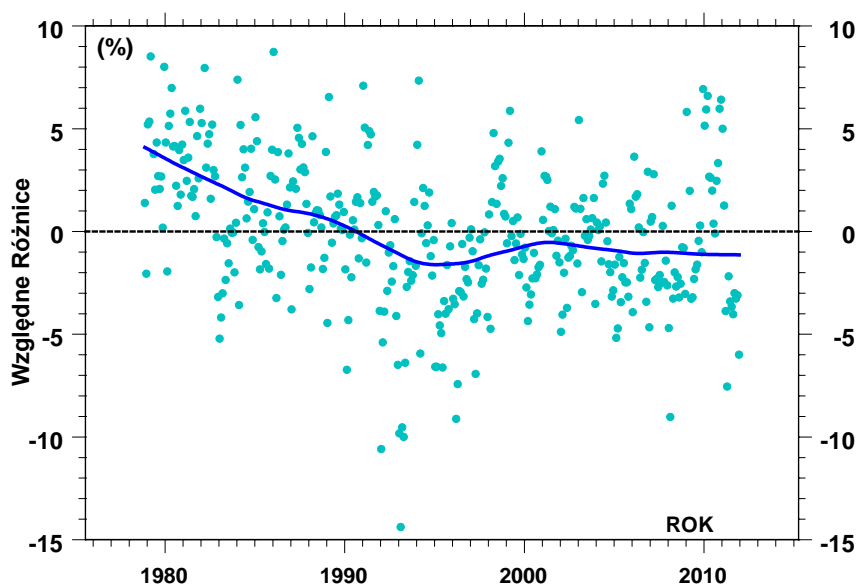
ekstremalnie niskich zawartości ozonu w okresie czerwiec-sierpień. W ciągu ostatnich lat takich dni było zaledwie kilka w sezonie letnim, wtedy należało bezwzględnie ograniczyć czas przebywania na Słońcu. Zastosowanie obu modeli do serii pomiarowej CZO₃ dla lata pokazało kilkanaście (Model A) lub kilka dni (Model B) z ekstremalnie niskim poziomem CZO₃ nad Belskiem w sezonie letnim w 2011 r. Największy ubytek CZO₃ w całej historii pomiarów ozonu w Belsku w sezonach letnich, ~15% poniżej wieloletniej (1963-2010) normy, zanotowano 25.08.2011 r.

Zmiany całkowitej zawartości ozonu wyznaczone z pomiarów spektrofotometrem Dobsona w Belsku korespondują z tymi jakie znaleziono w seriach pomiarów satelitarnych CZO₃ nad Europą. Dienne wartości całkowitej zawartości ozonu w okresie 1.01.2009 - 31.12.2011 uśrednione nad Europą, tj. w obszarze {35-65°N, 10°W-40°E}, przedstawiono na Rys.4.6. Dane pochodzą z globalnej bazy danych zawierającej wyniki satelitarnych pomiarów CZO₃ 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 2011). Dodatkowo na Rys.4.6 zaznaczono wieloletnie (1979-2010) średnie dzienne, wartość maksymalną i minimalną dla danego dnia dla Europy.



Rys.4.6. Dienne wartości całkowitej zawartości ozonu w okresie 01.01.2009-31.12.2011 uśrednione nad Europą {35°N-65°N; 10°W-40°E} – fioletowe punkty. Wieloletnie średnie dzienne z lat 1979-2010 - krzywa czerwona. Maksymalne i minimalne średnie dzienne wartości występujące na tym obszarze w okresie 1979-2010 odpowiednio niebieska i czarna krzywa.

