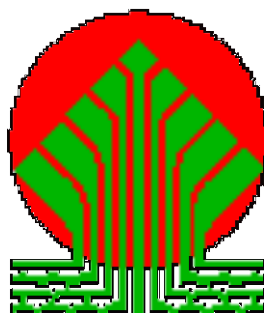




**Główny Inspektorat Ochrony Środowiska**

**MONITORING CAŁKOWITEJ ZAWARTOŚCI OZONU  
W ATMOSFERZE ORAZ NATĘŻNIA PROMIENIOWANIA  
UV-B NA STACJI BELSK W LATACH 2017-2020  
RAPORT O STANIE WARSTWY OZONOWEJ  
W 2018 ROKU**



Sfinansowano ze środków  
Narodowego Funduszu Ochrony  
Środowiska i Gospodarki Wodnej

Raport opracowano na zlecenie Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska i sfinansowano ze środków Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej

Warszawa, 2019

*Przy cytowaniu danych należy podawać źródło danych:  
Państwowy Monitoring Środowiska, Inspekcja Ochrony Środowiska*

## SPIS TREŚCI

Wstęp	3
1. Całkowita zawartość ozonu i jego rozkład pionowy	6
1.1 Całkowita zawartość ozonu uzyskana z pomiarów spektrofotometrem Dobsona, B. Rajewska-Więch, J.W. Krzyścin	6
1.2 Całkowita zawartość ozonu uzyskana z pomiarów spektrofotometrem Brewera, J. Jarosławski, B. Rajewska-Więch	15
1.3 Rozkład pionowy ozonu mierzony metodą Umkehr, B. Rajewska-Więch, J.W. Krzyścin	19
2. Zawartość dwutlenku siarki, ozonu, dwutlenku azotu i tlenku węgla przy powierzchni Ziemi	28
2.1 Dwutlenek siarki, J. Jarosławski, I. Pawlak	28
2.2 Ozon przyziemny i dwutlenek azotu, J. Jarosławski, I. Pawlak	32
2.3 Tlenek węgla, J. Jarosławski, I. Pawlak	37
2.4 Wyniki interkalibracji w Krajowym Laboratorium Referencyjnym wzorcującym	40
2.5 Omówienie wybranych aspektów dotyczących zmienności zanieczyszczeń gazowych zmierzonych na stacji COG PAN w Belsku w 2017 roku i w latach poprzednich, B. Kopcewicz, J. Jarosławski	40
3. Nadfioletowe promieniowanie słoneczne UV-B, A. Pietruczuk, J. Podgórski, P. Sobolewski, Jakub Wink	56
4. Zmiany zawartości ozonu w atmosferze nad Belskiem w 2017 roku na tle zmian globalnych ozonu, J.W. Krzyścin, B. Rajewska-Więch, Janusz Bokowski	
4.1 Całkowita zawartość ozonu w Belsku	67
4.2 Profil pionowy ozonu w Belsku	69
4.3 Ekstremalne wartości całkowitej zawartości ozonu w Belsku	71
4.4 Globalne zmiany całkowitej zawartości ozonu	77
4.5 Podsumowanie	89

**Załącznik 1.** Wyniki pomiarów całkowitej zawartości ozonu zmierzonych spektrofotometrem Dobsona na stacji IGF PAN w Belsku 01.01.2018 - 31.12.2018

**Załącznik 2.** Wyniki pomiarów stężeń gazowych zanieczyszczeń powietrza na stacji IGF PAN w Belsku 01.01.2018 - 31.12.2018

**Załącznik 3** Dane za rok 2018 całkowitej zawartości ozonu, rozkładu pionowego ozonu metodą Umkehr i promieniowania UV-B w Belsku w postaci arkusza Excel

## WSTĘP

Celem pracy jest:

- \* śledzenie stanu warstwy ozonowej nad Polską, trendów i skali zjawiska na tle globalnego procesu zmian warstwy ozonowej w celu zapewnienia naukowej podstawy i obiektywnego uzasadnienia działań podejmowanych na rzecz ochrony warstwy ozonowej
- \* zapewnienie podstaw do informowania społeczeństwa o skutkach zmian warstwy ozonowej objawiających się wzrostem natężenia biologicznie czynnego promieniowania UV-B w przypadku zmniejszenia zawartości ozonu w atmosferze
- \* 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 2018r. do 31 grudnia 2018r. zrealizowano wszystkie zadania zgodnie ze szczegółowym zakresem prac stanowiącym załącznik nr 1 do umowy nr 6/2017/F z dnia 5.04.2017r.

W ramach poszczególnych zadań w 2018 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 202 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.

Wyniki otrzymane z pomiarów są weryfikowane pod względem kompletności i spójności oraz przetwarzane do postaci umożliwiającej ich dalsze wykorzystywanie. Dodatkowo, po wykonaniu kalibracji spektrofotometrów dane historyczne są ponownie przeliczane, już z uwzględnieniem najnowszych współczynników kalibracyjnych. Dopiero tak przetworzone dane stanowią podstawę do interpretacji i analiz statystycznych. Zbiory danych powstałe w wyniku realizacji zadań są przechowywane na dysku twardym komputera zakładowego, a kopie zapasowe na nośnikach elektronicznych.

2. W Centralnym Obserwatorium Geofizycznym PAN w Belsku w 2018 roku kontynuowano rejestrację biologicznie czynnego ultrafioletowego promieniowania słonecznego, UV-B, rozpoczętą w roku 1975. Obecnie pomiary wykonywane są przy pomocy miernika UVS-AE-T firmy Kipp & Zonen (K&Z), w jednostkach [SED] (Standard Erythema Dose). Jednostka SED jest proponowana przez *International Organization for Standardization* (ISO) w miejsce jednostki MED. Minimum Erythema Dose. Zgodnie ze standardem ISO 17166:1999 stosowanie jednostek SED pozwala na prowadzenie standaryzowanych pomiarów promieniowania UV, które nie są obciążone indywidualnymi cechami osobniczymi determinującymi wystąpienie rumienia.

Wyniki otrzymane z pomiarów są weryfikowane pod względem kompletności i spójności oraz przetwarzane do postaci umożliwiającej ich dalszą obróbkę. Dodatkowo, po wykonaniu kalibracji dane historyczne są ponownie przeliczane już z uwzględnieniem najnowszych współczynników kalibracyjnych. Dopiero tak przetworzone dane stanowią podstawę do interpretacji i analiz statystycznych. Zbiory danych powstałe w wyniku realizacji zadań są przechowywane na dysku twardym komputera zakładowego, a kopie zapasowe na nośnikach elektronicznych.

3. W 2018 roku wykonywano w Belsku pomiary i rejestrację stężenia ozonu, SO<sub>2</sub>, CO i NO<sub>2</sub> w przyziemnej warstwie atmosfery. Pomiary te wykonywane są w sposób ciągły (24 godziny na dobę) miernikami firmy Monitor Labs, Monitor Europe i API. Na podstawie uzyskiwanych wartości chwilowych obliczane są średnie 60 min. Na ich podstawie przeprowadzana jest dalsza analiza wyników: obliczane są dobowe

wartości maksimum i minimum, średnia wartość dobową, średnie przebiegi dobowe oraz średnie miesięczne. Wyniki pomiarów przekazywano na bieżąco do bazy danych CAS znajdującej się w WIOŚ w Warszawie i przesyłane do Komisji Europejskiej trybie miesięcznym. Opracowano 1-godzinne wartości stężeń O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, CO i NO<sub>2</sub>. (Załącznik 2)

Wyniki otrzymane z pomiarów są weryfikowane pod względem kompletności i spójności oraz przetwarzane do postaci umożliwiającej ich dalszą obróbkę. Dodatkowo, po wykonaniu kalibracji dane historyczne są ponownie przeliczane już z uwzględnieniem najnowszych współczynników kalibracyjnych. Dopiero tak przetworzone dane stanowią podstawę do interpretacji i analiz statystycznych. Wyposażenie pomiarowe i używana aparatura podlegała nadzorowi i stałemu serwisowi.

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 za rok 2017 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**

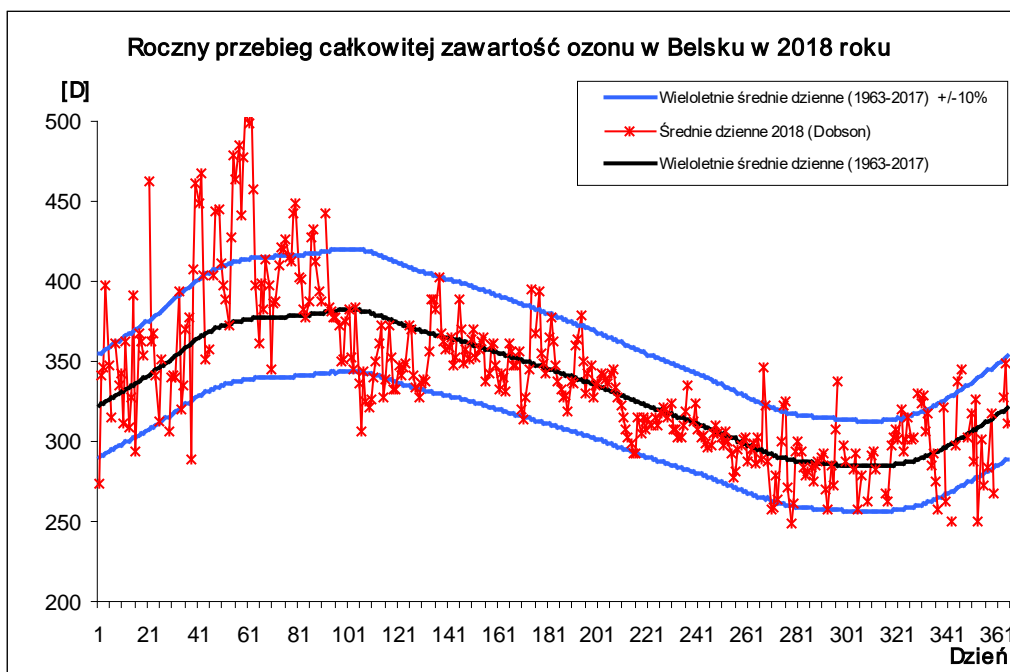
### **1.1 Całkowita zawartość ozonu uzyskana z pomiaru spektrofotometrem Dobsona**

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

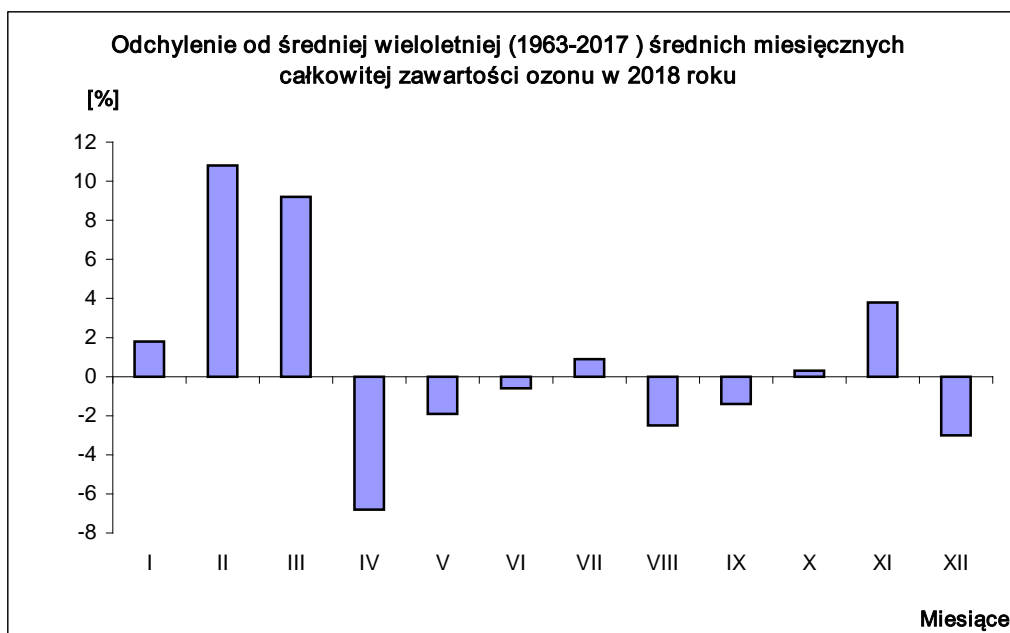
Całkowita zawartość ozonu jest wielkością, od której w znacznej mierze zależy dopływ do powierzchni Ziemi słonecznego promieniowania ultrafioletowego UV-B. Miarą jej jest grubość warstwy ozonu w atmosferze po sprowadzeniu go do warunków standardowych ciśnienia i temperatury. Średnio w atmosferze znajduje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

Analiza danych o całkowitej zawartości ozonu uzyskanych przy pomocy spektrofotometru Dobsona pozwala stwierdzić, że w 2018 roku średnie miesięczne wartości całkowitej zawartości ozonu w Belsku były wyższe od średniej wieloletniej z lat 1963-2017 w styczniu, lutym, marcu lipcu, i listopadzie, W październiku średnie miesięczne całkowitej zawartości ozonu były na poziomie średniej wieloletniej (1963-2017) Ujemne odchylenia średniej miesięcznej całkowitej zawartości ozonu od średniej wieloletniej zaobserwowano w kwietniu 6,8%, maju 1,9%, czerwcu 0,6% sierpniu 2,5%,wrześniu 1,4% i grudniu 3,0%.

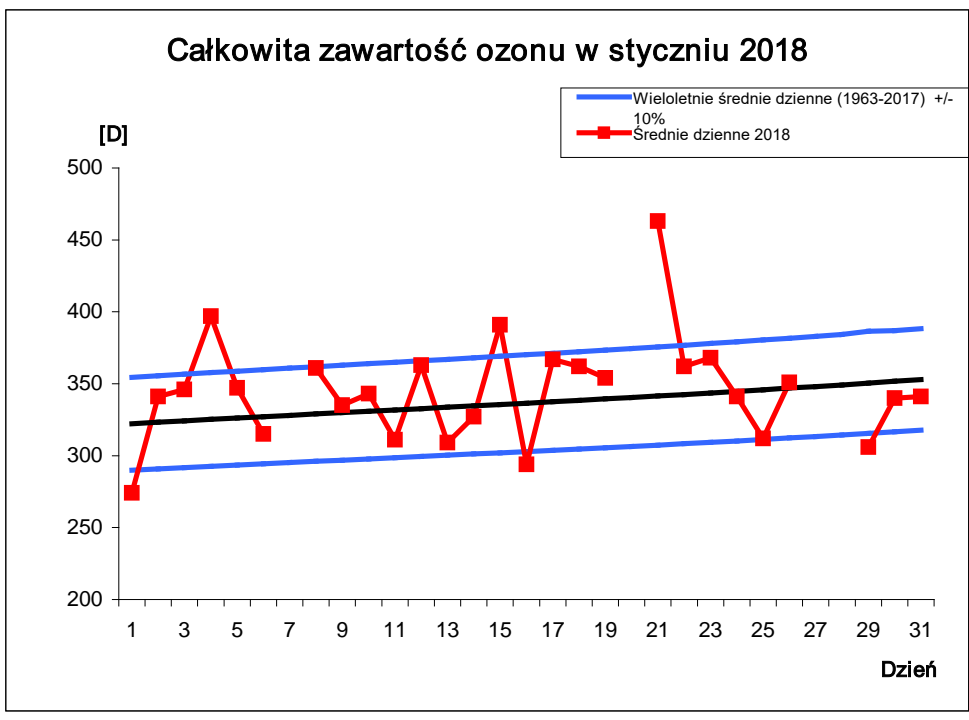
Przebieg średnich dziennych całkowitej zawartości ozonu w 2018 roku, zmierzonych spektrofotometrem Dobsona, w odniesieniu do wieloletniej średniej dziennej (1963-2017)  $\pm 10\%$  przedstawiono na Rys.1.1.1. Odchylenia procentowe średnich miesięcznych całkowitej zawartości ozonu od odpowiednich średnich wieloletnich przedstawia Tab.1.1.1 i Rys.1.1.1a.



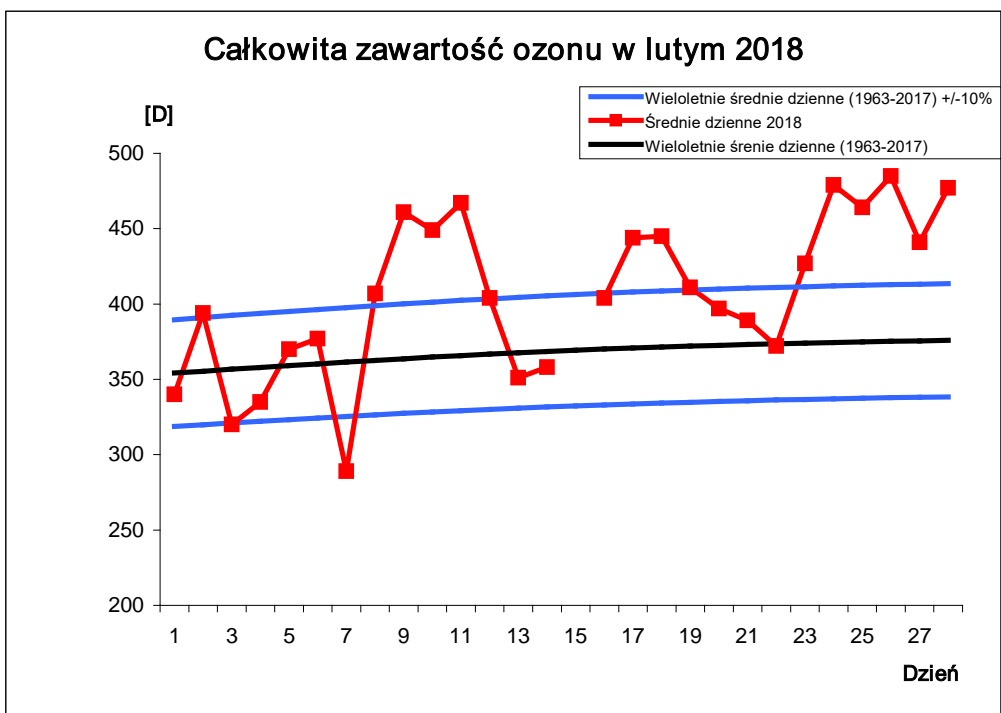
Rys. 1.1.1. Roczny przebieg średnich dziennych całkowitej zawartości ozonu, Belsk, 2018r.



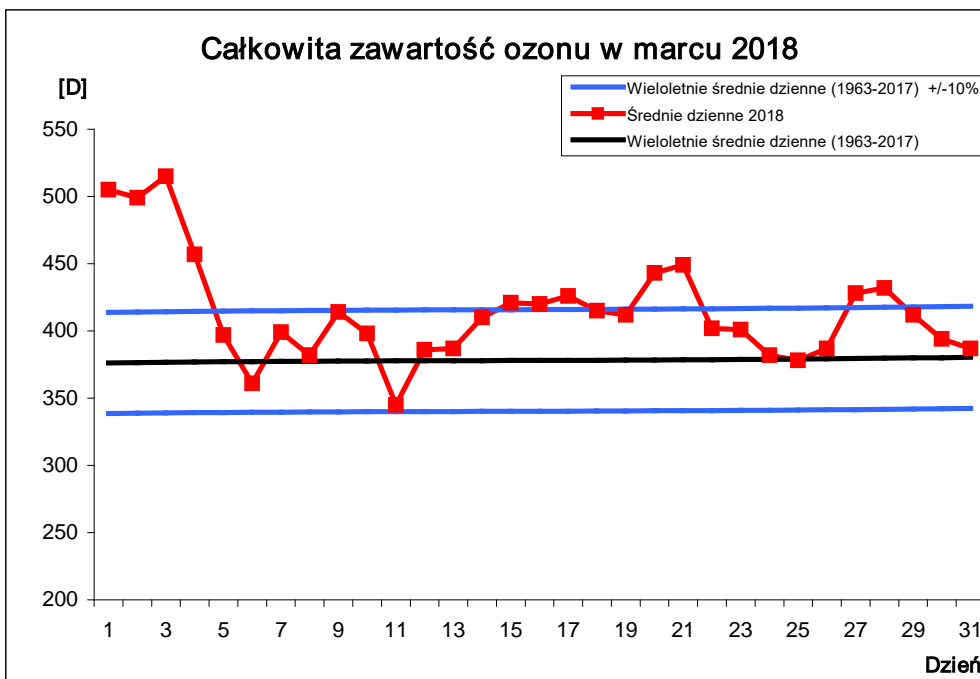
Rys.1.1.1.a. Odchylenie od średniej wieloletniej (1963-2017) średnich miesięcznych całkowitej zawartości ozonu w 2018 roku



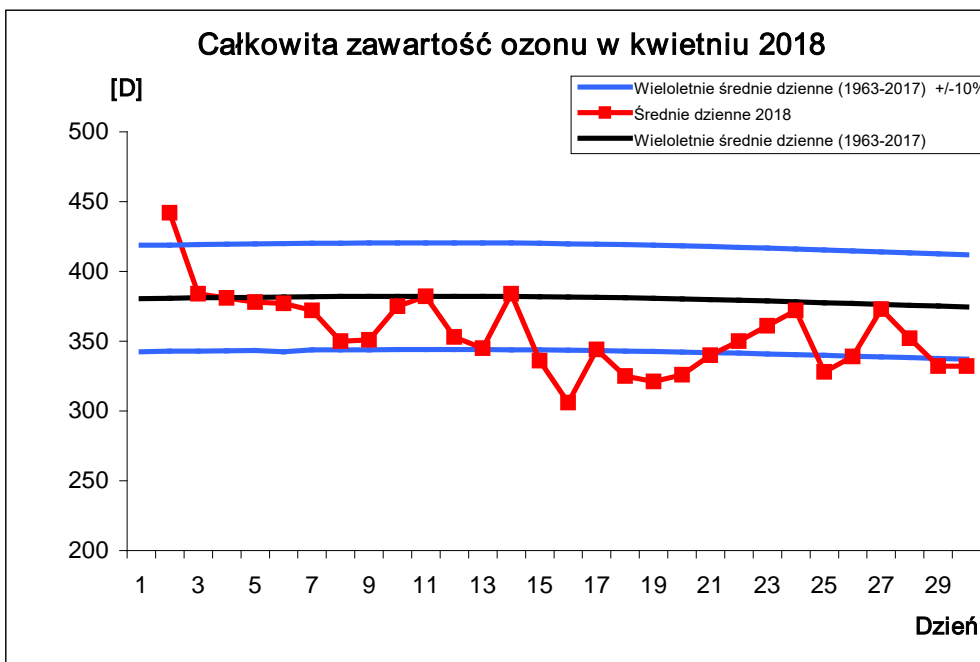
Rys. 1.1.2. Przebieg średnich dziennych całkowitej zawartości ozonu, styczeń 2018



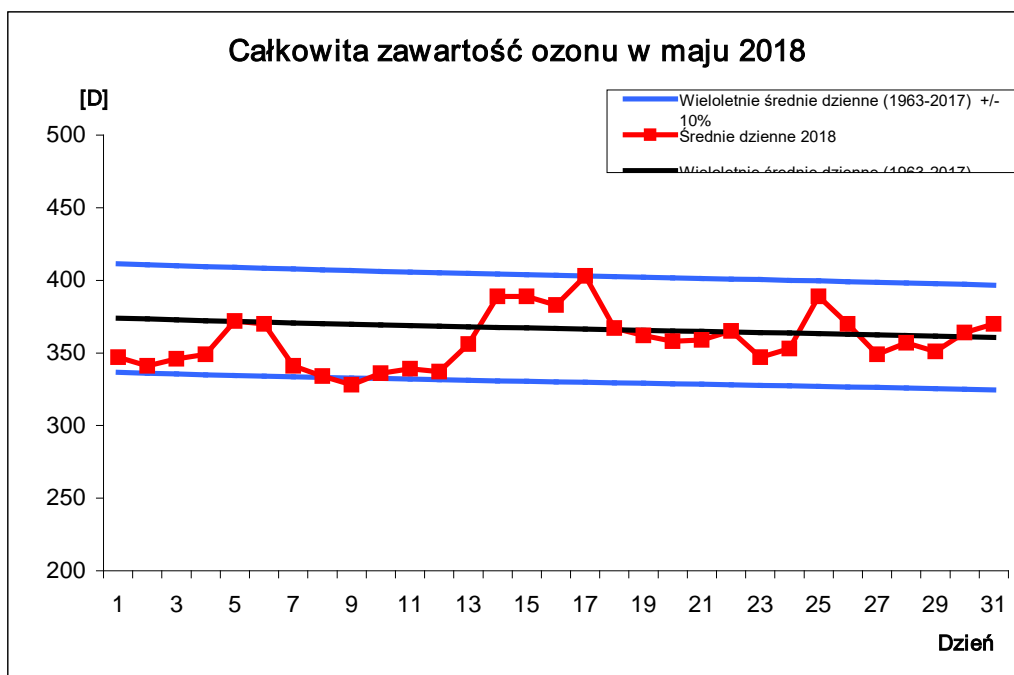
Rys. 1.1.3. Przebieg średnich dziennych całkowitej zawartości ozonu, luty 2018



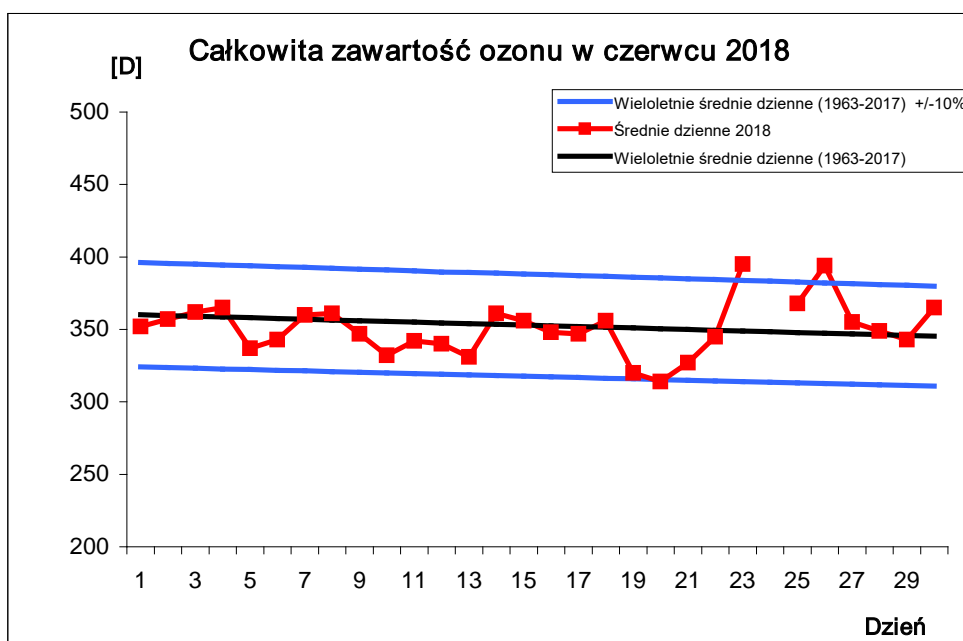
Rys.1.1.4. Przebieg średnich dziennych całkowitej zawartości ozonu, marzec 2018



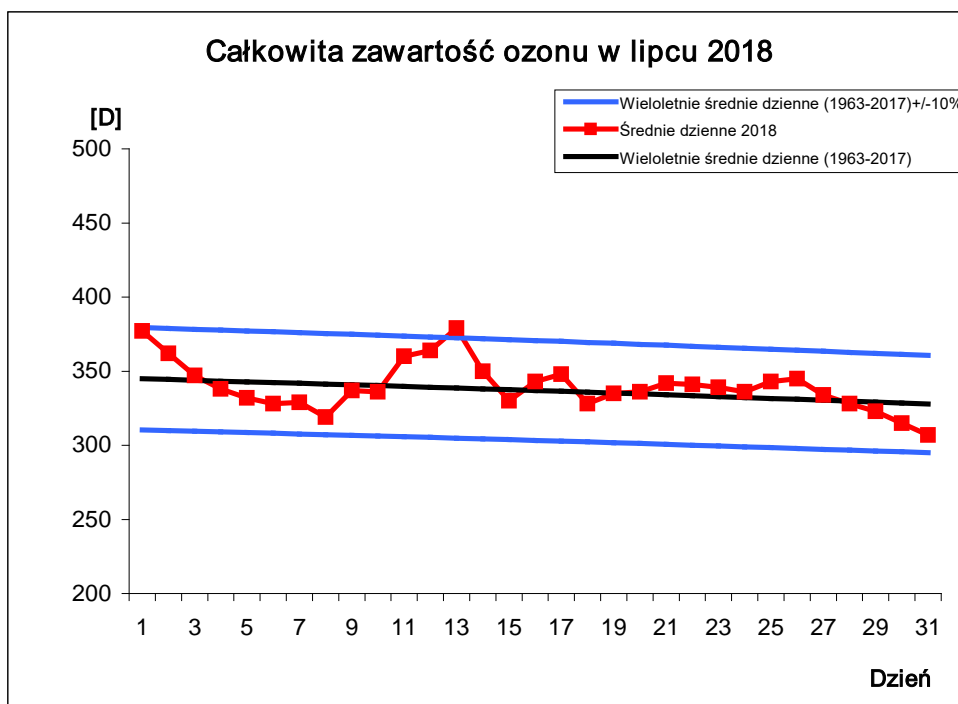
Rys.1.1.5. Przebieg średnich dziennych całkowitej zawartości ozonu, kwiecień 2018



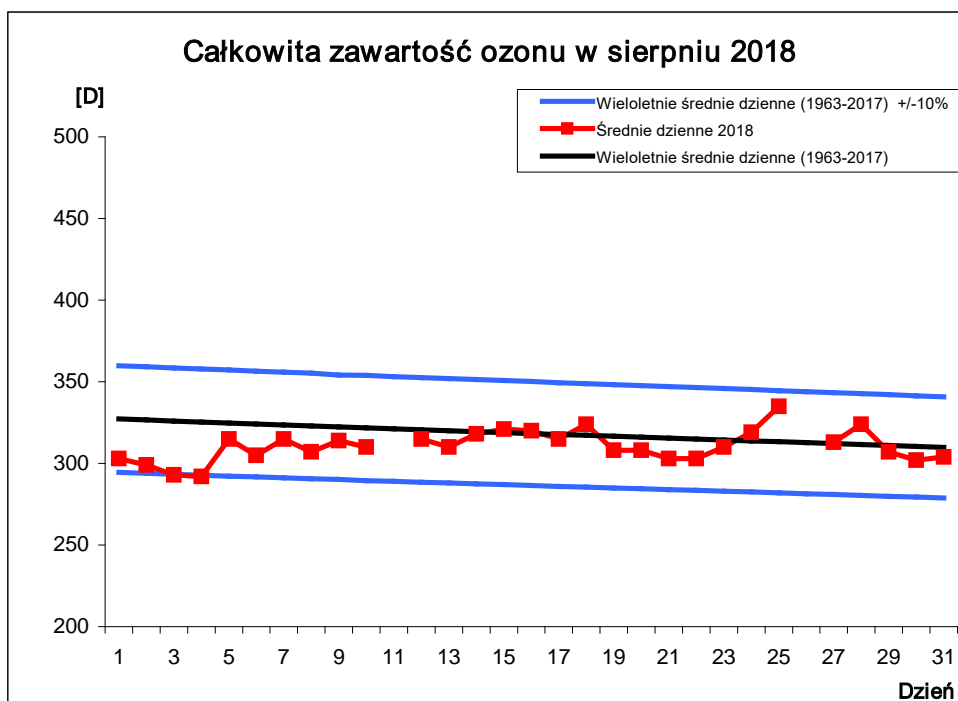
Rys.1.1.6. Przebieg średnich dziennych całkowitej zawartości ozonu, maj 2018



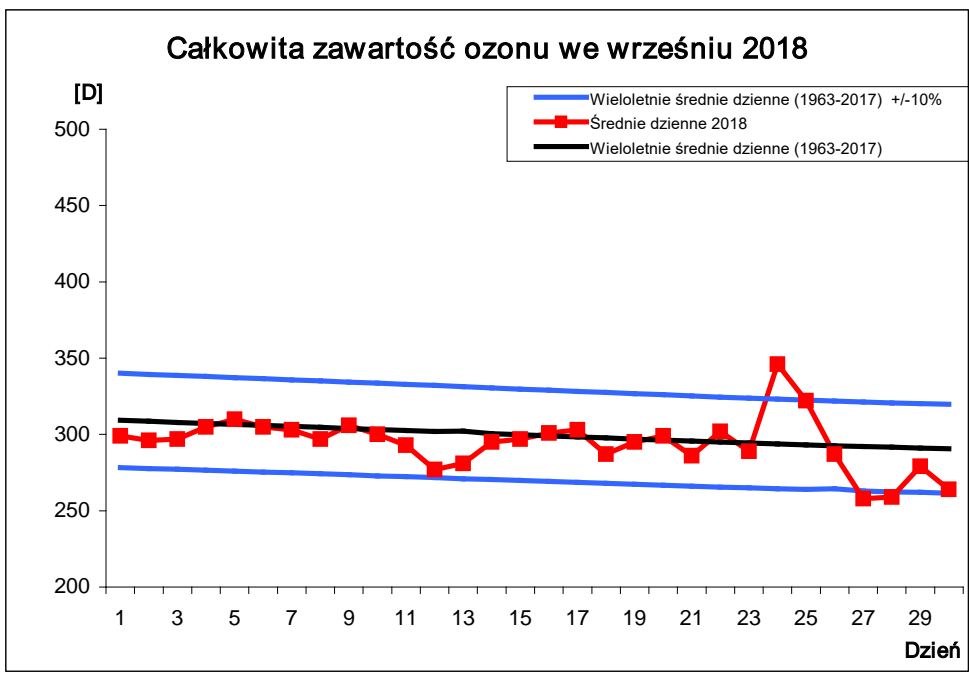
Rys.1.1.7. Przebieg średnich dziennych całkowitej zawartości ozonu, czerwiec 2018



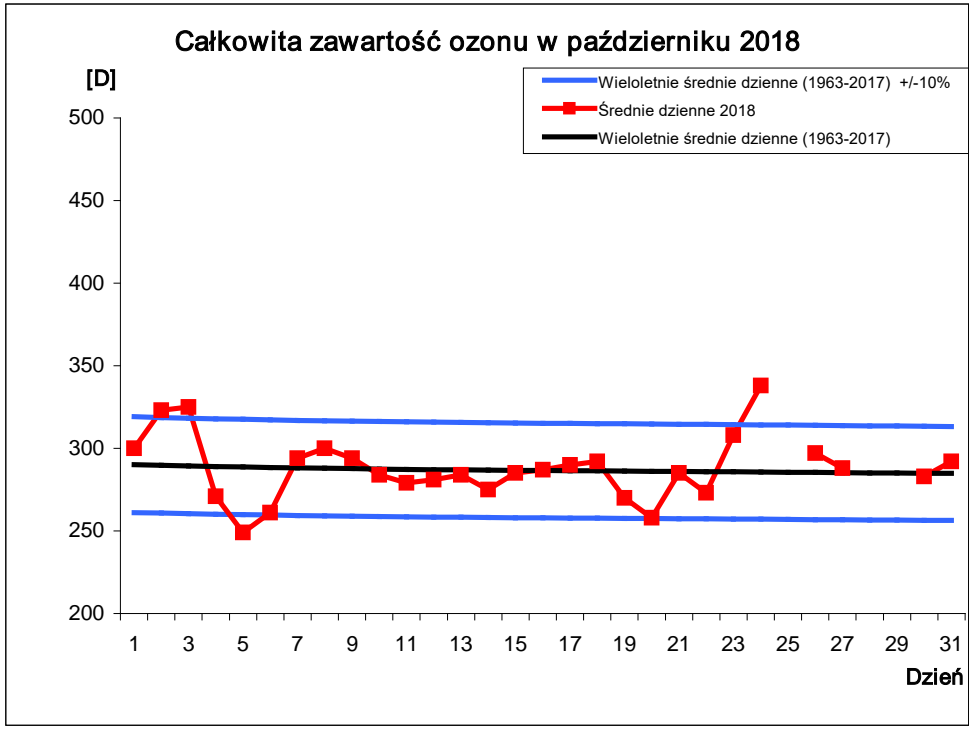
Rys.1.1.8. Przebieg średnich dziennych całkowitej zawartości ozonu, lipiec 2018



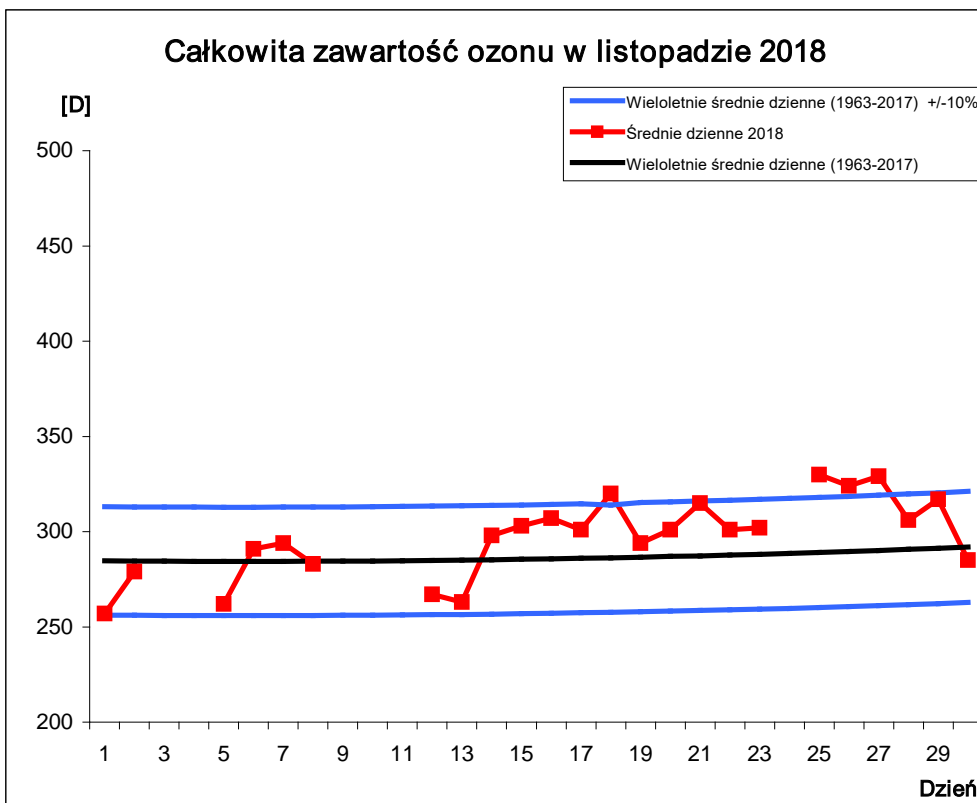
Rys.1.1.9. Przebieg średnich dziennych całkowitej zawartości ozonu, sierpień 2018



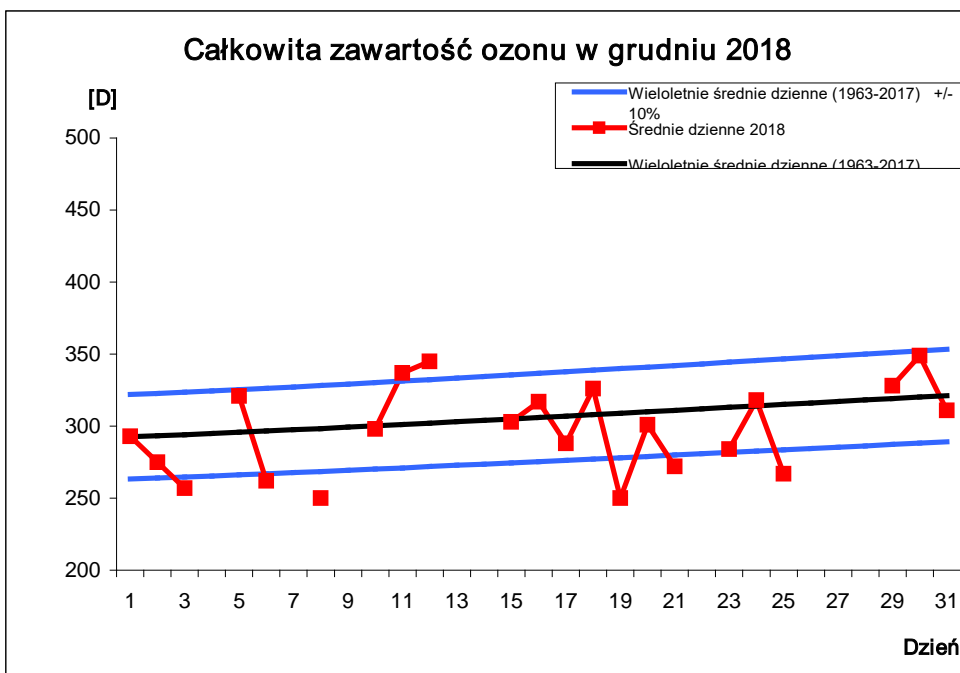
Rys.1.1.10. Przebieg średnich dziennych całkowitej zawartości ozonu, wrzesień 2018



Rys.1.1.11. Przebieg średnich dziennych całkowitej zawartości ozonu, październik 2018



Rys.1.1.12. Przebieg średnich dziennych całkowitej zawartości ozonu, listopad 2018



Rys.1.1.13. Przebieg średnich dziennych całkowitej zawartości ozonu, grudzień 2018

Tabela 1.1.1. Średnie miesięczne całkowitej zawartości ozonu [D] w 2018 roku i ich odstępstwa od średnich wieloletnich 1963-2017.

