



Główny Inspektorat Ochrony Środowiska

**MONITORING CAŁKOWITEJ ZAWARTOŚCI OZONU
W ATMOSFERZE ORAZ NATĘŻENIA PROMIENIOWANIA UV-B
NA STACJI BELSK W LATACH 2026–2028**

RAPORT O STANIE WARSTWY OZONOWEJ W 2025 ROKU



Praca wykonana zgodnie z umową zawartą z Głównym Inspektorem Ochrony Środowiska nr GIOŚ/247/2025/DMŚ/NFOŚiGW. Praca finansowana wyłącznie ze środków Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej.

Opracowano w Instytucie Geofizyki Polskiej Akademii Nauk w Zakładzie Fizyki Atmosfery przez zespół w składzie: Janusz Jarosławski, Janusz Krzyścin, Bonawentura Rajewska-Więch, Agnieszka Czerwińska, Aleksander Pietruczuk, Jakub Wink, Piotr Sobolewski.

Przy cytowaniu danych należy podawać źródło danych: Państwowy Monitoring Środowiska

Warszawa, 2026

SPIS TREŚCI

WSTĘP	3
1. CAŁKOWITA ZAWARTOŚĆ OZONU I JEGO ROZKŁAD PIONOWY	5
1.1. Całkowita zawartość ozonu uzyskana z pomiaru spektrofotometrem Dobsona	5
1.2. Całkowita zawartość ozonu uzyskana z pomiaru spektrofotometrem Brewera	14
1.3. Rozkład pionowy ozonu metodą Umkehr	17
2. ZAWARTOŚĆ DWUTLENKU SIARKI, OZONU, DWUTLENKU AZOTU I TLENKU WĘGLA PRZY POWIERZCHNI ZIEMI W CENTRALNYM OBSERWATORIUM GEOFIZYCZNYM PAN W BELSKU W 2025 R.	23
2.1. Dwutlenek siarki	23
2.2. Ozon przyziemny i dwutlenek azotu	25
2.3. Tlenek węgla	30
2.4. Pył zawieszony PM10	32
3. NADFIOLETOWE PROMIENIOWANIE SŁONECZNE UV-B	35
4. ZMIANA ZAWARTOŚCI OZONU W ATMOSFERZE NAD BELSKIEM W 2025 R.	42
4.1. Całkowita zawartość ozonu w Belsku	42
4.2. Profil pionowy ozonu w Belsku	46
4.3. Ekstremalne wartości całkowitej zawartości ozonu w Belsku	50
4.4. Promieniowanie UV-B w Belsku	53
4.5. Globalne zmiany całkowitej zawartości ozonu	56
4.5.1. Średnie strefowe (90°S – 65°N)	56
4.5.2. Zmiany całkowitej zawartości ozonu nad Antarktydą i Arktyką	61
4.6. Uwagi końcowe	67
5. PODSUMOWANIE	69
BIBLIOGRAFIA	70
SPIS ZAŁĄCZNIKÓW	72
Załącznik 1. Wyniki pomiarów całkowitej zawartości ozonu zmierzonych spektrofotometrem Dobsona na stacji IGF PAN w Belsku 01.01.2025 – 31.12.2025	72
Załącznik 2. Wyniki pomiarów stężeń gazowych zanieczyszczeń powietrza na stacji IGF PAN w Belsku 01.01.2025 – 31.12.2025	72
Załącznik 3. Dane za rok 2025 całkowitej zawartości ozonu, rozkładu pionowego ozonu metodą Umkehr i promieniowania UV-B w Belsku w postaci arkuszy Excel	72

Wskazówka: Ctrl+Klik na tytuł rozdziału, aby przejść do jego treści.

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 2025 r. do 31 grudnia 2025 r. zrealizowano wszystkie zadania zgodnie ze szczegółowym zakresem prac stanowiącym załącznik nr 1 do umowy nr GIOŚ/247/2025/DMŚ/NFOŚiGW.