Nad Europą w 2011 r. notowano wyjątkowo małe wartości CZO₃. Praktycznie od połowy lutego notowano wartości poniżej wieloletniej średniej dziennej. W ubiegłych latach zmiany CZO₃ uśrednione po całym kontynencie europejskim rzadko przekraczały poziom $\pm 10\%$ wieloletniej normy. Wiosną i zimą 2011-2012 zanotowano dni z niedoborem ozonu poniżej tego prognozy tj. 02-03.04, 23-28.12 i 30.12-31.12. Najwyższy procentowy spadek CZO₃ w serii czasowej w 2011 r – 19.3% zanotowano 27.12. Rekordowo niskie wartości CZO₃ w całej serii pomiarowej 1979-2011 wyznaczono w następujących dniach w 2011r: 25.03 α (-9.5%), 02-03.04 α (min. -12.8% dla 02.04), 29.06 (-5.6%), 01.07 α (-6.7%), 29.07-01.08 α (min.-6.5% dla 30.07), 23-28.08 α (min. -8.3% dla 25.08), 12-13.09 α (min.-5.8% dla 12.09), 02-06.10 (min. -9.9% dla 05.10), 10.31(-9.4%), 23-28.12(min -19.3% dla 27.12) i 30-31.12 (min. -11.4%). W ciepłym okresie roku (od maja do połowy maja do połowy października), kiedy promieniowanie słoneczne UV jest z natury wysokie, zanotowano znaczące ubytki ozonu przekraczające 5%. W tym sezonie największe ujemne odchyłki CZO₃ od normy sięgały około 8%. W tej sytuacji zmiany zawartość ozonu w atmosferze nad Europą w 2011 r. mogły prowadzić do zwiększonego zagrożenia zdrowotnego związanego z nadmierną ekspozycją na promieniowanie UV słońca.

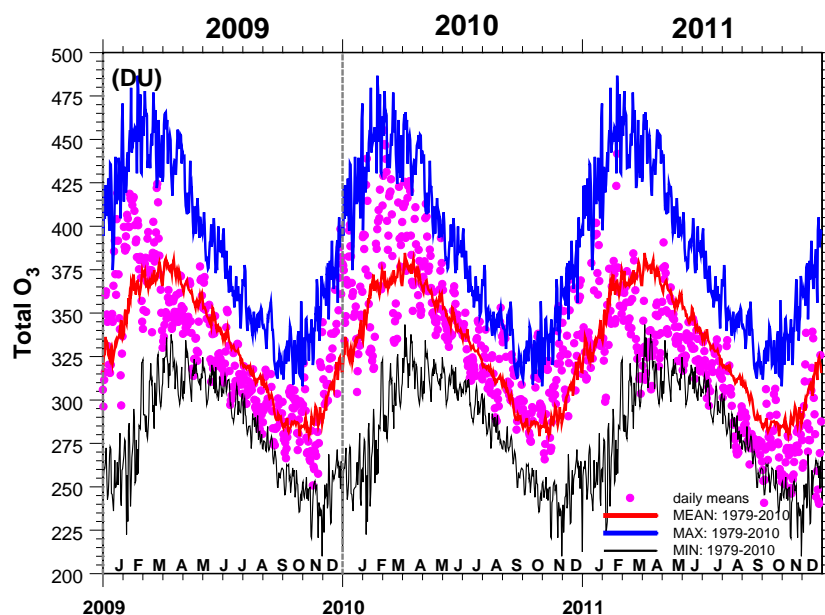


Rys. 4.7. Odchyłki średnich miesięcznych całkowitej zawartości ozonu nad Europą (w strefie 35°N-65°N : 10°W-40°E) od wieloletnich (1979-2010) średnich miesięcznych. Ciągła linia przedstawia wygładzone dane z zastosowaniem lokalnej regresji – LOWESS.

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 odchyłek CZO₃ od wieloletnich (1979 - 2010) średnich miesięcznych. W serii czasowej można wyróżnić następujące stadia: gwałtowny spadek CZO₃ (do 1995), wzrost (1995-2000) i stabilizacja (2001-011). Obecny poziom ozonu jest ~5% niższy niż w końcu lat 70-tych XX wieku. W ostatnich 10-latach nie zanotowano tendencji wzrostowej w serii czasowej CZO₃. Wydaje się, że w tej sytuacji trudno jest określić czas regeneracji warstwy ozonowej nad tym obszarem, czyli osiągnięcia poziomu ozonu z końca lat 70-tych XX wieku. Kiedy antropogeniczna emisja substancji niszczących ozon w stratosferze była niewielka i praktycznie bez wpływu na stan warstwy ozonowej. Modele fizyczno-chemiczne klimatu z uwzględnieniem warstwy ozonowej nie przewidują naprawy warstwy ozonowej nad Europą w najbliższych 2-3 dekadach. W tym momencie nie można ocenić, czy w następnych dekadach pojawi się wyraźna tendencja wzrostowa w CZO₃ nad Europą i jakie będzie tempo regeneracji warstwy ozonowej. Liczne opracowania wskazują na znaczący wpływ zmian w cyrkulacji atmosfery na obserwowane długookresowe tendencje zmian w warstwie ozonowej. Zmiany w warstwie ozonowej są wypadkowym efektem zmniejszenia zanieczyszczenia atmosfery substancjami niszczącymi warstwę ozonową i specyficznej cyrkulacji w atmosferze prowadzącej do długookresowych oscylacji CZO₃.