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
<b>Śr. wiel. 1963-2017</b>	338	370	379	382	367	353	337	318	299	287	286	307
<b>Śr. mieś. 2018</b>	344	410	414	356	360	351	340	311	295	288	297	298
<b>Różnica w %</b>	1,8	10,8	9,2	-6,8	-1,9	-0,6	0,9	-2,5	-1,4	0,3	3,8	-3,0

W miesiącach letnich 2018 roku, kiedy promieniowanie ultrafioletowe osiąga maksymalne natężenie, ze względu na dominującą zależność od wysokości Słońca, odchylenia średnich miesięcznych wartości ozonu w odniesieniu do średnich wieloletnich (1963-2017) wynosiły. -1,9% w maju, -0,6% w czerwcu, 0,9% w lipcu i -2,5% 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 2018 roku, linia czarna – wieloletnia (1963-2017) 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 kwietniu, maju, sierpniu wrześnieiu i grudniu. W kwietniu (Rys.1.1.5) średnie dzienne wartości całkowitej zawartości ozonu z wyjątkiem trzech dni były poniżej średniej wieloletniej. W maju (Rys.1.1.6) i w sierpniu (Rys.1.1.9) średnie dzienne całkowitej zawartości ozonu z wyjątkiem odpowiednio ośmiu i czterech dni w każdym z nich były niższe od średniej wieloletniej 1963-2017. We wrześniu (Rys.1.1.10) i grudniu (Rys.1.1.13) średnie dzienne całkowitej zawartości ozonu poza odpowiednio czterema i siedmioma dniami były poniżej wieloletniej średniej dziennej (1963-2017). Niedobory całkowitej zawartości ozonu w miesiącach letnich (maj, czerwiec, lipiec, sierpień) w stosunku do średniej wieloletniej mogą stanowić potencjalne zagrożenie wzmożonym dopływem promieniowania ultrafioletowego. Średnie dzienne wartości ozonu w ciągu całego lata (maj, czerwiec, lipiec, sierpień) były na poziomie  $\pm 10\%$  wieloletniej średniej dziennej (1963-2017). W październiku za wyjątkiem dziesięciu dni obserwowano w Belsku wartości ozonu powyżej średniej wieloletniej (Rys.1.1.11). W listopadzie

zanotowano siedem dni kiedy to średnie dzienne wartości ozonu były poniżej średniej wieloletniej dla tych dni.(Rys.1.1.12). W grudniu 2018 roku za wyjątkiem ośmiu dni średnia dzienna całkowitej zawartości ozonu była poniżej średniej wieloletniej (Rys.1.1.13). Spadki całkowitej zawartości ozonu, przekraczające -10% średniej wieloletniej obserwowano w styczniu, lutym, kwietniu, październiku i grudniu 2018 roku.

Przebieg zmienności z dnia na dzień całkowitej zawartości ozonu w Belsku w 2018 roku w odniesieniu do przebiegu średnich wieloletnich (1963-2017) 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 (GO<sub>3</sub>OS), działającego pod egidą Światowej Organizacji Meteorologicznej (WMO). Dzięki temu mamy dostęp do aktualnych danych o całkowitej zawartości ozonu w ciągu całego roku, uzyskiwanych 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 2018 roku.

## **1.2 Całkowita zawartość ozonu uzyskana z pomiaru spektrofotometrem Brewera**

**Janusz Jarosławski, Bonawentura Rajewska-Więch**

Przez cały 2018 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

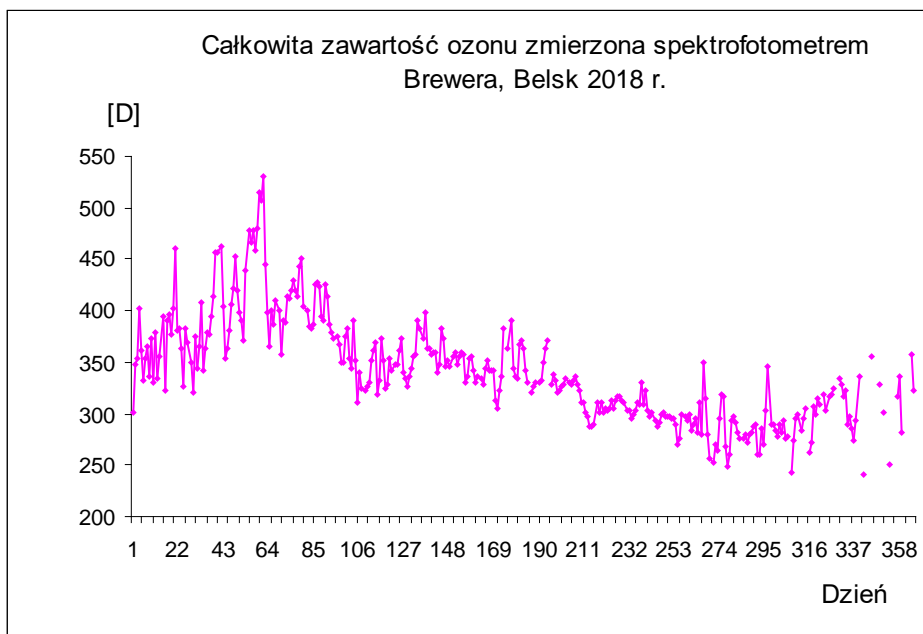
W dniach od 14.05.2017r. do 19.05.2017r. odbyło się w Poprad Ganovce, Słowacja porównanie spektrofotometru Brewera No. 64 ze standardem światowym, spektrofotometrem kanadyjskim No.17. Wykonano wzorcowanie spektrofotometru oraz pomiary porównawcze całkowitej zawartości ozonu i promieniowania UV-B. Poziom kalibracji jest zgodny ze wzorcowym spektrofotometrem kanadyjskim w granicach 1%.

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 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 ( $\text{SO}_2$ ). Mimo wymienionych różnic pomiarowych, średnie miesięczne całkowitej zawartości ozonu uzyskane przy pomocy obydwu przyrządów różnią się niewiele (Rys.1.2.2).

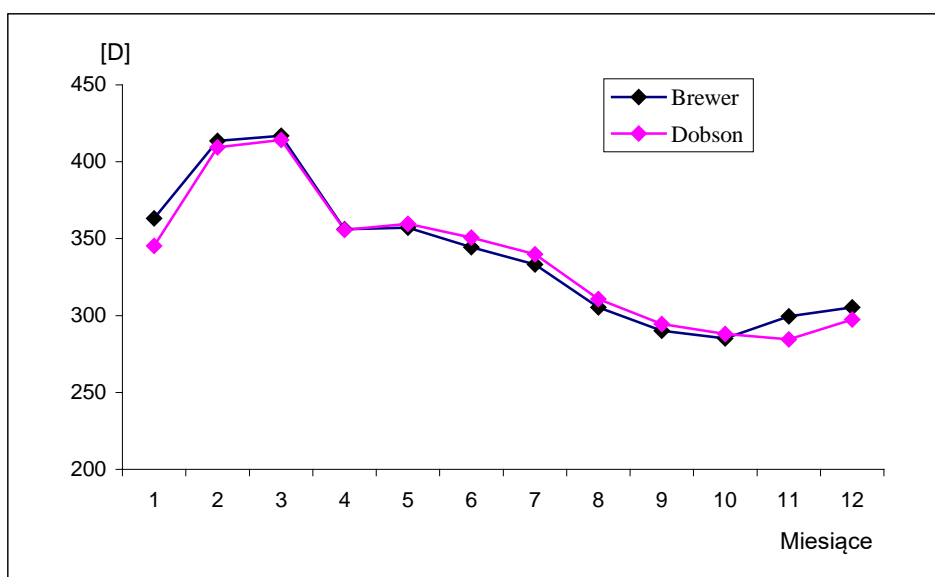
Jakkolwiek podstawowym przyrządem sieci pomiarów całkowitej zawartości ozonu nadal pozostaje spektrofotometr Dobsona, to jednak możliwość kontynuacji pomiarów i analiz porównawczych obu przyrządów jest niezwykle ważna, chociażby ze względu na zapewnienie ciągłości serii pomiarów.

Tabela 1.2.1. Średnie dzienne wartości całkowitej zawartości ozonu uzyskane z pomiaru spektrofotometrem Brewera w Belsku w 2017 roku.

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
<b>1</b>	301,8	364,7	515,5	425,4	352,7	348,4	370,3	296,7	293,6	295,1	275,8	298,0
<b>2</b>	347,3	408,1	508,0	413,5	341,7	356,3	362,8	287,9	288,1	317,9	277,7	286,4
<b>3</b>	352,7	341,4	530,6	387,3	347,7	360,3	341,3	287,9	290,6	316,3	-	273,0
<b>4</b>	401,8	363,5	445,8	379,4	347,8	357,4	330,8	289,4	298,5	267,4	242,7	293,6
<b>5</b>	360,7	378,1	398,7	372,5	361,5	330,1	-	310,6	300,8	249,1	273,0	335,4
<b>6</b>	332,5	376,4	364,8	375,8	372,8	337,0	321,5	300,7	297,7	260,2	292,8	-
<b>7</b>	-	394,1	400,7	366,5	340,9	354,5	327,1	310,0	296,3	293,0	299,4	240,9
<b>8</b>	364,6	413,0	386,7	350,5	334,9	355,6	330,0	301,2	297,7	297,2	283,9	-
<b>9</b>	336,3	456,0	409,8	348,9	326,1	342,1	330,6	305,0	295,5	290,6	295,7	-
<b>10</b>	373,2	456,8	400,7	374,4	335,5	331,0	331,9	303,2	295,1	281,4	304,4	336,7
<b>11</b>	331,1	463,2	357,0	382,5	343,3	335,4	350,2	305,6	288,6	275,7	299,8	355,9
<b>12</b>	378,9	404,9	389,9	354,0	356,1	335,1	362,7	312,8	269,9	276,3	262,9	361,5
<b>13</b>	333,7	354,2	388,9	344,3	356,8	328,8	370,9	305,9	276,0	278,8	271,9	-
<b>14</b>	355,5	362,9	413,2	391,2	391,1	344,8	-	313,4	299,1	271,2	307,8	-
<b>15</b>	394,4	380,8	412,7	351,0	383,6	350,9	327,9	315,9	297,0	280,6	299,8	328,6
<b>16</b>	323,2	405,3	420,3	309,9	373,1	342,0	338,2	316,5	294,3	282,6	315,3	-
<b>17</b>	391,2	422,0	428,7	340,1	398,1	342,3	332,3	312,8	299,0	287,7	308,5	300,8
<b>18</b>	396,4	452,0	419,5	324,1	362,7	342,6	320,0	311,8	284,0	289,6	351,5	-
<b>19</b>	376,5	418,8	414,7	322,0	363,5	312,0	322,0	302,5	289,0	260,0	318,2	251,3
<b>20</b>	402,7	398,4	443,9	326,2	357,2	305,7	326,9	302,2	294,9	261,2	302,1	333,2
<b>21</b>	461,2	391,2	-	331,0	360,0	321,7	328,9	294,8	281,6	285,5	315,8	-
<b>22</b>	380,5	371,6	403,5	351,4	359,8	336,3	335,0	298,6	310,1	270,1	318,0	-
<b>23</b>	382,3	439,9	401,2	361,6	340,8	383,3	331,0	303,4	280,5	302,9	324,1	316,7
<b>24</b>	363,7	477,1	385,2	369,7	348,0	-	327,6	310,0	349,6	345,2	355,0	336,4
<b>25</b>	327,1	466,1	382,1	319,0	382,1	363,6	332,2	309,4	315,0	290,3	-	282,6
<b>26</b>	382,6	478,6	387,0	331,3	373,1	390,3	336,8	329,9	279,6	290,3	334,1	-
<b>27</b>	-	457,9	425,3	373,7	346,6	344,3	327,5	308,5	256,2	282,7	328,8	-
<b>28</b>	350,0	480,7	427,9	351,4	352,1	337,0	323,0	321,7	252,6	278,4	317,4	-
<b>29</b>	320,8		423,7	324,7	345,7	333,5	311,5	302,6	270,2	289,8	323,12	-
<b>30</b>	374,3		393,8	329,3	355,7	366,5	311,0	296,8	264,2	280,9	289,8	357,9
<b>31</b>	343,4		389,7		359,7		301,7	300,5		293,5		322,5



Rys.1.2.1. Przebieg średnich dziennych całkowitej zawartości ozonu zmierzonej spektrofotometrem Brewera, Belsk 2018



Rys.1.2.2. Przebieg średnich miesięcznych całkowitej zawartości ozonu zmierzonych spektrofotometrem Dobsona i Brewera, Belsk 2018

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

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

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

W 2018 roku wykonano 201 serii pomiarowych przy pomocy spektrofotometru Dobsona pozwalających wyznaczyć pionowy rozkład ozonu metodą Umkehr (w tym 36 pomiarów zwanych „krótki Umkehr”).

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 umkehrskich

Data	Zawartość Ozonu w warstwach [D]										O <sub>3</sub> [D]
	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
5 02 2018 P	1,54	3,95	10,09	20,8	35,0	55,0	83,0	78,7	49,2	34,2	372
7 02 2018 A	1,55	4,06	10,57	21,3	33,7	59,1	90,4	83,8	51,5	33,8	390
20 02 2018 A	1,47	3,61	9,41	21,3	37,2	59,9	84,0	84,4	56,9	36,4	395
20 02 2018 P	1,49	3,75	10,33	24,0	38,0	57,9	80,1	82,6	60,6	38,8	399
21 02 2018 A	1,49	3,75	9,95	21,8	38,3	66,6	90,3	79,5	49,9	33,5	395
22 02 2018 P	1,52	4,07	11,59	25,3	39,6	61,6	81,0	73,1	47,8	34,6	381
1 03 2018 A	1,43	3,42	8,97	21,2	41,5	70,7	98,7	119,3	94,4	45,4	506
2 03 2018 A	1,44	3,5	9,17	20,1	36,3	67,2	104,0	128,1	89,8	41,7	501
2 03 2018 P	1,48	3,93	11,13	24,1	41,2	75,0	105,6	109,4	75,4	39,6	487
4 03 2018 A	1,44	3,58	9,75	22,2	40,0	72,1	101,1	101,5	68,5	37,6	458
5 03 2018 A	1,42	3,47	9,48	22,7	42,0	69,3	87,3	75,1	48,6	34,1	394
8 03 2018 A	1,3	2,61	5,47	10,2	24,3	77,6	112,7	78,5	42,6	30,0	384
18 03 2018 A	1,43	3,75	10,89	21,4	30,8	53,7	93,3	103,2	63,9	35,9	418
19 03 2018 P	1,41	3,59	10,51	22,7	35,4	59,0	87,3	89,1	59,0	36,6	405
21 03 2018 A	1,44	3,97	11,78	22,1	31,9	58,1	98,9	107,4	68,0	36,9	441
24 03 2018 P	1,42	3,81	11,76	25,0	41,0	72,8	90,0	66,0	38,3	29,5	379
26 03 2018 A	1,31	2,93	7,82	18,3	35,1	60,9	84,0	81,0	53,1	36,4	382
30 03 2018 A	1,35	3,34	10,4	25,4	40,7	67,3	94,5	78,0	44,5	30,4	395
4 04 2018 A	1,32	3,24	10,05	24,1	37,8	60,2	83,9	78,6	49,2	34,0	383
6 04 2018 P	1,35	3,52	11,52	26,9	41,4	62,7	79,1	68,8	43,6	33,3	373
7 04 2018 A	1,32	3,27	10,15	23,4	38,2	62,2	82,7	72,8	44,4	32,9	372
8 04 2018 A	1,31	3,25	10,24	24,2	37,5	55,9	71,1	64,7	42,7	36,5	350
9 04 2018 A	1,30	3,14	9,61	22,6	37,7	59,2	75,8	66,1	40,1	33,2	350
10 04 2018 A	1,29	3,07	9,30	21,5	34,5	49,9	71,7	83,3	59,9	42,6	379
12 04 2018 A	1,27	2,98	8,99	21,5	35,7	56,1	76,3	70,1	43,1	34,6	352
12 04 2018 P	1,27	2,95	9,14	23,9	39,9	58,7	72,2	61,7	38,7	34,3	345
13 04 2018 A	1,27	3,01	9,42	23,8	39,0	56,1	70,4	63,2	39,5	35,2	343
18 04 2018 A	1,27	3,07	9,62	22,2	37,1	58,6	72	56,2	31,3	31,3	323
18 04 2018 P	1,26	3,02	9,72	24,6	40,0	57,6	69,3	56,4	32,1	31,0	325
19 04 2018 A	1,26	2,96	9,36	23,5	41,1	59,4	67,1	52,0	30,2	32,1	320
19 04 2018 P	1,26	2,98	9,23	21,6	37,2	58,3	69,8	55,4	32,1	33,1	322
20 04 2018 A	1,23	2,8	8,68	23,0	40,2	58,5	69,7	57,1	33,6	32,5	329

Tabela 1.3.1 cd. Zawartości ozonu w poszczególnych warstwach umkehrwskich

Data	Zawartość Ozonu w warstwach [D]										O <sub>3</sub>
	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	[D]
20 04 2018 P	1,24	2,88	9,08	23,4	38,7	54,8	66,9	56,8	33,5	33,7	322
21 04 2018 P	1,26	3,03	9,93	24,5	38,7	55,7	69,5	60,8	36,8	34,0	336
22 04 2018 P	1,24	2,91	9,63	27,0	43,8	59,8	70,5	59,3	37,1	33,0	346
27 04 2018 A	1,24	2,94	9,19	19,9	30,4	50,6	79,3	84,8	53,8	36,7	370
27 04 2018 P	1,25	3,03	10,02	23,5	37,0	58,1	77,8	70,4	42,1	32,8	357
29 04 2018 A	1,23	2,90	9,56	24,2	40,9	61,4	72,7	56,2	31,0	29,3	330
30 04 2018 A	1,21	2,77	8,57	20,2	34,3	49,9	67,4	66,3	42,7	40,2	337
4 05 2018 A	1,21	2,83	9,24	22,2	36,3	56,5	75,9	70,2	42,1	33,5	351
4 05 2018 P	1,20	2,73	8,98	23,6	38,0	56,2	70,6	64,8	42,5	36,7	348
5 05 2018 A	1,19	2,67	8,83	24,3	40,3	51,0	64,8	81,9	56,8	42,1	374
6 05 2018 A	1,20	2,77	9,02	21,9	35,1	54,7	72,5	74,6	53,2	39,4	367
7 05 2017 A	1,18	2,62	8,43	22,7	40,1	59,8	72,9	62,6	38,0	33,3	343
7 05 2018 P	1,21	2,88	10,08	26,0	39,7	55,8	69,1	60,4	35,9	32,7	335
8 05 2018 P	1,19	2,72	9,07	23,3	37,4	55,6	68,1	60,1	38,7	36,7	336
9 05 2018 A	1,19	2,72	9,06	22,7	35,1	50,7	68	61,6	35,8	34,3	322
10 05 2018 P	1,18	2,66	8,79	23,3	38,9	55,5	68,8	61,8	37,8	34,5	335
11 05 2018 A	1,16	2,56	8,31	22,6	39,0	55,8	69,5	61,7	37,3	34,3	334
13 05 2018 A	1,19	2,78	9,46	23,5	38,2	57,4	73,4	67,1	41,7	34,6	351
21 05 2018 A	1,15	2,59	8,76	22,7	35,2	53,4	71,9	74,5	49,9	37,7	360
22 05 2018 P	1,15	2,59	8,97	23,6	34,0	48,8	64,0	74,6	52,1	38,6	351
23 05 2018 P	1,16	2,66	8,98	21,6	34,1	47,7	69,6	71,3	47,7	40,4	348
24 05 2018 A	1,14	2,56	8,53	21,8	36,0	54,6	72,3	66,5	40,5	35,2	341
24 05 2018 P	1,15	2,61	8,92	22,5	35,1	54,3	71,5	70,3	46,9	38,0	354
28 05 2018 A	1,13	2,50	8,42	22,8	39,0	57,1	72,2	67,9	43,3	35,9	352
28 05 2018 P	1,15	2,62	9,25	25,2	40,8	60,1	74,1	64,0	38,9	32,9	350
29 05 2018 A	1,13	2,51	8,52	22,6	36,7	54,9	70,6	69,5	46,6	37,6	353
29 05 2018 P	1,13	2,49	8,58	24,5	40,2	55,7	70,4	67,4	43,5	36,4	352
30 05 2018 A	1,14	2,57	8,97	23,1	34,7	53,2	71,7	77,1	53,8	39,1	368
30 05 2018 P	1,13	2,48	8,54	23,8	37,4	55,9	71,8	69,5	48,6	38,7	361
31 05 2018 P	1,15	2,70	9,79	25,2	38,6	53,2	69,1	75,8	52,7	40,1	370
1 06 2018 A	1,13	2,53	8,86	24,6	39,8	55,9	70,2	65,8	41,8	35,7	348
3 06 2018 A	1,13	2,52	8,43	20,9	34,7	55,8	74,3	72,9	48,8	38,2	360

Tabela 1.3.1 cd. Zawartości ozonu w poszczególnych warstwach umkehrwskich

Data	Zawartość Ozonu w warstwach [D]										O <sub>3</sub>
	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	[D]
4 06 2018 P	1,11	2,39	8,06	22,7	37,5	56,9	73,4	69,0	48,6	39,0	362
5 06 2018 A	1,14	2,62	9,20	23,4	37,7	54,6	68,6	62,3	38,3	35,1	335
6 06 2018 A	1,12	2,43	8,19	23,4	45,7	65,2	68,2	52,3	30,8	31,3	330
6 06 2018 P	1,13	2,56	9,11	25,5	44,2	65,0	75,1	60,7	36,0	31,1	351
7 06 2018 A	1,13	2,53	8,69	22,7	40,5	63,2	75,6	63,0	39,1	34,0	352
7 06 2018 P	1,11	2,40	8,20	24,5	43,5	62,0	74,4	65,0	41,4	34,0	358
8 06 2018 A	1,12	2,46	8,4	23,4	41,9	62,9	76,3	66,5	42,3	34,3	361
8 06 2018 P	1,13	2,57	9,12	24,5	40,0	58,9	73,5	66,8	42,1	34,8	355
11 06 2018 P	1,12	2,49	8,64	23,6	40,1	59,7	72,3	61,3	37,0	33,2	341
15 06 2018 A	1,12	2,46	8,41	22,7	39,5	61,1	77,0	65,7	38,4	31,8	349
15 06 2018 P	1,11	2,46	8,74	26,2	41,8	58,7	75,7	72,1	45,3	33,4	366
16 06 2018 A	1,13	2,56	8,99	23,2	38,9	61,4	77,3	64,0	36,7	31,2	346
20 06 2018 A	1,10	2,38	8,03	22,9	42,4	58,8	62,7	47,7	26,7	31,4	305
29 06 2018 A	1,13	2,57	8,99	23,0	37,6	56,8	71,9	63,6	38,9	34,7	341
4 07 2018 P	1,12	2,48	8,35	21,8	36,0	53,2	70,1	64,5	39,8	36,3	336
5 07 2018 A	1,13	2,58	8,97	22,3	34,0	54,0	66,6	59,7	39,3	38,4	331
5 07 2018 P	1,11	2,41	8,24	23,9	38,7	50,9	65,5	62,9	40,4	38,3	335
6 07 2018 A	1,14	2,66	9,65	25,8	40,5	54,9	64,7	56,7	34,6	35,1	328
6 07 2018 P	1,11	2,37	7,85	22,0	38,2	54,4	67,4	58,5	35,0	34,9	324
9 07 2018 P	1,12	2,47	8,31	23,5	43,1	63,2	71,4	55,1	31,6	30,5	331
21 07 2018 P	1,16	2,68	9,13	23,7	38,4	56,0	69,3	60,7	37,4	35,3	336
23 07 2018 P	1,16	2,69	9,15	24,1	40,4	60,3	71,0	56,1	34,3	33,6	335
24 07 2018 A	1,16	2,66	8,80	21,8	35,3	52,6	68,4	60,5	36,8	36,4	327
24 07 2018 P	1,14	2,55	8,32	22,3	37,5	54,8	68,8	60,4	37,0	35,8	331
25 07 2018 A	1,16	2,68	9,06	23,3	35,8	52,5	71,0	67,1	41,4	34,7	340
28 07 2018 A	1,19	2,91	10,23	24,7	36,7	54,4	69,8	58,2	33,3	32,1	325
31 07 2018 A	1,16	2,66	8,87	24,5	38,5	52,7	63,2	51,1	29,1	33,1	306
1 08 2018 A	1,16	2,61	8,31	21,5	37,5	55,5	63,1	47,7	26,5	32,7	298
1 08 2018 P	1,1	2,20	6,21	17,9	39,1	44,6	57,9	56,7	31,7	40,7	301
2 08 2018 A	1,15	2,49	7,70	21,0	37,5	51,5	59,0	46,3	25,8	35,1	290
2 08 2018 P	1,17	2,68	8,64	21,3	32,8	49,5	62,1	54,2	31,2	35,9	302
3 08 2018 A	1,17	2,68	8,72	23,0	38,2	54,3	60,3	44,6	24,4	32,2	291

Tabela 1.3.1 cd. Zawartości ozonu w poszczególnych warstwach umkehrwskich

Data	Zawartość Ozonu w warstwach [D]										O <sub>3</sub>
	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	[D]
4 08 2018 A	1,17	2,64	8,48	23,0	38,7	53,9	59,3	44,1	24,4	32,6	290
6 08 2018 A	1,18	2,72	8,78	23,3	40,0	58,2	65,0	46,9	25,4	30,1	302
6 08 2018 P	1,19	2,78	8,93	22,6	39,7	61,5	68,1	46,2	23,9	27,6	302
7 08 2018 A	1,17	2,63	8,30	22,7	39,6	57,8	66,3	49,3	27,3	31,2	307
7 08 2018 P	1,15	2,48	7,63	22,4	39,7	55,2	66,5	55,6	33,3	34,7	321
8 08 2018 A	1,18	2,66	8,40	22,8	39,2	56,0	63,0	47,3	27,0	32,8	302
8 08 2018 P	1,18	2,69	8,72	24,8	41,4	57,1	63,4	46,5	25,8	30,7	303
9 08 2018 A	1,21	2,89	9,29	21,8	33,6	52,9	64,2	52,6	32,4	37,2	311
10 08 2018 A	1,21	2,87	9,30	23,2	37,8	55,9	63,8	47,0	26,9	33,2	303
13 08 2018 A	1,21	2,80	8,67	21,3	35,9	54,6	65,9	51,3	29,0	33,6	306
13 08 2018 P	1,19	2,67	8,40	23,7	39,3	53,0	63,0	51,9	30,5	34,8	310
14 08 2018 A	1,18	2,57	7,93	23,7	41,3	56,5	65,6	47,4	30,5	36,2	316
16 08 2018 A	1,21	2,80	8,66	22,0	35,0	52,7	69,7	58,5	33,8	33,7	319
16 08 2018 P	1,21	2,81	8,81	22,7	36,7	53,8	67,8	55,2	32,0	33,7	316
17 08 2018 A	1,21	2,80	8,51	21,3	35,7	55,5	69,7	54,6	30,2	31,9	312
17 08 2018 P	1,21	2,77	8,45	21,7	37,4	57,4	68,3	51,8	30,1	33,4	314
19 08 2018 A	1,22	2,81	8,54	21,7	36,6	55,8	66,2	50,5	28,9	33,2	307
20 08 2018 P	1,22	2,84	8,77	22,4	35,1	51,5	63,2	53,2	31,5	35,3	307
22 08 2018 A	1,22	2,81	8,46	22,1	38,3	55,9	63,8	47,0	26,1	32	299
22 08 2018 P	1,24	2,97	9,36	23,8	37,6	55,0	64,9	48,8	27,3	31,9	304
23 08 2018 A	1,23	2,88	8,50	20,3	34,0	52,0	66,1	53,0	30,5	35,4	306
23 08 2018 P	1,26	3,07	9,97	25,5	37,8	51,0	63,0	51,8	30,3	34,8	310
24 08 2018 A	1,23	2,82	8,67	23,8	37,0	54,4	65,3	51,9	33,3	36,6	318
27 08 2018 A	1,27	3,08	9,41	22,5	36,4	57,2	71,2	51,8	27,6	29,7	310
27 08 2018 P	1,27	3,10	9,77	24,3	37,0	52,2	64,4	51,4	29,7	33,7	308
29 08 2018 A	1,26	3,03	9,37	24,7	39,5	56,8	67,9	48,6	25,4	28,0	304
29 08 2018 P	1,25	2,91	8,64	22,0	37,2	56,0	65,3	48,0	28,0	33,8	305
30 08 2018 A	1,26	2,94	8,64	21,6	36,6	54,6	63,6	47,0	26,0	32,4	296
30 08 2018 P	1,27	3,02	9,36	25,2	39,2	54,6	63,5	47,6	26,6	31	302
31 08 2018 P	1,27	2,99	8,76	21,1	34,2	49,8	64,0	51,5	29,5	35,8	301
3 09 2018 A	1,27	3,00	8,65	20,7	33,6	49,5	62,6	48,3	26,4	34,1	290
3 09 2018 P	1,27	2,97	8,66	21,7	35,5	49,9	61,9	48,4	27,3	35,2	295

Tabela 1.3.1 cd. Zawartości ozonu w poszczególnych warstwach umkehrwskich

Data	Zawartość Ozonu w warstwach [D]										O <sub>3</sub>
	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	[D]
4 09 2018 A	1,27	2,92	8,28	20,0	32,9	51,9	63,2	50,7	30,1	36,8	301
4 09 2018 P	1,29	3,10	8,98	20,2	31,2	51,8	62,7	52,0	32	38,1	305
7 09 2018 A	1,28	2,96	8,43	21,2	35,1	50,0	64,0	51,2	29,3	35,4	301
7 09 2018 P	1,32	3,28	9,62	21,5	33,0	50,5	66,3	51,9	29,0	34,1	302
10 09 2018 A	1,31	3,15	9,06	21,8	35,3	53,6	66,3	49,0	26,3	31,2	298
12 09 2018 P	1,32	3,22	9,21	21,6	35,2	51,6	58,3	40,3	21,2	32,1	276
13 09 2018 A	1,34	3,37	9,72	21,4	32,3	49,0	64,5	47,0	23,4	30,3	283
17 09 2018 P	1,35	3,38	9,48	21,4	36,7	59,3	68,1	46,4	25,1	30,2	302
19 09 2018 A	1,35	3,30	9,05	20,4	33,6	52,8	66,2	48,2	25,8	32,2	294
19 09 2018 P	1,37	3,48	10,14	23,5	35,6	51,6	64,2	48,4	26,9	32,6	299
20 09 2018 A	1,34	3,20	8,65	20,1	34,2	53,4	66,1	48,7	26,7	33,1	297
20 09 2018 P	1,34	3,19	8,76	21,4	36,2	54,9	66,0	47,5	25,7	31,2	297
21 09 2018 A	1,34	3,18	8,58	20,3	34,2	50,7	60,9	43,6	23,4	33,7	282
21 09 2018 P	1,36	3,32	9,15	20,7	33,2	50,7	63,7	45,3	23,2	31,3	283
29 09 2018 A	1,31	2,83	6,83	16,8	34,1	53,1	63,3	44,0	23,2	33,4	281
30 09 2018 A	1,38	3,30	8,55	19,4	30,8	36,9	61,3	39,6	21	39,4	265
1 10 2018 A	1,42	3,68	9,90	20,1	30,6	49,7	62,3	48,8	27,9	36,3	294
5 10 2018 P	1,40	3,40	8,64	18,7	32,2	50,2	57,7	32,4	15,1	28,5	249
6 10 2018 A	1,40	3,34	8,29	17,3	29,8	48,5	58,8	36,2	17,7	32,5	256
10 10 2018 A	1,43	3,52	9,12	20,8	37,0	56,4	62,1	40,0	21,1	30,4	283
10 10 2018 P	1,43	3,58	9,44	22,3	40,2	58,8	59,7	36,4	18,7	27,5	278
12 10 2018 A	1,41	3,39	8,55	20,1	37,8	57,4	62,0	38,7	19,7	28,6	278
12 10 2018 P	1,46	3,79	10,16	22,4	37,6	58,0	63,5	37,8	18,6	26,1	279
13 10 2018 A	1,44	3,56	9,20	21,3	38,5	57,8	62,1	39,2	20,2	28,4	282
14 10 2018 A	1,43	3,45	8,76	20,2	35,6	53,0	59,2	38,5	20,1	31,2	273
15 10 2018 A	1,44	3,52	8,83	19,3	34,0	54,4	63,6	41,7	21,5	30,7	280
15 10 2018 P	1,49	4,01	10,80	22,4	34,4	52,5	63,2	42,7	22,3	30,3	285
16 10 2018 P	1,46	3,71	9,64	21,0	34,1	52,0	63,6	44,1	22,9	30,6	284
17 10 2018 P	1,47	3,78	9,89	21,5	34,6	52,7	63,2	43,2	22,7	30,8	2885
18 10 2018 A	1,48	3,83	9,84	20,1	31,3	48,9	64,4	47,0	25,5	33,8	288
18 10 2018 P	1,47	3,77	10,37	24,9	37,7	52,1	61,2	43,6	24,0	30,8	291
21 10 2018 P	1,49	3,82	9,60	19,3	30,6	49,1	64,3	44,8	23,1	32,3	280

Tabela 1.3.1 cd. Zawartości ozonu w poszczególnych warstwach umkehrskich

Data	Zawartość Ozonu w warstwach [D]										O <sub>3</sub>
	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	[D]
31 10 2018 A	1,54	4,14	10,72	21,6	32,7	51,6	68,6	49,3	25,8	30,3	297
31 10 2018 P	1,51	3,83	9,81	22,1	36,7	54,4	63,7	42,0	21,7	28,9	285
6 11 2018 A	1,56	4,14	10,43	21,3	34,8	55,8	67,0	42,9	21,8	28,2	288
6 11 2018 P	1,54	3,99	9,83	20,2	34,4	56,7	67,6	43,1	22,0	28,6	288
7 11 2018 A	1,55	4,06	10,14	20,8	34,1	55,1	69,1	45,8	23,5	28,8	293

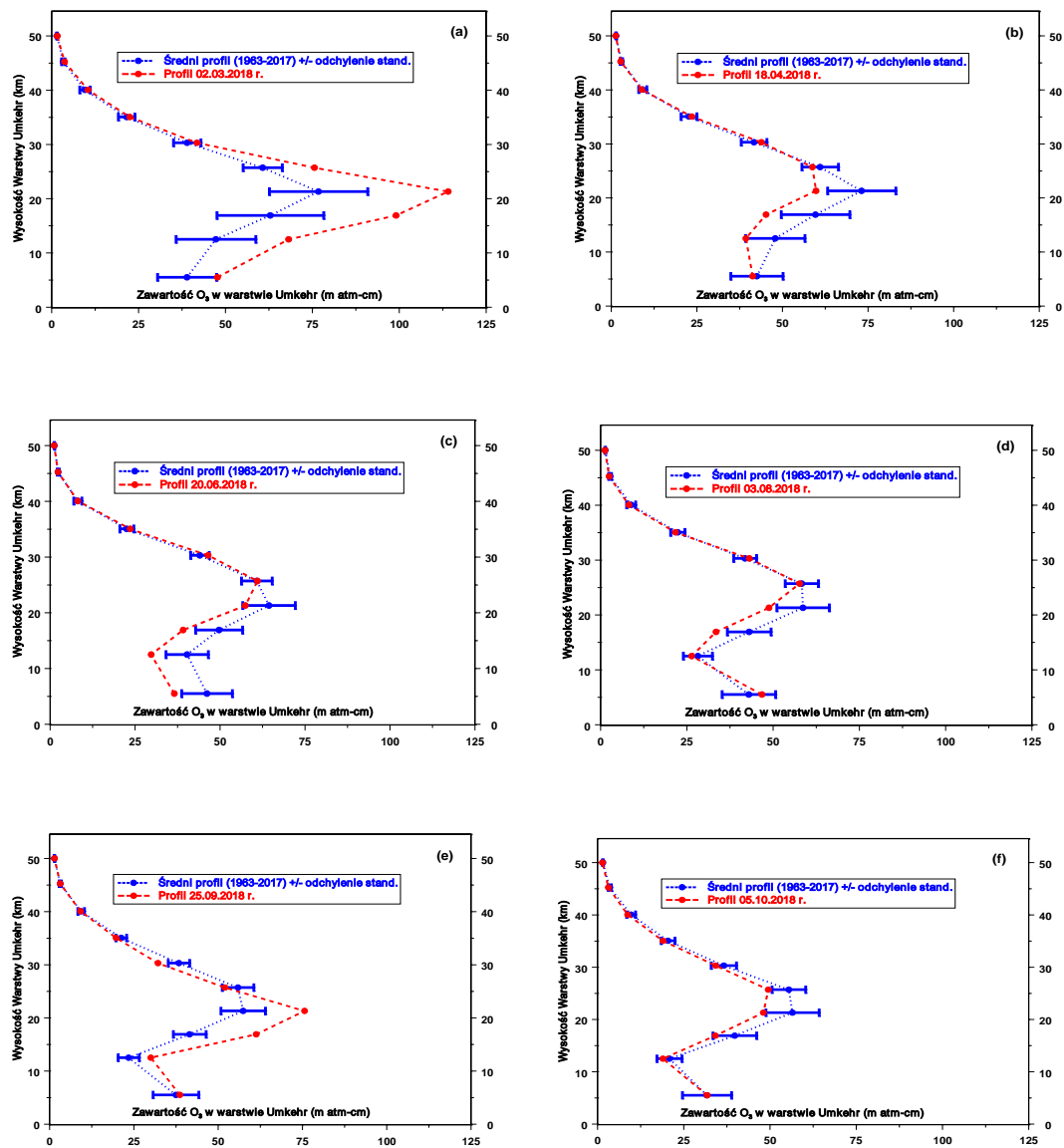
Tabela 1.3.2 Średnie miesięczne zawartości ozonu w poszczególnych warstwach umkehrskich w 2018 roku

Miesiąc	Średnia zawartość ozonu w warstwie [D]										O <sub>3</sub>	
	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	n	[D]
2018												
AVE II	1,51	3,87	10,32	22,4	37,0	60,0	84,8	80,4	52,7	35,2	6	388,7
SD	0,03	0,19	0,74	1,8	2,2	3,9	4,5	4,2	5,0	2,0		10,2
AVE III	1,41	3,49	9,76	21,3	36,7	67,0	96,5	94,7	62,2	36,2	12	429,2
SD	0,06	0,40	1,79	4,0	5,5	7,5	8,6	19,5	18,1	4,8		47,9
AVE IV	1,27	3,03	9,57	23,3	38,1	57,3	73,1	64,8	39,9	34,1	21	345,9
SD	0,04	0,17	0,64	1,8	2,9	3,7	5,0	9,3	7,8	3,0		20,2
AVE V	1,17	2,64	8,93	23,3	37,4	54,7	70,6	68,5	44,5	36,6	23	356,3
SD	0,03	0,11	0,43	1,1	2,2	3,0	2,8	6,0	6,4	2,6		12,9
AVE VI	1,12	2,50	8,63	23,6	40,4	59,8	72,9	63,7	39,5	34,0	16	347,5
SD	0,01	0,07	0,39	1,3	2,8	3,3	3,9	6,4	5,7	2,4		15,2
AVE VII	1,14	2,60	8,84	23,4	37,9	54,9	68,2	59,3	36,2	35,0	13	329,6
SD	0,02	0,14	0,64	1,3	2,5	3,4	2,6	4,2	3,6	2,3		8,5
AVE VIII	1,21	2,79	8,66	22,5	37,5	54,4	64,7	50,2	28,7	33,4	35	305,5
SD	0,04	0,19	0,66	1,5	2,1	3,0	3,0	3,6	2,8	2,6		7,7
AVE IX	1,32	3,18	8,88	20,8	34,0	51,2	63,9	47,3	25,9	33,6	18	291,9
SD	0,04	0,18	0,71	1,4	1,63	4,3	2,4	3,6	3,0	2,6		11,0
AVE X	1,45	3,67	9,53	20,9	34,7	53,2	64,2	41,5	21,6	30,4	18	280,4
SD	0,04	0,22	0,74	1,7	3,1	3,4	2,5	4,5	3,1	2,4		11,8
AVE XI	1,55	4,06	10,13	20,8	34,3	55,9	67,9	43,9	22,4	28,5	3	289,7
SD	0,01	0,08	0,30	0,6	0,4	0,8	1,1	1,6	0,9	0,3		2,92

W Tabeli 1.3.2 przedstawiono średnie miesięczne zawartości ozonu w poszczególnych warstwach umkehrskich, gdzie AVE – średnia arytmetyczna, SD – odchylenie standardowe, n – Ilość obserwacji Umkehr w miesiącu,  $O_3$  – średnia całkowitej zawartości ozonu z dni kiedy wykonywano pomiar Umkehr

Na Rys.1.3.1 przedstawiono interesujące przykłady zmian zawartości ozonu w poszczególnych umkehrskich warstwach atmosfery. Jak widać zmiany te w odniesieniu do średniej wieloletniej 1963-2017 (linia niebieska) są najbardziej spektakularne w dolnej stratosferze i w troposferze. Niestety, w metodzie Umkehr zawartości ozonu wyznaczone w najniższych warstwach są najmniej wiarygodne. Na Rys.1.3.1 można zauważyć znacznie większą zmienność średnich zawartości ozonu w dolnej stratosferze w okresie zimowo-wiosennym w porównaniu do lata. Ponadto profile ozonu w poszczególnych dniach mogą znacznie odbiegać od średnich wieloletnich, zarówno co do wartości w poszczególnych warstwach jak i wysokości wystąpienia maksimum ozonu.

Należy dodać, że zmiany profilu ozonu przy ustalonej całkowitej zawartości ozonu są jednym z czynników wpływających na wielkość natężenia promieniowania UV-B docierającego do powierzchni Ziemi. Dane ozonowe ze stacji dysponującymi długimi, ciągłymi i wiarygodnymi seriami pomiarowymi są szczególnie cenne 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 50-letnią zrewaloryzowaną serią pomiarową. Wyniki pomiarów rozkładu pionowego ozonu metodą Umkehr w Belsku są szeroko stosowane w najpoważniejszych analizach statystycznych i metodycznych.