W ramach poszczególnych zadań w 2025 roku w Centralnym Obserwatorium Geofizycznym Polskiej Akademii Nauk (COG PAN) w Belsku były wykonywane:

- Systematyczne pomiary całkowitej zawartości ozonu przy pomocy spektrofotometru Dobsona – pięciokrotnie w ciągu dnia w lecie i trzykrotnie w zimie, 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). Zgodnie z nową umową z GIOŚ od września 2025 roku pomiary całkowitej zawartości ozonu spektrofotometrem Dobsona wykonywane są tylko w dni robocze (Załącznik 1, Załącznik 3).
- 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 (Załącznik 3).
- Wykonano 207 serii pomiarowych przy pomocy spektrofotometru Brewera pozwalających wyznaczyć pionowy rozkład ozonu metodą Umkehr. Pomiary Umkehr wykonywane są w określonych warunkach pogodowych (bezczmurne niebo). Wyniki pomiarów z serii Umkehr, 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 (Załącznik 3).
- 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.

- W COG PAN w Belsku w 2025 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]. 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 (Załącznik 3).
- W 2025 roku wykonywano w Belsku pomiary i rejestrację stężenia ozonu, SO₂, CO, NO₂ i pyłu zawieszonego PM₁₀ w przyziemnej warstwie atmosfery. Pomiary te wykonywane są w sposób ciągły (24 godziny na dobę) analizatorami firmy Horiba, Thermo i Envea. Na podstawie uzyskiwanych wartości chwilowych obliczane są średnie 60 min. Na ich podstawie przeprowadzana jest dalsza analiza wyników. Wyniki pomiarów przekazywano na bieżąco do bazy danych CAS znajdującej się w oddziale CLB GIOŚ w Warszawie i przesyłano do Komisji Europejskiej w trybie miesięcznym. Opracowano 1-godzinne wartości stężeń O₃, SO₂, CO, NO₂ i PM₁₀ (Załącznik 2).
- Wyniki pomiarów całkowitej zawartości ozonu w atmosferze oraz natężenia promieniowania UV-B przekazywano do GIOŚ w trybie miesięcznym.
- Wyniki pomiarów całkowitej zawartości ozonu i natężenia promieniowania UV-B za rok 2025 dla Głównego Urzędu Statystycznego oraz europejskiej bazy danych INSPIRE przekazano do GIOŚ.
- W przypadku spadku całkowitej zawartości ozonu o więcej niż 20% średniej wieloletniej był poinformowany GIOŚ.
- Dane o całkowitej zawartości ozonu i jego rozkładzie pionowym przekazywano do Światowego Centrum Danych Ozonowych w Toronto, Kanada.
- 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.
- Opracowano końcowy raport o stanie warstwy ozonowej i natężenia promieniowania UV-B. Raport ten zawiera analizę danych i trendy w Polsce na tle zmian globalnych.