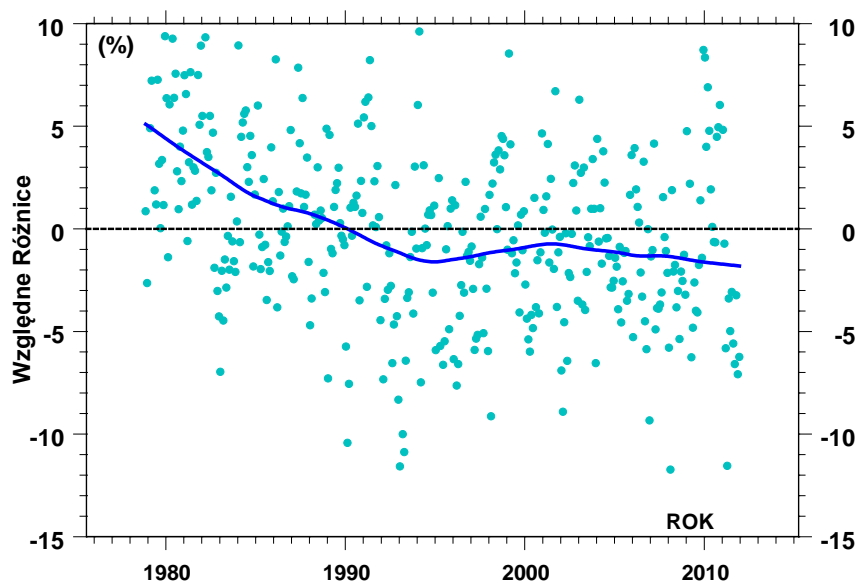
W 2010 r. notowano ekstremalnie wysokie zawartości ozonu na półkuli północnej związane ze specyficzną cyrkulacją w atmosferze tj. występowaniem niezwykle silnej ujemnej fazy tzw. Arktycznych Oscylacji przypadającej na wschodnią fazę quasi-dwuletnich oscylacji w równikowej stratosferze (Steinbrecht i inni, 2011). Natomiast niskie wartości ozonu w końcu zimy 2010/2011 r. i w późniejszym okresie 2011 r. były wynikiem silnej destrukcji ozonu w zimowym wirze polarnym i mniejszym transportem ozonu do średnich i wysokich szerokości półkuli północnej w wyniku słabszej niż normalnie aktywności komórki Brewera-Dobsona. (Manney i inni, 2011, Krzyściń, 2012). Wzrostowe, bez ustalonego kierunku, lub nawet spadkowe tendencje mogą, więc występować na przemian utrudniając ocenę antropogenicznej składowej trendu i tym samym moment regeneracji warstwy ozonowej .

Zmiany w ozonie atmosferycznym nad środkową Europą 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. Nad środkową Europą w całym 2011 r., a zwłaszcza w kwietniu, i latem i w grudniu, stwierdzono pojawienie się znacznych niedoborów ozonu tj. dziennych wartości CZO₃ wyraźnie poniżej wieloletniej (1979-2010) normy. Wielokrotnie poziom CZO₃ był co najmniej o 10% niższy niż wieloletnia (1979-2010) średnia dzienna. Najwyższy procentowy niedobór CZO₃ w całej w serii czasowej w 2011 r., -26,0%, stwierdzono 28 grudnia. Rekordowo wysokie wartości CZO₃ w całej serii pomiarowej 1979-2011 wyznaczono w następujących dniach w 2011r: 26.03 (-13.4%); 03.04 (-13.9%), 06-08.04 (minimalna wartość -18.3% dla 07.04), 02-03.06 (min. -10.2% dla 03.06), 22.06 (-9.1%), 10.07 (-11.7%), 12-13.07 (min. -11.0% dla 13.07), 19.08 (-8.9%), 21-29.08 (min. -13.9% dla 25.08.2011), 09.09 (-7.5%), 13-14.09 (min. -12.2% dla 13.09), 04-05.10(-15.9% dla 05.10), 23-28.12 (min. -26% dla 28.12). W ciepłym sezonie roku (15.05-15.10), kiedy poziom UV jest z natury wysoki, dla 18 dni poziom CZO₃ był niższy o więcej niż 10% w stosunku do średniej wieloletniej. W tych dniach mogło istnieć zwiększone zagrożenie nadmierną ekspozycją na promieniowanie UV.