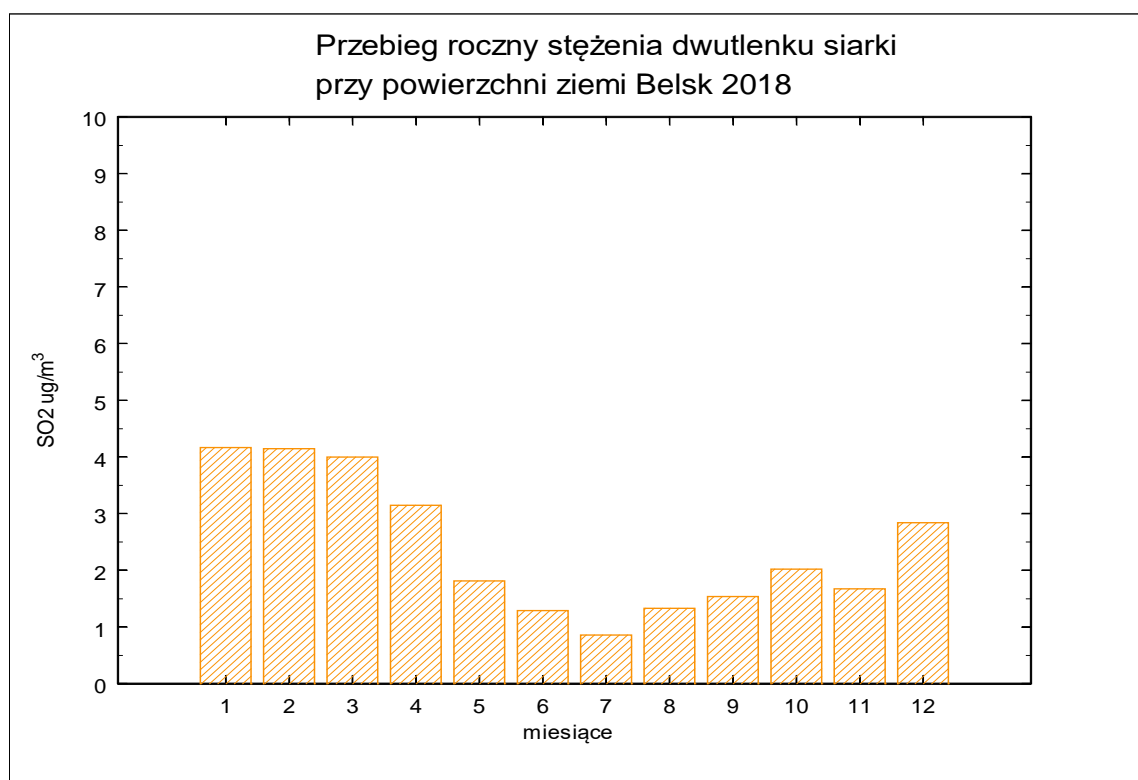
Rys.1.3. Pionowy profil  $O_3$  dla wybranych dni w 2018 r. wyznaczony z pomiarów Umkehr spektrofotometrem Dobsona z zastosowaniem algorytmu obliczeniowego *UMK04*.

## 2. Zawartość dwutlenku siarki, ozonu dwutlenku azotu i tlenku węgla przy powierzchni ziemi w Centralnym Obserwatorium Geofizycznym PAN Belsku w 2018 r.

Janusz Jarosławski, Izabela Pawlak

### 2.1 Dwutlenek siarki

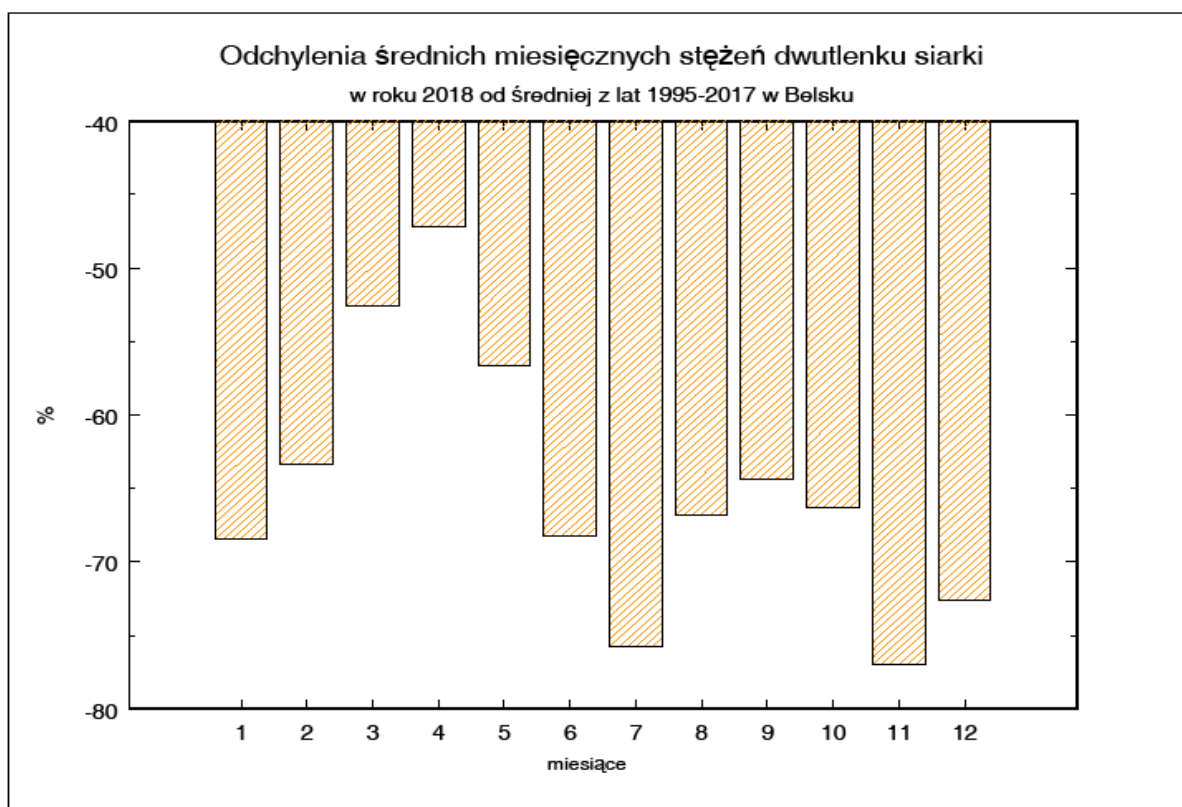
Rok 2018 był kolejnym rokiem systematycznych pomiarów stężeń dwutlenku siarki na stacji w Belsku. Pomiar wykonywany był analizatorem firmy Horiba APSA 370 działającym w oparciu o zjawisko fluorescencji  $\text{SO}_2$  w promieniowaniu UV. Wyniki ciągłych pomiarów w postaci średnich 60-min obejmują okres od stycznia do grudnia.



Rys.2.1.1. Przebieg roczny stężenia  $\text{SO}_2$  przy powierzchni ziemi, Belsk 2018

Przebieg roczny średnich miesięcznych stężeń  $\text{SO}_2$  charakteryzował się występowaniem względnie wyższych ale w skali absolutnej bardzo niskich stężeń w okresie od stycznia do kwietnia (od 3 do 4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) i w grudniu oraz wyjątkowo niskich stężeń w okresie od maja do listopada, ze średnimi miesięcznymi oscylującymi wokół 1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Rys. 2.1.1.). Maksymalne średnie miesięczne stężenie  $\text{SO}_2$  w roku 2018 zostało zmierzone w styczniu (4,2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) i było niższe od maksymalnego średniego miesięcznego stężenia  $\text{SO}_2$  zmierzonego w roku 2017 o 4,1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (również w styczniu). W roku 2018

średnie miesięczne stężenia  $\text{SO}_2$  były znacznie niższe od średnich wieloletnich zmierzonych w okresie 1995-2017 od 40%-60% w pierwszej połowie roku aż do prawie 80% w drugiej połowie roku (Rys. 2.1.2). Najniższe średniomiesięczne stężenie  $\text{SO}_2$  w ciągu roku zmierzono w lipcu (średnia miesięczna –  $0,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Było ono niższe o  $0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  od najniższej wartości średniomiesięcznej stężeń  $\text{SO}_2$  zmierzonej jesienią w roku 2017 i było to najniższe średniomiesięczne stężenia  $\text{SO}_2$  w całej dotychczasowej historii pomiarów tego zanieczyszczenia (od 1995). W roku 2018 obserwowano nietypowy przebieg sezonowy  $\text{SO}_2$  z niewielką zmiennością sezonową oraz niskimi stężeniami w drugiej połowie roku, przy przebiegu w pierwszej połowie roku zbliżonym do obserwowanych dotychczas w rejonie Belska.



Rys.2.1.2 Odchylenia średnich miesięcznych stężeń  $\text{SO}_2$  w 2018 roku od średniej a lat 1995-2017 w Belsku

Duże względne odchylenia procentowe od wartości średnich spowodowane są bardzo niskimi wartościami bezwzględnymi stężenia  $\text{SO}_2$  – niewielkie zmiany wartości stężeń powodują duże zmiany procentowe względnych odchyleń. Amplituda roczna zmian

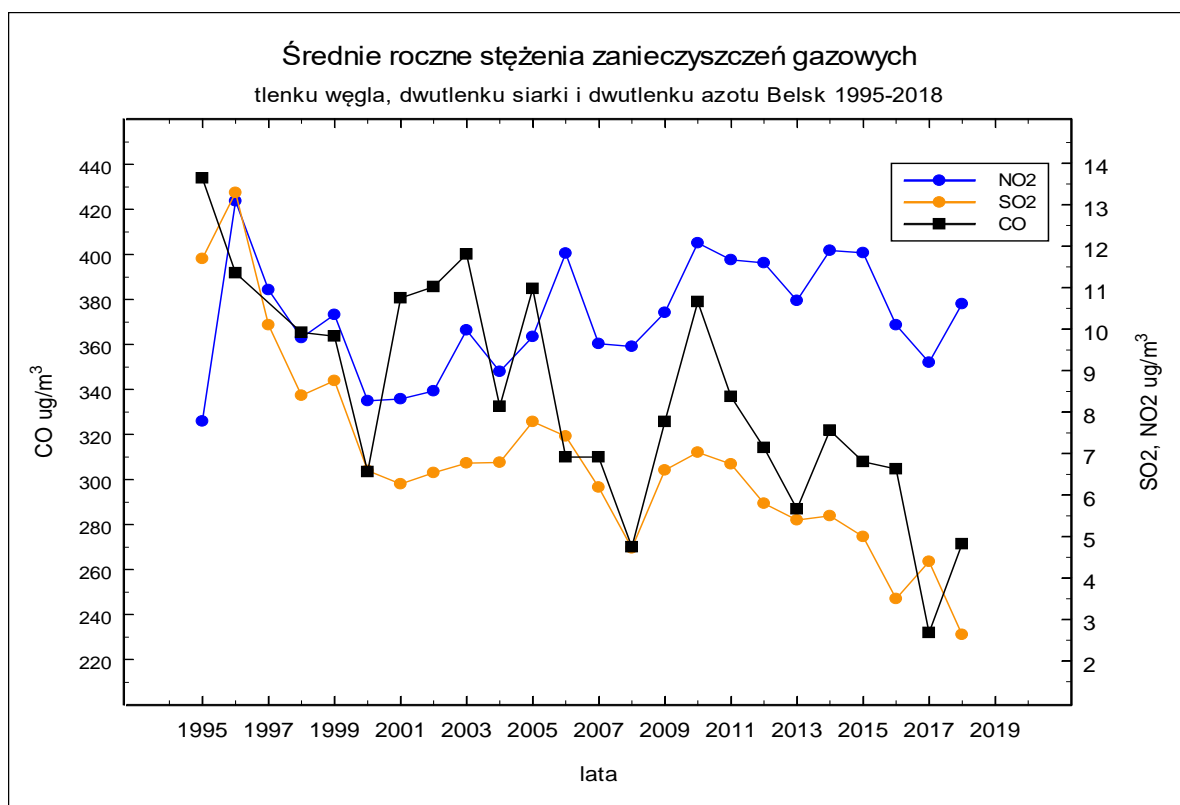
poziomów stężeń SO<sub>2</sub> pomiędzy zimą a latem była mniejsza niż w roku 2017 i wynosiła ok 2-3 µg/m<sup>3</sup>.

Średnia roczna wartość stężenia SO<sub>2</sub> w roku 2018 była prawie dwukrotnie niższa od zmierzonej w roku 2017 i była najniższa w całej serii pomiarowej z lat 1995-2017; wynosiła 2,4 µg/m<sup>3</sup> (Rys. 2.1.3). Średnie roczne stężenia SO<sub>2</sub> od roku 1995 przedstawia Tabela 2.1.1

Tabela 2.1.1 Średnie roczne koncentracje SO<sub>2</sub> w przyziemnej warstwie atmosfery w Belsku (µg/m<sup>3</sup>).

Rok	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
SO <sub>2</sub>	11,7	13,6	10,1	8,4	8,8	6,6	6,3	6,5	6,8	6,8	7,8	7,4
Rok	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
SO <sub>2</sub>	6,2	4,7	6,6	7,0	6,8	5,8	5,4	5,5	5,0	3,5	4,4	2,4

Przebieg średniorocznych stężeń SO<sub>2</sub> od roku 1995 przedstawia Rys. 2.1.3. Maksymalne wartości chwilowe (śr. 60-min) stężeń dwutlenku siarki w poszczególnych miesiącach roku 2018 charakteryzowały się mniejszą zmiennością, niż w latach poprzednich oraz znacznie mniejszymi wartościami maksymalnymi w okresie jesienno-zimowym od analogicznych wartości mierzonych poprzednich latach. Najwyższe chwilowe stężenie SO<sub>2</sub> zmierzone w roku 2017 wyniosło 31 µg/m<sup>3</sup> (w grudniu) i było o 20 µg/m<sup>3</sup> niższe niż maksymalne stężenie SO<sub>2</sub> zmierzone w roku 2017. Wartości chwilowe (średnie 60-min) stężeń SO<sub>2</sub> przedstawiają rysunki dołączone do wydruku danych na końcu raportu. Wartości średnich miesięcznych wraz z wartościami maksymalnymi SO<sub>2</sub> przedstawia Tabela 2.1.2.

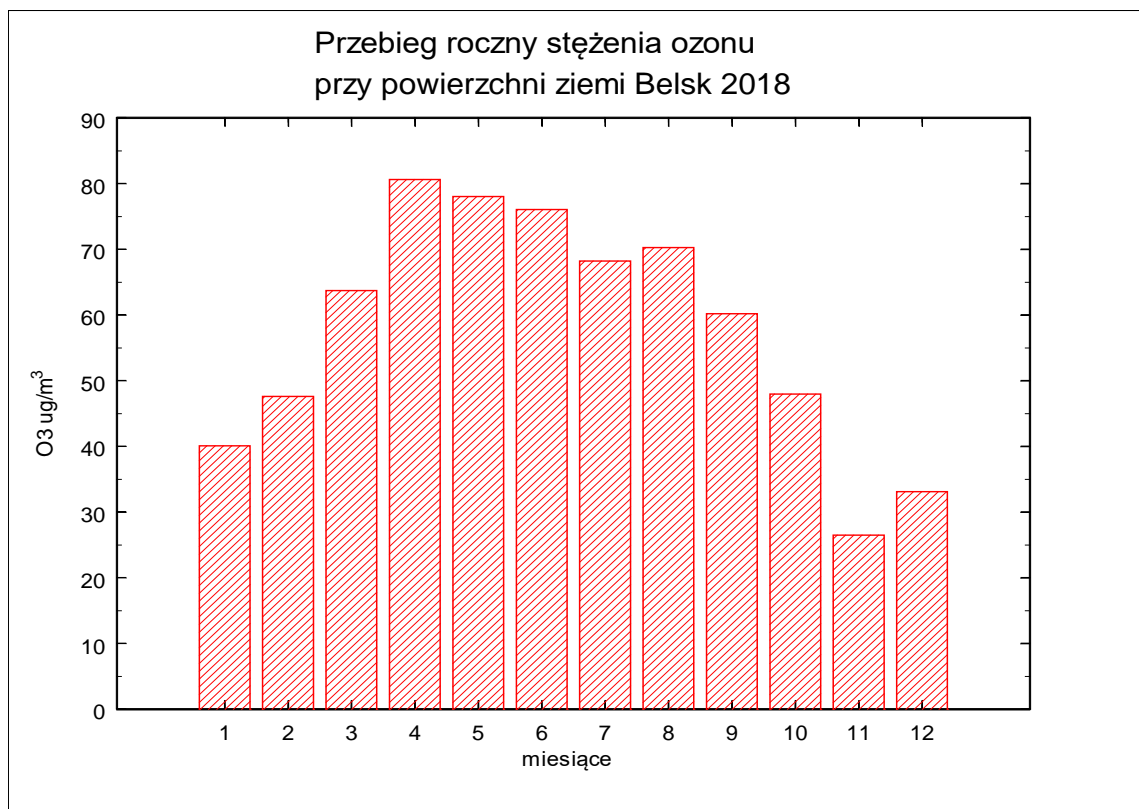


Rys. 2.1.3. Średnie roczne stężenie zanieczyszczeń gazowych CO, SO<sub>2</sub> i NO<sub>2</sub> Belsk 1995-2018

Tabela 2.1.2 Średnie miesięczne i wartości maksymalne koncentracji SO<sub>2</sub> w przyziemnej warstwie atmosfery w Belsku w roku 2018 (µg/m<sup>3</sup>).

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Śr.	4,2	4,1	4,0	3,1	1,8	1,3	0,9	1,3	1,5	2,0	1,7	2,8
max.	26	23	20	24	15	8	9	14	14	21	12	31

## 2.2 Ozon przyziemny i dwutlenek azotu

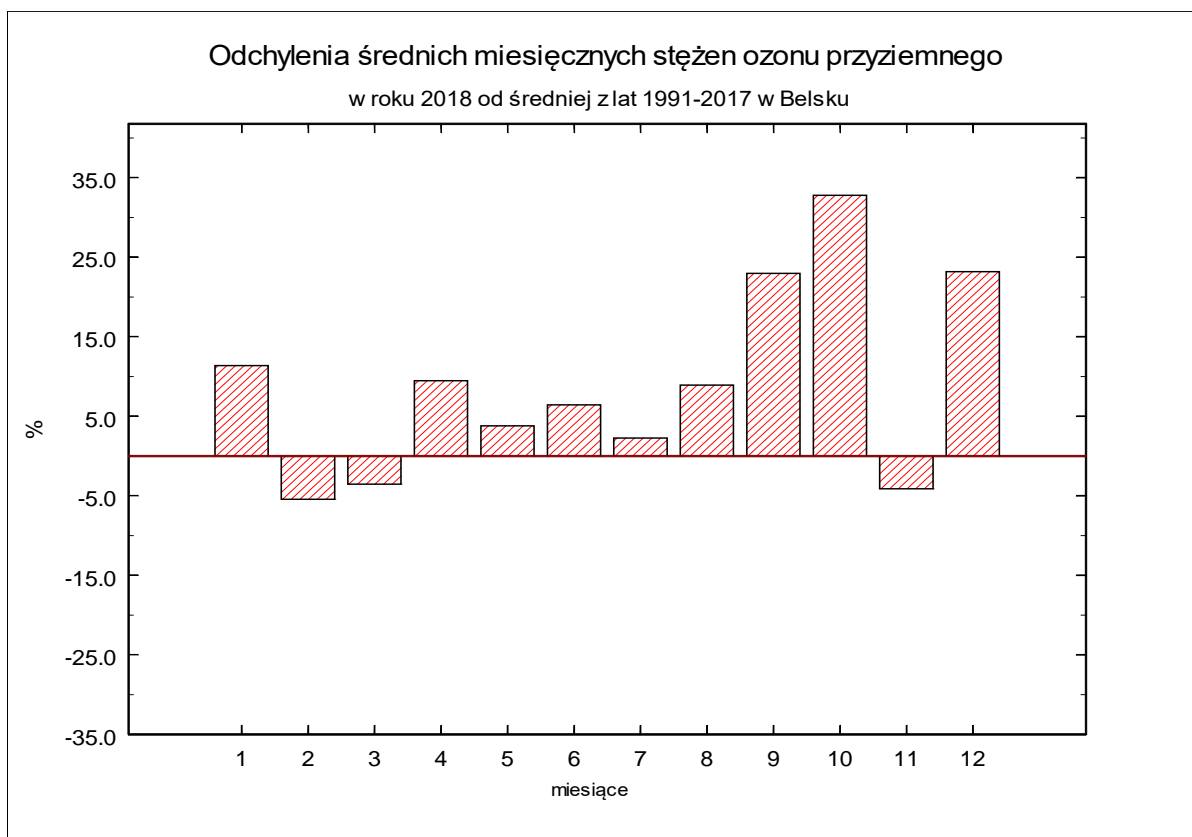


Rys. 2.2.1 Przebieg roczny stężenia O<sub>3</sub> przy powierzchni Ziemi, Belsk 2018

Rok 2018 był kolejnym rokiem pomiarów koncentracji ozonu oraz dwutlenku azotu na stacji w Belsku. Pomiarów wykonywane były analizatorami firmy Thermo 49i (ozon) oraz firmy Horiba model APNA 370 (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 2018 przebieg cyklu rocznego ozonu był zbliżony do średniego przebiegu rocznego z ostatnich kilkunastu lat. Maksimum roczne średnich miesięcznych wystąpiło w kwietniu (średnia miesięczna wartość stężeń ozonu 80,6 µg/m<sup>3</sup>). Było o 7 µg/m<sup>3</sup> wyższe od maksimum z roku 2017. Odchylenia średnich miesięcznych stężeń ozonu od wartości średnich z okresu 1991-2017 były dodatnie dla dziewięciu miesięcy (występowały niezależnie od pory roku do ok. +35%) i w niewielkim stopniu ujemne dla miesięcy jesienno – zimowych – listopad, luty, marzec - -5%. Przebieg roczny stężenia ozonu w przyziemnej warstwie atmosfery (średnie

miesięczne) przedstawia Rys. 2.2.1, a odchylenia od średnich miesięcznych z lat 1991-2017 przedstawia Rys. 2.2.2.

W roku 2018 maksymalne wartości chwilowe stężeń ozonu były zbliżone do obserwowanych w ostatnich latach, szczególnie w okresie letnim. Maksymalne stężenie chwilowe ozonu (śr. 60-min) wyniosło  $171 \mu\text{g}/\text{m}^3$  i zostało zmierzone w lipcu. Od kwietnia do września z wyjątkiem lipca wartości maksymalne stężenia ozonu były bardzo wyrównane i niższe o ok.  $20\text{-}30 \mu\text{g}/\text{m}^3$  od maksymalnej, lipcowej wartości. W roku 2018 zwraca uwagę wczesne wiosenne maksimum i ogólnie przebieg roczny zbliżony do przebiegu rocznego całkowitej zawartości ozonu. Świadczyłoby to o malejącym znaczeniu lokalnej produkcji fotochemicznej ozonu na rzecz transportu z wyższych warstw atmosfery. Wartości chwilowe stężeń ozonu przedstawiają rysunki

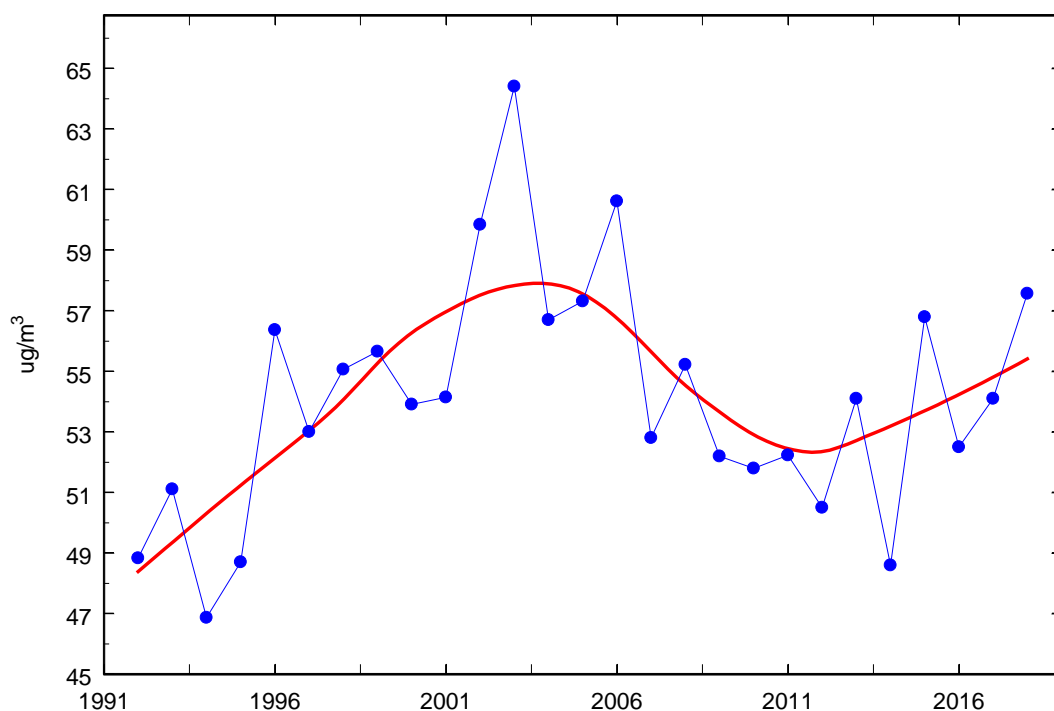


Rys. 2.2.2 Odchylenia średnich miesięcznych stężeń ozonu przyziemnego w roku 2018 od średniej z lat 1991-2017 w Belsku

dołączone do wydruku danych na końcu raportu. Średnie roczne stężenie ozonu w przyziemnej warstwie atmosfery w roku 2018 wyniosło  $57,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  i było wyższe od tego z

roku 2017 o  $3,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  oraz zbliżone maksymalnych wartości w całej serii obserwowanych w latach 2000-2006. . Można stwierdzić, że obserwowane w 2018 roku, zwłaszcza w okresie letnim poziomy stężenie ozonu były porównywalne do tych, jakie mierzono w Belsku na początku lat 2000-tych, jeśli nie brać pod uwagę rekordowego roku 2003. Rok 2018 jest rokiem wysokich stężeń o czym świadczy również wzrost wskaźnika AOT40 (suma wartości przekroczeń stężeń ozonu ponad 40 ppb) i ilości przekroczeń wartości średnich 8-godzinnych stężeń. Biorąc pod uwagę wyniki pomiarów z ostatnich dziewięciu lat można stwierdzić, że obserwujemy powrót długookresowego wzrostu stężeń ozonu podobny do tego, jaki miał miejsce w latach dziewięćdziesiątych.. Przebieg średnich rocznych stężeń ozonu w latach 1992-2018 przedstawia Rys. 2.2.3. Wartości średnich miesięcznych wraz z wartościami maksymalnymi ozonu w roku 2018 przedstawia Tabela 2.2.1.

Średnie roczne stężenia ozonu Belsk 1992-2018

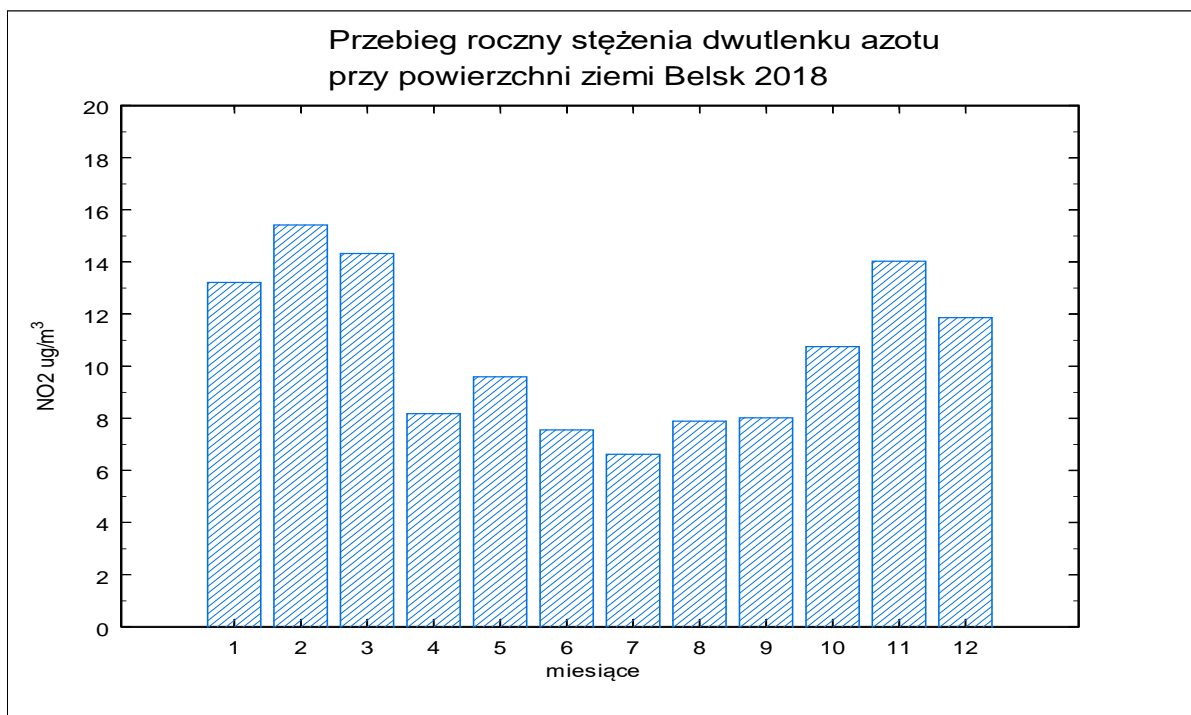


Rys. 2.2.3 Średnie roczne stężenia ozonu przy powierzchni Ziemi, Belsk 1992-2018

Tabela 2.2.1 Średnie miesięczne i wartości maksymalne koncentracji ozonu w przyziemnej warstwie atmosfery w Belsku w roku 2018 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
śr.	40,1	47,6	63,7	80,6	78,1	76,1	68,2	70,3	60,2	48,0	26,5	33,1
Max.	84	87	121	148	139	139	171	153	145	103	67	73

Stężenie dwutlenku azotu w roku 2018 w Belsku osiągało podobne lub wyższe (w zależności od miesiąca) wartości jak w ostatnich latach. W porównaniu do czasu około 2000 roku, kiedy to rejestrowano jedne z najniższych wartości stężeń dwutlenku azotu, różnice są już niewielkie chociaż nadal mamy do czynienia ze wzrostem o ok. 15%. Przebieg sezonowy stężeń dwutlenku azotu w roku 2018 był zbliżony do obserwowanego podczas ubiegłych lat z minimum w miesiącach letnich i maksimum w miesiącach jesienno-zimowych. W miesiącach letnich (kwiecień-lipiec) średnie miesięczne były o 4 - 8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  niższe niż w pozostałych miesiącach (Rys. 2.2.4). Odchylenia średniomiesięcznych stężeń  $\text{NO}_2$  od średniej z lat 1995-2017 w roku 2018 były zmienne (od -15% do 35%) największe dodatnie w miesiącach zimowych i wczesnowiosennych a najbardziej ujemne w miesiącach wiosennych (kwiecień) i zimowych (grudzień) (Rys. 2.2.5).



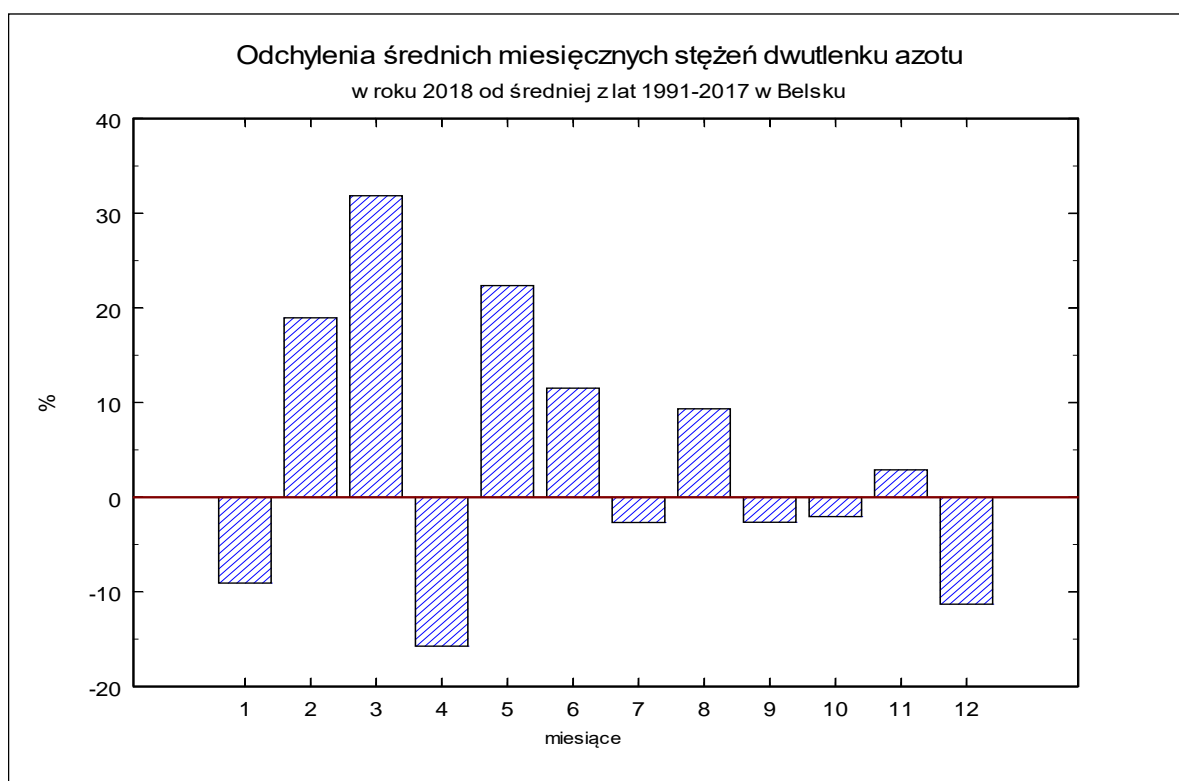
Rys. 2.2.4 Przebieg roczny stężenia  $\text{NO}_2$  przy powierzchni Ziemi, Belsk 2018

Najwyższe w roku 2018 średnie miesięczne stężenie dwutlenku azotu zmierzono w lutym ( $15,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  – wyższe o  $1,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$  od tego w r. 2017) a najniższe w lipcu ( $6,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$

– wyższe niż w roku 2017 o  $1,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Przebieg średnich miesięcznych stężeń dwutlenku azotu w roku 2018 przedstawia Rys. 2.2.4.

Średnie roczne stężenie dwutlenku azotu w przyziemnej warstwie atmosfery w roku 2018 wyniosło  $10,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  i było niższe od tego w roku 2016 o  $1,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Obserwowana od kilkunastu lat stabilizacja poziomu średniorocznych stężeń  $\text{NO}_2$  była kontynuowana w roku 2018.

Wartości chwilowe stężeń dwutlenku azotu przedstawiają rysunki dołączone do wydruku danych na końcu raportu. Maksymalne wartości chwilowe dwutlenku azotu były porównywalne z wartościami zaobserwowanymi w roku 2017. Wartość maksymalna – śr. 60-min wyniosła  $76 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (w styczniu) była niższa o  $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  od tej zmierzonej w roku 2017 (w styczniu). Wartości średnich miesięcznych wraz z wartościami maksymalnymi dwutlenku azotu przedstawia Tabela 2.2.2.



Rys 2.2.5 Odchylenia średnich miesięcznych stężeń  $\text{NO}_2$  w roku 2018 od średniej z lat 1991-2017 w Belsku

Tabela 2.2.2 Średnie miesięczne i wartości maksymalne koncentracji NO<sub>2</sub> w przyziemnej warstwie atmosfery w Belsku w roku 2018 (µg/m<sup>3</sup>).

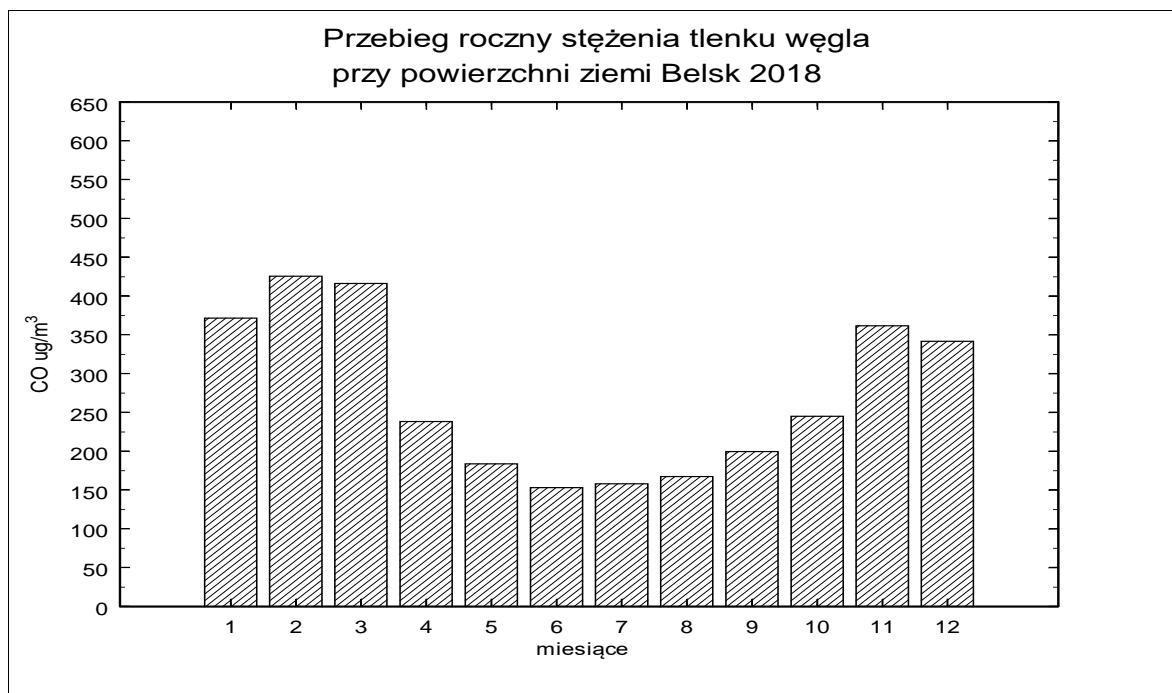
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
śr.	13,2	15,4	14,3	8,2	9,6	7,6	6,6	7,9	8,0	10,8	14,0	11,9
Max.	76	58	63	32	36	38	34	33	33	44	52	48

### 2.3. Tlenek Węgla

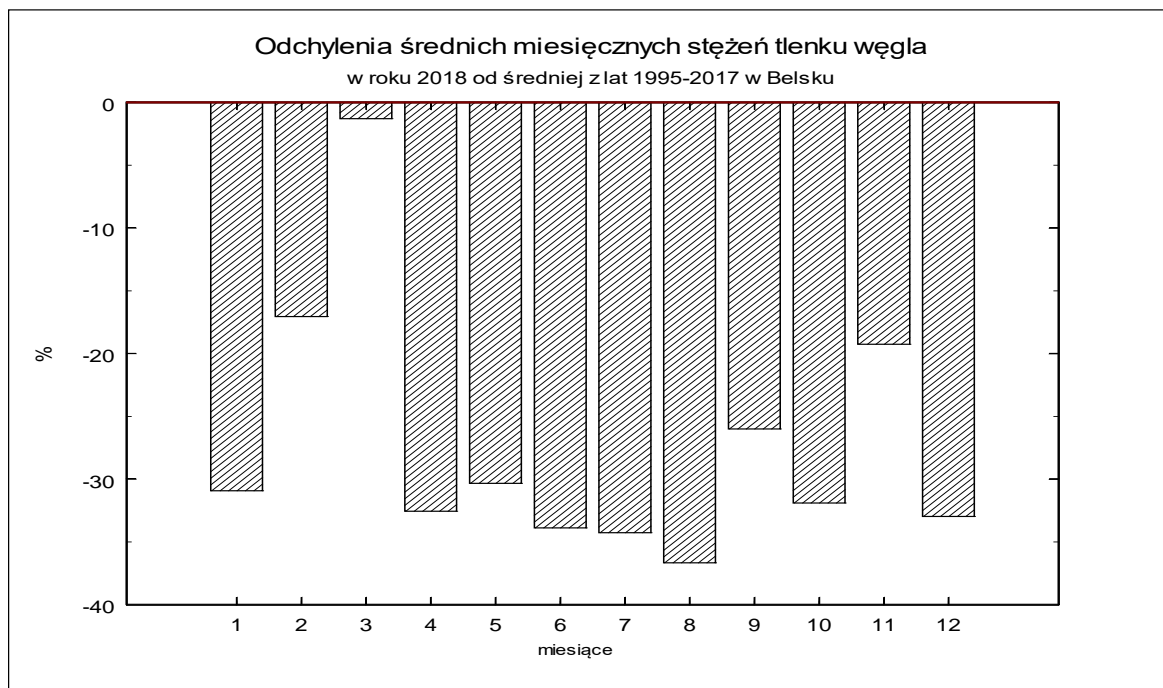
W roku 2018 kontynuowano w Belsku pomiary stężeń tlenu węgla w przyziemnej warstwie atmosfery. Pomiar wykonywany był przyrządem firmy Horiba model APMA370. Analizator działa w oparciu o zjawisko absorpcji promieniowania podczerwonego przez tlenek węgla. Z powodu specyficznych warunków (stacja pozamiejska) 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 µg/m<sup>3</sup> a nawet mniej, zwłaszcza w ostatnich latach). Próg wykrywalności nowego analizatora jest szacowany na ok. 25 µg/m<sup>3</sup> (dla poprzedniego analizatora wynosił ok. 100 µg/m<sup>3</sup>), co skutkuje większą dokładnością danych uzyskiwanych w okresie letnim, kiedy stężenia tlenu węgla w rejonie Belska okresowo spadają poniżej 100 µg/m<sup>3</sup>. Również bardzo ograniczony dryf punktu zerowego stosowanego analizatora umożliwia dokładniejszy pomiar niskich (rzędu 100 µg/m<sup>3</sup>) stężeń CO w powietrzu otaczającym.