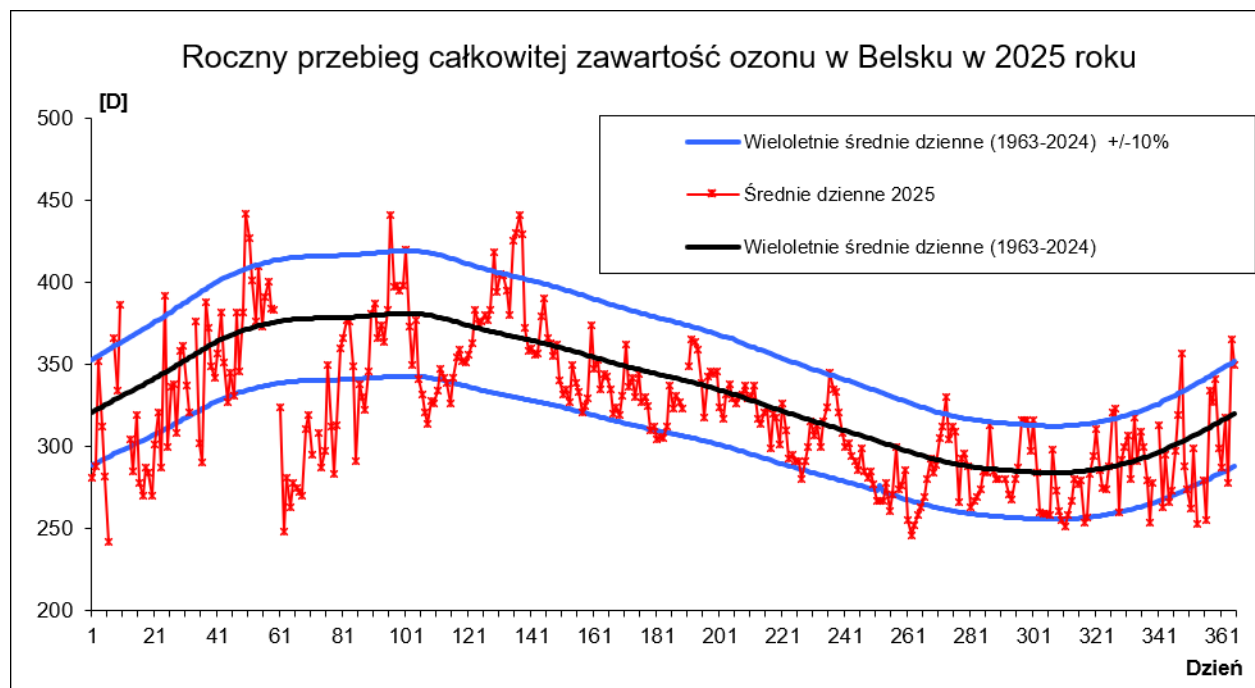
1. CAŁKOWITA ZAWARTOŚĆ OZONU I JEGO ROZKŁAD PIONOWY

1.1. Całkowita zawartość ozonu uzyskana z pomiaru spektrofotometrem Dobsona

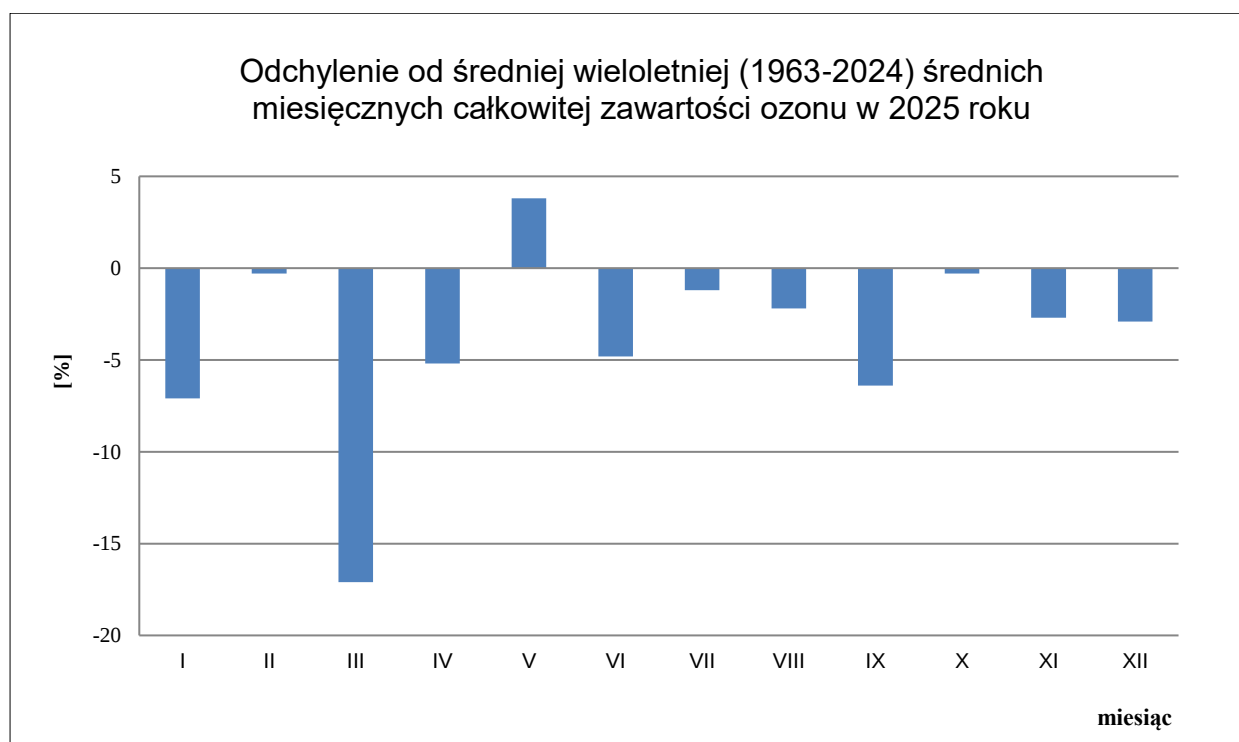
Bonawentura Rajewska-Więch, Janusz W. Krzyścin