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

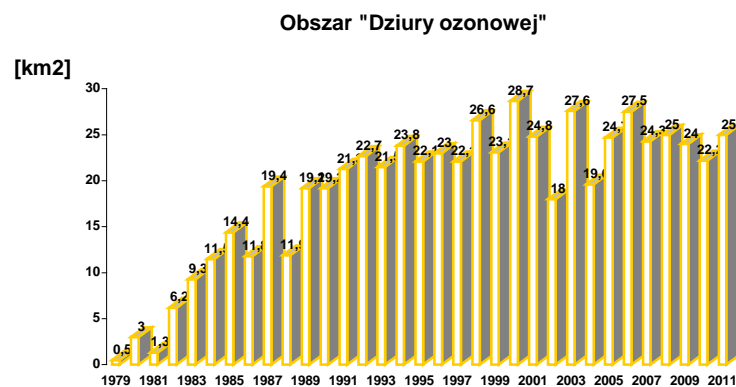
Długookresowe zmiany CZO_3 nad środkową Europą przedstawiono na Rys.4.9. Podobnie jak w przypadku zmian CZO_3 w skali całego kontynentu możemy stwierdzić występowanie następujących faz zmienności ozonu: gwałtowny spadek CZO_3 (do 1995) i wzrost (1995-2000). W środkowej Europie zauważamy po 2000 r. raczej nieznaczny spadkowy trend CZO_3 niż stabilizację, która jest widoczną dla całego kontynentu w okresie 2001-2011. Obecny poziom ozonu jest $\sim 7,5\%$ niższy niż w końcu lat 70-tych XX wieku. Wydaje się, że w ostatnich dekadzie specyficzne procesy dynamiczne zachodzące w atmosferze sprzyjały lokalnej destrukcji ozonu. Zmiany poziomu ozonu w trakcie nawet jednego roku, np. przejście od maksymalnie dużych wartości CZO_3 w 2010 r. do minimalnych wartości w 2011 r. (wcześniej dyskutowane w opisie zmienności ozonu dla całej Europy), mogą być znaczne, co jest uwarunkowane zmiennością procesów dynamicznych w atmosferze ziemskiej. W tej sytuacji trudno określić jest termin ewentualnej regeneracji warstwy ozonowej.



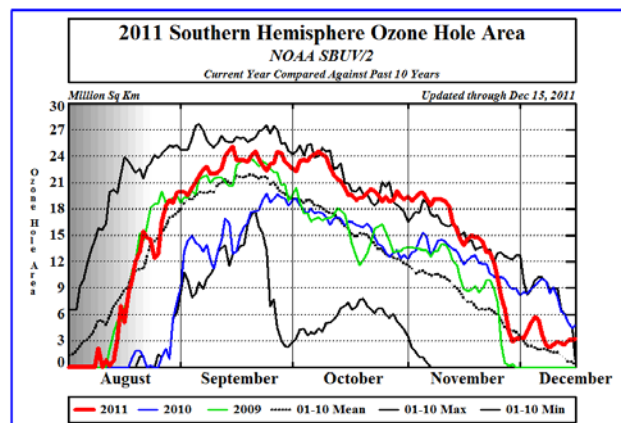
Rys. 4.9. Tak jak Rys. 4.7, ale dane dla środkowej Europy (45°N-55°N, 10°E-25°E).