W roku 2018 przebieg roczny stężenia CO charakteryzował się silną sezonowością podobnie jak w latach poprzednich. Bardzo niskie stężenia tlenu węgla zmierzono już od kwietnia aż do października z minimum w czerwcu - 153 µg/m<sup>3</sup> - stężenie wyższe od rekordowo najniższego stężenia średniomiesięcznego zmierzonego w roku 2017 o ok. 50 µg/m<sup>3</sup>, oraz wyższych stężeń w pozostałych miesiącach (od 245 do ok. 426 µg/m<sup>3</sup>) z maksimum w lutym. Odchylenia stężeń w stosunku do średniej wieloletniej były dla wszystkich miesięcy roku ujemne, największe ujemne odchylenia sięgały ok. -37% dla sierpnia (Rys. 2.3.2). Średnie roczne stężenie tlenu węgla było wyższe o 40 µg/m<sup>3</sup> od tego z roku 2017 (najniższego w całej dotychczasowej serii) i wyniosło 272 µg/m<sup>3</sup>. Najwyższe wartości chwilowe stężeń tlenu węgla (średnie 60-min) obserwowano w okresie zimowym (styczeń-luty i listopad-grudzień) (patrz Tabela 2.3.1). Maksymalne stężenie chwilowe w roku wyniosło 1228 µg/m<sup>3</sup>; było aż o ok. 700 µg/m<sup>3</sup> niższe od maksymalnych

wartości z roku 2017. Przebieg roczny stężenia CO w Belsku w roku 2018 (średnie miesięczne) przedstawia Rys 2.3.1, a wartości średnich miesięcznych i chwilowych wartości maksymalnych przedstawia Tabela 2.3.1



Rys. 2.3.1 Przebieg roczny stężenia CO przy powierzchni Ziemi, Belsk 2018



Rys. 2.3.2 Odchylenia średnich miesięcznych stężeń CO w roku 2018 od średniej z lat 1995-2017 w Belsku

Tabela 2.3.1 Średnie miesięczne i wartości maksymalne koncentracji CO w przyziemnej warstwie atmosfery w Belsku w roku 2018 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
śr.	371,6	425,8	416,4	238,4	183,9	153,3	158,1	167,5	199,8	245,3	361,9	341,7
max	1149	1160	1247	548	265	379	277	437	555	530	1043	1228

Wybrane wyniki pomiarów stężeń zanieczyszczeń powietrza w roku 2018 (średnich 1-godz i średnich kroczących 8 godz. przedstawione są w Tabelach 2.3.2 i 2.3.3

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

Parametr	Jednostki	SO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	NO <sub>2</sub>	CO
Kompletność serii pomiarowej	%	97,0%	98,5%	98,4%	98,5%
Percentyle z serii pomiarowej	S10	0,5	21,9	3,2	3,8
	S50	1,6	54,1	8,6	9,6
	S90	5,3	98,9	19,9	22,6
	S98	9,7	122,1	32,0	37,9
	S99,8	16,8	144,8	53,2	77,2
Wartość najwyższa	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	30,9	171,0	76,2	165,9
Liczba wyników pomiarów przewyższających poziom informowania		0	0	0	0

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

Parametr	Jednostki	O <sub>3</sub>	CO
Kompletność serii pomiarowej	%	98,2%	98,3%
Percentyle z serii pomiarowej	S <sub>10</sub>	24,0	147,0
	S <sub>50</sub>	54,9	218,0
	S <sub>90</sub>	94,3	478,6
	S <sub>98</sub>	114,2	696,6
	S <sub>99,8</sub>	134,7	963,7
Wartość najwyższa	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	161,5	1132,3
Liczba wyników pomiarów przewyższających wartość dopuszczalną		105	0
Wartość wskaźnika ozonowego AOT 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{godz}$		34403	

Wszystkie analizatory zanieczyszczeń powietrza pracujące na stacji C.O.G. PAN w Belsku podlegały okresowym przeglądom serwisowym, 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. Wyniki interkalibracji w Krajowym Laboratorium Referencyjnym i Wzorcującym**

W dniach 15-17 maja 2018 w Krajowym Laboratorium Referencyjnym i Wzorcującym w Krakowie odbyły się badania biegłości w zakresie pomiarów stężeń tlenków azotu, dwutlenku siarki, tlenku węgla i ozonu. W badaniu ze strony IGF PAN brały udział wszystkie analizatory, za pomocą których realizowany był i jest nadal program pomiarów stężeń zanieczyszczeń w ramach umowy z GIOŚ. Do oceny wyników otrzymanych przez uczestników porównania użyto wskaźników  $z'$  oraz  $E_n$  wg metodologii normy ISO 13528:2015. Dla 30 przebiegów (stężeń poszczególnych gazów) we wszystkich przypadkach uzyskano wartość parametru  $E_n$  w zakresie zadowalającym. Dla jednego przebiegu (najwyższe stężenie  $SO_2$ ) uzyskano wynik wątpliwy wskaźnika  $z'$  (ale nie niezadowalający). Dla pozostałych 29 przebiegów uzyskano zadowalające wartości tego wskaźnika.

Podsumowując, w wyniku przeprowadzonego badania biegłości stwierdzono, że w przypadku wszystkich analizatorów nie ma potrzeby prowadzenia działań naprawczych ani kontroli wcześniejszej, niżby to wynikało z ustalonego harmonogramu badań biegłości (zwykle co dwa lata). Ponadto wyniki porównania potwierdzają dobrą jakość systemów wzorcujących stosowanych na stacji COG w Belsku: zestawu butli z gazami wzorcowymi, kalibratora Thermo 146i oraz fotometru ozonowego ME9811.

#### **2.5. Omówienie wybranych aspektów dotyczących zmienności zanieczyszczeń gazowych zmierzonych na stacji C.O.G. PAN w Belsku w roku 2018 i w latach poprzednich**

**Barbara Kopcewicz, Janusz Jarosławski.\**

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  $\text{NO}_x$  i prawie nie zależy od VOC, w innych zaś warunkach, produkcja ozonu rośnie wraz ze wzrostem VOC i nie zależy od koncentracji  $\text{NO}_x$  (a czasami nawet zmniejsza się). Jest konieczne określenie dla każdego obszaru oddzielnie rodzaju zależności koncentracji ozonu od  $\text{NO}_x$  i VOC, a także innych związków chemicznych mających wpływ na stan zanieczyszczenia atmosfery.

Nieliniowa zależność  $\text{O}_3$  od  $\text{NO}_x$  przejawia się w tym, że w zależności od tego czy jesteśmy w obszarze wysokiego  $\text{NO}_x$  czy niskiego  $\text{NO}_x$ , wzrost emisji  $\text{NO}_x$  ogranicza produkcję  $\text{O}_3$ , lub, odpowiednio, promuje powstawanie  $\text{O}_3$ . Obszary wysokiego  $\text{NO}_x$  i niskiego  $\text{NO}_x$  są definiowane nie poprzez bezwzględną wartość emisji  $\text{NO}_x$  ( $E_{\text{NO}_x}$ ) ale poprzez względną wielkość produkcji rodników ( $S$ ) i emisji  $\text{NO}_x$ . Jeżeli  $S > E_{\text{NO}_x}$  to mamy do czynienia z obszarem niskiego  $\text{NO}_x$ , natomiast w przypadku gdy  $S < E_{\text{NO}_x}$ , mamy do czynienia z obszarem wysokiego  $\text{NO}_x$ . Przebieg reakcji chemicznych w troposferze i wynikający z tego jej stan chemiczny zależy, przy tym samym poziomie emisji  $\text{NO}_x$ , 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.

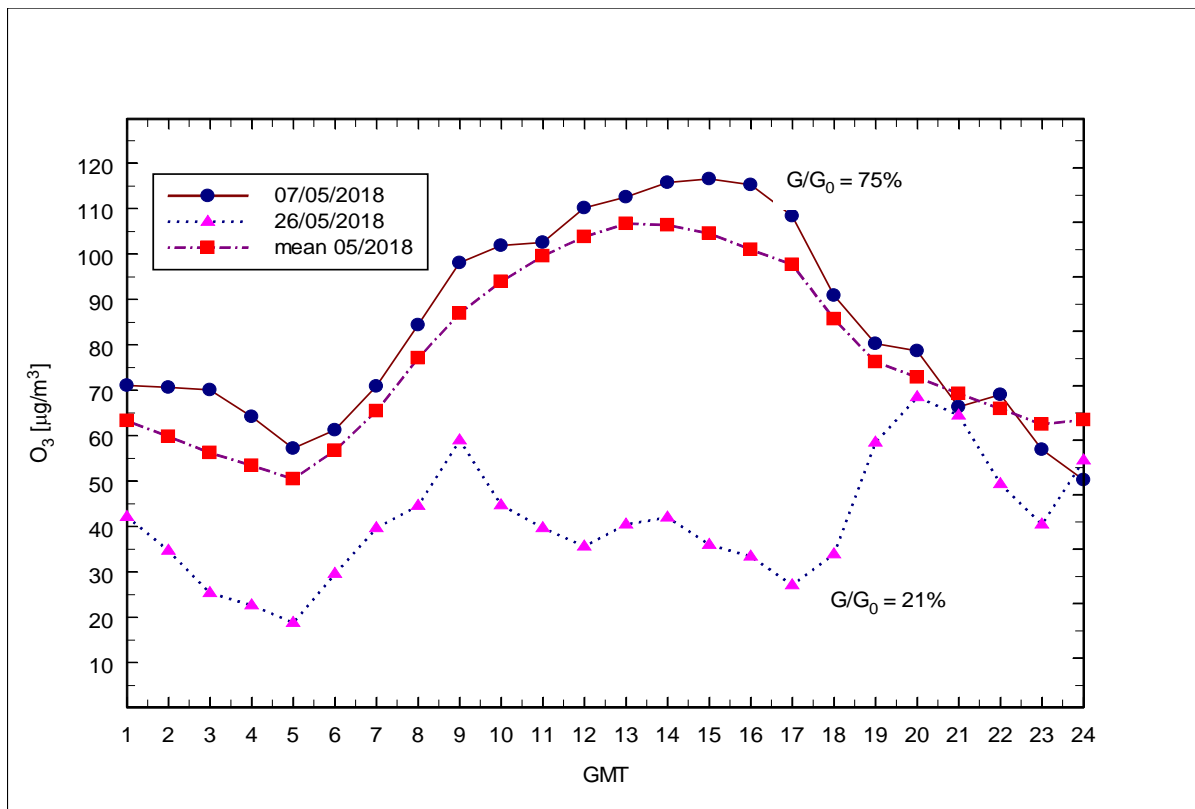
Wygodnym sposobem badania czynników kontrolujących koncentrację ozonu przyziemnego jest obserwowanie przebiegów dobowych, zarówno ozonu jak i jego prekursorów. Przykładem tego jest Rys.2.4.1, na którym porównuje się średnie miesięczne przebiegi dobowe koncentracji  $\text{O}_3$  (a) i  $\text{NO}_x$  (b) w maju 2018 roku z przebiegiem dobowym koncentracji  $\text{O}_3$  i  $\text{NO}_x$  dla dwóch dni, przy czystym ( $G/G_0 = 75\%$ ) oraz zachmurzonym ( $G/G_0 = 21\%$ ) niebie. Wskaźnikiem braku chmur jest stosunek obserwowanego natężenia globalnego promieniowania przy powierzchni ziemi,  $G$ , do wielkości tego promieniowania na granicy atmosfery ziemskiej,  $G_0$ . W tym wypadku  $G/G_0$  jest indeksem przezroczystości atmosfery. Biorąc pod uwagę rozpraszanie na molekułach powietrza i aerozolu atmosferycznym stosunek ten nie przekracza wartości 80% latem a 65% zimą. W maju 2018 wartość średnia  $G/G_0$  wynosiła 60%. Przy wysokim  $\text{NO}_x$  źródło wolnych rodników jest niewystarczające by reagować i usunąć całe  $\text{NO}_x$  i dla  $G/G_0 = 21\%$  koncentracja  $\text{NO}_x$  w ciągu dnia jest większa niż dla  $G/G_0 = 75\%$ . Jeżeli atmosfera znajduje się w obszarze niskiego  $\text{NO}_x$  ( $G/G_0 = 75\%$ ) (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 HO<sub>2</sub> z NO, w wyniku powstaje NO<sub>2</sub>, a to z kolei prowadzi w konsekwencji do wzrostu O<sub>3</sub> (Rys. 2.4.1.d). W przypadku niskiej koncentracji NO większą rolę odgrywa reakcja konkurencyjna HO<sub>2</sub> z O<sub>3</sub>, co prowadzi do rozpadu ozonu. Jednakże głównym czynnikiem wpływającym na proces powstawania ozonu w przyziemnej warstwie atmosfery jest promieniowanie UV. Pokazuje to porównanie średnich przebiegów NO, NO<sub>x</sub> i O<sub>3</sub> w sierpniu (wysoki indeks G/G<sub>0</sub> = 60%) (Rys. 2.4.1. d) i grudniu (niski indeks G/G<sub>0</sub> = 24%) (Rys. 2.4.1.e) 2018 roku gdy mimo niewielkich różnic w koncentracji NO i NO<sub>x</sub> obserwuje się prawie dwukrotny spadek koncentracji ozonu w grudniu w porównaniu do wartości rejestrowanych w sierpniu. Ilustruje to dobrze nieliniowość zależności O<sub>3</sub> od NO<sub>x</sub>.

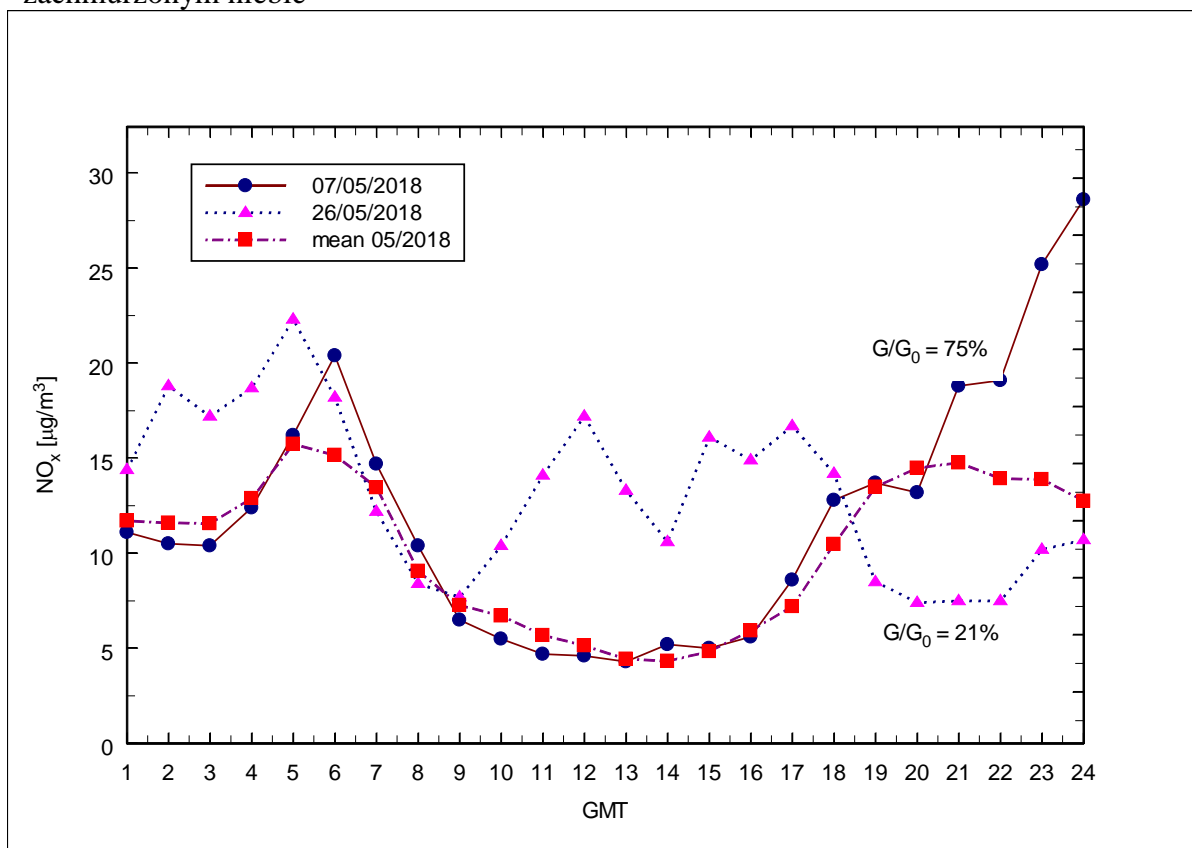
Rysunki 2.4.2.a i 2.4.2.b przedstawiają, odpowiednio, średnie miesięczne zmiany dobowe ozonu w sezonie letnim (sierpień) i zimowym (grudzień) w okresie od 1996 do 2018 roku. Porównując wyniki pomiarów ozonu przyziemnego rejestrowanych w sierpniu i grudniu 2018 roku z wartościami otrzymywanymi w tych samych miesiącach w latach 1996 – 2017 stwierdzono, że koncentracja ozonu w sierpniu 2018 roku była niższa niż w roku 2015, porównywalna do wartości rejestrowanych w latach 1996-2014 i nieznacznie wyższa niż wartości rejestrowane w latach 2016-2017. W grudniu 2018 roku średnia wartość ozonu była niższa niż wartości rejestrowane w 2017 roku i była porównywalna do wartości rejestrowanych w latach 1996-2016. W roku 2018, podobnie jak w latach ubiegłych, maksymalne wartości koncentracji ozonu przyziemnego były obserwowane w sezonie wiosenno-letnim (kwiecień – sierpień). Maksymalny średni miesięczny przebieg dobowy był zarejestrowany w maju (Rys. 2.4.3.a). Rysunek 2.4.3 b przedstawia maksymalne średnie miesięczne przebiegi dobowe koncentracji ozonu w latach 1996 – 2018. Najniższą wartość koncentracji ozonu przyziemnego zarejestrowano w sierpniu 1996 roku. Podobne wartości otrzymano w lipcu 2012 i 2014 roku. Najwyższą, wyjątkowo wysoką koncentrację ozonu przyziemnego zarejestrowano w sierpniu 2002 roku. W 2018 roku maksymalna wartość koncentracji ozonu rejestrowana w maju była nieznacznie wyższa od wartości rejestrowanych w maju 2017 roku. Z dobowych przebiegów koncentracji ozonu rejestrowanych w latach 1996 – 2018 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. Najwyższa, wyjątkowo wysoka koncentracja ozonu przyziemnego była zarejestrowana w kwietniu 2009 roku. Miało to istotny wpływ na średni przebieg dobowy koncentracji ozonu w latach 2003-2014, znacznie wyższy niż ten obserwowany w latach 1996-2000. W kwietniu 2018 roku wartość koncentracji ozonu była najwyższa (Rys. 2.4.4 a). Rysunki 2.4.5 oraz 2.4.6 przedstawiają średnie miesięczne zmiany dobowe NO<sub>2</sub>, NO, CO oraz SO<sub>2</sub>, odpowiednio w sezonie letnim (sierpień) i zimowym (grudzień), uśrednione w okresie od 2004 do 2014 roku oraz w 2015, 2016, 2017 i 2018 roku.

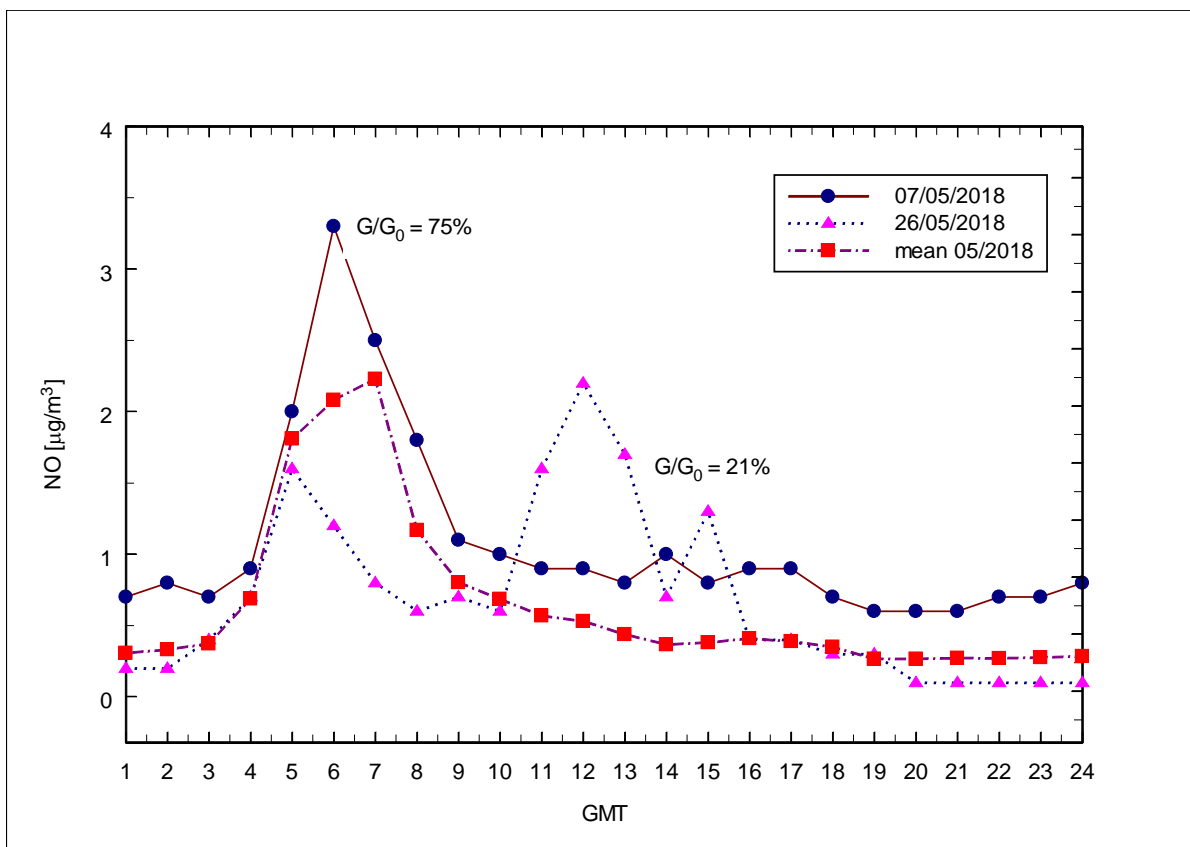
Przebiegi dobowe NO<sub>2</sub> (Rys. 2.4.4 b i Rys. 2.4.5 a) są, zgodnie z przewidywaniami teoretycznymi, ujemnie skorelowane z przebiegami dobowymi ozonu (Rys 2.4.4 a i 2.4.2 a). Rysunki 2.4.5 b oraz 2.4.6 b przedstawiają przebiegi dobowe koncentracji NO. W średnich przebiegach dobowych latem powtarza się, na tle wyrównanych niskich stężeń w ciągu dnia, występowanie maksimum w godzinach rannych 7 GMT. (Rys. 2.4.5.b). Zimą (Rys. 2.4.6 b) maksima nie są tak ostre jak latem, występują rano, około dwie godziny później niż latem oraz, dodatkowo, są obserwowane również wieczorem (Rys. 2.4.1 e). Przebiegi dobowe koncentracji tlenku węgla wykazują dość regularny przebieg w miesiącach letnich (podwójne maksimum – rano i w nocy) oraz wieczorne maksimum zimą (Rys. 2.4.5.c oraz Rys.2.4.6.c). Porównując średnie przebiegi dobowe CO zarejestrowane w 2018 roku ze uśrednionymi przebiegami dobowymi w okresie 2004-2014 i w 2015 roku możemy zaobserwować znaczny spadek koncentracji CO zarówno latem (dwukrotny) jak i zimą 2018 roku. 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). Koncentracja dwutlenku siarki w sierpniu 2018 roku miała wartość najniższą od tych rejestrowanych w latach 2004-2017 (Rys. 2.4.5 d). Średnia wartość koncentracji dwutlenku siarki w grudniu 2018 roku była również wielokrotnie niższa od wartości średnich dobowych przebiegów rejestrowanych w latach 2004-2017 (Rys. 2.4.6 d). Rysunki 2.4.7 (a, b, c, d ,e) przedstawiają zmiany dobowe koncentracji, odpowiednio, CO, SO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub> oraz NO<sub>x</sub> w poszczególnych miesiącach 2018 roku.



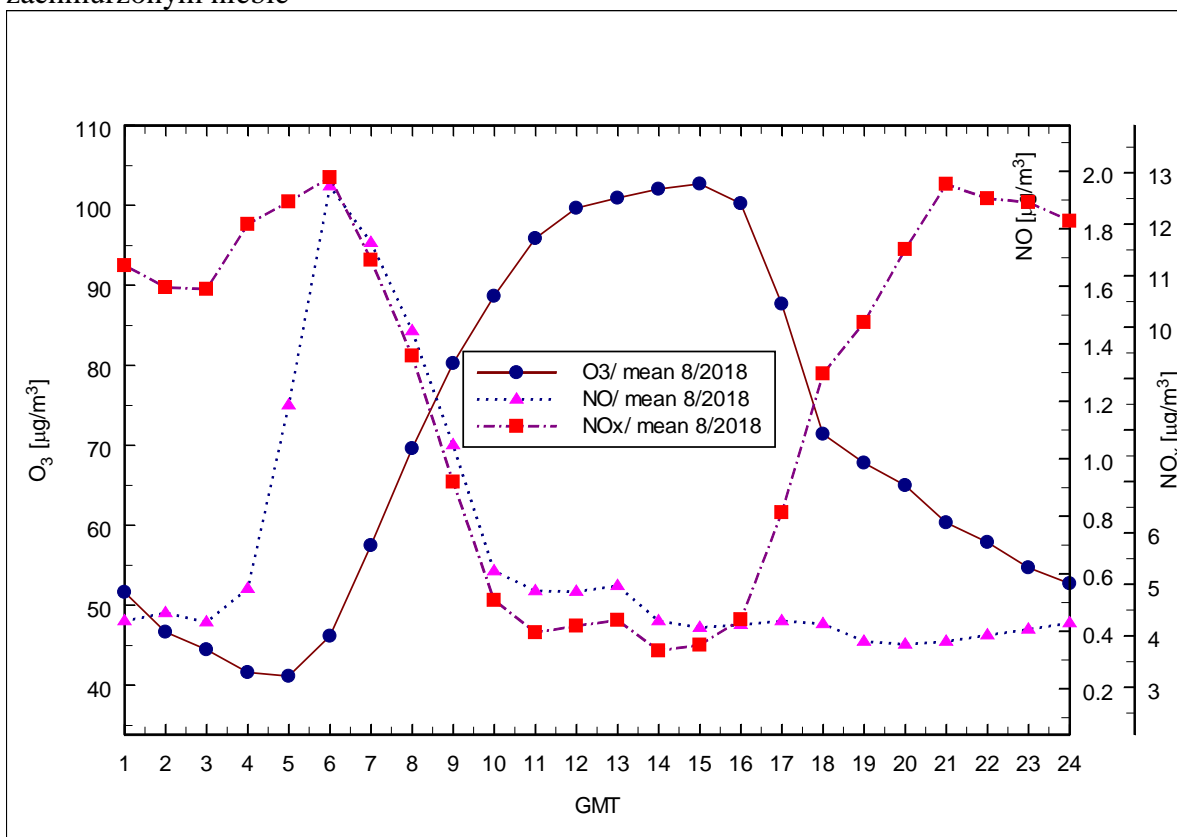
Rys.2.4.1 (a) Przykłady przebiegów dobowych O<sub>3</sub> w maju 2018 przy czystym i zachmurzonym niebie



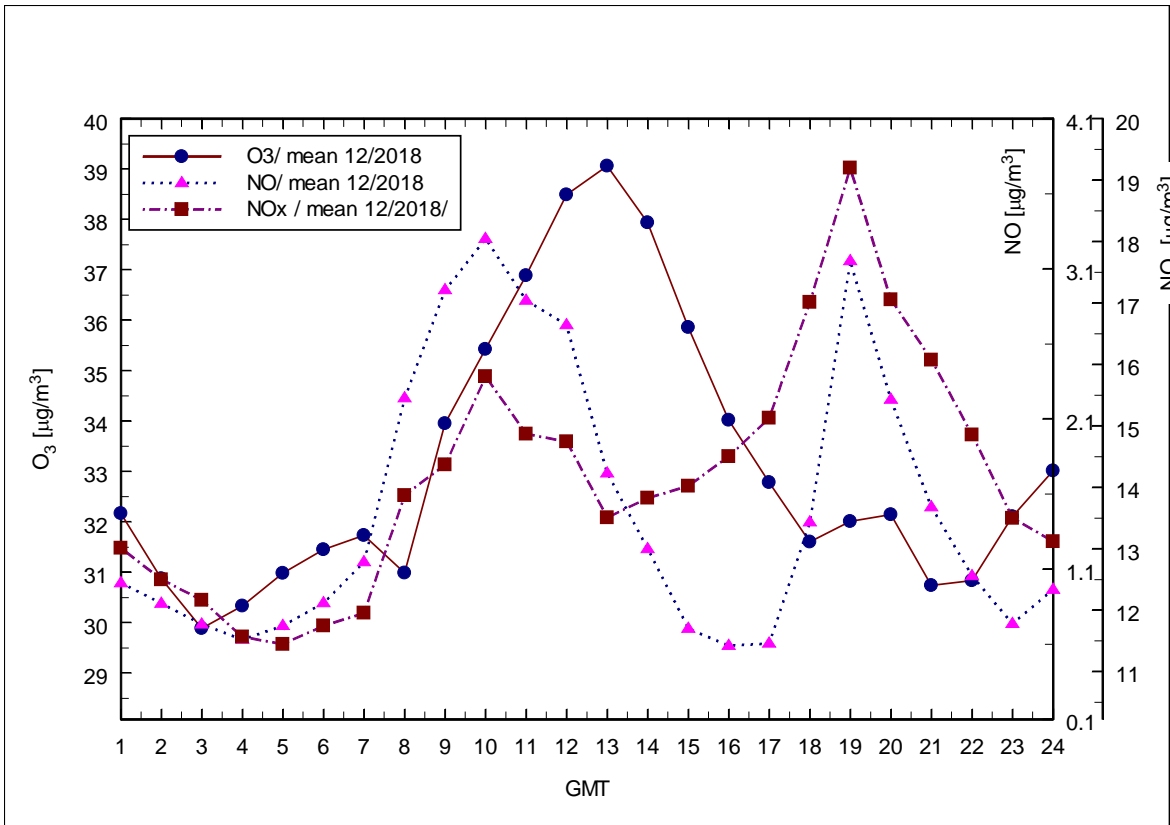
Rys.2.4.1 (b) Przykłady przebiegów dobowych NO<sub>x</sub> w maju 2018 przy czystym i zachmurzonym niebie



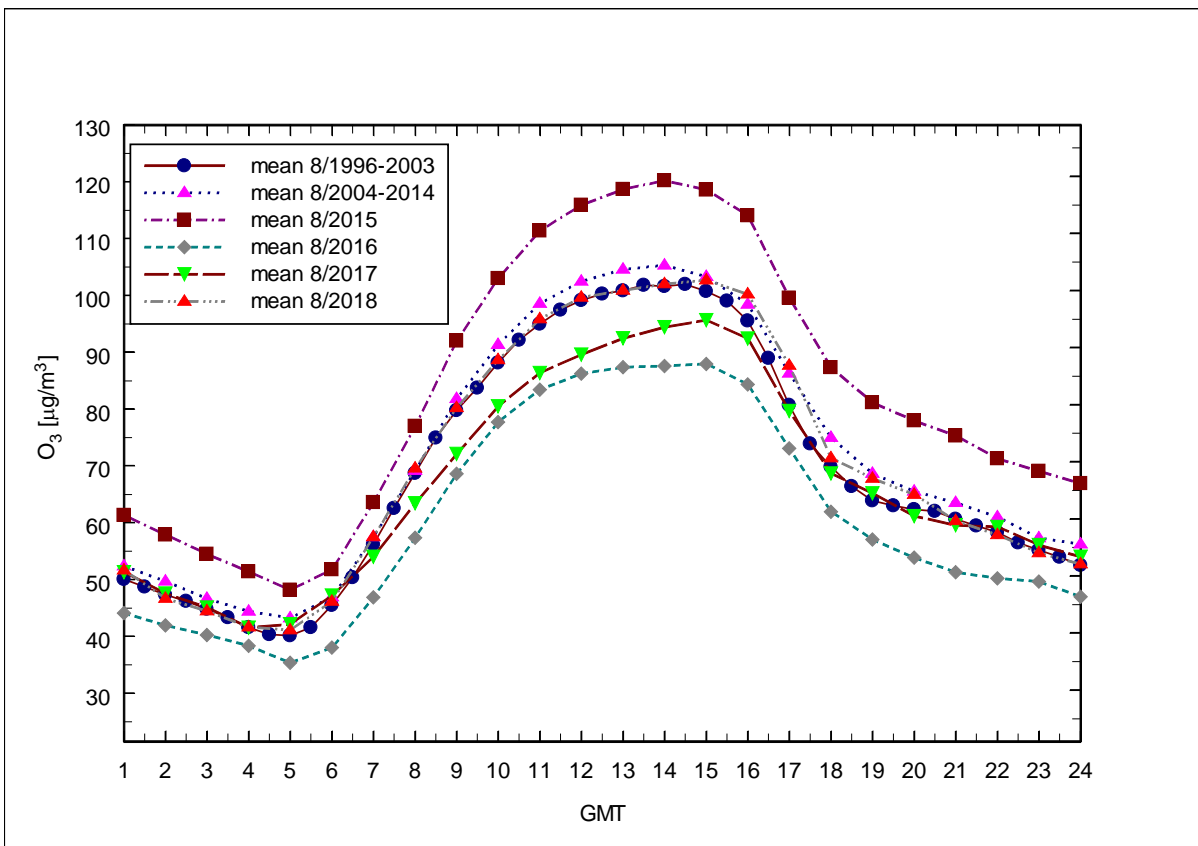
Rys.2.4.1 (c) Przykłady przebiegów dobowych NO w maju 2018 przy czystym i zachmurzonym niebie



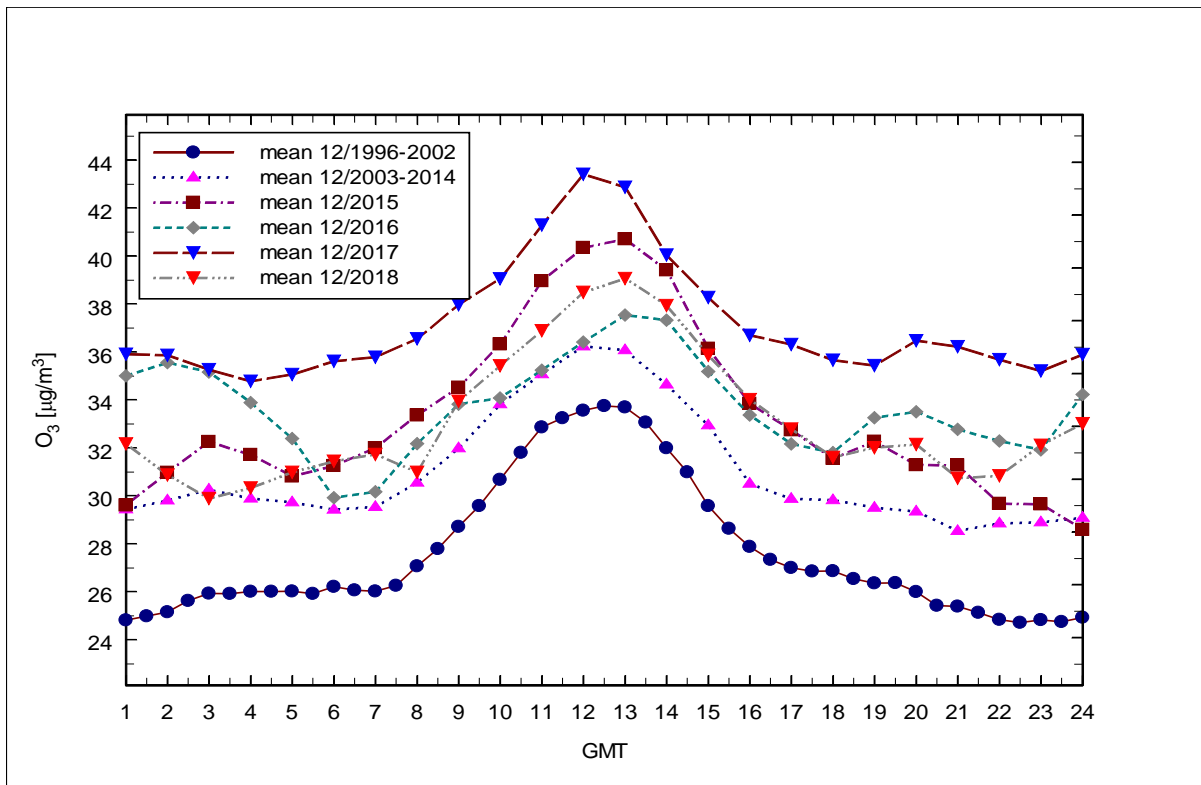
Rys.2.4.1 (d) Średni przebieg dobowy O₃, NO i NOₓ w sierpniu 2018



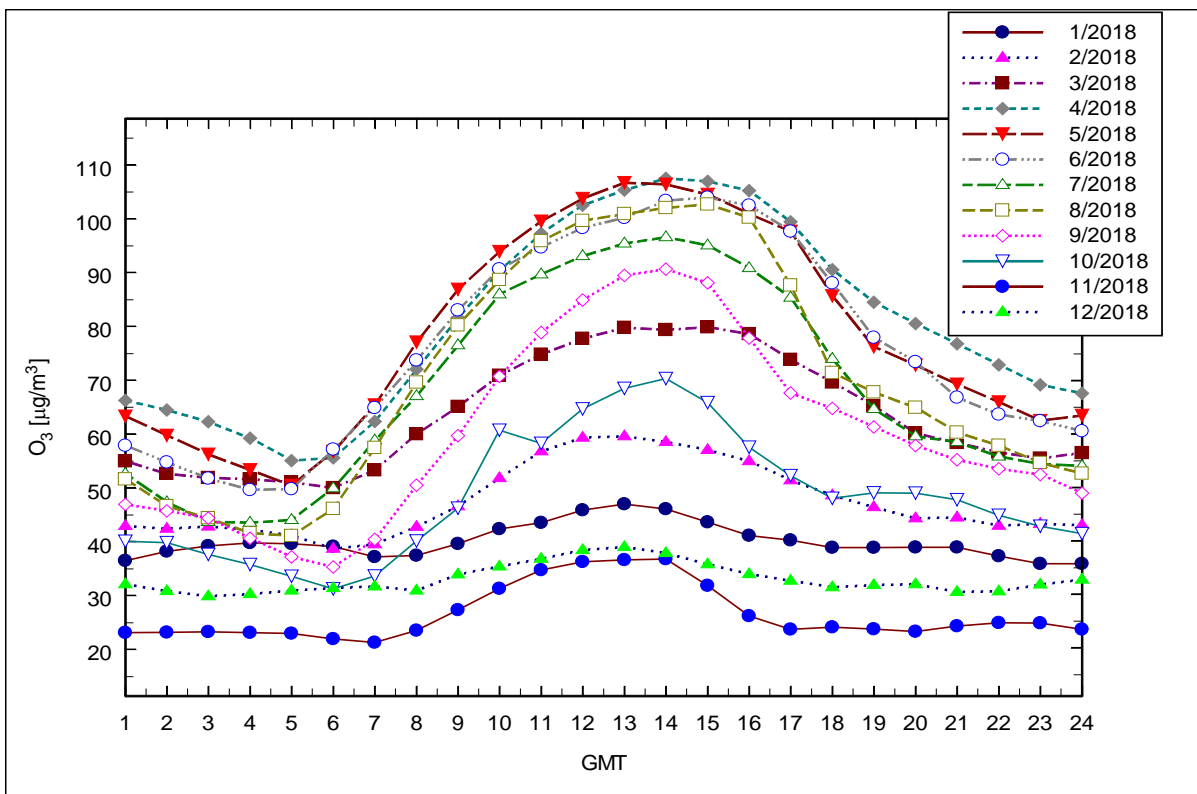
Rys.2.4.1 (e) Średni przebieg dobowy O<sub>3</sub>, NO i NO<sub>x</sub> w grudniu 2018



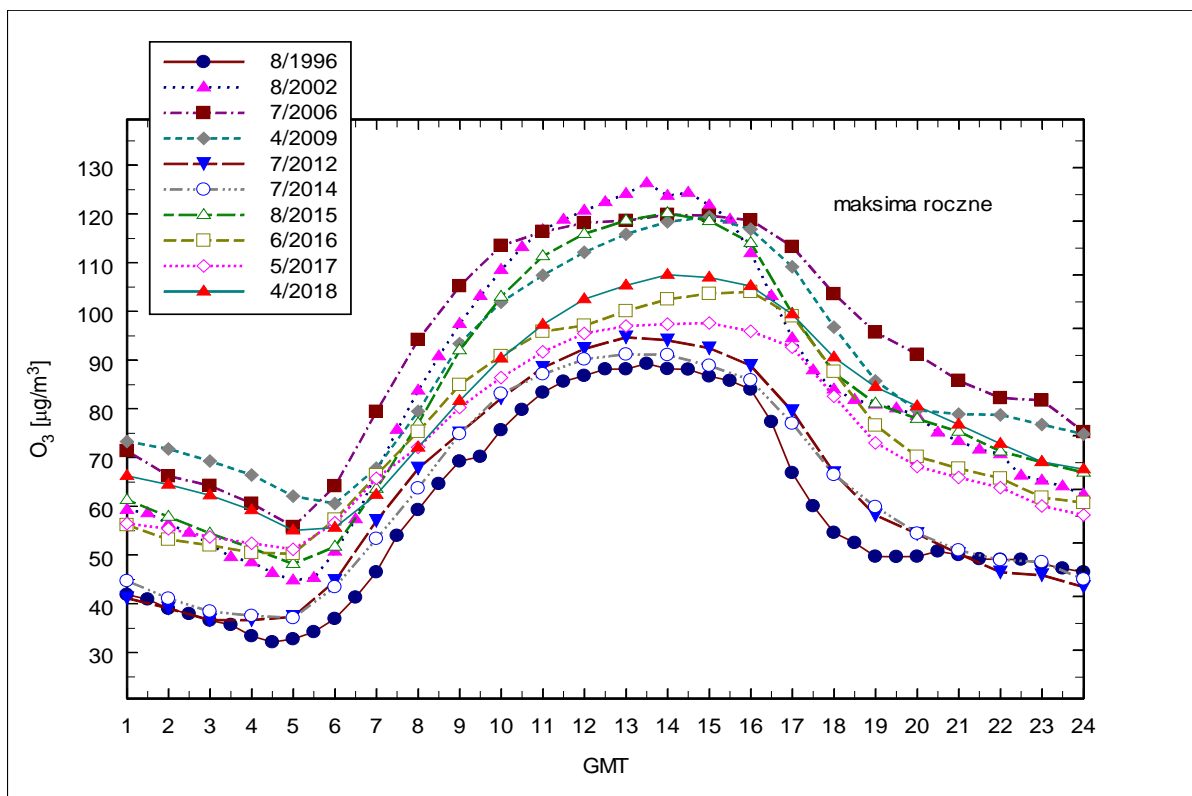
Rys.2.4.2 (a) Średni przebieg dobowy O<sub>3</sub> w sierpniu w latach 1996-2018