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

Analiza danych o całkowitej zawartości ozonu uzyskanych przy pomocy spektrofotometru Dobsona (od września 2025 roku w dni wolne od pracy średnie dzienne uzyskiwane są ze spektrofotometru Brewera) pozwala stwierdzić, że w 2025 roku średnie miesięczne wartości całkowitej zawartości ozonu w Belsku były wyższe od średniej wieloletniej z lat 1963–2024 tylko w maju o 3,8%. Ujemne odchylenia średniej miesięcznej całkowitej zawartości ozonu od średniej wieloletniej zaobserwowano w styczniu 7,1%, lutym 0,3%, marcu 17,1%, kwietniu 5,2%, czerwcu 4,8%, lipcu 1,2%, sierpniu 2,2%, wrześniu 6,4%, październiku 0,3%, listopadzie 2,7% i grudniu 2,9%. Przebieg średnich dziennych całkowitej zawartości ozonu w 2025 roku, zmierzonych spektrofotometrem Dobsona, w odniesieniu do wieloletniej średniej dziennej (1963–2024) $\pm 10\%$ przedstawiono na Rys. 1.1.1. Przebiegi średnich dziennych całkowitej zawartości ozonu w poszczególnych miesiącach w odniesieniu do wieloletniej średniej dziennej (1963–2024) $\pm 10\%$ przedstawiono na Rys. 1.1.2-1.1.13. Odchylenia procentowe średnich miesięcznych całkowitej zawartości ozonu od odpowiednich średnich wieloletnich przedstawia Tab. 1.1.1 i Rys. 1.1.1a.