Zwyczajowo mówi się o występowaniu „dziury ozonowej” w sytuacji, gdy CZO_3 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 CZO_3 mniejszą od 220 D. Maksymalny obszar „dziury ozonowej” w 2001 roku osiągnął 29 mln km². Na Rys.4.10 przedstawiono wartości maksymalnego obszaru „dziury ozonowej” w okresie 1979-

2011. Od początku lat 90-tych XX wieku maksymalna powierzchnia „dziury ozonowej” (ma to miejsce zwykle w połowie września) oscyluje wokół dwudziestu kilku milionów km². Rok 2011 był rokiem typowym w rozwoju „dziury ozonowej” nad Antarktydą. Dziura pojawiła się w połowie sierpnia, 15 września osiągnęła maksymalną powierzchnię ~25 mln km² i zanikła w połowie grudnia nieco później niż normalnie. W 2011 r. powierzchnia dziury pozostawała na niezmiennym poziomie, ~24-25 mln km², przez niemal 1 miesiąc i osiągnęła rekordową wartość (w całej serii pomiarowej) dla początku października. Zanik „dziury ozonowej” ma miejsce na ogół w początkach grudnia (Rys.4.11). Prowadzona przez NOAA antarktyczna stacja pomiaru ozonu South Pole zarejestrowała w dniu 9 października 2011 r. najniższą średnią dzienną zawartość ozonu w ciągu roku, wynoszącą 102 D.



Rys.4.10. Obszar „dziury ozonowej” na półkuli południowej w milionach km² w okresie 1979-2011.

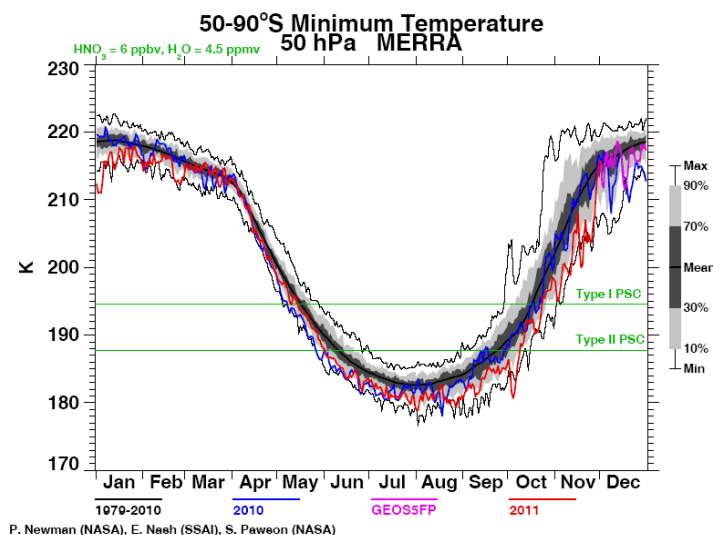


Rys. 4.11. Powierzchnia antarktycznej „dziury ozonowej” w milionach km² w 2009 2010 i 2011 r. (odpowiednio krzywa zielona, niebieska i czerwona) na tle średnich dziennych powierzchni dziury w okresie 2001-2010 (kropkowana czarna krzywa), oraz maksymalnych i minimalnych dziennych wartości w latach 2001-2010 (ciągłe czarne krzywe nad i pod krzywą dla średnich wartości). (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 przyczyniła się do utworzenia 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 (NO₂). 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 (NO₂) w warunkach dopływu promieniowania słonecznego. Jeśli NO₂ 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.

Każdego roku w stratosferze nad Antarktydą istnieją warunki sprzyjające tworzeniu PSC, bowiem tworzący się w końcu jesieni antarktycznej potężny polarny wir izoluje ten obszar od napływu cieplejszych mas ze średnich szerokości geograficznych. Dochodzi wtedy do znacznego wychłodzenia stratosfery nad Antarktydą i PSC typ I i II mogą istnieć w czasie całej zimy (Rys. 4.12). W sytuacji znacznego zanieczyszczenia atmosfery substancjami niszczącymi warstwę ozonową,

które stopniowo lecz powoli ulega zmniejszeniu w wyniku stosowania ograniczeń w produkcji takich substancji wprowadzonych przez Protokół Montrealski z 1987, następuje szereg reakcji heterogenicznych na powierzchni kropeł lub kryształów tworzących PSC prowadzących nawet do całkowitego zaniku ozonu w dolnej stratosferze (15-20 km) nad Antarktydą.