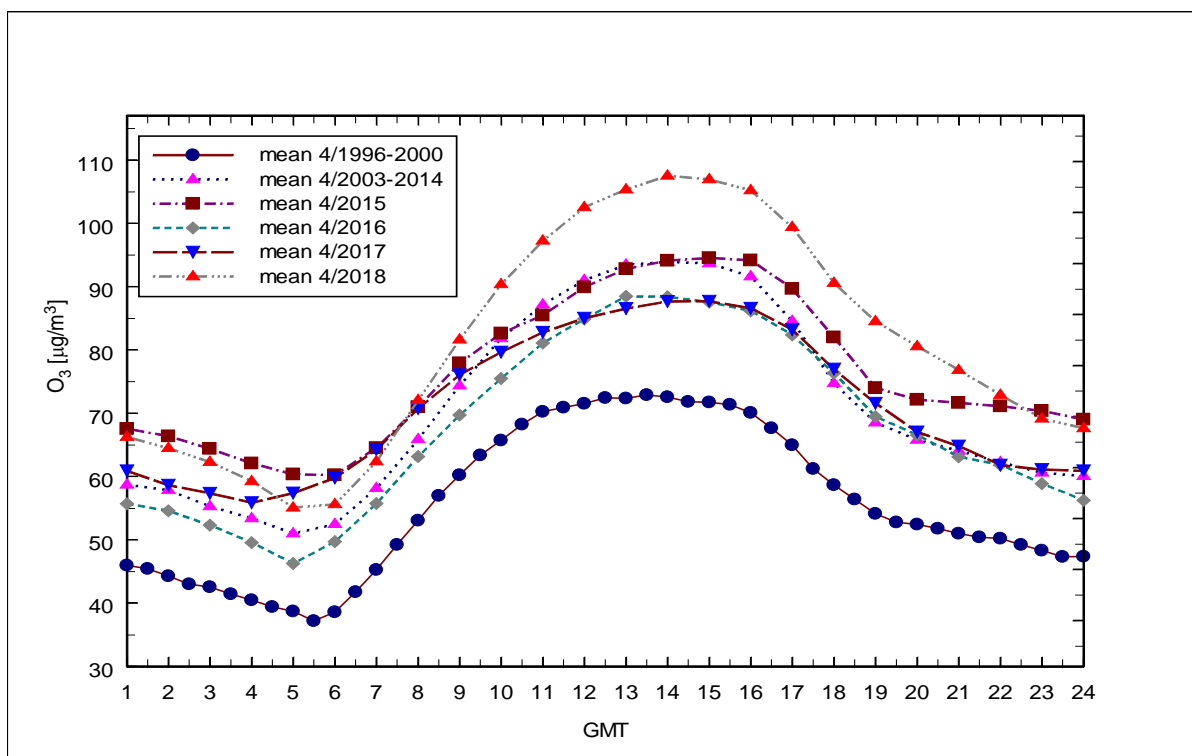
Rys.2.4.2 (b) Średni przebieg dobowy O<sub>3</sub> w grudniu w latach 1996-2018



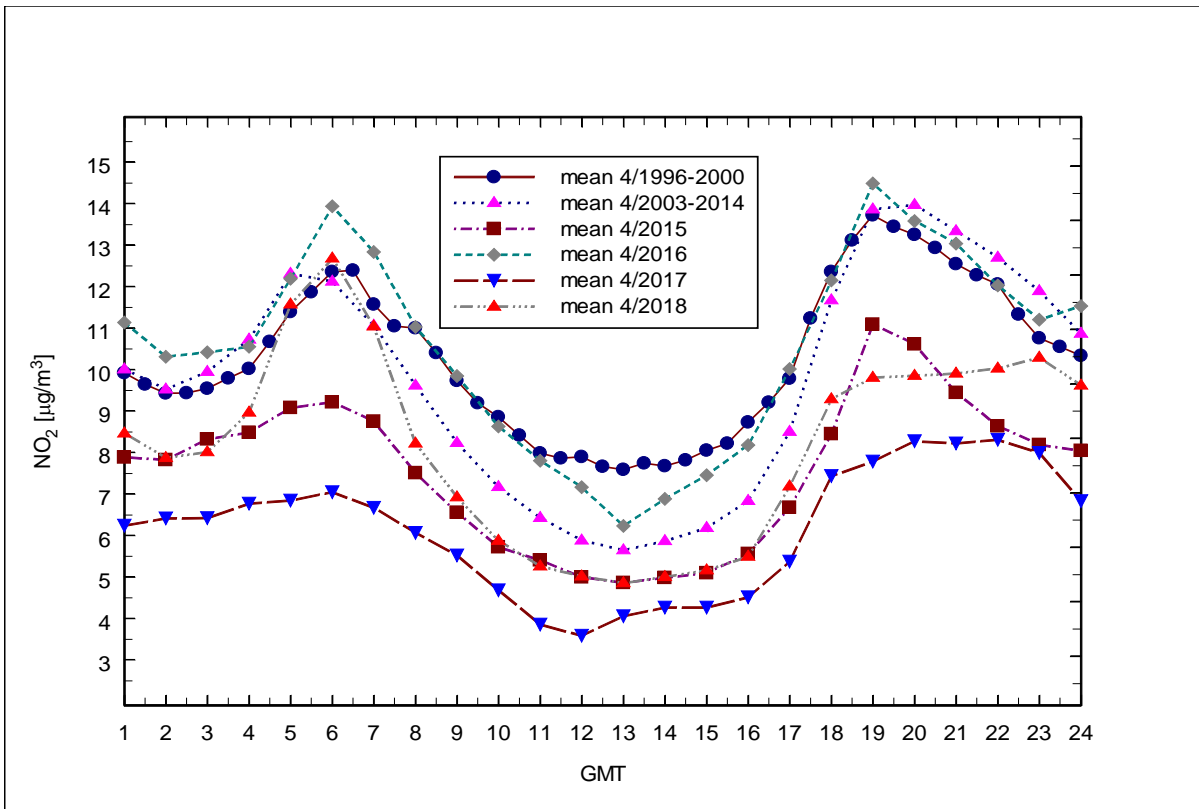
Rys.2.4.3 (a) Średnie przebiegi dobowe O<sub>3</sub> w poszczególnych miesiącach roku 2018



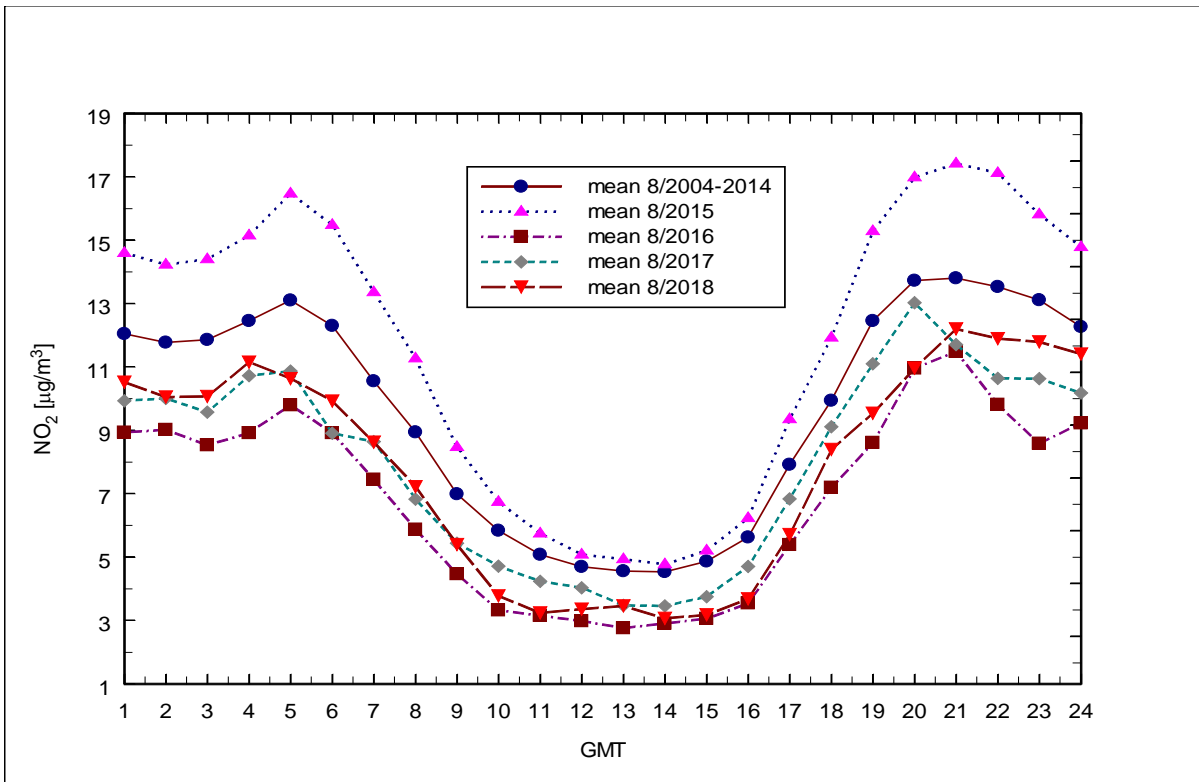
Rys.2.4.3 (b) Średnie przebiegi dobowe  $O_3$  w miesiącach, w których wystąpiło maksimum roczne, w latach 1996-2018



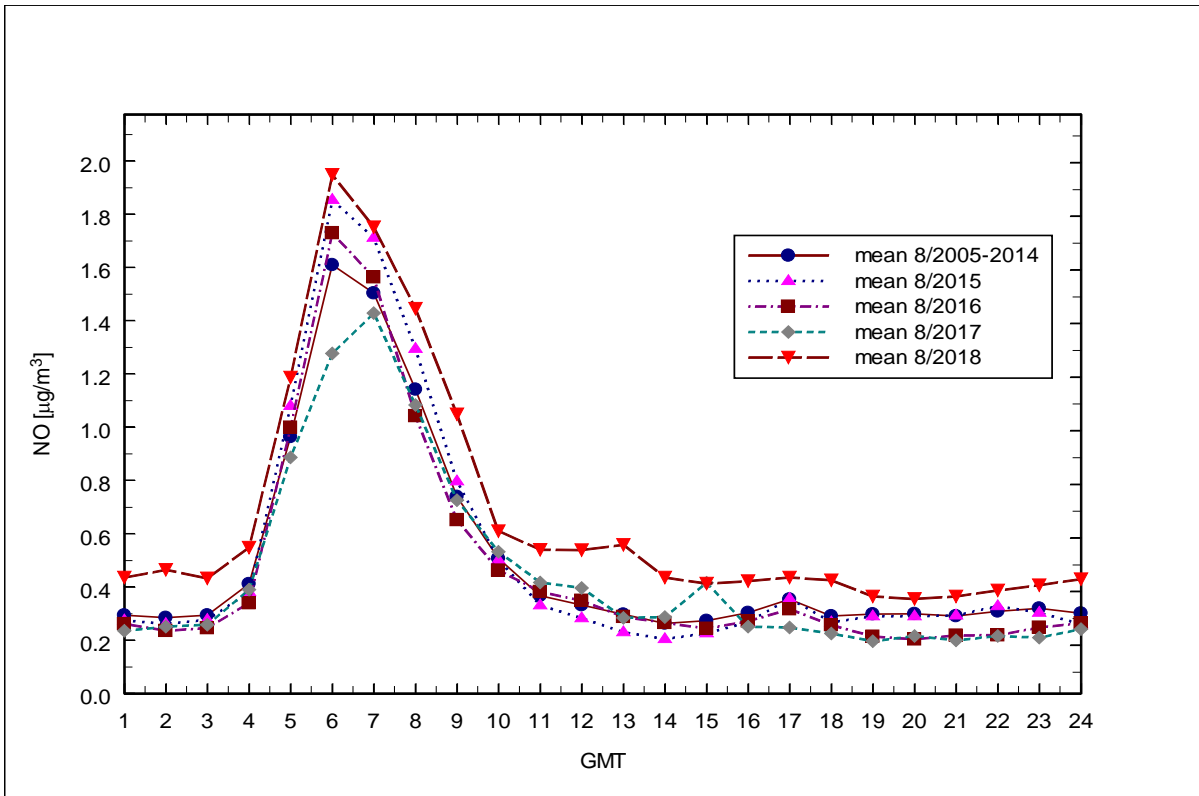
Rys.2.4.4 (a) Średnie przebiegi dobowe  $O_3$  w kwietniu w latach 1996-2018



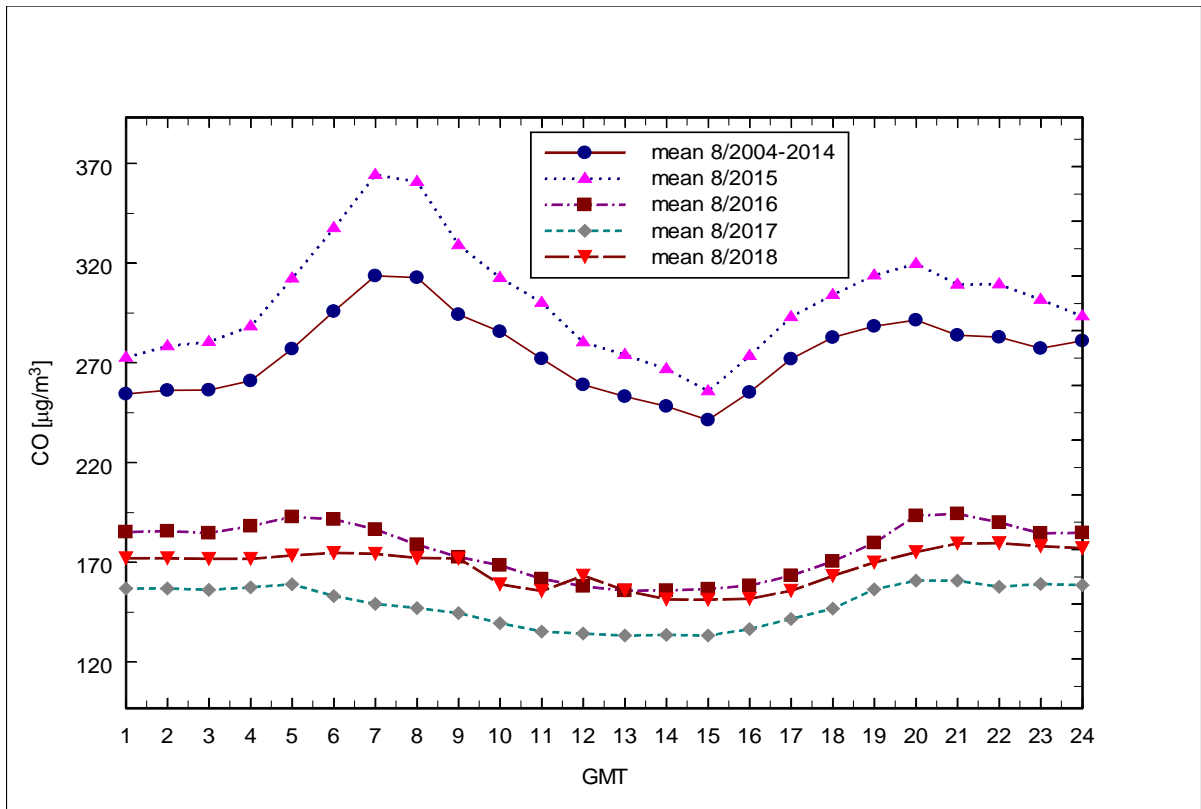
Rys.2.4.4 (b) Średnie przebiegi dobowe NO<sub>2</sub> w kwietniu w latach 1996-2018



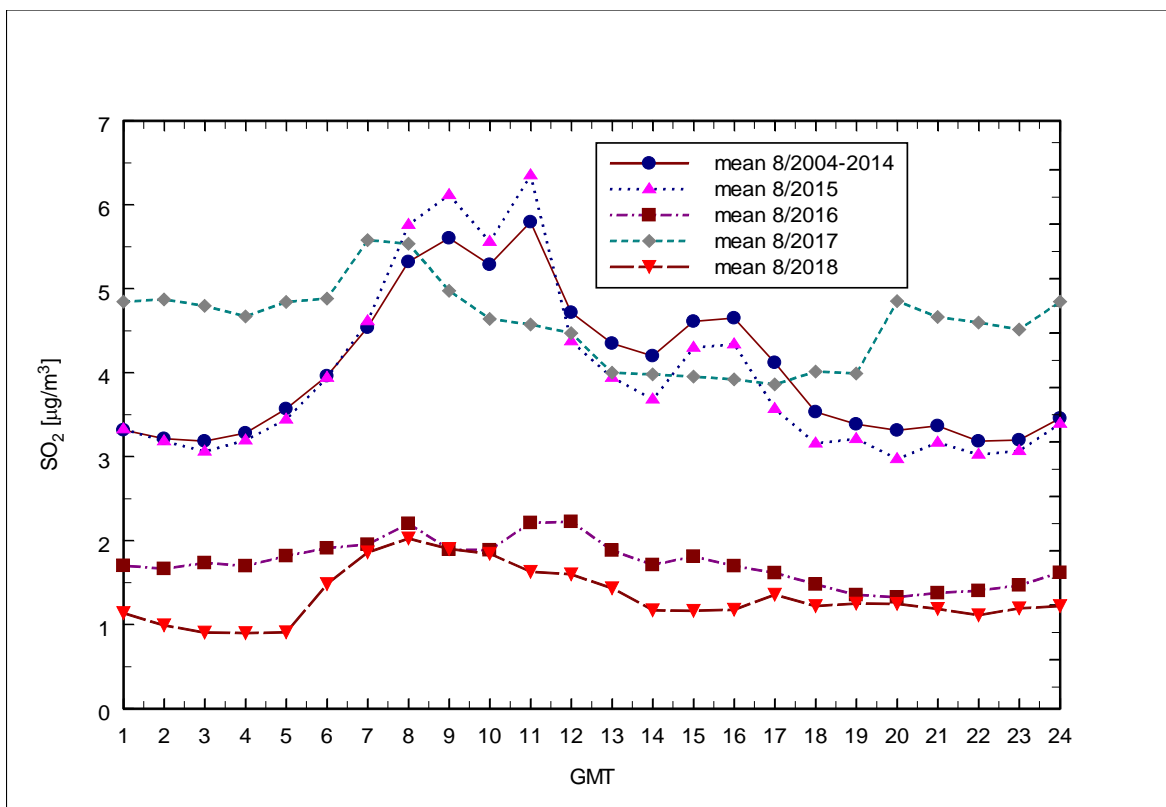
Rys.2.4.5 (a) Średnie przebiegi dobowe NO<sub>2</sub> w sierpniu w latach 2004-2018



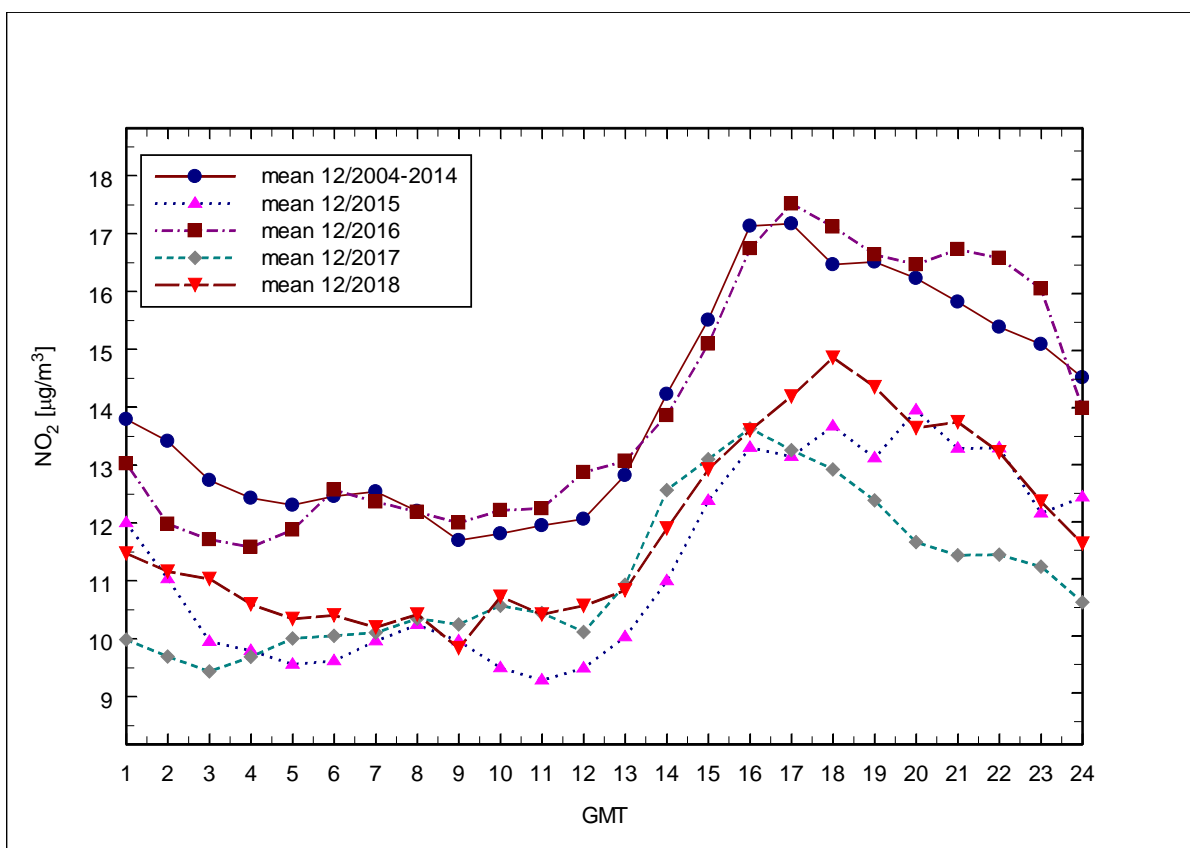
Rys.2.4.5 (b) Średnie przebiegi dobowe NO w sierpniu w latach 2005-2018



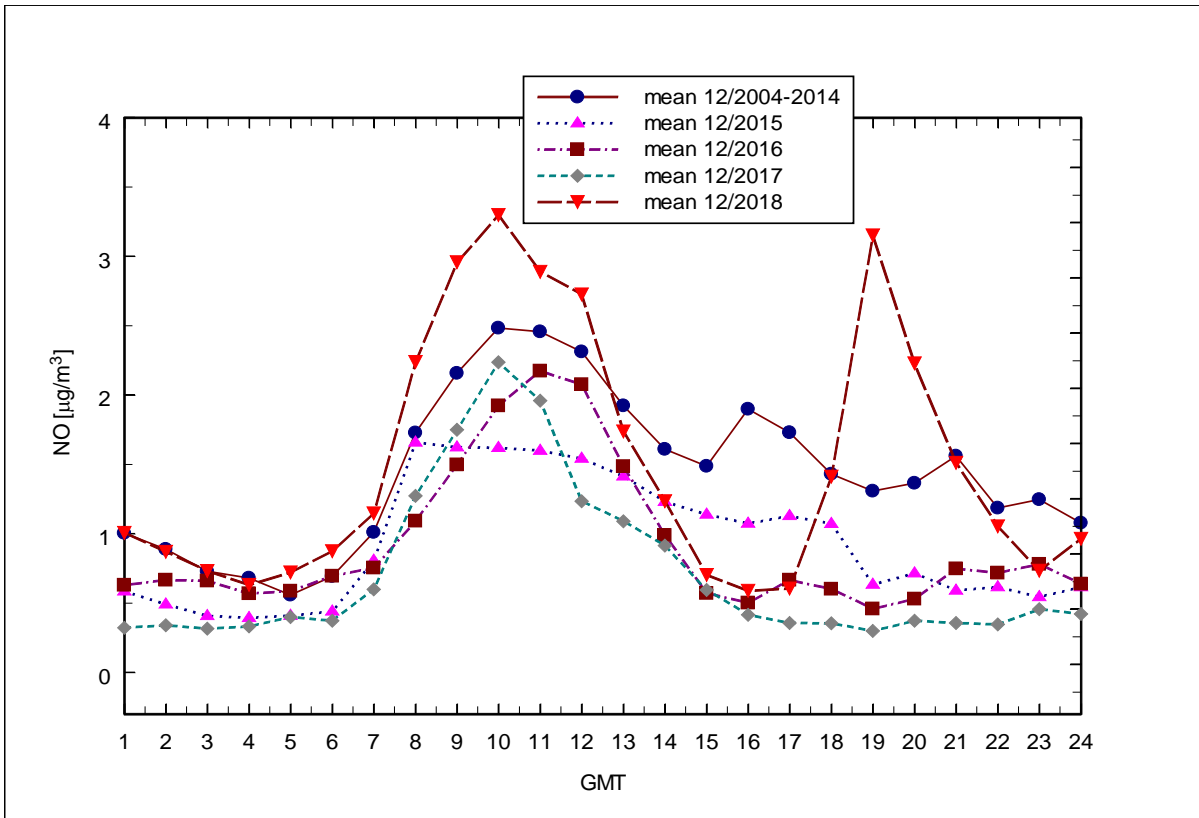
Rys.2.4.5 (c) Średnie przebiegi dobowe CO w sierpniu w latach 2004-2018



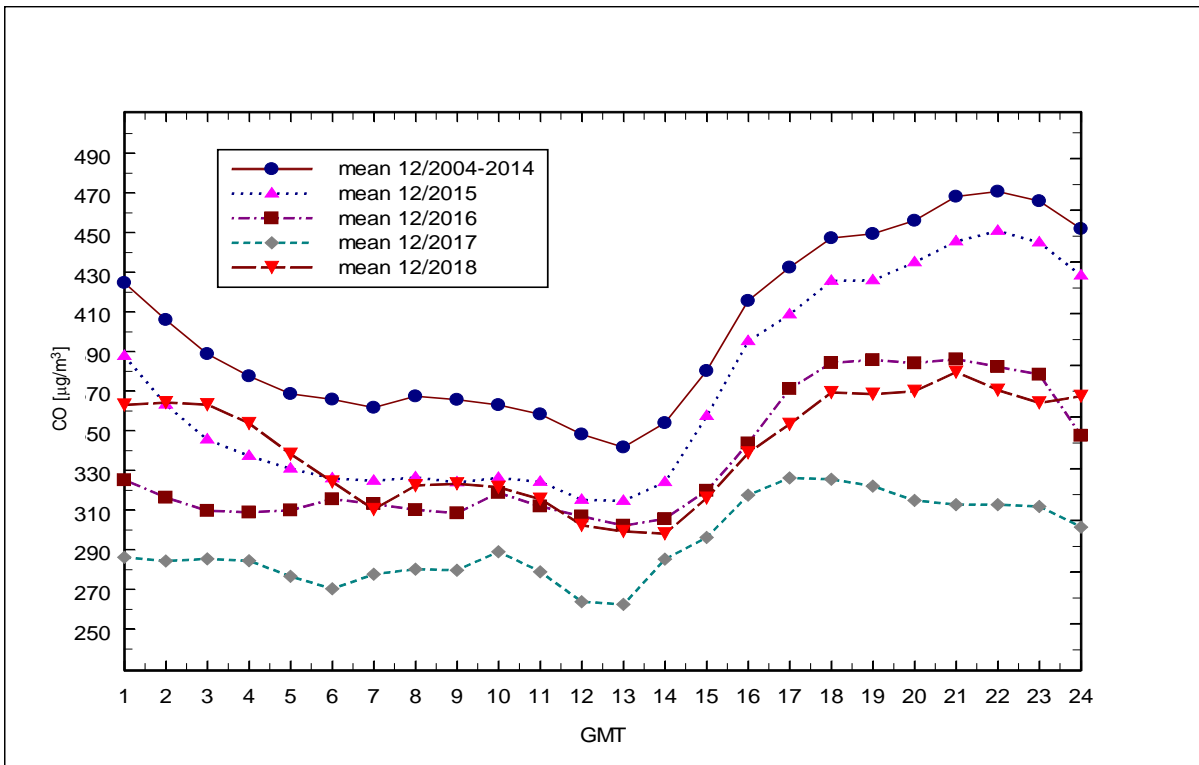
Rys.2.4.5 (d) Średnie przebiegi dobowe SO<sub>2</sub> w sierpniu w latach 2004-2018



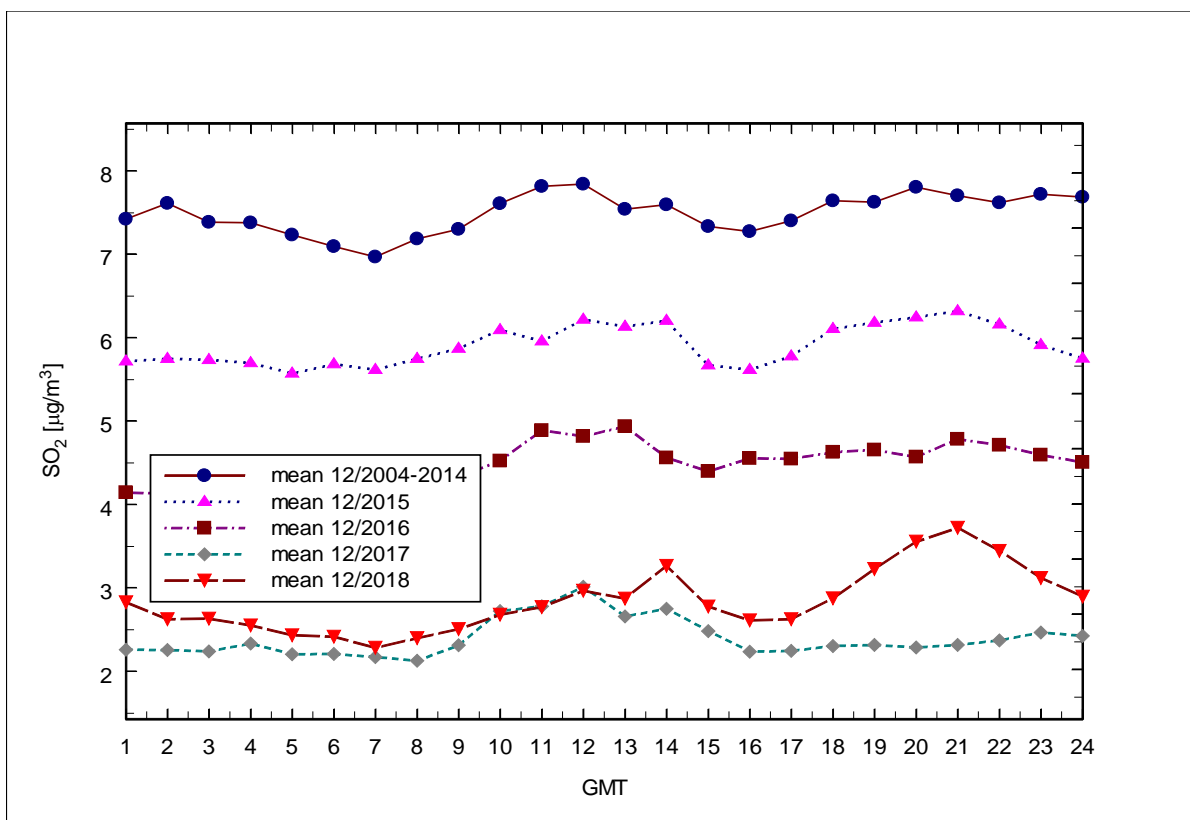
Rys.2.4.6 (a) Średnie przebiegi dobowe NO<sub>2</sub> w grudniu w latach 2004-2018



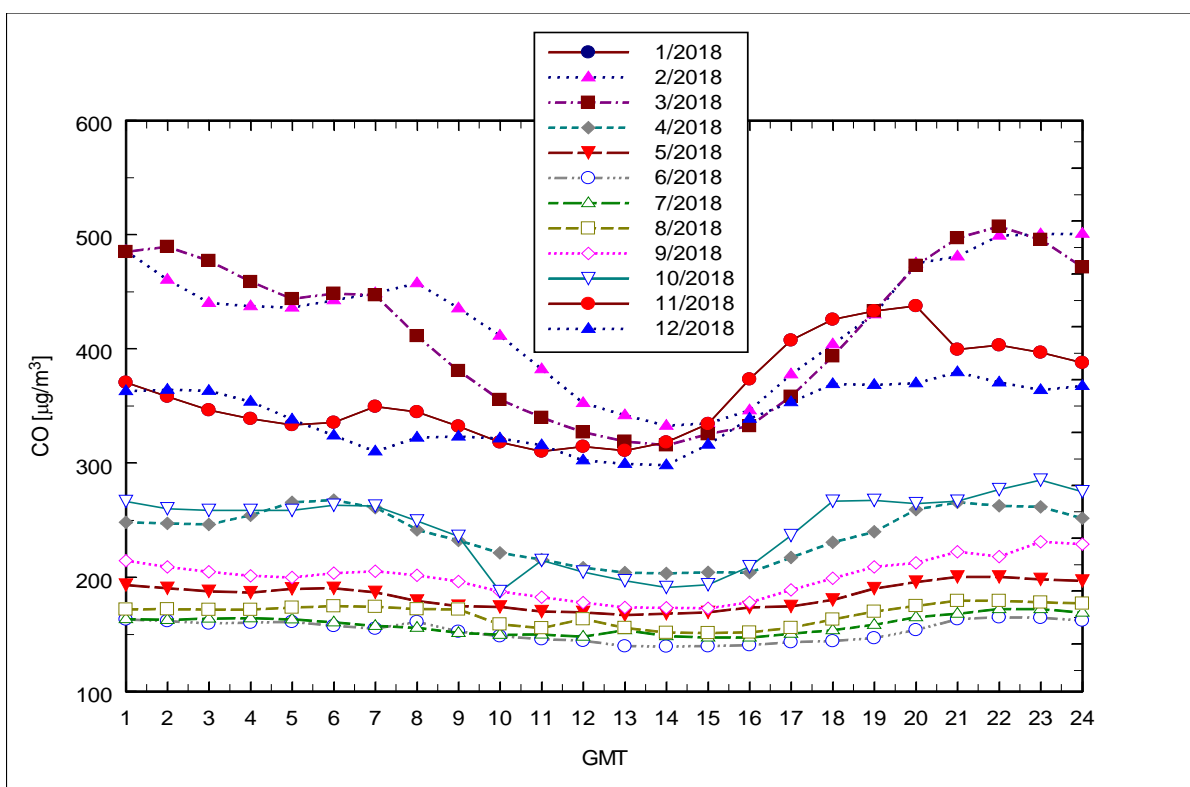
Rys.2.4.6 (b) Średnie przebiegi dobowe NO w grudniu w latach 2004-2018



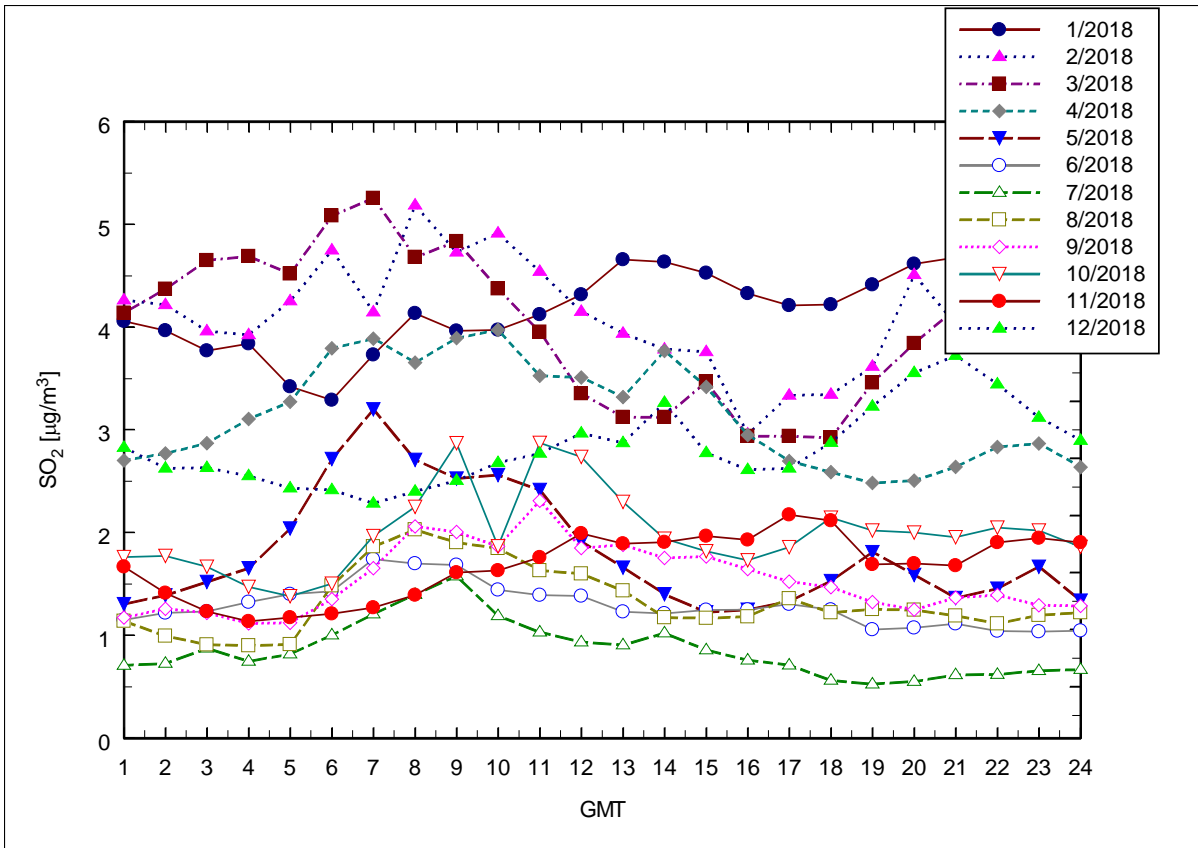
Rys.2.4.6 (c) Średnie przebiegi dobowe CO w grudniu w latach 2004-2018



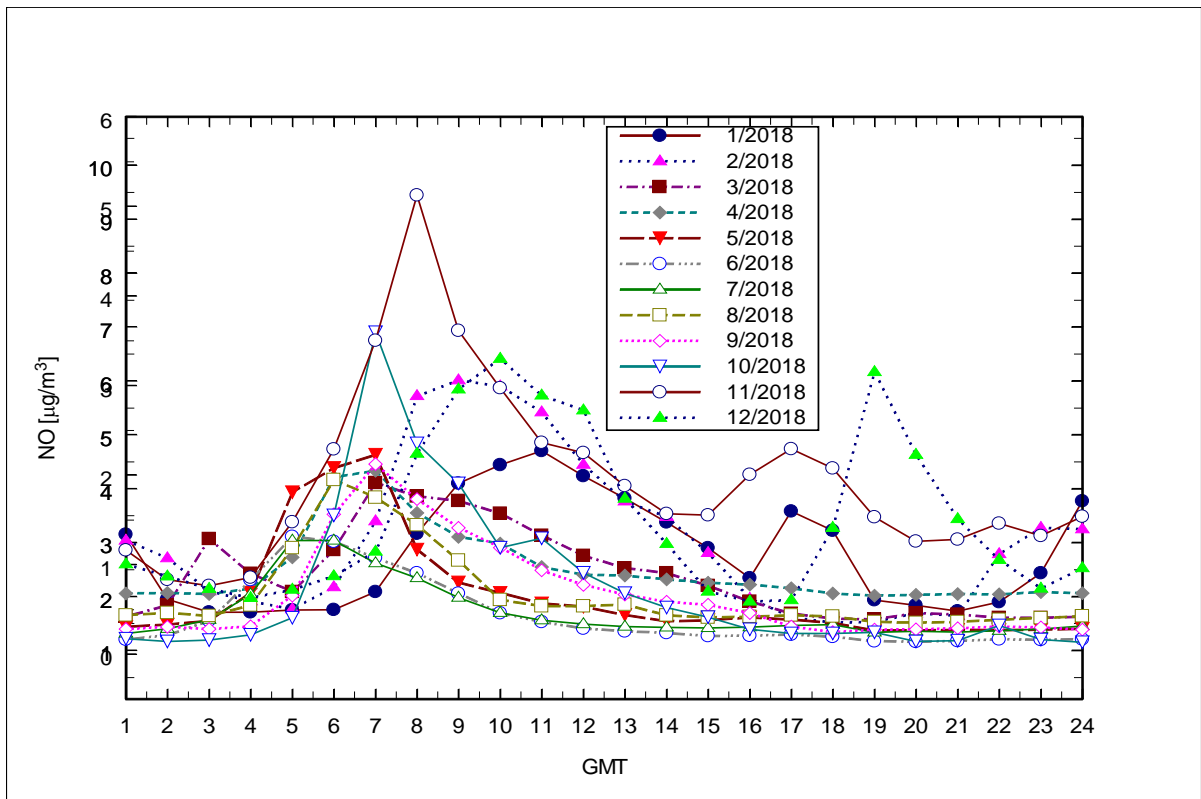
Rys.2.4.6 (d) Średnie przebiegi dobowe SO<sub>2</sub> w grudniu w latach 2004-2018