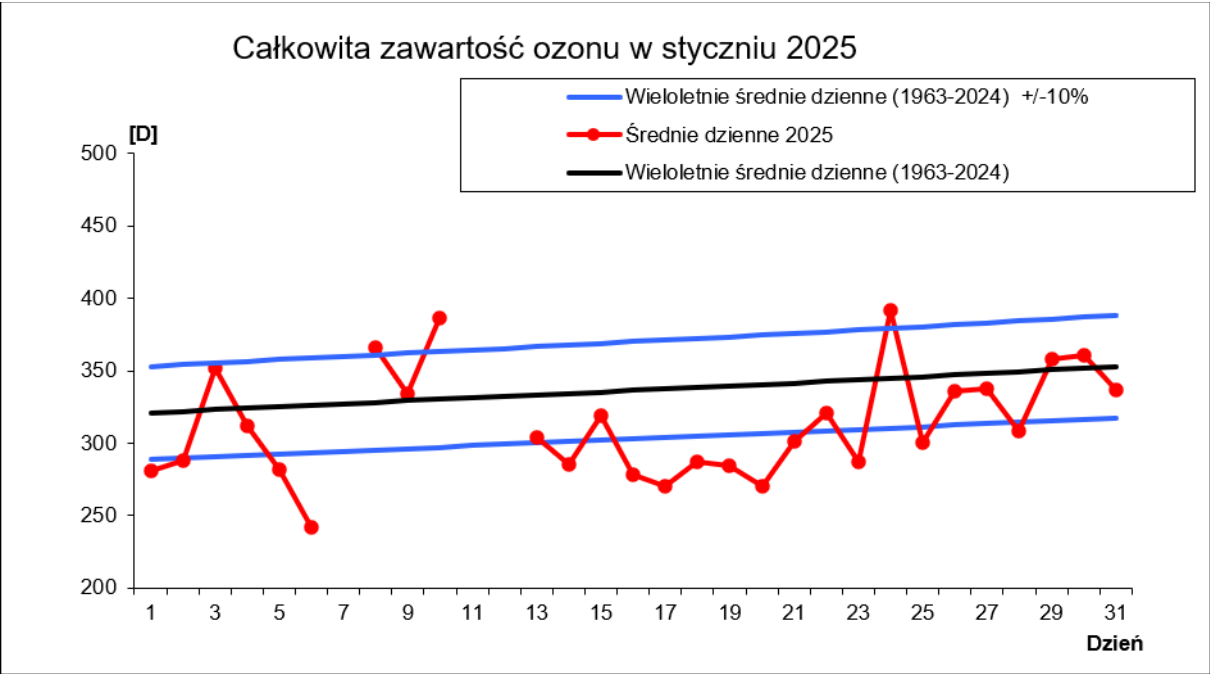
Rys. 1.1.1. Roczny przebieg średnich dziennych całkowitej zawartości ozonu, Belsk, w roku 2025.



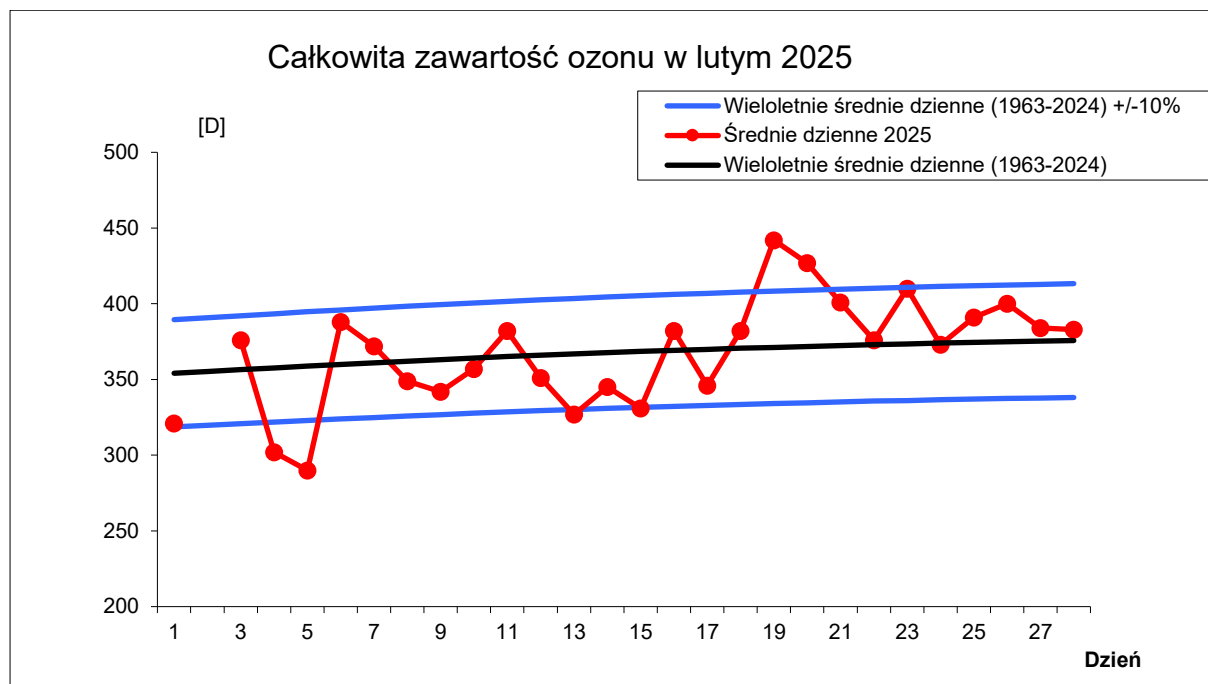
Rys. 1.1.1a. Odchylenie od średniej wieloletniej (1963–2024) średnich miesięcznych całkowitej zawartości ozonu w roku 2025.