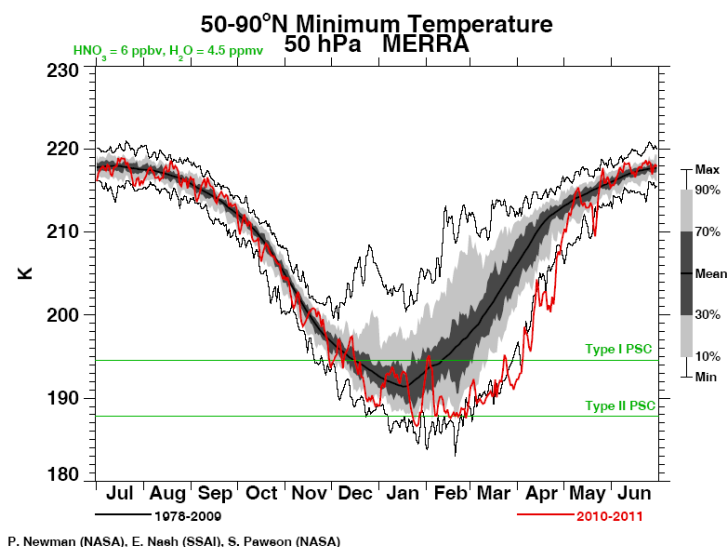


Rys. 4.12. Sezonowy przebieg minimalnej temperatury na poziomie 50 hPa w strefie 50-90°S w latach 2010 (niebieska linia) i 2011 (czerwona linia) w odniesieniu do średniego poziomu temperatury z lat 1979-2010 i ekstremalnych wartości dla tego okresu (źródło: opracowanie NOAA, USA)

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.

W stratosferze nad Arktyką rzadko występują niskie temperatury sprzyjające tworzeniu PSC. Sporadycznie i nad niewielkimi obszarami półkuli północnej CZO_3 może spadać poniżej bariery 220D powszechnie uznawanej za próg pojawienia się „dziury ozonowej” nad Antarktydą. Najniższe obserwowane wartości CZO_3 nad Antarktydą dochodzą do 90D w końcu września i początku października, czyli na początku wiosny na półkuli południowej. Natomiast nad Arktyką minimalne wartości CZO_3 notowane są w końcu jesieni (~180D) i są prawie 2 razy wyższe od tych występujących nad Antarktydą. Pojawienie ekstremalnie niskich CZO_3 nad Arktyką tym okresie, gdy stratosfera nie jest maksymalnie wychłodzona i nie ma warunków

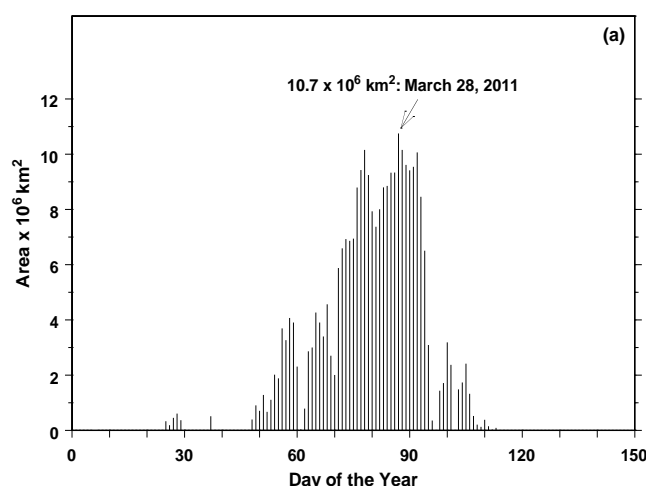
do tworzenia się PSC, świadczy o innym mechanizmie ekstremalnego zmniejszenia grubości warstwy ozonowej nad półkulą północną. Lokalnie nad Arktyką mogą pojawiać się obszary z CZO_3 poniżej bariery 220D w sytuacji przemieszczania się krótko-życiowych „mini dziur” ozonowych generowanych zaburzeniami w cyrkulacji atmosferycznej i nie mającymi związku z procesami chemicznej destrukcji ozonu.