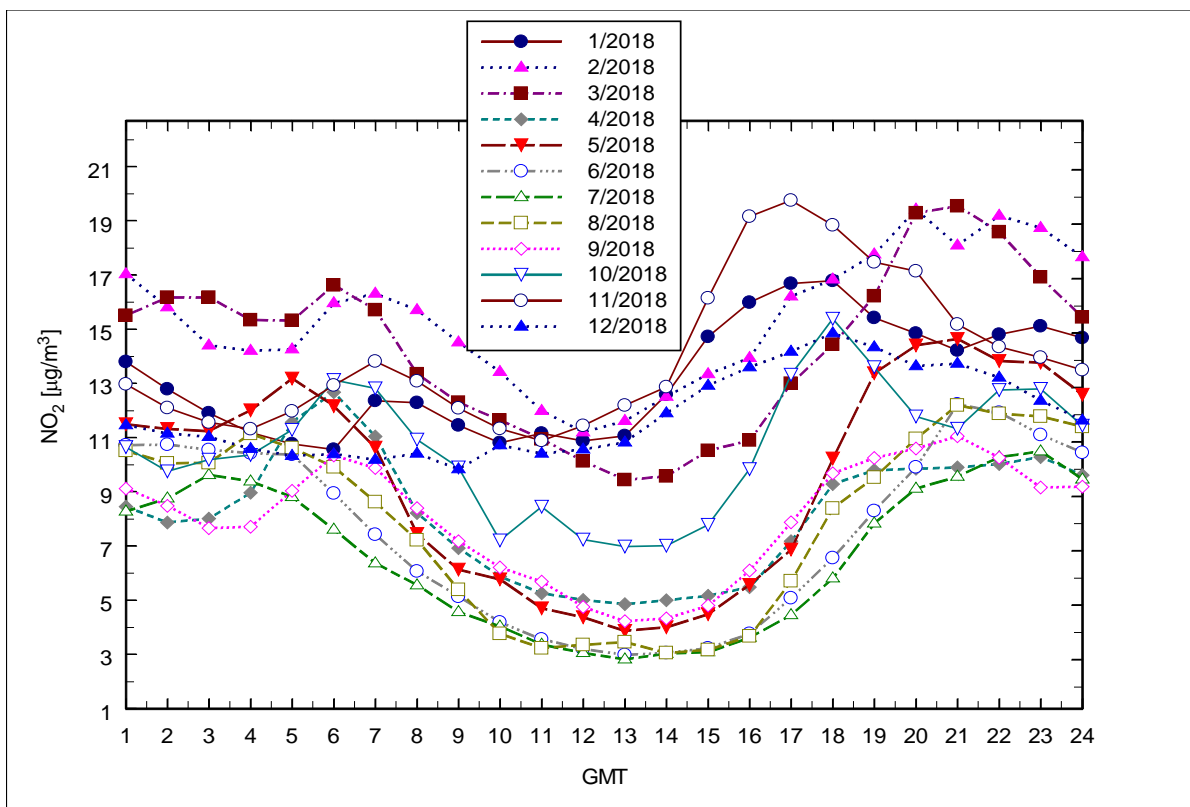
Rys.2.4.7 (a) Średnie przebiegi dobowe CO w poszczególnych miesiącach roku 2018



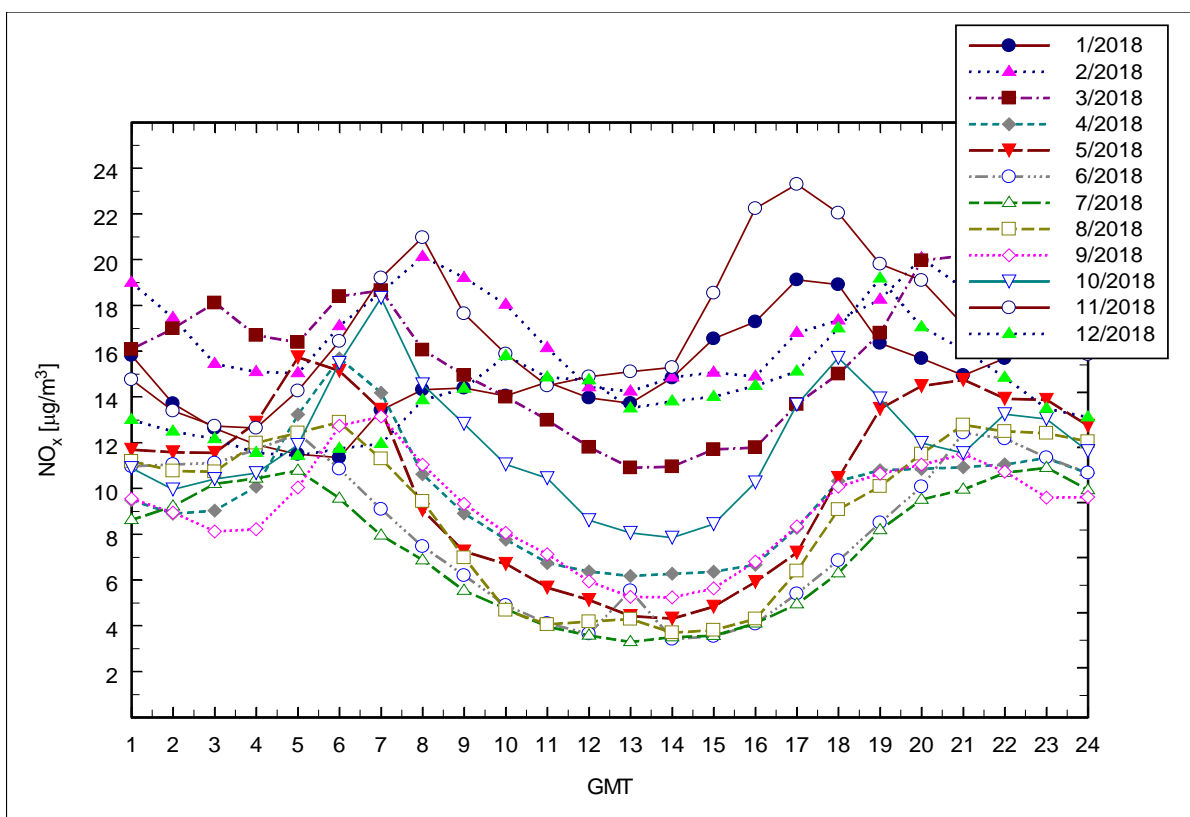
Rys.2.4.7 (b) Średnie przebiegi dobowe SO<sub>2</sub> w poszczególnych miesiącach roku 2018



Rys.2.4.7 (c) Średnie przebiegi dobowe NO w poszczególnych miesiącach roku 2018



Rys.2.4.7 (d) Średnie przebiegi dobowe NO<sub>2</sub> w poszczególnych miesiącach roku 2018



Rys.2.4.7 (e) Średnie przebiegi dobowe NO<sub>x</sub> w poszczególnych miesiącach roku 2018

### 3. Nadfioletowe promieniowanie słoneczne UV-B

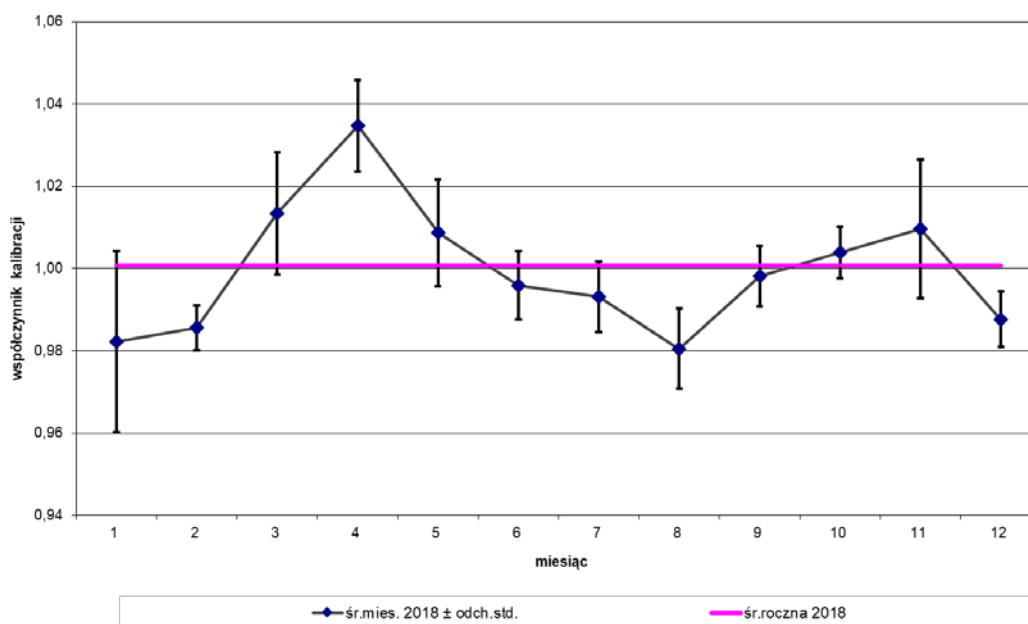
**Aleksander Pietruczuk, Jerzy Podgórski, Piotr Sobolewski**

W roku 2018 w Centralnym Obserwatorium Geofizycznym Instytutu Geofizyki PAN (COG) w Belsku kontynuowano monitoring promieniowania ultrafioletowego Słońca w zakresie erytemalnym (UV-B) oraz czasu usłonecznienia. Wykonane pomiary były podstawą do wyznaczenia dawek dobowych napromienienia promieniowaniem o skuteczności erytemalnej (tzw. napromienienie erytemalne) oraz indeksu UV, który określa maksymalną moc napromienienia erytemalnego zarejestrowaną danego dnia.

Pomiary promieniowania słonecznego w zakresie ultrafioletu prowadzone są w Centralnym Obserwatorium Geofizycznym IGF PAN 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. W sierpniu 2013 miernik SL 501A o numerze seryjnym 2011 zastąpiono identycznym urządzeniem o numerze seryjnym 20233. Równoległe do pomiarów miernikiem SL od 2006 r. używano miernika UVS-AE-T firmy Kipp & Zonen (K&Z). Pozwoliło to na wykorzystanie danych z tego miernika do sporządzenia niniejszego raportu zamiast danych z miernika SL, który uległ awarii w połowie roku 2015. Od tego roku miernik K&Z jest podstawowym miernikiem do monitoringu promieniowania UV w COG Belsk.

Przez cały rok wyniki uzyskiwane z detektora Kipp&Zonen poddawane są bieżącej kontroli, która polega na porównywaniu wartości chwilowych mocy promieniowania UV-B uzyskiwanych z detektora Kipp&Zonen ze spektrofotometru Brewera. Spektrofotometr Brewera jest corocznie wzorcowany przez standard światowy Brewer Nr. 17, co zapewnia wysoką dokładność pomiarów UV-B. W celu zapewnienia większej dokładności do porównań wybierano dni pogodne - całkowicie bądź częściowo bezchmurne. Jako kryterium wyboru dni do porównania wykorzystywano dane uzyskiwane z detektora usłonecznienia CSD-11. Współczynnik kalibracyjny wyznaczano metodą regresji liniowej zależności mocy promieniowania uzyskiwanego z miernika K&Z oraz spektrofotometru Brewera. Zmienność roczna współczynnika jest przedstawiona na Rys. 3.1, średnia wartość

współczynnika kalibracyjnego dla 2018 wynosił 1,01. Sezonowe wahania współczynnika kalibracyjnego nie przekraczały 4%.



Rys.3.1.. Zmienność roczna współczynnika kalibracyjnego miernika Kipp&Zonen w 2018 roku.

Wyniki pomiarów dokonanych w roku 2018 dla poszczególnych miesięcy przedstawiono w Tabeli 3.1 w postaci dawek dobowych oraz indeksu UV. Dawki dobowe wyrażone są w SED (Standard Erythema Dose). W raportach z lat ubiegłych stosowano tylko jednostki MED. Jednostki SED w raportach są stosowane od 2015.

1 SED jest równy  $100 \text{ J/m}^2$  promieniowania efektywnego erytemalnie (tj. wywołującego rumień na skórze). Jednostka SED jest proponowana przez *International Organization for Standardization* (ISO) zgodnie ze standardem ISO 17166:1999 w miejsce jednostki MED. Indeks UV jest iloczynem maksymalnej mocy promieniowania UV [ $\text{W/m}^2$ ] zmierzonej danego dnia i czynnika 40 [ $\text{m}^2/\text{W}$ ]. Jest to bezwymiarowy parametr określający maksymalną zarejestrowaną moc promieniowania UV-B, a jego wartość zawiera się w przedziale od 0 do 16.

Tabela 3.1. Dawki dzienne napromienienia erytemalnego i indeks UV zmierzone w Belsku w 2018 r.

Mies.	I		II		III	
Dzień	UV - B [ SED ]	Indeks UV	UV - B [ SED ]	Indeks UV	UV - B [ SED ]	Indeks UV
1	0,96	0,3	0,75	0,3	5,32	1,2
2	1,36	0,4	1,50	0,5	5,35	1,4
3	1,30	0,4	2,94	0,8	4,12	0,9
4	1,14	0,3	1,23	0,5	6,77	1,4
5	1,24	0,4	3,45	0,8	6,79	1,5
6	1,38	0,4	2,45	0,7	4,76	1,2
7	0,51	0,2	3,14	0,8	1,94	0,6
8	1,56	0,4	2,20	0,8	6,18	1,6
9	1,62	0,4	1,45	0,4	5,58	1,7
10	0,56	0,2	1,65	0,5	7,68	1,7
11	0,49	0,1	1,59	0,4	6,83	1,5
12	0,64	0,2	1,86	0,7	4,72	1,4
13	0,90	0,5	2,99	0,8	7,18	2,1
14	1,08	0,3	1,74	0,8	4,01	1,2
15	1,52	0,4	2,88	0,8	2,11	0,5
16	1,24	0,4	1,58	0,5	2,08	0,5
17	1,43	0,4	2,31	0,8	10,68	2,2
18	1,59	0,5	3,12	1,0	12,47	2,4
19	1,08	0,5	3,73	0,9	12,69	2,7
20	1,37	0,3	4,98	1,1	6,89	1,4
21	0,89	0,3	5,08	1,1	9,55	2,5
22	1,52	0,4	5,50	1,3	11,20	2,5
23	1,20	0,3	2,60	0,7	5,19	1,3
24	1,32	0,4	4,26	1,2	7,88	2,0
25	2,48	0,7	5,05	1,2	11,54	2,3
26	1,68	0,4	2,72	0,7	9,02	2,4
27	0,88	0,3	4,26	1,2	4,69	1,2
28	0,61	0,2	4,55	1,3	5,80	1,9
29	1,00	0,4			3,04	1,2
30	1,45	0,5			12,84	2,8
31	2,65	0,6			4,01	1,2
Średnia	1,25	0,4	2,91	0,8	6,74	1,6
Odch.	-11%		-11%		-12%	

Mies.	IV		V		VI	
Dzień	UV - B [ SED ]	Indeks UV	UV - B [ SED ]	Indeks UV	UV - B [ SED ]	Indeks UV
1	1,68	0,5	25,26	4,9	33,73	5,6
2	5,46	1,9	19,42	5,3	24,76	5,5
3	11,19	2,6	25,93	4,8	29,14	5,8
4	14,82	3,1	28,11	5,1	35,25	6,0
5	15,78	3,2	28,11	4,9	34,32	6,5
6	16,59	3,3	27,64	4,7	40,22	6,6
7	18,18	3,4	32,09	5,5	37,38	6,0
8	18,49	3,5	32,37	5,6	37,10	6,0
9	19,08	3,6	31,03	5,7	37,02	6,3
10	16,12	3,0	32,26	5,8	37,24	6,5
11	16,51	3,4	28,53	5,3	23,25	6,8
12	17,28	3,3	30,79	5,3	22,94	6,1
13	18,67	4,0	30,81	5,3	25,60	6,8
14	18,11	3,4	21,62	4,6	29,43	6,6
15	19,67	4,1	20,49	5,3	32,86	6,5
16	15,85	3,6	7,73	2,8	28,42	6,1
17	9,02	3,4	9,75	3,4	27,33	5,7
18	25,84	4,8	18,30	6,4	28,99	6,3
19	26,49	4,8	23,92	5,7	35,88	7,4
20	26,68	4,8	33,02	5,6	40,95	7,6
21	24,45	4,4	30,23	6,1	36,62	6,9
22	25,66	4,7	26,51	5,7	30,84	6,6
23	17,72	3,7	30,05	6,1	21,48	5,8
24	19,95	4,0	30,65	5,7	14,45	5,3
25	24,84	5,4	27,27	5,4	18,69	4,1
26	20,10	5,1	11,88	4,6	20,39	5,7
27	22,02	4,7	33,81	5,8	24,90	5,8
28	24,94	4,8	34,25	5,9	25,78	6,8
29	23,90	5,1	37,13	6,1	33,57	6,4
30	27,95	5,3	34,38	5,7	21,53	6,0
31			33,77	5,5		
Średnia	18,77	3,8	27,00	5,3	29,67	6,2
Odch.	30%		15%		6%	

Mies.	VII		VIII		IX	
Dzień	UV - B [ SED ]	Indeks UV	UV - B [ SED ]	Indeks UV	UV - B [ SED ]	Indeks UV
1	16,71	5,9	35,82	6,2	21,13	4,3
2	11,15	3,6	36,78	6,4	21,64	4,0
3	29,97	6,8	27,75	6,5	21,43	4,4
4	34,27	6,2	33,96	6,5	20,31	4,0
5	37,12	6,3	27,62	6,0	20,10	4,1
6	39,17	6,6	26,75	6,4	17,93	3,9
7	38,76	6,5	34,22	5,9	19,62	3,7
8	34,13	7,2	34,58	6,0	15,76	3,6
9	39,07	6,4	29,55	5,4	11,87	3,9
10	36,59	6,7	28,65	5,3	20,43	4,0
11	18,49	4,6	11,51	4,8	13,74	3,7
12	26,56	6,1	31,46	5,8	21,46	4,3
13	25,95	5,7	31,15	5,7	19,04	3,9
14	15,46	5,1	21,31	4,7	7,28	1,6
15	18,06	6,2	21,60	5,6	11,22	3,5
16	15,30	5,8	25,60	5,3	16,68	3,7
17	25,49	6,5	23,07	5,1	16,51	3,5
18	26,10	6,6	23,51	4,8	16,21	3,4
19	27,54	7,1	26,10	5,2	16,38	3,2
20	33,01	6,9	23,37	4,7	15,02	3,0
21	30,30	6,1	23,18	5,2	15,49	3,1
22	32,66	5,7	27,14	5,4	7,99	2,9
23	34,04	5,8	25,52	4,6	6,55	2,1
24	35,37	6,0	20,41	4,4	5,35	2,1
25	24,79	6,4	9,21	2,6	10,92	2,9
26	25,48	6,1	7,33	1,7	13,30	3,0
27	29,06	6,2	21,87	4,8	10,19	2,9
28	30,90	6,0	14,52	3,4	13,27	3,1
29	27,39	5,9	22,46	4,4	13,79	3,1
30	33,52	5,9	21,39	3,9	13,21	2,9
31	33,85	6,0	17,07	4,6		
Średnia	28,59	6,1	24,66	5,1	15,13	3,4
Odch.	5%		12%		18%	

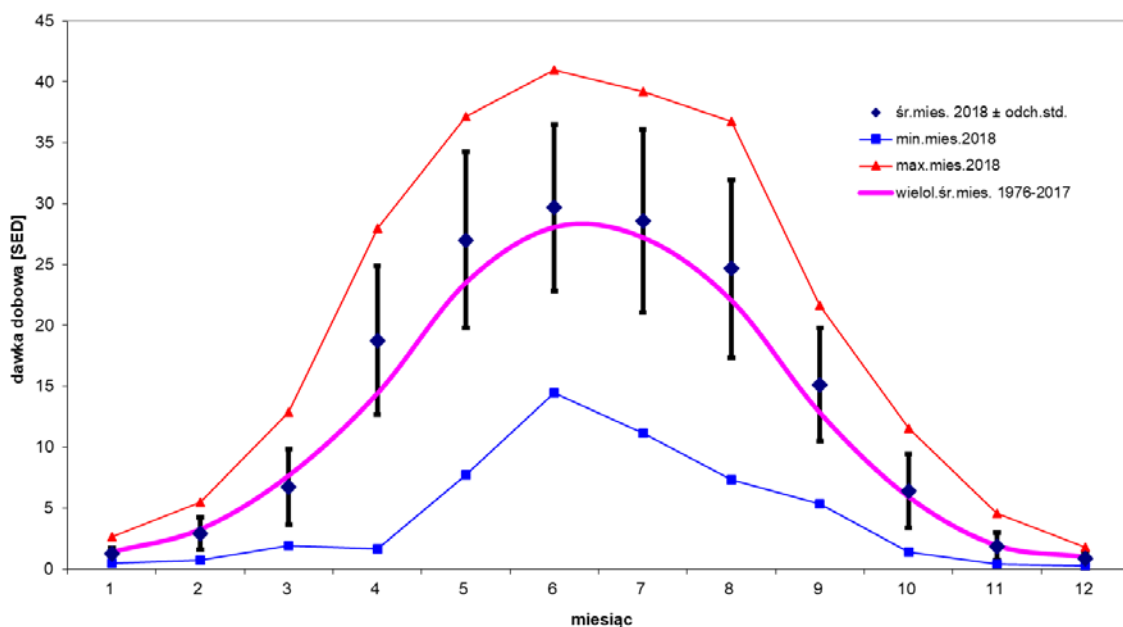
Mies.	X		XI		XII	
Dzień	UV - B [ SED ]	Indeks UV	UV - B [ SED ]	Indeks UV	UV - B [ SED ]	Indeks UV
1	11,58	2,5	4,55	1,0	1,81	0,5
2	7,45	2,2	4,00	1,0	1,77	0,5
3	6,51	2,3	0,79	0,3	1,19	0,4
4	10,44	2,7	1,37	0,4	0,61	0,2
5	7,92	2,0	2,46	0,8	1,53	0,4
6	11,39	2,5	3,75	0,9	1,17	0,4
7	7,97	2,1	3,27	0,8	0,59	0,2
8	8,80	2,3	3,36	0,8	0,99	0,3
9	9,27	2,1	1,89	0,5	0,40	0,2
10	9,73	2,1	1,58	0,5	0,73	0,3
11	8,53	2,4	1,10	0,3	0,84	0,3
12	9,26	2,0	3,20	0,9	1,03	0,3
13	8,98	2,0	2,12	0,6	0,29	0,1
14	8,97	2,0	0,91	0,3	0,49	0,2
15	8,27	1,8	2,24	0,7	1,02	0,3
16	7,61	1,7	0,54	0,2	0,37	0,1
17	7,05	1,6	2,65	0,7	1,43	0,4
18	6,50	1,5	0,61	0,2	1,08	0,3
19	3,52	1,0	0,83	0,3	0,91	0,3
20	2,64	0,7	2,05	0,6	0,90	0,3
21	6,23	1,6	1,62	0,6	1,23	0,4
22	6,00	1,6	1,21	0,4	0,76	0,3
23	1,50	0,4	0,61	0,2	1,13	0,4
24	2,90	0,9	0,51	0,2	0,69	0,4
25	1,92	0,5	0,89	0,3	0,86	0,3
26	3,28	1,0	0,40	0,2	0,55	0,2
27	3,22	0,9	1,42	0,5	0,36	0,1
28	1,36	0,4	1,86	0,5	0,44	0,2
29	1,50	0,4	1,84	0,5	0,31	0,1
30	3,21	1,0	2,04	0,5	0,48	0,2
31	4,87	1,1			1,02	0,4
Średnia	6,40	1,6	1,86	0,5	0,87	0,3
Odch.	8%		-4%		-13%	

Tabela 3.2 zawiera średnie i ekstremalne wartości danych UV, usłonecznienia i całkowitej zawartości ozonu dla poszczególnych miesięcy. Kolumny 2 do 4 zawierają odpowiednio średnią, minimalną i maksymalną wartość dawek dobowych napromienienia erytemalnego, kolumna 5 zawiera średnią wartość indeksu UV, kolumna 6 - usłonecznienia, kolumna 7- średnie miesięczne całkowitej zawartości ozonu, kolumna 8 - średnie wieloletnie (1976-2017) dawek napromienienia erytemalnego, kolumna 9 - odchylenie (w %) dawek napromienienia w bieżącym roku od średniej wieloletniej.

Tabela 3.2. Średnie miesięczne wartości dziennych

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
	UV-B	UV-B	UV-B	Indeks uv	US	OZON	UV-B	odch.
							1976-2017	
2018:	[SED]	[SED]	[SED]		[Godz.]	[D]	[SED]	
M	średnia	min.	max.	średnia	średnia	średnia	średnia	[%]
1	1,25	0,49	2,65	0,4	1,2	344	1,40	-11
2	2,91	0,75	5,50	0,8	2,6	410	3,26	-11
3	6,74	1,94	12,84	1,6	4,2	414	7,68	-12
4	18,77	1,68	27,95	3,8	9,2	356	14,42	30
5	27,00	7,73	37,13	5,3	10,4	360	23,50	15
6	29,67	14,45	40,95	6,2	8,9	351	28,07	6
7	28,59	11,15	39,17	6,1	8,5	340	27,23	5
8	24,66	7,33	36,78	5,1	9,9	311	22,05	12
9	15,13	5,35	21,64	3,4	6,7	295	12,83	18
10	6,40	1,36	11,58	1,6	4,9	288	5,94	8
11	1,86	0,40	4,55	0,5	2,3	297	1,93	-4
12	0,87	0,29	1,81	0,3	0,8	298	1,00	-13

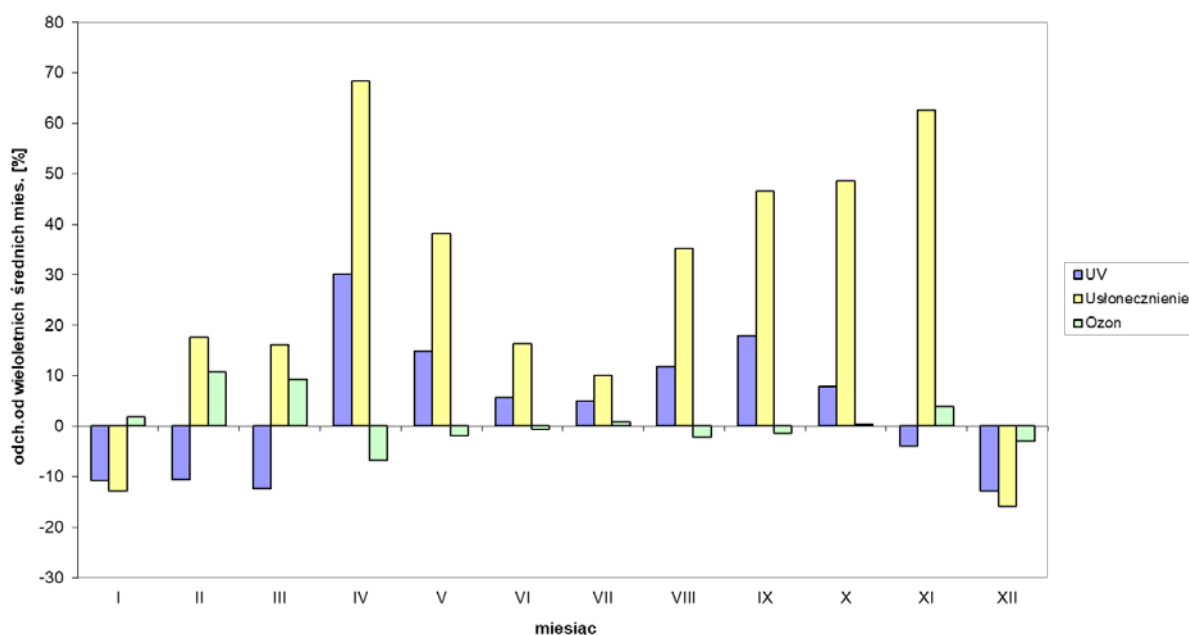
Na Rys.3.2 przedstawiono średnie miesięczne dawki dobowe napromienienia erytemalnego w 2018 r. wraz z odchyleniami standardowymi w odniesieniu do średnich wieloletnich oraz maksymalne i minimalne wartości dawek dobowych, zarejestrowanych w kolejnych miesiącach roku. Na Rys.3.3 przedstawione zostały odchylenia procentowe zarejestrowanych w 2018 roku średnich w miesiącu dawek dobowych napromienienia erytemalnego od średniej wieloletniej (1976-2017) w kolejnych miesiącach roku. Na tym samym rysunku przedstawiono także odchylenia procentowe zarejestrowanych w roku 2018 średnich miesięcznych wartości usłonecznienia i koncentracji ozonu od ich średnich wieloletnich.



Rys. 3.2. Średnie miesięczne dawek dobowych napromienienia erytemalnego oraz największe i najmniejsze wartości zarejestrowane danego miesiąca.

Największe niedobory napromienienia erytemalnego zanotowano w chłodnej części roku 2018. W styczniu 11%, lutym 11%, marcu 12%, listopadzie 4% i w grudniu 13%. W pozostałych miesiącach notowano nadwyżki promieniowania UV. Rok 2018 był wyjątkowo słoneczny, niedobory usłonecznienia notowano jedynie w styczniu i grudniu. W lutym i marcu mimo dużego usłonecznienia notowano około 10% nadwyżkę całkowitej zawartości ozonu. Skutkowało to niedoborami promieniowania UV w tych miesiącach. W kwietniu blisko 7% niedobór całkowitej zawartości ozonu wzmocniony przez blisko 70%

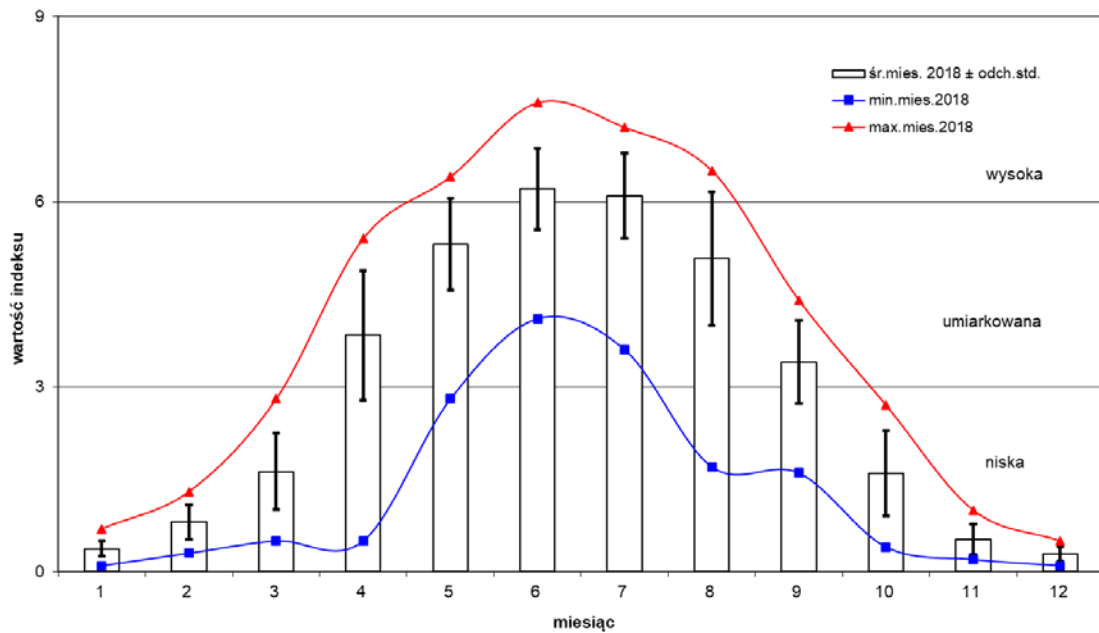
nadwyżkę w usłonecznieniu spowodował wystąpienie wyjątkowo dużych, około 30%, nadwyżek w promieniowaniu UV-B. Nadwyżki promieniowania UV-B przekraczające 10% notowano jeszcze w maju 15%, sierpniu 12% i wrześniu 18%. Spowodowane one były wyjątkowo dużym usłonecznieniem, którego nadwyżki przekraczały 35%. Warto zaznaczyć, że odchylenia całkowitej zawartości ozonu od średniej wieloletniej za wyjątkiem lutego, marca i kwietnia nie przekraczały 2-3%. W związku z tym głównym czynnikiem kształtującym promieniowanie UV-B było zachmurzenie, którego wskaźnikiem jest usłonecznienie. Jednak czynnik ten ma istotne znaczenie przy dużych kątach zenitalnych Słońca. W miesiącach jesiennych i zimowych nie ma już tak dużego znaczenie. Widać to doskonale na przykładzie października i listopada. W październiku około 50% nadwyżka usłonecznienia spowodowała jedynie około 8% wzrost promieniowania UV-B, w listopadzie mimo około 60% nadwyżek usłonecznienia zanotowano około 4% niedobór promieniowania UV. W tym miesiącu czynnikiem kształtującym promieniowanie UV-B była 4% nadwyżka całkowitej zawartości ozonu.



Rys.3.3. Odchylenie od średniej wieloletniej dawek miesięcznych napromienienia erytemalnego, usłonecznienia oraz koncentracji ozonu.

Na Rys. 3.4 przedstawiono średnie miesięczne indeksu UV-B wraz z odchyleniami standardowymi oraz wartości ekstremalne zarejestrowane w danym

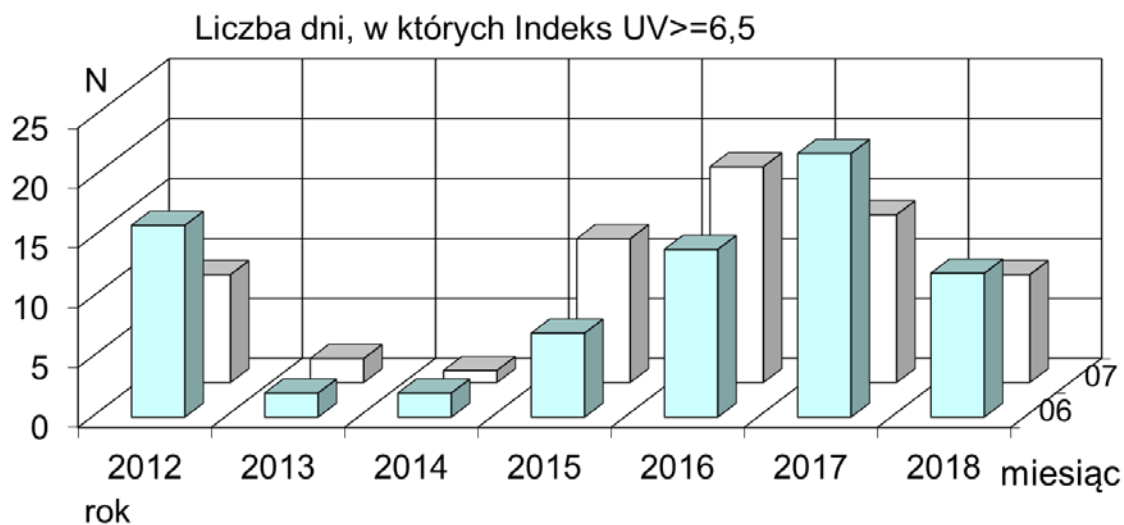
miesiącu. Największe wartości indeksu UV zanotowano w miesiącach letnich co wiąże się oczywiście z małymi kątami zenitalnymi Słońca.



Rys. 3.4. Średnie miesięczne indeksu UV oraz największe i najmniejsze wartości zarejestrowane danego miesiąca.

Największe wartości indeksu UV wynoszące odpowiednio 7,4 oraz 7,6 zarejestrowano 19 i 20 czerwca. Wartości indeksu równe lub większe 7 rejestrowano w sumie dwa razy w czerwcu, dwa razy w lipcu. Wartość indeksu 6,5 została przekroczona w sumie 23 razy, czyli blisko 2 razy mniej niż w 2017. Z tego 21 razy w miesiącach czerwcu i lipcu, co jest zilustrowane na rys.3.5.

Liczba dni z indeksem powyżej 6,5 w czerwcu ma podobną wartość do tej z 2016 i znacznie mniejszą niż w 2017, a w lipcu obserwowano mniejszą ilość przekroczeń indeksu 6,5 w porównaniu do ostatnich trzech lat. Trend spadkowy jest obserwowany mimo wyjątkowo dużego usłonecznienia.



Rys.3.5 Liczba dni danego miesiąca, w których indeks UV przekracza wartość 6,5

Podsumowując, w roku 2018 kontynuowano monitoring promieniowania słonecznego z zakresu UV-B w Centralnym Obserwatorium Geofizycznym w Belsku. Prowadzono również stałą weryfikację pomiarów przy pomocy spektrofotometru Brewera.

W 2018 głównym czynnikiem kształtującym dopływ promieniowania UV było niskie zachmurzenie przejawiające się dużym usłonecznieniem przy małych odstępstwach od średniej całkowitej zawartości ozonu. Czynnikiem ten jest znaczący szczególnie przy małych kątach zenitalnych Słońca, czyli w miesiącach od maja do sierpnia. Rekordowo duże, przekraczające 30% nadwyżki napromienienia erytemalnego zanotowano kwietniu gdy niedobory ozonu zbiegły się z dużym usłonecznieniem. Warto zaznaczyć, że liczba dni z indeksem UV powyżej 6,5 wróciła do poziomu z roku 2016 lub była nieznacznie niższa.

#### **4. Zmiana zawartości ozonu w atmosferze nad Belskiem w 2018 r. na tle zmian globalnych ozonu**

**Janusz Krzyścin, Bonawentura Rajewska-Więch, Janusz Borkowski**

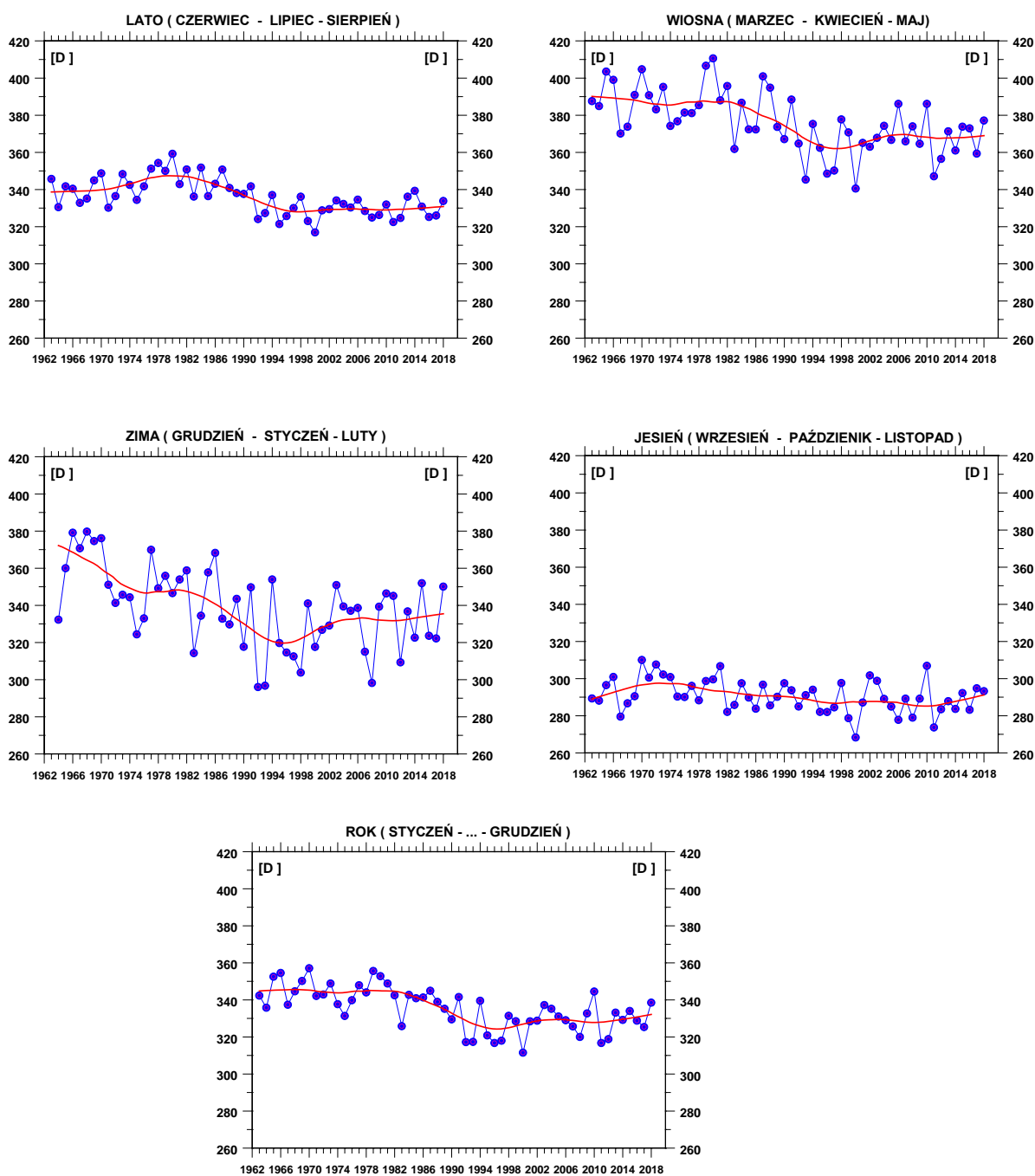
##### **4.1. Całkowita zawartość ozonu w Belsku**

W Centralnym Obserwatorium Geofizycznym w Belsku w ciągu całego 2018 r. obserwowano wartości średnich miesięcznych całkowitej zawartości ozonu (CZO<sub>3</sub>) zbliżone do wieloletnich (1963-2017) średnich miesięcznych. Jedynie w kwietniu średnia miesięczna wartości CZO<sub>3</sub> (Rys. 1.1.1a) była znacznie poniżej (~6,8%) wieloletniej normy. Dla pozostałych miesięcy średnie miesięczne wartości CZO<sub>3</sub> fluktuowały względem średniego poziomu w granicach od -3% (w marcu, kwietniu i czerwcu) do 2% (we wrześniu i listopadzie). Wartości odchyłek średnich dziennych od średnich wieloletnich przekraczały -10%, zwłaszcza w sezonie zimowym (Rys.1.1.1). Niskie dzienne wartości CZO<sub>3</sub> w stosunku do średnich wieloletnich pojawiły się zimą w okresie od lutego do kwietnia i w grudniu.

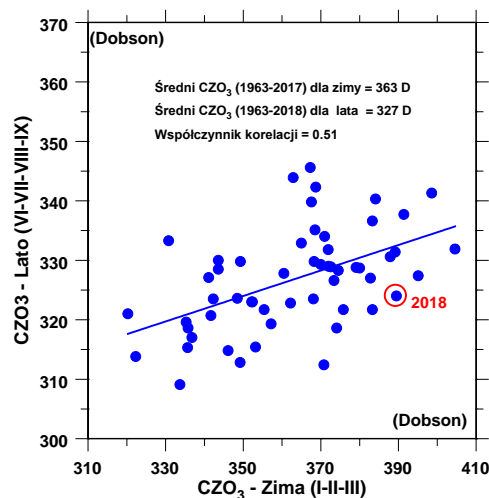
Analizując długookresowe zmiany średnich sezonowych CZO<sub>3</sub> w Belsku (krzywe w kolorze czerwonym na Rys.4.1.1 reprezentujące wygładzone metodą lokalnej regresji przebiegi średnich sezonowych) stwierdzamy, że od połowy lat 90-tych XX wieku następuje zmiana kierunku trendu w średnich sezonowych i w średniej rocznej CZO<sub>3</sub>. Wyrażna spadkowa tendencja, która pojawiła się z końcem lat 70-tych została zatrzymana około 1996 r. Od tego momentu obserwujemy niewielką wzrostową tendencję w średnich rocznych CZO<sub>3</sub>, a także w zimowych i wiosennych średnich wartościach CZO<sub>3</sub>. Na początku XXI wieku powyższa tendencja zostaje zahamowana. W ostatnich latach wydaje się, że średnie wartości CZO<sub>3</sub> oscylują wokół pewnego ustalonego poziomu bez wyraźnego trendu, a w okresie jesiennym po 2010 r. pojawia się słaba tendencja wzrostowa.