Rys. 4.13. Sezonowy przebieg minimalnej temperatury na poziomie 50 hPa w strefie 50-90°N w latach 2010 (niebieska linia) i 2011 (czerwona linia) w odniesieniu do średniego poziomu temperatury z lat 1979-2010 i ekstremalnych wartości dla tego okresu (źródło: opracowanie NOAA, USA)

W Arktyce tworzą się PSC, ale nie prowadzą do znacznego (poniżej 220D) obniżenia wartości CZO_3 . Zimą 2010/2011 r. stratosfera nad Arktyką była wyjątkowo wychłodzona, co sprzyjało pojawieniu się licznych PSC typ I i II (Rys.4.13). Heterogeniczne reakcje niszczące ozon, które zachodzą na powierzchni cząstek tworzących PSC, doprowadziły do pojawienia się nad Arktyką rozległego obszaru, gdzie deficyt ozonu był większy niż 30% wieloletniej normy. Taki deficyt CZO_3 przyjmuje się umownie za progową wartość występowania „dziury ozonowej” nad Arktyką. Dziura ozonowa nad Arktyką pojawiła się w środku zimy 2010/2011 i zanikła na początku kwietnia 2011 r. Powierzchnia „dziury ozonowej” ponad Arktyką osiągnęła rekordową wartość ~11 mln km² w końcu marca 2011 (Rys.4.14). Nie wydają się, że „dziura ozonowa” nad Arktyką będzie pojawiała się regularnie w następnych latach, tak jak to ma miejsce nad Antarktydą. Warunki

termiczne w stratosferze były wyjątkowe nad Arktyką zimą 2010/2011 i zbiegły się z niską aktywnością komórki cyrkulacyjnej Brewera-Dobsona (Krzyścin, 2012).



Rys.4.14. Powierzchnia „dziury ozonowej” nad Arktyką w 2011 r. (źródło: Krzyścin, 2012)

Obecnie umocnił się pogląd, iż niszczące ozon antropogeniczne substancje są główną przyczyną niedoborów CZO₃. 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°S-60°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 CO₂) 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 wzmacniając słabą wzrostową tendencję CZO₃. 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 będzie 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 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 CZO₃ 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., Krzyściński J., Kopcewicz B., Podgórski J., Sobolewski P., Pietruczuk A. „Monitoring całkowitej zawartości ozonu w atmosferze oraz natężenia promieniowania UV-B na stacji Belsk w latach 2011-2013” Raport o stanie warstwy ozonowej w 2010 roku, 2011, IGF PAN, zlecenie GIOŚ nr 48/2010/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., Stolarski R.S., and Newman P.A., 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., and Rajewska-Więch B., 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., and Rajewska-Więch B., 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. Krzyścin, J.W., Extreme ozone loss over the Northern Hemisphere high latitudes in the early 2011, *Tellus B- Atmosphere*, 2012 (in press).
8. Manney, G. L., Santee, M. L., Rex, M., Livesey, N. J., Pitts, and co-authors. 2011. Unprecedented Arctic ozone loss in 2011, *Nature*, doi:10.1038/nature10556.
9. Newchurch, M.J., Yang E.S., Cunnold D.M., Reinsel G.C., Zawodny J.C., and Russel III J.M., Evidence for slowdown in stratospheric ozone loss: First stage of ozone recovery, *Journal of Geophysical Research*, vol.108, 4507, 2003.
10. Rajewska-Więch B., and Krzyścin J., Changes in total column ozone at Belsk in perspective of ozone changes over Europe 1963-2008 (in Polish), *Przegląd Geofizyczny*, Z. 1-2, s. 49-59, 2010
11. Shepherd, T.G. and Jonsson A.I., 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
12. Shepherd, T.G., Dynamics, stratospheric ozone, and climate change, *Atmosphere-Ocean*, 46(1) ,117-138, doi:10.3137/ao.460106, 2009
13. Steinbrecht, W., Kohler U., Claude H., Weber M., Burrows J.P., and van der A R.J., Very high ozone columns at northern mid-latitudes in 2010, *Geophysical Research Letter*, 38, L06803, doi:10.1029/2011
14. Waugh, D. W., Oman L., Kawa S.R., Stolarski R.S., Pawson S., Douglass A.R., Newman P.A., and Nielsen J.E., Impacts of climate change on stratospheric ozone recovery, *Geophysical Research Letter*, 36, L03805, doi:10.1029/2008GL036223, 2009.