W 2018 r. średnia CZO<sub>3</sub> dla sezonu letniego (335 D) była około 2.5% wyższa niż wieloletnia norma (327 D) dla tego okresu. W tej sytuacji przy braku zachmurzenia poziom promieniowania UV przy powierzchni Ziemi powinien być nieznacznie niższy (około 3%) niż wieloletnia norma. Typowe wartości CZO<sub>3</sub> w sezonie letnim wskazują, że wcześniej w sezonie zimowym nie obserwowano wartości CZO<sub>3</sub> znacznie poniżej wieloletniej (1963-2017) normy (Rys.4.1.2). W 2018r. powyższa zimowa średnia wynosiła 389 D około 7% powyżej wieloletniej normy (363 D). Wystąpienie zimą wartości CZO<sub>3</sub> znacznie powyżej wieloletniej normy jest sygnałem wzmocnienia wielkoskalowej komórki

cyrkulacyjnej w stratosferze prowadzącej do wymiany masy między równikiem a biegunem północnym (tzw. cyrkulacji Brewera-Dobsona), która w zimie powoduje akumulację ozonu w średnich i wysokich szerokościach geograficznych. Nadwyżki  $\text{CZO}_3$ , które wystąpiły w okresie zimowym nie zostaną w późniejszych miesiącach zlikwidowane, gdyż wysokie wartości  $\text{CZO}_3$  pojawiają się w skali całej półkuli poza strefą równikową.



Rys.4.1.1. Średnie sezonowe całkowitej zawartości ozonu uzyskane z pomiarów spektrofotometrem Dobsona w COG IGF PAN, Belsk, w okresie 1963-2018



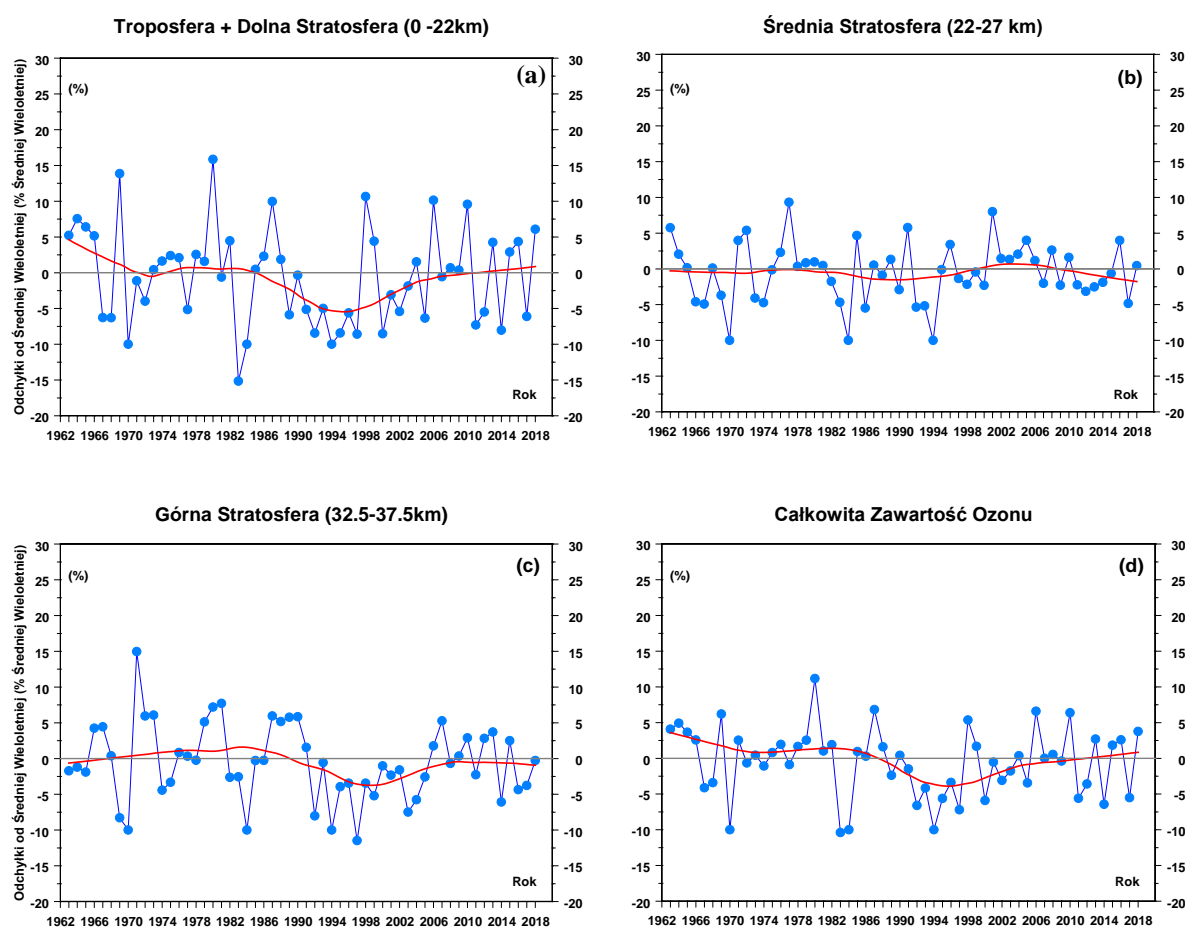
Rys. 4.1.2. Średnia całkowitej zawartości ozonu w Belsku w sezonie letnim (czerwiec-lipiec-sierpień-wrzesień) w funkcji średniej w poprzedzającym sezonie zimowym (styczeń-luty-marzec). Czerwony punkt oznacza wartości w 2018 r.

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 (Rys.4.4.1). W związku z tym oczekiwano zatrzymania, a następnie odwrócenia spadkowej tendencji w zawartości ozonu w atmosferze. Zatrzymanie spadkowej tendencji w ozonie atmosferycznym w połowie lat 90-tych ubiegłego wieku zostało potwierdzone 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 i inni, 2013; Krzyścin, 2015; Krzyścin i Rajewska, 2016). Jednak regeneracja warstwy ozonowej nad Belskiem przebiega powoli i w ostatnich 10 latach raczej widać stabilizację poziomu  $\text{CZO}_3$  niż jego stopniowy wzrost, który był oczekiwany w związku z systematycznie malejącą koncentracją substancji niszczących warstwę ozonową.

#### 4.2. Profil pionowy ozonu w Belsku

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 poszukiwana jest zmiana kierunku trendu z ujemnego na dodatni, którą 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 (np. wzrost  $\text{CO}_2$ ) na koncentrację ozonu na tych wysokościach (Newchurch i inni, 2003).



Rys. 4.2.1. Odchyłki średnich wiosennych (marzec-kwiecień-maj) od średniej wieloletniej zawartości ozonu w wybranych warstwach atmosfery z pomiarów Umkehr spektrofotometrem Dobsona w Belsku (1963-2018). Profil ozonu wyznaczono stosując algorytm *UMK04*. (a) troposfera i dolna stratosfera 0-22km, (b) średnia stratosfera 22-27km, (c) wysoka stratosfera 32.5-37.5 km, (d) cała kolumna atmosfery

Na Rys.4.2.1 przedstawiono przebiegi średnich sezonowych (marzec-kwiecień-maj) zawartości ozonu w wybranych warstwach atmosfery (troposfera + dolna stratosfera, środkowa stratosfera, górna stratosfera, cała kolumna atmosfery) z pomiarów Umkehr

spektrofotometrem Dobsona w Belsku. Profile ozonu na Rys.4.2.1 uzyskano 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.

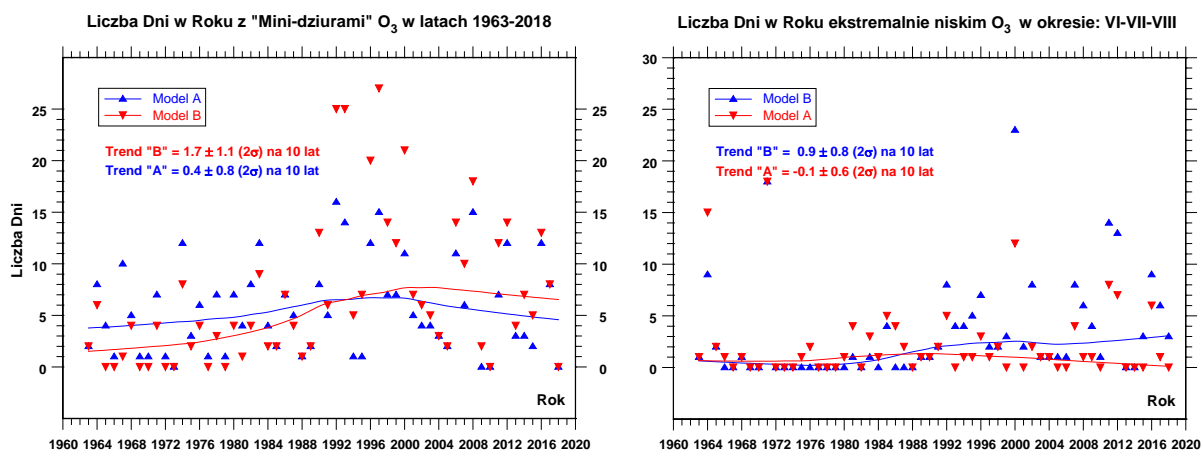
Przebiegi wygładzonych zmian zawartości ozonu w sezonach wiosennych (1963-2018) w wybranych warstwach atmosfery wskazują na wzrostową tendencję od połowy lat 90-tych XX w zawartości ozonu w całej kolumnie atmosfery (Rys.4.2.d), w warstwach 0-22km (troposfera i dolna stratosfera, Rys.4.2.1a) i 32,5-37,5 km (górną stratosferą, Rys 4.2.1c). W średniej stratosferze (22-27 km – Rys.4.2.1b) przez cały okres pomiarowy zawartość ozonu oscyluje wokół ustalonego poziomu bez wyraźnego trendu. W sezonie wiosennym 2018 r. we wszystkich warstwach i w całej kolumnie atmosfery zanotowano zawartości ozonu powyżej normy. W ostatnich latach obserwowana jest stabilizacja poziomu ozonu. Taka tendencja nie jest jeszcze utrwalona i dodanie kolejnych wyników pomiarów w następnych latach może wygenerować trend. W sprawozdaniu z 2016 r. dyskutowano, że w warstwie obejmującej dolną stratosferę i troposferę istnieje dodatnia tendencja od 1995 r. Na zmiany ozonu w tej warstwie atmosfery dodatkowo wpływają procesy dynamiczne i dodanie kolejnych lat (2017 i 2018) zatrzymało wzrostowy trend ozonu. Ponieważ o zmienności ozonu w wysokich warstwach atmosfery decydują przede wszystkim procesy chemiczne, więc wzrostowy trend w tych warstwach byłby potwierdzeniem skuteczności ograniczeń w produkcji substancji niszczących warstwę ozonową, które wprowadził Protokół Montrealski z 1987 r. i jego późniejsze poprawki. Jednak w ostatnich latach nie widać kontynuacji dodatniego trendu w wysokich warstwach atmosfery, a raczej stabilizację od około 2005 r. (patrz rys.4.2.1c), co może sugerować pojawienie się w tej warstwie atmosfery substancji chemicznych niszczących warstwę ozonową, które nie są kontrolowane przez Protokół Montrealski i późniejsze poprawki.

#### **4.3. Ekstremalne wartości całkowitej zawartości ozonu w Belsku**

Głębokie lokalne zmniejszenie wartości  $\text{CZO}_3$  w średnich szerokościach geograficznych trwające zwykle kilka dni i związane ze zmianami cyrkulacji atmosfery w

górnjej 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 (patrz Roz.4.4). W 2002 r. 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  $\text{CZO}_3$  w tych dniach z założenia powinien być co najmniej o 20% poniżej ważonej średniej „biegnącej” (model *A*) lub wieloletniej 1963-2017 średniej dziennej (model *B*).

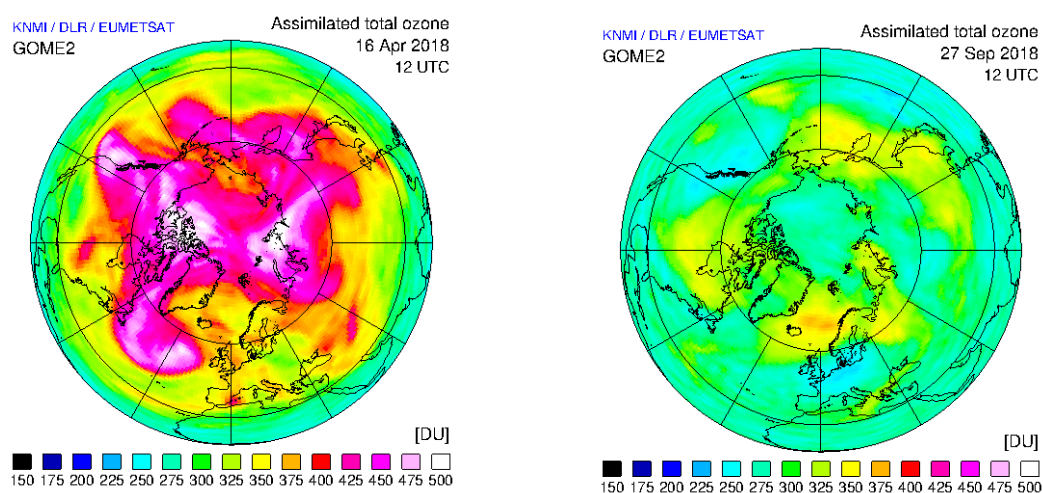
W nawiązaniu do tej pracy przeprowadzona analizę liczby dni z „mini-dziurami” nad Belskiem w latach 1963-2018, której wyniki przedstawia Rys.4.3.1 (lewa strona). W serii obserwacji w 2018 r. nie znaleziono dni z wartościami  $\text{CZO}_3$  przekraczającymi wartość progową dla pojawienia się „mini-dziury”. Średnia wieloletnia (1963-2018) liczby dni z „mini-dziurami” ozonowymi wynosi 6 i 7 odpowiednio dla Modelu *A* i *B*. Liczba dni z „mini dziurami” znacznie zmienia się z roku na rok, ale tylko wyjątkowo obie metody wskazują na brak „mini-dziur”. Poprzednio taka sytuacja miała miejsce w 1973 i 2010 r.



Rys. 4.3.1. Liczba dni w roku z „mini-dziurami ozonowymi nad Belskiem w latach 1963-2018 (lewa strona) i liczba dni w okresie czerwiec-sierpień z deficytem całkowitej zawartości ozonu >10% normy (prawa strona)

Wygładzone przebiegi czasowe (1963-2018) liczby dni z „mini-dziurami” ozonowymi (Rys.4.3.1 - lewa strona) wskazują, że obecnie znajdujemy się w fazie niezmiennej tendencji w częstotliwości pojawiania się „mini dziur”, która wystąpiła po okresie wzrostu liczby dni z „mini-dziurami” trwającym do połowy lat 90-tych. Dla całego okresu

pomiarów w Belsku 1963-2017 model **B** przewiduje stopniowy wzrost liczby dni z „mini-dziurami”, tj. istotnie statystyczny (na poziomie istotności  $2\sigma$ ) wzrost o około 2 dni na 10 lat (patrz wartość trendu na Rys.4.3.1 – lewa strona). Natomiast wyniki modelu **A** sugerują, że liczba „mini-dziur” jest na niezmiennym poziomie w okresie 1963-2017. Modele **A** i **B** w różny sposób klasyfikują „mini-dziury”. Model **A** wyznacza odchylenia od „biegnącej” średniej, która jest niższa od średniej dla całego okresu (model **B**) w sekwencji lat z obniżonym poziomem ozonu np. w połowie lat 90-tych XX wieku. Wyniki, uzyskane z zastosowaniem modelu **A** sugerują, że krótkookresowe procesy w dynamice atmosfery prowadzące do pojawiania się dni z ekstremalnie małymi zawartościami ozonu nie uległy zasadniczo zmianie w analizowanym okresie. Wyniki modelu **B** sugerują 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 (wartość progowa dla „mini-dziury” 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 kąpielii słonecznych.



Rys. 4.3.2. Rozkład CZO<sub>3</sub> nad półkulą północną z pomiarów spektrofotometrem GOME-2 na platformie satelitarnej Eumetsat w dniu 16.04.2018 (lewa strona) i 27.09.2018 (prawa strona). Pomiarzy spektrofotometrem Dobsona w Belsku w tych dniach pokazały odpowiednio 19.7% i 11% ubytek ozonu w stosunku do średniej wieloletniej dla tego dnia.

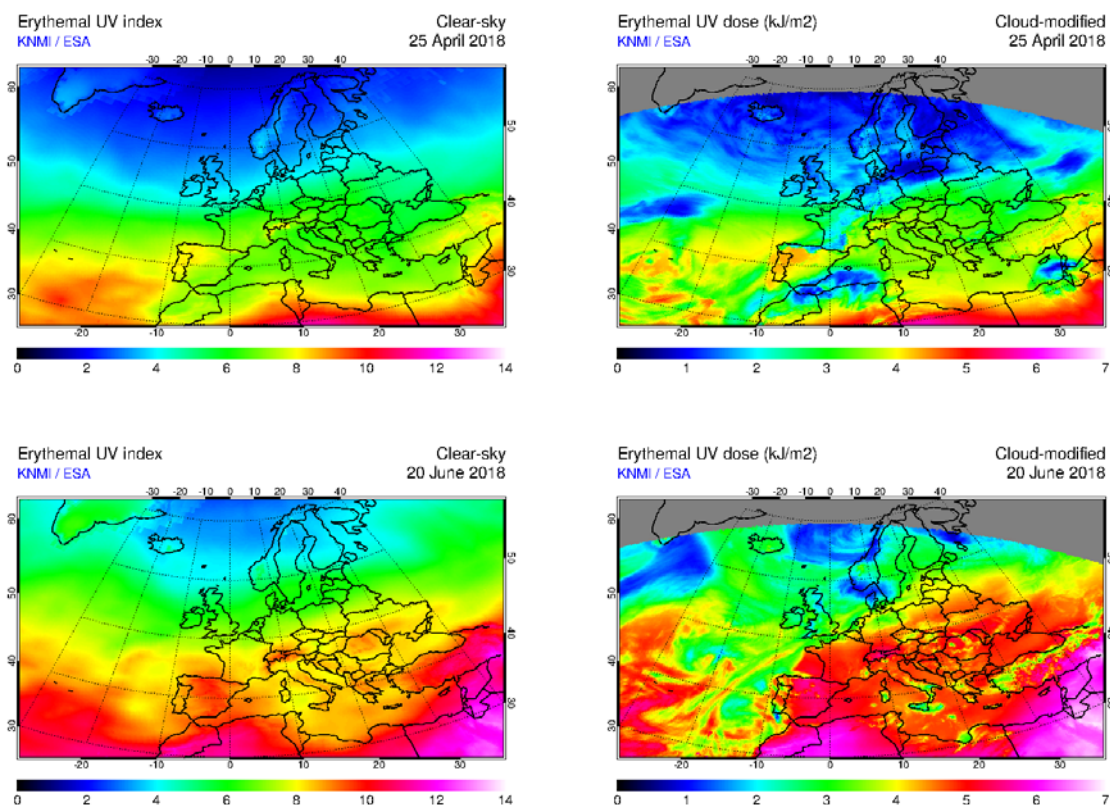
Wyznaczenie zmian w częstotliwości pojawienia się ekstremalnie niskich wartości  $\text{CZO}_3$  jest szczególnie ważne w sezonie letnim, kiedy wysoki poziom promieniowania UV może stanowić zagrożenie dla zdrowia. W tym czasie dni z 20% odchyłkami  $\text{CZO}_3$  od normy nie występują. Arbitralnie przyjęto próg 10% deficytu  $\text{CZO}_3$  do wyznaczenia okresów z ekstremalnie niskimi wartościami ozonu. W tej sytuacji dawka rumieniowa (promieniowania UV-B) byłaby ~10% wyższa od normy dla bezchmurnego nieba.

Rys. 4.3.2 (lewa strona) ilustruje przestrzenny rozkład  $\text{CZO}_3$  na półkuli północnej na podstawie obserwacji satelitarnych w dniu 16.04.2018 tj. w dniu ekstremalnego niedoboru ozonu w Belsku w 2018 r. Pomiar  $\text{CZO}_3$  spektrofotometrem Dobsona pokazał niedobór ~20% względem wieloletniej dziennej normy. Rys.4.3.2 (prawa strona) przedstawia sytuację w dniu 27.09.2018, kiedy zanotowano w Belsku największy niedobór ozonu w sezonie czerwiec-wrzesień 2018 wynoszący 11% w stosunku do wieloletniej dziennej normy. Późną wiosną i latem rzadko niedobory ozonu przekraczają poziom 10% normy. W obu przypadkach obszar z ekstremalnym  $\text{CZO}_3$  obejmował znaczną część Europy.

Przeprowadzono obliczenia analogicznie do sytuacji dotyczącej „mini-dziur”, ale zastosowano 10% wartość progową. Wyniki przedstawiono na Rys.4.3.1 (prawa strona). Model **B** wskazuje niewielki dodatni trend w ilości ekstremalnych dni tj. około 1 dzień na 10 lat. Według modelu **A** trend ten jest nieistotny statystycznie (patrz wartości trendu na Rys.4.3.1- prawa strona). W 2018 r. w okresie letnim (czerwiec-lipiec-sierpień) znaleziono 3 dni z wartościami  $\text{CZO}_3$  poniżej progu -10% (według modelu **B**). Zwykle takich dni bywa zaledwie kilka (maksymalnie kilkanaście) w sezonie letnim, wtedy należy bezwzględnie ograniczyć czas przebywania w nasłonecznionych miejscach.

Pomiary natężenia napromienienia o skuteczności rumieniowej z użyciem biometru Kipp & Zonen pokazały w dniu 20.06.2018 najwyższą w roku wartość tj. 7,6 indeksu UV ( $1 \text{ Index} = 25 \text{ mW/m}^2$ ). Powyższą wartość potwierdziły pomiary widm UV z zastosowaniem spektrofotometru Brewera. Wysoka wartości indeksu w tym dniu była wynikiem niskich wartości  $\text{CZO}_3$  (~10% poniżej normy). W tym dniu zanotowano najwyższą w roku dzienną dawkę rumieniową  $4098 \text{ J/m}^2$ . Wczesną wiosną (25.04.2018) zarejestrowano w Belsku wysoki indeks UV 5,4 tj. około 20% powyżej normy w związku z pojawieniem się niskich wartości ozonu nad Polską. Dzienna dawka rumieniowa w tym dniu wynosiła ~ $2500 \text{ J/m}^2$ , co w przybliżeniu było 10 krotnością minimalnej dawki wywołującej rumień skóry (tzw. MED) u osoby z fototypem 2. Wysokie wartości indeksu UV o tej porze roku są szczególnie niebezpieczne dla zdrowia, gdyż organizm nie jest jeszcze zaadaptowany do długotrwałych ekspozycji na promieniowanie UV, a

umiarkowane temperatury (~20C) zachęcają do nadmiernego opalania bez zastosowania kremów z filtrem ochronnych. Satelitarne pomiary (Rys.4.3.3) pokazały zbliżone wartości indeksu i dziennej dawki.



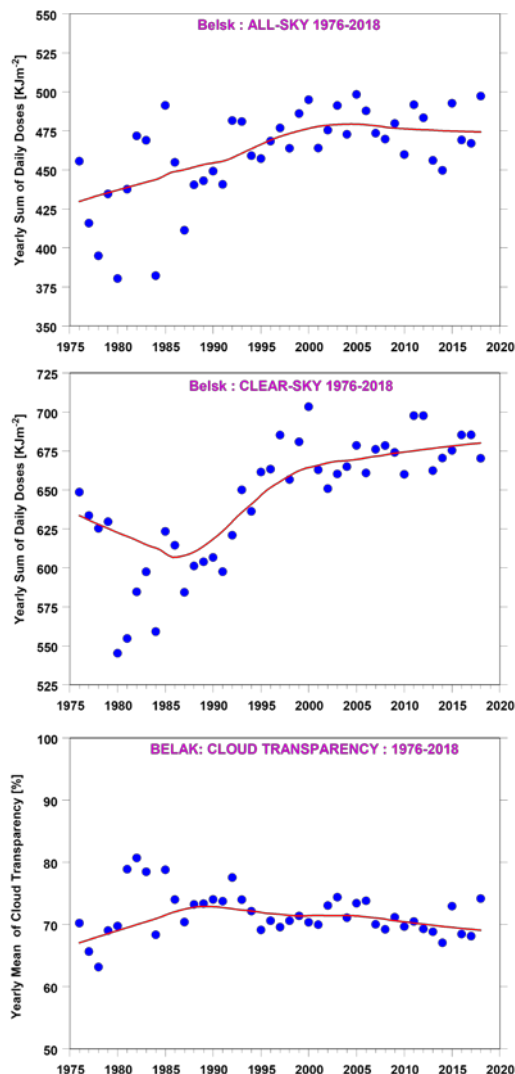
Rys. 4.3.3. Indeks UV i dzienna dawka rumieniowa nad Europą wyznaczona z pomiarów spektrofotometrem GOME-2 w dniu 25.04.2018 (górze) i 20.06.2018 (dół) na platformie satelitarnej MetOp-A.

W Belsku monitoring promieniowania UV o skuteczności rumieniowej prowadzony jest od 1976 r. z zastosowaniem różnych modeli szerokopasmowych biometrów: Robertson-Berger (1976-1994), Solar Light (1992-2014), Kipp @ Zonen (2006-2017). Seria czasowa w ubiegłych latach, także i w 2018 r., została poddana procedurze homogenizacyjnej, która polegała na zastosowaniu poprawek wynikających z porównania wyników pomiarów szerokopasmowymi miernikami dla dni bezchmurnych z wynikami modelu transferu promieniowania (metoda stosowana w latach 1976-1994) i z jednoczesnymi pomiarami natężenia promieniowania UV o skuteczności rumieniowej z zastosowaniem spektrofotometru Brewera nr. 64 (od 1995 r. do chwili obecnej). Jakość pomiarów ozonu i promieniowania UV spektrofotometru Brewera w Belsku jest zapewniona przez corocznie porównania (od lata 1995 r.) ze światowym standardem –

spektrofotometrem Brewera nr. 17. Przebieg sum rocznych dziennych dawek rumieniowych wskazuje na wzrost napromienienia UV w Belsku w latach 1976-2000 i późniejszą stabilizację (brak trendu). W XXI wieku dawki roczne oscylują wokół poziomu  $465 \text{ kJ/m}^2$  (patrz czerwona linia na rys.4.3.4-góra). W 2018 r suma roczna wyniosła  $490 \text{ kJ/m}^2$  i była jedną z najwyższych w historii pomiarów w Belsku.

Analizując czynniki wpływające na trendy w napromienieniu UV wyznaczono hipotetyczne sumy roczne dziennych dawek rumieniowych przy braku zachmurzenia. Zastosowano model transferu promieniowania słonecznego w atmosferze wykorzystując jako parametry wejściowe do modelu średnie dzienne  $\text{CZO}_3$  zmierzone spektrofotometrem Dobsona i grubość optyczną aerozolu wyznaczoną z globalnego modelu cyrkulacji atmosfery (reanaliza MERRA-2). Wygładzony przebieg sum rocznych wskazuje na stopniowy wzrost sum rocznych od 1985 r. (patrz czerwona linia na rys 4.3.4 – środkowy rysunek). Taki przebieg był wynikiem zmniejszających się wartości  $\text{CZO}_3$  w latach 1980-1995 i większej przejrzystości atmosfery od lat 80-tych ubiegłego wieku (mniejsze wartości zapylenia atmosfery w wyniku kryzysu ekonomicznego lat 80-90 XX wieku i zmian w gospodarce po roku 1990).

Wpływ długookresowych zmian w zachmurzeniu na przebieg sum rocznych dziennych dawek rumieniowych określono stosując współczynnik przepuszczalności chmurowej, czyli stosunek zmierzonych dawek do modelowych dla hipotetycznych bezchmurnych warunków (patrz czerwona linia na rys 4.3.4 – dolny rysunek). W latach 1976-1990 współczynnik przepuszczalności chmurowej wzrastał, czyli chmury w mniejszym stopniu osłabiały promieniowanie UV docierające do powierzchni gruntu. Od 1990 r. obserwuje się stopniowe zmniejszenie przepuszczalności promieniowania rumieniowego przez chmury, co by wskazywało na wzrost stopnia zachmurzenia albo grubości optycznej chmur w tym okresie. Poziom UV w Belsku ustabilizował się w XXI wieku w wyniku łącznego nałożenia się długookresowych zmian w ozonie atmosferycznym, aerozolu i zachmurzeniu. Wydaje się, że o kierunku trendu promieniowania UV w Belsku w najbliższym okresie będą decydować zmiany w zachmurzeniu indukowane zmianami klimatu.



Rys.4.3.4. Sumy roczne dziennych dawek promieniowania rumieniowego w Belsku w latach 1976-2018: zmierzone wartości (górny rysunek), modelowane wartości dla bezchmurnego nieba (środkowy rysunek). Współczynnik przepuszczalności chmurowej (dolny rysunek).

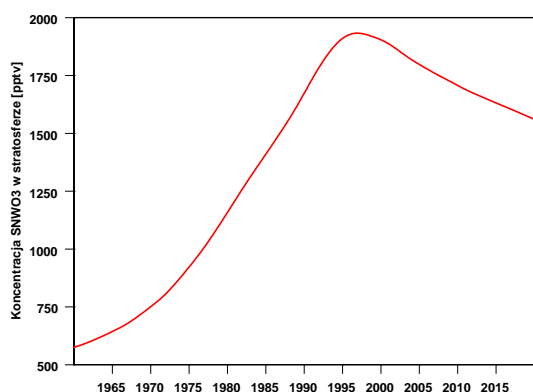
#### 4.4. Globalne zmiany całkowitej zawartości ozonu

##### Sezonowe trendy całkowitej zawartości ozonu na półkuli północnej

Analiza pomiarów satelitarnych ozonu w większej skali przestrzennej pozwala stwierdzić, w jakim stopniu zmiany ozonu nad Belskiem mają lokalny charakter. W dalszej części tego rozdziału, dla oceny różnic w długookresowej zmienności ozonu nad Belskiem i nad innymi obszarami na półkuli północnej, wykorzystano homogenizowane dane satelitarne zamieszczone w globalnej bazie Multi Sensor Re-analysis version 2 (MSR-2), Van der A, R et al. (2015). Baza prowadzona jest przez holenderski Królewski

Instytut Meteorologiczny (KNMI) i zawiera globalne dane CZO<sub>3</sub> od stycznia 1979 do grudnia 2018 r. z rozdzielczością 0,5° (szerokość geograficzna) x 0,5 (długość geograficzna).

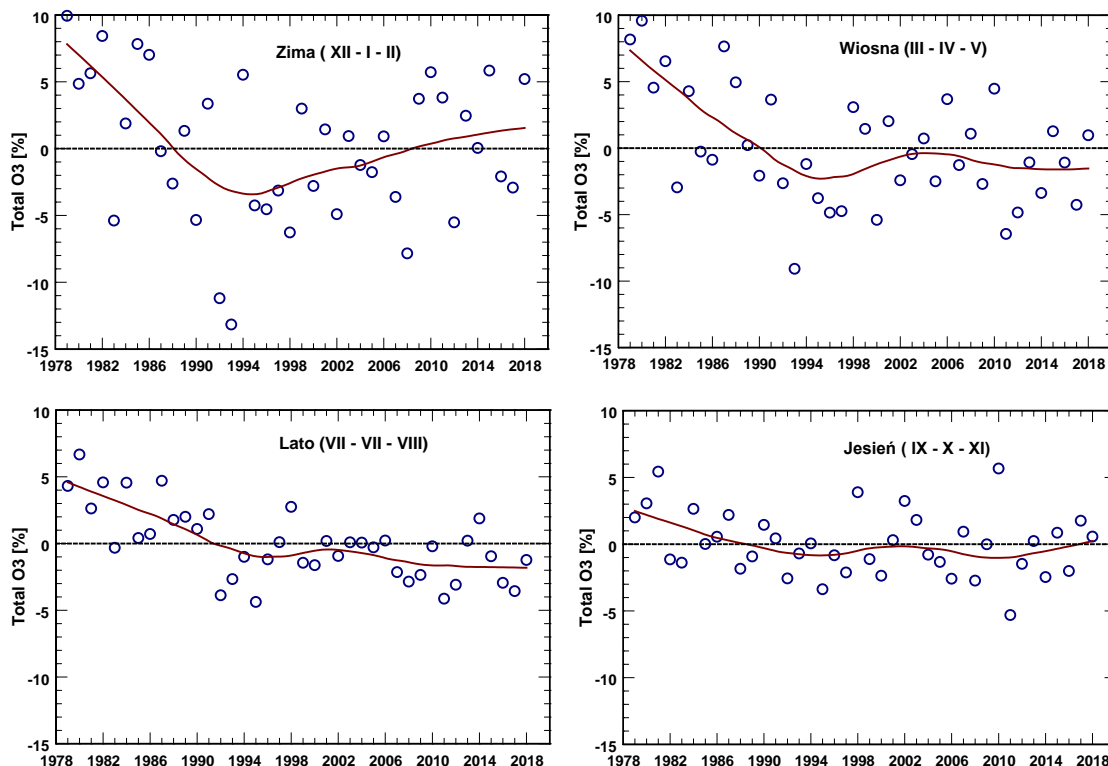
Zwykle długookresowe zmiany ozonu wiąże się ze zmianami koncentracji w stratosferze substancji niszczących warstwę ozonową (SNWO<sub>3</sub>). Koncentracja SNWO<sub>3</sub> w stratosferze w średnich szerokościach geograficznych zaczyna maleć w drugiej połowie lat 90-tych XX wieku (Rys.4.4.1) w wyniku ograniczeń w produkcji SNWO<sub>3</sub> wprowadzonych przez Protokół Montrealski (PM) z 1987 r. i jego późniejsze poprawki. W tej sytuacji w końcówce lat 90-tych XX wieku w danych ozonowych powinien pojawić się dodatni trend, którego identyfikacja może być utrudniona ze względu na występowanie naturalnych oscylacji w poziomie ozonu indukowanych przez globalne i lokalne procesy transportu w atmosferze.



Rys. 4.4.1. Zawartość substancji niszczących warstwę ozonową (SNWO<sub>3</sub>) w stratosferze (1960-2020) w średnich szerokościach geograficznych według obliczeń modelowych (krzywa czerwona)

W dalszej części rozdziału dyskutowany będzie stopień naprawy warstwy ozonowej w Belsku i w Polsce na tle zmienności ozonu w większej skali przestrzennej. Wyznaczone zostaną liniowe trendy w średnich sezonowych (1979-2018) CZO<sub>3</sub> z pomiarów spektrofotometrem Dobsona N°84 w Belsku i danych MSR-2 dla następujących obszarów: okolice Belska (20-21°E, 51-52°N), Polska (14-24°E, 49-54.5°N), Środkowa Europa (12-24°E, 45-55°N), Europa (10°W-45°E, 35-60°N), pas średnich (30-60°N) i wysokich (60-90°N) szerokości geograficznych na półkuli północnej, tropiki (0-30°N). Na Rys. 4.4.2 przykładowo przedstawiono odchyłki średnich sezonowych CZO<sub>3</sub> nad terytorium Polski (osobno w okresie zimy, wiosny, lata i jesieni) od wieloletniej (1979-

2018) średniej jako procent tej średniej. Średnią wyznaczono z wartości  $\text{CZO}_3$  z węzłów siatki obejmujących obszar Polski i część krajów sąsiednich.



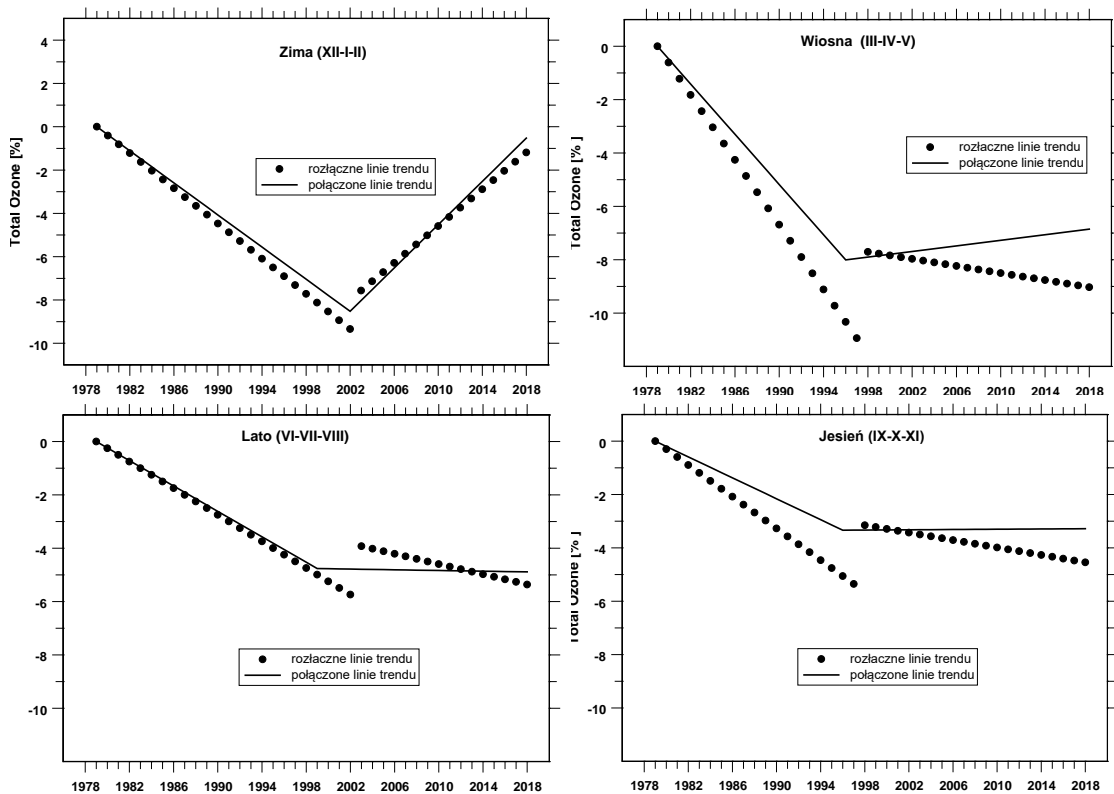
Rys. 4.4.2. Względne odchyłki sezonowych średnich  $\text{CZO}_3$  (kółka) nad Polską w okresie 1979-2018 na podstawie danych satelitarnych MSR-2. Czerwona krzywa reprezentuje dane wygładzone metodą LOWES.

Spodziewana naprawa warstwy ozonowej po spadkowej tendencji trwającej do połowy lat 90-tych XX wieku wydaje się być widoczna w Polsce zimą i na jesieni (Rys. 4.4.2). Sezonowy przebieg zmienności długookresowej  $\text{CZO}_3$  może po części być wynikiem zmian w transgranicznym transporcie ozonu do Polski, które są indukowane zmianami w dynamice atmosfery. W modelach zmian długookresowych  $\text{CZO}_3$  dąży się do uzyskania tzw. składowej antropogenicznej trendu z odfiltrowanymi krótkookresowymi (w skali od miesięcy do kilkunastu lat) zaburzeniami związanymi z procesami dynamicznymi w atmosferze. W tym celu stosuje się modele regresji wieloskładnikowej parametryzując zmienność ozonu generowaną przez znane procesy dynamiczne np. oscylacje południowe, oscylacje północnoatlantyckie, cyrkulację Brewera-Dobsona itp. W dalszej części rozdziału wyznaczono antropogeniczną składową trendu stosując regresję wieloliniową z

parametryzacją efektów związanych z podstawowymi czynnikami wpływającymi na zmienność ozonu: 11-letnia aktywność słońca, NAO, QBO, ENSO, cyrkulacja Brewera-Dobsona, aerozol stratosferyczny. Założono, że antropogeniczna składowa trendu jest funkcją liniową złożoną z dwóch odcinków: jeden od 1979 (początek danych) do momentu zmiany kierunku trendu (po roku 1995, co sugeruje przebieg SNWO<sub>3</sub> w średnich szerokościach geograficznych, Rys.4.4.1), drugi odcinek reprezentuje obecną fazę zmian CZO<sub>3</sub>. Termin zmiany kierunku trendu nie jest z góry zadany i może wystąpić w okresie 1996-2001, czyli do momentu zmiany kształtu SNWO<sub>3</sub> w wysokich szerokościach geograficznych. Termin zmiany kierunku trendu został wyznaczony z najlepszego dopasowania modelowanego przebiegu do obserwowanego stosując metodę najmniejszych kwadratów.

Odcinki tworzące trend w okresie 1979-2018 mogą być połączone lub rozłączone. Zwykle w modelowaniu zmian CZO<sub>3</sub> stosowano pierwsze podejście (tzw. piecewise trend lines). Ostatnio zaczęto stosować podejście drugie (tzw. independent trend lines), które zakłada niezależność trendów przed i po terminie odwrócenia kierunku trendu. Wymóg ciągłości linii trendu pociąga za sobą dopasowanie trendu w drugim okresie do trendu istniejącego na początku danych i powoduje wzmocnienie dodatniego trendu w drugim okresie, jeśli w pierwszym okresie występuje spadkowa tendencja.

W modelu statystycznym krótkookresowe zmiany CZO<sub>3</sub> związane z procesami zachodzącymi w dynamice atmosfery, które potencjalnie mogą wpływać na redystrybucję ozonu w skali globalnej, parametryzowano stosując następujące zmienne wyjaśniające: 11-letnią aktywność słoneczna (gęstość energii dla fali 10.7cm), indeks quasi dwuletnich oscylacji prędkości wiatru w równikowej stratosferze (tzw. QBO), indeks Południowych Oscylacji (tzw. indeks El Nino/La Nina), indeks Arktycznych oscylacji, grubość optyczną aerozolu w stratosferze dla fali 550 nm, intensywność cyrkulacji Brewera-Dobsona parametryzowaną przez strumień ciepła w kierunku bieguna północnego. W szacowaniu niepewności trendu uwzględniono zmniejszenie liczby stopni swobody modelu regresyjnego ze względu na istniejące autokorelacji rzędu 1 w serii czasowej wartości resztkowych modelu. Niepewność oszacowań statystycznych wyznaczono stosując metodę bootstrap, czyli wyznaczono medianę i 95% przedział ufności szacowanych wielkości z zespołu wielkości pochodzących z wielokrotnego (10,000 razy) zastosowania modelu regresji dla hipotetycznych serii czasowych CZO<sub>3</sub>, w których losowo zmieniano wyraz modelu odpowiedzialny za przypadkowy szum.



Rys.4.4.3. Przebieg trendów do rozłącznych i połączonych segmentów liniowych (% na 10 lat) w sezonowych CZO<sub>3</sub> nad Polską w okresie 1979-2018 na podstawie danych satelitarnych MSR-2.

Przykładowo na Rys 4.4.3 przedstawiono sezonowe trendy CZO<sub>3</sub> w Polsce, które wyznaczono stosując model z połączonymi i rozłącznymi fragmentami trendu. Trendy reprezentują zmiany liniowe w średnich sezonowych CZO<sub>3</sub> po wyeliminowaniu naturalnych fluktuacji związanych z procesami dynamicznymi w atmosferze, które wpływają na zmiany koncentracji ozonu w dolnej stratosferze i troposferze. Przebiegi trendów dla sezonu wiosennego wskazują, że kierunki zmian CZO<sub>3</sub> wyznaczone dwoma metodami mogą być odmienne. Wartości trendów, także w innych obszarach, przedstawiono w Tabeli 4.4.1

Tabela 4.4.1. Trendy w średnich sezonowych CZO<sub>3</sub> w wybranych obszarach na półkuli północnej dla modelu z połączonymi i rozłączonymi liniowymi segmentami. Wyniki istotne statystycznie zaznaczono pogrubioną czcionką. W nawiasach przedstawiono przedziały 5 i 95 percentyla dla szacowanego trendu.

Region	Trend (%/10 yr)			
	1979-1996/2001 Joint Segments	Free Segments	1997/2002- 2018 Joint Segments	Free Segments
	<i>Winter (DJM)</i>			
Belsk-Dobson	<b>-4.7</b> (-7.6, -2.3)	<b>-2.2</b> (-6.4, 1.5)	<b>2.7</b> (0.6, 5.3)	<b>4.1</b> (0.2, 6.9)
Belsk-Satellite	<b>-4.1</b> (-6.2, -2.6)	<b>-3.9</b> (-7.0, -1.4)	<b>4.5</b> (2.4, 6.7)	<b>4.3</b> (1.4, 7.1)
Poland	<b>-4.1</b> (-6.2, -2.6)	<b>-3.9</b> (-6.9, -1.4)	<b>4.6</b> (2.4, 6.7)	<b>4.3</b> (1.5, 7.0)
Central Europe	<b>-4.1</b> (-6.2, -2.6)	<b>-4.2</b> (-6.8, -1.8)	<b>4.3</b> (2.4, 6.4)	<b>3.7</b> (1.2, 6.3)
Europe	<b>-3.6</b> (-5.4, -2.4)	<b>-3.7</b> (-5.8, -1.9)	<b>3.2</b> (1.8, 4.8)	<b>2.7</b> (0.8, 4.7)
NH Mid-latitudes	<b>-3.1</b> (-4.2, -2.0)	<b>-2.6</b> (-3.9, -1.5)	<b>1.8</b> (1.1, 2.8)	<b>1.6</b> (0.4, 3.0)
NH High-latitudes	No Available	No Available	No Available	No Available
NH Tropics	<b>-0.8</b> (-1.4, -0.3)	<b>-1.3</b> (-2.1, -0.4)	<b>0.8</b> (0.4, 1.3)	0.3 (-0.2, 1.0)
	<i>Spring (MAM)</i>			
Belsk-Dobson	<b>-5.9</b> (-7.6, -4.2)	<b>-5.7</b> (-7.5, -4.3)	<b>1.4</b> (0.3, 2.9)	0.0 (-1.6, 1.9)
Belsk-Satellite	<b>-4.2</b> (-5.8, -2.7)	<b>-5.9</b> (-8.0, -3.6)	0.6 (-0.4, 2.0)	-1.0 (-2.5, 0.4)
Poland	<b>-4.4</b> (-5.9, -2.9)	<b>-6.1</b> (-8.0, -3.8)	0.8 (-0.2, 2.1)	-0.8 (-2.2, 0.6)
Central Europe	<b>-4.2</b> (-5.7, -2.8)	<b>-5.8</b> (-7.6, -3.7)	0.8 (-0.1, 2.0)	-0.7 (-2.0, 0.6)
Europe	<b>-3.6</b> (-4.8, -2.3)	<b>-5.2</b> (-6.6, -3.5)	<b>1.2</b> (0.4, 2.3)	-0.2 (-1.3, 0.8)
NH Mid-latitudes	<b>-3.0</b> (-4.0, -2.0)	<b>-3.9</b> (-5.1, -2.4)	<b>1.2</b> (0.6, 2.1)	0.5 (-0.3, 1.3)
NH High-latitudes	<b>-4.8</b> (-7.0, -2.8)	<b>-6.1</b> (-8.8, -3.2)	<b>3.6</b> (2.2, 5.6)	<b>2.2</b> (0.3, 4.5)
NH Tropics	-0.3 (-0.8, 0.1)	-0.6 (-1.3, 0.1)	<b>0.7</b> (0.3, 1.1)	0.3 (-0.1, 1.0)
	<i>Summer (JJA)</i>			
Belsk-Dobson	<b>-3.9</b> (-5.1, -3.0)	<b>-4.2</b> (-5.3, -3.1)	0.8 (-0.1, 2.0)	-0.3 (-1.6, 1.1)
Belsk-Satellite	<b>-2.6</b> (-3.6, -1.8)	<b>-2.7</b> (-3.9, -1.4)	-0.3 (-1.0, 0.6)	-1.1 (-2.5, 0.6)
Poland	<b>-2.4</b> (-3.4, -1.7)	<b>-2.6</b> (-3.8, -1.3)	-0.1 (-0.8, 0.9)	-0.9 (-2.2, 0.8)
Central Europe	<b>-2.4</b> (-3.4, -1.6)	<b>-2.5</b> (-3.6, -1.3)	-0.0 (-0.8, 0.9)	-1.0 (-2.3, 0.6)
Europe	<b>-1.7</b> (-2.5, -1.0)	<b>-1.9</b> (-3.0, -0.9)	0.5 (-0.1, 1.2)	-0.3 (-1.2, 0.9)
NH Mid-latitudes	<b>-1.5</b> (-2.3, -0.8)	<b>-1.6</b> (-2.5, -0.7)	0.1 (-0.7, 1.4)	-0.1 (-1.0, 1.0)
NH High-latitudes	<b>-1.4</b> (-2.3, -0.6)	<b>-2.5</b> (-3.9, -0.9)	0.4 (-0.4, 1.2)	-0.7 (-1.7, 0.6)
NH Tropics	-0.3 (-0.9, 0.2)	-0.3 (-1.1, 0.6)	<b>1.1</b> (0.7, 1.7)	<b>0.9</b> (0.1, 1.9)
	<i>Autumn (SON)</i>			
Belsk-Dobson	<b>-2.7</b> (-4.2, -1.4)	<b>-3.7</b> (-5.5, -1.9)	0.8 (-0.5, 2.2)	-0.8 (-2.6, 1.1)
Belsk-Satellite	<b>-1.7</b> (-3.0, -0.6)	<b>-2.7</b> (-4.6, -0.9)	0.1 (-1.0, 1.2)	-1.1 (-2.3, 0.5)
Poland	<b>-1.8</b> (-3.0, -0.7)	<b>-2.9</b> (-4.7, -1.1)	0.2 (-0.8, 1.3)	-0.9 (-2.1, 0.5)
Central Europe	<b>-1.4</b> (-2.5, -0.4)	<b>-2.5</b> (-4.1, -0.8)	0.0 (-0.9, 1.0)	-1.0 (-2.1, 0.3)
Europe	<b>-1.5</b> (-2.3, -0.8)	<b>-2.3</b> (-3.3, -1.2)	0.2 (-0.3, 0.9)	-0.5 (-1.2, 0.2)
NH Mid-latitudes	<b>-1.6</b> (-2.2, -1.0)	<b>-2.3</b> (-3.0, -1.5)	0.4 (0.0, 0.9)	-0.1 (-0.6, 0.3)
NH High-latitudes	<b>-1.1</b> (-2.3, -0.0)	<b>-2.8</b> (-4.5, -1.0)	-0.6 (-1.8, 0.4)	<b>-2.0</b> (-3.0, -0.9)
NH Tropics	-0.4 (-0.9, 0.1)	0.2 (-0.5, 0.9)	<b>0.8</b> (0.3, 2.1)	<b>1.2</b> (0.5, 1.9)

Od końca lat 90-tych XX wieku zawartość w stratosferze substancji niszczących warstwę ozonową zaczyna się stopniowo zmniejszać i w konsekwencji w XXI wieku we wszystkich analizowanych obszarach i sezonach nie obserwuje się spadkowej tendencji w CZO<sub>3</sub>, którą zanotowano we wcześniejszym okresie. Najmniejsze ubytki ozonu ~ 1% na 10 lat w pierwszym okresie zanotowano w tropikach (0°N-30°N) i w sezonach jesiennych. Natomiast największe ubytki ozonu ~5% na 10 lat miały miejsce w strefie poza-równikowej w sezonach wiosennych. Trendy wyznaczone dla Belsku okazały się reprezentatywne dla Polski i Centralnej Europy i są około 0.5-1% większe (co do wartości bezwzględnej) od odpowiadających sezonowych trendów w Europie i średnich szerokościach geograficznych.

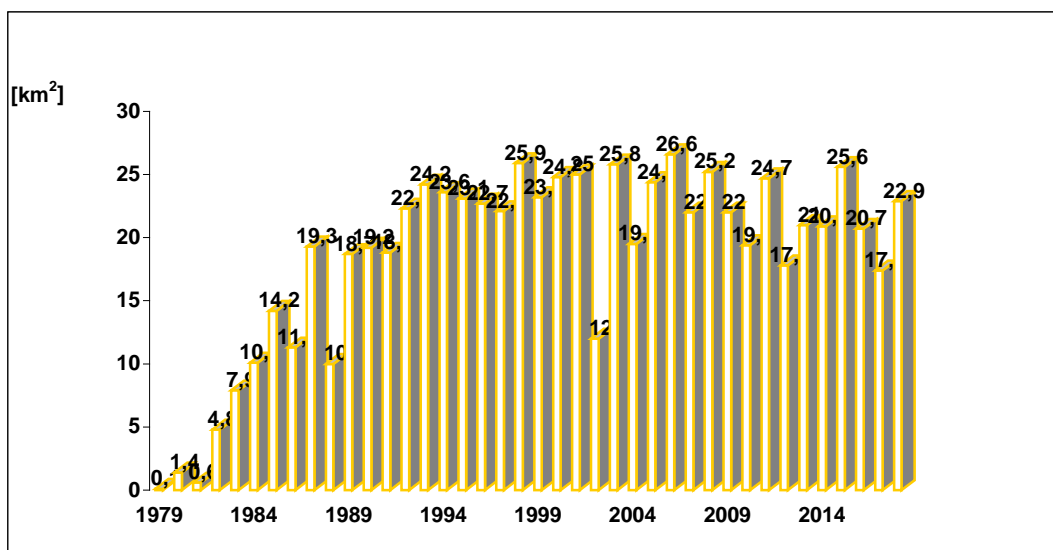
Naprawę warstwy ozonowej na półkuli północnej wyraźnie widać w sezonie zimowym. W ostatnim okresie istotnie statystycznie wzrostowe trendy wyznaczone z zastosowaniem obu modeli znaleziono w sezonie zimowym we wszystkich analizowanych obszarach. Największe wzrosty ~5% na 10 lat zanotowano w Polsce i Centralnej Europie, a znacznie mniejsze w średnich szerokościach geograficznych (~3%) i w tropikach (~1%). Wzrostowe trendy (~1% na 10 lat) wyznaczono w obszarach tropikalnych także w pozostałych sezonach. Model z połączonymi odcinkami trendu wskazuje w sezonie wiosennych dodatnie trendy (~1% na 10 lat) w danych ze spektrofotometru Dobsona, także w Europie i w średnich szerokościach geograficznych. Natomiast w wysokich szerokościach geograficznych (>60°N) wiosenny trend jest najwyższy (~3% na 10 lat). Model z rozłącznymi odcinkami trendu wskazuje na istotny dodatni trend w tym sezonie tylko w wysokich szerokościach geograficznych.

Obecnie poziom zanieczyszczenia atmosfery substancjami niszczącymi warstwę ozonową jest nadal wysoki (Rys. 4. 4. 1) i nie wydaje się prawdopodobne, że stosunkowo niewielkie zmniejszenie tej koncentracji w XXI wieku doprowadziło do zauważalnej naprawy warstwy ozonowej we wszystkich porach roku. Istnieją, więc prawdopodobnie inne mechanizmy powodujące osłabienie lub wzmocnienie tempa naprawy warstwy ozonowej. Poza sezonem zimowym naprawa warstwy ozonowej ma lokalny charakter i jest widoczna w strefie równikowej i nad niektórymi obszarami poza równikiem (np. w Arktyce na wiosnę). Mechanizmem różnicującym tempo naprawy warstwy ozonowej w różnych rejonach mogą być np. lokalne zmiany w dynamice atmosfery powiązane ze zmianami klimatu, prowadzące np. do wzrostu napływu powietrza ubogiego w ozon ze stratosfery równikowej do wybranych obszarów poza równikowych. Warto zauważyć, pojawienie się w ostatnich latach dodatniego trendu (~1% na 10 lat) w strefie równikowej we wszystkich sezonach,

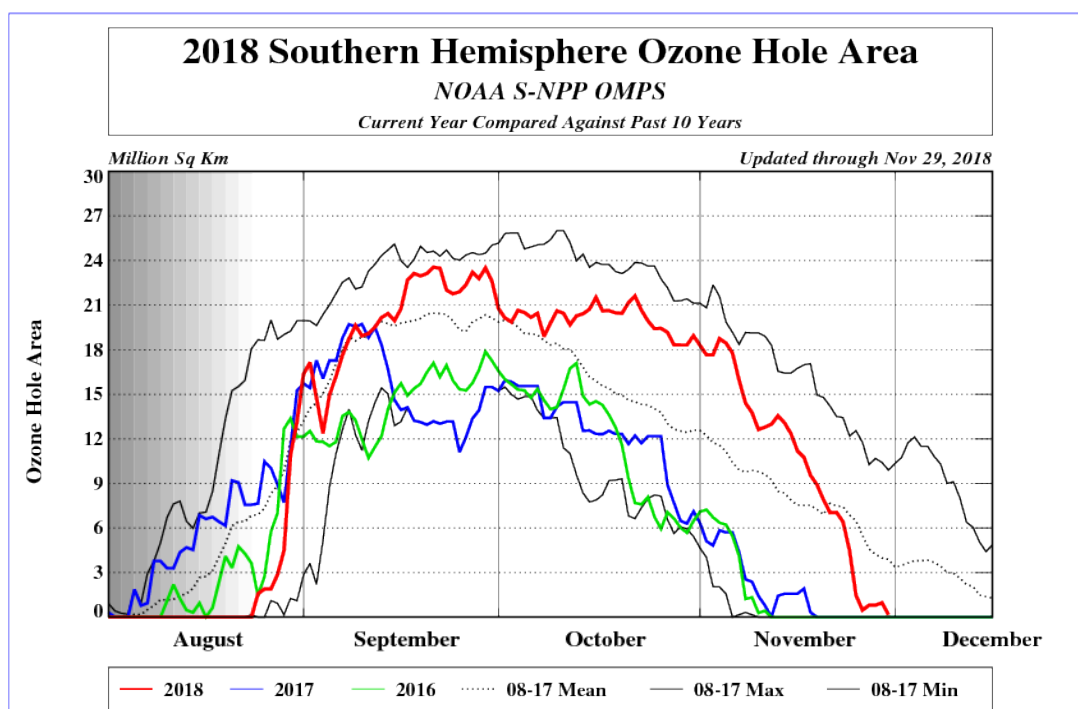
który nie był poprzedzony okresem ujemnego trendu w latach 80-tych i 90-tych. Istnieją sugestie, że wzrost ozonu w strefie równikowej jest wynikiem wzrostu koncentracji ozonu w troposferze, co może mieć to poważne konsekwencje dla globalnych zmian klimatu, gdyż ozon w troposferze jest gazem cieplarnianym. Nie można też wykluczyć ewentualności, że w analizowanej serii czasowej poziom ozonu w ostatnich kilku latach jest zawyżony (lub zaniżony) w wyniku nieodpowiedniej kalibracji spektrofotometrów działających na platformach satelitarnych.

### **Antarktyda i Arktyka**

Zwyczajowo mówi się o występowaniu „dziury ozonowej” gdy  $\text{CZO}_3$  jest poniżej 220 D. Taka sytuacja zdarza się regularnie w ostatnich 40 latach w okresie sierpień-grudzień nad obszarami polarnymi półkuli południowej. Przed 1979 nie notowano nad Antarktydą wartości  $\text{CZO}_3$  mniejszych od 220 D. Na Rys.4.4.4 przedstawiono maksymalny obszar „dziury ozonowej” w okresie 1979-2018. Od połowy lat 90-tych XX wieku maksymalna powierzchnia „dziury ozonowej” (zwykle w połowie września) oscyluje wokół dwudziestu kilku milionów  $\text{km}^2$ . W sezonie 2018 maksymalna dziura ozonowa miała powierzchnię 22.9 mln  $\text{km}^2$  tj. około 6 mln  $\text{km}^2$  więcej niż w poprzednim roku. Podobna sytuacja miała miejsce w 2005 r., kiedy maksymalna powierzchnia dziury wynosiła 24 mln  $\text{km}^2$  i wzrosła o około 5 ml  $\text{km}^2$  w stosunku do poprzedniego z roku. Jednak od początku XXI wieku zaczynamy obserwować symptomy zmniejszenia rozległości i głębokości „dziury”. Powierzchnia dziury nie rośnie systematycznie z roku na roku tak jak to obserwowano w latach 80-tych i wczesnych 90-tych ubiegłego wieku. Obserwowane są duże wahania z okresem kilkuletnim. W 2002 r. „dziura” rozpadła się na dwie części i maksymalnie miała wtedy powierzchnię 12 mln  $\text{km}^2$ . W związku ze zmianami klimatu i zwiększonymi fluktuacjami w temperaturze w stratosferze nad Antarktydą, co wpływa na tempo niszczenie ozonu w tej warstwie atmosfery, obserwuje się coraz częściej anomalny i nieprzewidywalny rozwój dziury ozonowej. Należy podkreślić, że dziura ozonowa istnieje sezonowo tylko nad Antarktydą. Formuje się już od prawie 40 lat w końcu antarktycznej zimy (sierpień) i zanika kilka tygodni przez początkiem antarktycznego lata. Podobne zjawisko nie występuje w innych rejonach na kuli ziemskiej. Niezwykle rzadko pojawia się „dziura ozonowa” nad Arktyką i tylko podczas ekstremalnie chłodnych zim. W średnich i niskich geograficznych nie ma odpowiednich warunków atmosferycznych (niska temperatura) do pojawienia się „dziur” ozonowych.



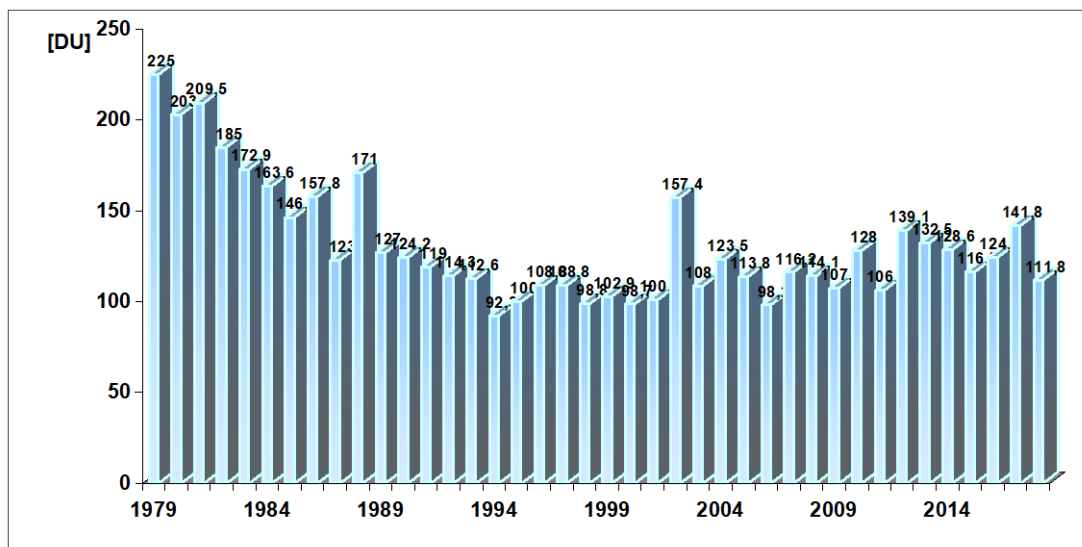
Rys.4.4.4. Maksymalny obszar „dziury ozonowej” w okresie 1979-2018



Rys. 4.4.5. Powierzchnia antarktycznej „dziury ozonowej” w milionach km<sup>2</sup> w 2016, 2017 i 2018r. (odpowiednio krzywa zielona, niebieska i czerwona) na tle średnich dziennych obszaru dziury ozonowej w okresie 2007-2017 (kropkowana czarna krzywa), oraz maksymalnych i minimalnych dziennych wartości w latach 2007-2017 (ciągłe czarne krzywe nad i pod krzywą dla średnich wartości). (źródło: opracowanie NOAA, USA)

Rozwój „dziury ozonowej” nad Antarktydą w 2018 r. był nietypowy. „Dziura ozonowa” pojawiła się 20 sierpnia tj. około 2-tygodnie później niż średnio w latach 2008-

2017. Jej obszar szybko wzrastał, co jest charakterystyczne dla początkowych etapów rozwoju „dziury ozonowej”, osiągając maksymalny rozmiar (22.9 mln km<sup>2</sup>) w drugiej połowie września. Przez miesiąc powierzchnia „dziury ozonowej” ulegała niewielkim zmianom utrzymując się na poziomie ~20 mln km<sup>2</sup>. Następnie zanotowano stopniowy spadek powierzchni. „dziury ozonowej” w tempie zbliżonym do tego z ostatnich lat i pod koniec listopada (miesiąc wcześniej niż zwykle) „dziura ozonowa” całkowicie zanikła (Rys.4.4.5).



Rys.4.4.6. Minimalna całkowita zawartość ozonu w dziurze ozonowej w Dobsonach nad Antarktydą w latach 1979-2018.

Jednym z parametrów określających „dziurę ozonową” jest minimalna całkowita zawartość ozonu w jej obszarze (Rys.4.4.6). W ubiegłym wieku bywały lata, kiedy ta wartość była poniżej 100 D, a przed pojawieniem się „dziury ozonowej” (przed 1980) minimalne wartości ozonu nad Antarktydą nie spadały poniżej 220 Dobsonów. W 2018 r. minimalna wartość CZO<sub>3</sub> wyniosła 111,8 D, co odpowiadało sytuacji z lat 90-tych ubiegłego wieku, czyli apogeum rozwoju „dziury ozonowej” nad Antarktydą. Jak wcześniej dyskutowano nie oznacza to, że „dziura ozonowa” zacznie się odbudowywać, takie sygnały pojawiały się już wcześniej, ale w następnych latach powierzchnia jej zmniejszała się.

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 (NO<sub>2</sub>). Kiedy temperatura spada jeszcze bardziej (rzędu -90°C) mogą tworzyć się chmury zawierające wyłącznie zamrożoną wodę. Te lodowe chmury nazywane są PSCs typu II. Cząstki obu typów chmur mogą rosnąć do takiej wielkości, że nie mogą już unosić się w powietrzu i wypadają ze stratosfery. Zabierają wówczas ze sobą kwas azotowy. Stanowi on substancję rezerwarową, która uwalnia dwutlenek azotu (NO<sub>2</sub>) w warunkach dopływu promieniowania słonecznego. Jeśli NO<sub>2</sub> 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 połowie 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 pojawić się w maju i zanikają w listopadzie. 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 całkowite zniszczenie ozonu w dolnej stratosferze (15-20 km) w sezonie wiosennym.

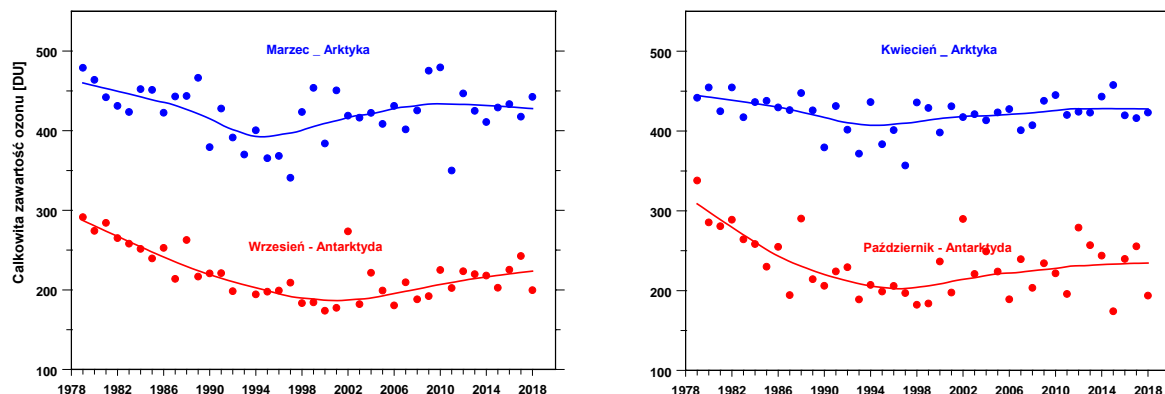
W stratosferze nad Arktyką niskie temperatury sprzyjające tworzeniu PSCs średnio występują na znacznie mniejszym obszarze i dlatego objętość PSC jest znacznie mniejsza niż nad Antarktydą. Rekordowa objętość PSC typ I w Arktyce stanowiła ~40%

maksymalnej objętości PSC typ I nad Antarktydą, natomiast w przypadku PSC typ II tylko ~10%. W niektórych latach arktyczna stratosfera była tak ciepła, że nie było warunków do powstania PSC typu II, a nawet PSC typu I.

Seria czasowa średnich miesięcznych CZO<sub>3</sub> dla obszaru 65°N-90°N (Arktyka) i 65°S-90°S (Antarktyda) dla wybranych wiosennych miesięcy, kiedy efekt destrukcji ozonu związanego ze stratosferycznymi chmurami polarnymi powinien być największy (marzec, kwiecień - Arktyka; wrzesień, październik - Antarktyda) wyraźnie wskazuje na naprawę warstwy ozonowej po 1995 r. (Arktyka) i po 2000 r. (Antarktyda) - Rys.4.4.7. Tempo regeneracji warstwy ozonowej nad Arktyką jest niespodziewanie duże. Poziom CZO<sub>3</sub> w Arktyce 2018 r. był zbliżony do tego z wczesnych lat 80-tych XX wieku. Wzrostowa tendencja w Arktyce pojawiała się już w latach 1993-1995 r., tj. kilka lat przed maksimum zanieczyszczenia arktycznej stratosfery substancjami niszczącymi ozon. Wydaje się, że szybki powrót warstwy ozonowej do stanu z lat 80-tych XX wieku jest wynikiem procesów dynamicznych dodatkowo akumulujących ozon w stratosferze (np. w wyniku zwiększenie intensywności transportu ozonu z obszarów tropikalnych do biegunów w komórce Brewera-Dobsona). Nad Antarktydą wzrostowa tendencja w CZO<sub>3</sub> pojawia się w latach 1997-1999, czyli zgodnie z oczekiwaniami wynikającymi ze zmian koncentracji substancji niszczących warstwę ozonową. Rys.4.4.7 sugeruje, że na koniec 2018 r. połowa maksymalnego ubytku ozonu nad Antarktydą, liczonego od poziomu z 1980 r., została zapełniona. Takie tempo regeneracji jest jednak niezgodne z powolnym zmniejszeniem w tym rejonie koncentracji substancji niszczących warstwę ozonową po 2000 r. Prawdopodobnie zmiany w dynamice atmosfery indukowane zmianami klimatu (efekt cieplarniany?) przyczyniają się do zwiększenia tempa regeneracji warstwy ozonowej.

We wrześniu październiku 2018 r. pojawiły się nad Antarktyką negatywne anomalie CZO<sub>3</sub> w średnich miesięcznych (Rys.4.4.7, patrz wartości w 2018 r. poniżej wygładzonej krzywej przedstawiającej długookresową tendencję zmian CZO<sub>3</sub>). Niższe niż zwykle temperatury niskiej stratosfery nad Antarktydą zimą i wiosną 2018 r. doprowadziły do powstania większej ilości PSC, zwłaszcza typu II,

[https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology/figures/merra2/temperature/icevs\\_2018\\_merra2.pdf](https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology/figures/merra2/temperature/icevs_2018_merra2.pdf). W konsekwencji zaobserwowano zwiększenie destrukcji ozonu w wrześniu i październiku.



Rys.4.4.7. Średnie miesięczne CZO<sub>3</sub> nad Arktyką i Antarktydą w dwóch pierwszych miesiącach wiosennych w okresie 1979-2018: marzec, kwiecień- Arktyka, wrzesień- październik – Antarktyda. Dane według bazy danych KNMI MSR-2

#### 4.5. Podsumowanie

W ostatnich kilkunastu latach warstwa ozonowa na obu półkulach odbudowuje się po okresie (do połowy lat 90-tych XX wieku), kiedy była niszczone przez substancje antropogeniczne zawierające związki chloru i bromu (freony, halony). Wydaje się, że wypełnianie postanowień Protokołu Montrealskiego z 1987 r. i jego późniejszych poprawek dot. ochrony warstwy ozonowej było jedną z przyczyn zatrzymania się spadkowej tendencji w ozonie atmosferycznym w okresie zmniejszania się (po 1996 r.) koncentracji substancji niszczących warstwę ozonową w stratosferze (WMO, 2014). Steinbrecht i inni (2017) stwierdzili na podstawie pomiarów satelitarnych rozkładu pionowego ozonu istotnie statystyczny dodatni trend 1-2% na 10 lat w okresie 2000-2016 wysoko w stratosferze powyżej 5 hPa. W dolnych warstwach atmosfery (100-10 hPa) trendy były nie istotne statystycznie. Zaskakująco w pobliżu 100 hPa trendy stawały się lekko ujemne. Ostatnie prace (Frith i inni, 2014, Chipperfield i inni, 2017, Ball i inni, 2018) wskazują, że oczekiwany wzrostowy trend w całkowitej zawartości ozonu jednak nie pojawiał się w średniorocznych seriach czasowych CZO<sub>3</sub> po 2000 r. Jedynie w

wybranych miesiącach (wrzesień i październik nad Antarktydą) obserwuje się statystycznie istotny dodatni trend w CZO<sub>3</sub> (Solomon i inni, 2016, Pazmino i inni, 2017).

Ball i inni (2018) analizując trendy w profilu pionowym rozkładu ozonu w 10 stopniowych pasach szerokościowych obejmujących obszar między biegunami (60S-60N) potwierdzili istnienie regeneracji warstwy ozonowej wysoko w stratosferze (10-1 hPa) i brak trendu w średniej stratosferze (32-10 hPa) w latach 1998-2016. Jednak stwierdzili zaskakująco trwałą spadkową tendencję ozonu w niskiej stratosferze (32-100 hPa), która istnieje do chwili obecnej od początku analizowanych serii czasowych (od 1985 r.). Utrzymywanie się całkowitej zawartości ozonu na stałym poziomie od końca lat 90-tych ubiegłego wieku jest wynikiem wzrostowego trendu w troposferze, który kompensuje ubytki ozonu w dolnej stratosferze. Wzrosty w wysokiej stratosferze, gdzie koncentracja ozonu jest z natury mała, mają niewielki wpływ na zmiany ozonu w całej kolumnie atmosfery. Spadkowy trend w dolnej stratosferze jest tym bardziej zaskakujący, że nie został on potwierdzony przez zaawansowane modele fizyko-chemiczne atmosfery (SOCOL, WACCM), które odtworzyły jedynie regenerację warstwy ozonowej wysoko w stratosferze. W tym momencie natura zmian ozonu w dolnej stratosferze nie jest poznana. Autorzy wnioskujeją na podstawie wyników Hossaini i inni (2017), że może to być efekt niszczenia ozonu w tej części atmosfery przez krótko żyjące substancje nie kontrolowane przez ustalenia Protokołu Montrealskiego i jego późniejsze poprawki. Należy podkreślić, że wyniki Ball i inni (2018) sugerują, że obecne przewidywania czasu regeneracji warstwy ozonowej (około 2050 w średnich szerokościach geograficznych, WMO, 2014), które są oparte na prognozach z wykorzystaniem modeli fizyczno-chemicznych i scenariuszy zmian klimatu, nie są wiarygodne i na ten moment wydaje się, że regeneracja warstwy ozonowej będzie przesunięta w czasie, o ile w ogóle nastąpi.

Przedstawione w Rozdziale 4.4 wyniki analizy trendów w wybranych obszarach ma półkuli północnej wyraźnie pokazują na sezonową zależność tempa regeneracji warstwy ozonowej, która jest widoczna przede wszystkim w sezonie zimowym poza strefą wysokich szerokości geograficznych, dla której w tym okresie brak jest danych (noc polarna). W pozostałych sezonach regeneracja ozonu w Arktyce jest obserwowana w sezonie wiosennym i letnim. W tropikach wzrostowy trend istnieje we wszystkich sezonach. W tej sytuacji nie możemy mówić o regeneracji warstwy ozonowej, a tylko o wzroście CZO<sub>3</sub> po 1996 r., bowiem wcześniej nie obserwowano spadkowej tendencji CZO<sub>3</sub> w tym rejonie. Według obecnego stanu wiedzy nie można zidentyfikować źródeł nieoczekiwanego kierunku zmian CZO<sub>3</sub> w ostatnich latach, a zwłaszcza bardzo szybkiej

odbudowy ozonu w Arktyce. Niewykluczone jest to, że po części taki trend ma charakter fizyczny i jest związany z zawyżaniem wartości ozonu przez satelitarne spektrofotometry nad tym rejonem. Wymagana jest, więc globalne porównanie danych satelitarnych z wynikami pomiarów na stacjach naziemnych w celu wprowadzenia ewentualnej korekcji tych danych.

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 CZO<sub>3</sub>. Wzrostowe, bez ustalonego kierunku, lub nawet spadkowe tendencje w CZO<sub>3</sub> związane z naturalnymi oscylacjami w procesach dynamicznych zachodzących w dolnej stratosferze mogą, więc występować na przemian utrudniając ocenę antropogenicznej składowej trendu i tym samym nie pozwalając ocenić w jakim stopniu warstwa ozonowa zmieniła się w wyniku ograniczenia produkcji substancji niszczących ozon według zaleceń Montrealskiego Protokołu 1987 o ochronie warstwy ozonowej.

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 CO<sub>2</sub>) wskazują, że zmiany ozonu w XX w średnich szerokościach geograficznych były przede wszystkim związane ze zmianą koncentracji substancji niszczących warstwę ozonową (WMO, 2014). W pewnych rejonach globu obserwuje się w końcu XX wieku odwrócenie kierunku trendu prowadzące do zwiększenie grubości warstwy ozonowej. Taka tendencja nie jest trwała. W ostatnich latach (po 2005 r.) pojawiło się zaskakujące osłabienie tempa naprawy warstwy ozonowej w sezonie wiosennym w Centralnej Europie w tym i nad Polską (Krzyścin i Rajewska-Więch, 2016). Podobny powrót do tendencji spadkowej obserwuje się około 2010 r. w serii czasowej uśrednionej CZO<sub>3</sub> w strefie tropikalnej i w średnich szerokości geograficznych poza biegunami (Ball i inni, 2018)

W 1987 r. społeczność międzynarodowa podjęła bezprecedensowy wysiłek i uzgodniła w ramach tzw. Protokołu Montrealskiego szereg działań, których skutkiem miało być zredukowanie emisji freonów do atmosfery i innych substancji niszczących warstwę ozonową. Obecnie istnieje przekonanie, że dzięki Protokołowi Montrealskiemu i jego późniejszym poprawkom, wprowadzającym dalsze ograniczenia w produkcji

substancji szkodliwych dla ozonu, antropogeniczne niszczenia warstwy ozonowej w skali obserwowanej w latach 80 i 90-tych ubiegłego wieku nie jest możliwe w najbliższych dziesięcioleciach, ale obecny stan wiedzy nie pozwala przewidywać termin regeneracji warstwy ozonowej. Mechanizmy zarówno dynamiczne jak i chemiczne decydujące o zmianach w warstwie ozonowej nie są do końca rozpoznane. W tej sytuacji należy kontynuować prowadzony monitoring zmian całkowitej zawartości ozonu i jego profilu na stacjach naziemnych, a zwłaszcza na tych, które jak Belsk prowadzą ciągłe wieloletnie pomiary zapewniając wysoka jakość danych i tym samym stwarzając podstawy do weryfikacji danych satelitarnych i hipotez dot. ewolucji warstwy ozonowej w wyniku współdziałania procesów dynamicznych i chemicznych zachodzących w atmosferze.

## Bibliografia

Ball, W. T., Alsing, J., Mortlock, D. J., Staehelin, J., Haigh, J. D., Peter, T., Tummon, F., Stübi, R., Stenke, A., Anderson, J., Bourassa, A., Davis, S. M., Degenstein, D., Frith, S., Froidevaux, L., Roth, C., Sofieva, V., Wang, R., Wild, J., Yu, P., Ziemke, J. R., and Rozanov, E. V.: Evidence for a continuous decline in lower stratospheric ozone offsetting ozone layer recovery, *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 1379-1394, <https://doi.org/10.5194/acp-18-1379-2018>, 2018.

Chipperfield, M.P., Bekki, S., Dhomse, S., Harris, N.R.P., Hassler, B., Hossaini, R., Steinbrecht, W., Thiéblemont, R., and Weber, M.: Detecting recovery of the stratospheric ozone layer, *Nature*, 549, 211-218, doi:10.1038/nature23581, 2017.

Frith, S.M., Kramarova, N.A., Stolarski, R.S., McPeters, R.D., Bhartia, P.K., and Labow, G.J.: Recent changes in total column ozone based on the SBUV Version 8.6 Merged Ozone Data Set, *J.Geophys.Res.Atmos.*, 119, 9735-9751, doi:10.1002/2014JD021889, 2014.

Hossaini, R., Chipperfield, M.P., Montzka, S.A., Leeson, A.A., Dhomse, S., and Pyle, J.A.: The increasing threat to stratospheric ozone from dichloromethane, *Nature Communication*, 8, doi: 10.1038 /ncomms15962, 2017.

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

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.

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.

Krzyścin, J.W., Rajewska-Więch, B., and Jarosławski, J., The long-term variability of atmospheric ozone from the 50-yr observations carried out at Belsk (51.84°N, 20.78°E), Poland, *Tellus B*, 65, 21779, <http://dx.doi.org/10.3402/tellusb.v65i0.21779>, 2013.

Krzyściń, J.W., The ozone recovery in the NH extratropics: the trend analyses of SBUV/SBUV-2 merged ozone data in the 1979-2012 period, *Atmospheric Environment* 98, 17-24, 2015.

Krzyściń, J.W., and Rajewska-Więch, B., Specific variability of total ozone over Central Europe in the period 1979-2014. *International Journal of Climatology*, 36(10) 3539-3549, 2016.

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.

Pazmino, A., Godin-Beekmann, S., Hauchecorne, A., Claud, C., Khaykin, S., Goutail, F., Wolfram, E., Salvador, J., and Quel, E.: Symptoms of total ozone recovery inside the Antarctic vortex during Austral spring, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/acp-2017-1157>, in review, 2017.

Rajewska-Więch B., and Krzyściń 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.

Solomon, S., Ivy, D.J., Kinnison, J., Mills, M.J., Neely, R.R., and Schmidt, A.: Emergence of healing in the Antarctic ozone layer, *Science*, 353, 269-274, doi: 10.1126/science.aae0061, 2016.

Steinbrecht, W., Froidevaux, L., Fuller, R., Wang, R., Anderson, J., Roth, C., Bourassa, A., Degenstein, D., Damadeo, R., Zawodny, J., Frith, S., McPeters, R., Bhartia, P., Wild, J., Long, C., Davis, S., Rosenlof, K., Sofieva, V., Walker, K., Rahpoe, N., Rozanov, A., Weber, M., Laeng, A., von Clarmann, T., Stiller, G., Kramarova, N., Godin-Beekmann, S., Leblanc, T., Querel, R., Swart, D., Boyd, I., Hocke, K., Kämpfer, N., Maillard Barras, E., Moreira, L., Nedoluha, G., Vigouroux, C., Blumenstock, T., Schneider, M., García, O., Jones, N., Mahieu, E., Smale, D., Kotkamp, M., Robinson, J., Petropavlovskikh, I., Harris, N., Hassler, B., Hubert, D., and Tummon, F.: An update on ozone profile trends for the period 2000 to 2016, *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 10675-10690, <https://doi.org/10.5194/acp-17-10675-2017>, 2017.

Van der A, R., Allaart, M. and Eskes, H., Multi-Sensor Reanalysis (MSR) of total ozone, version 2. Dataset. Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI), 2015. 015. [doi:10.21944/temis-ozone-msr2](https://doi.org/10.21944/temis-ozone-msr2)

WMO: Scientific Assessment of ozone Depletion: 2014, Global Ozone Research and Monitoring Project Report, World Meteorological Organization, Report No. 55, p.416, Geneva, Switzerland, 2014.