Tabela 1.1.1. Średnie miesięczne całkowitej zawartości ozonu [D] w 2025 roku i ich odstępstwa od średnich wieloletnich 1963–2024.

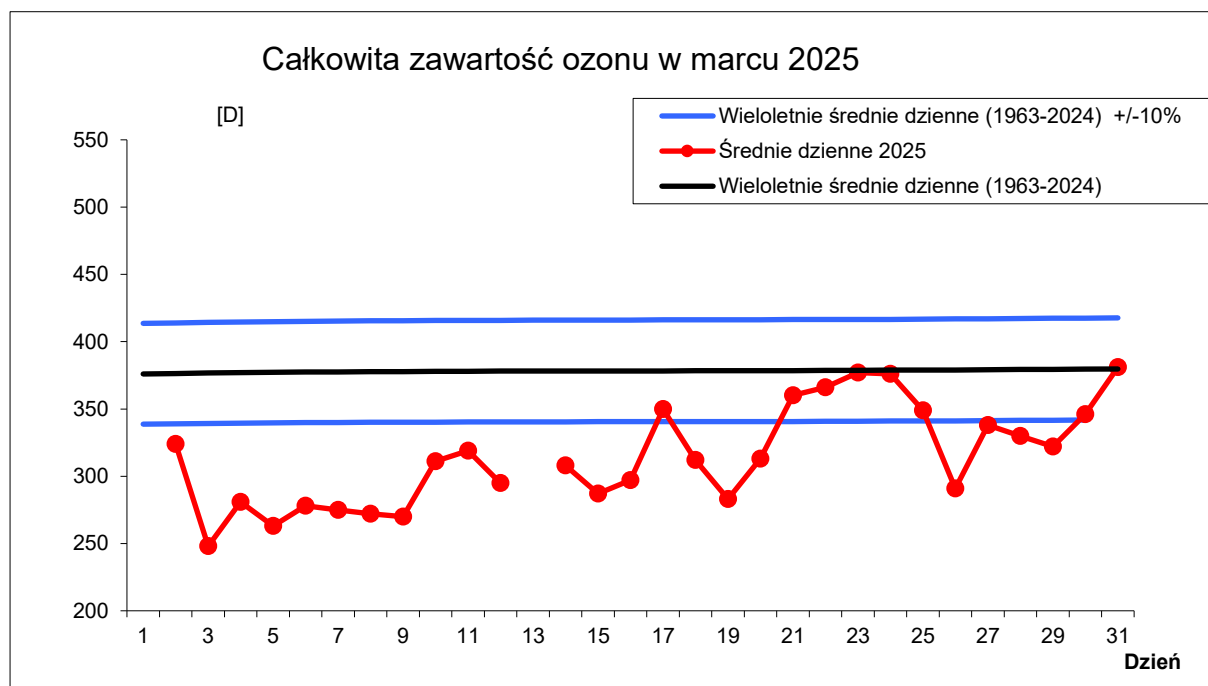
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Śr. 1963-2024	338	369	380	381	367	351	337	317	299	286	286	306
Śr. 2025	314	368	315	361	381	334	333	310	280	285	281	297
Różnica w %	-7,1	-0,3	-17,1	-5,2	3,8	-4,8	-1,2	-2,2	-6,4	-0,3	-2,7	-2,9



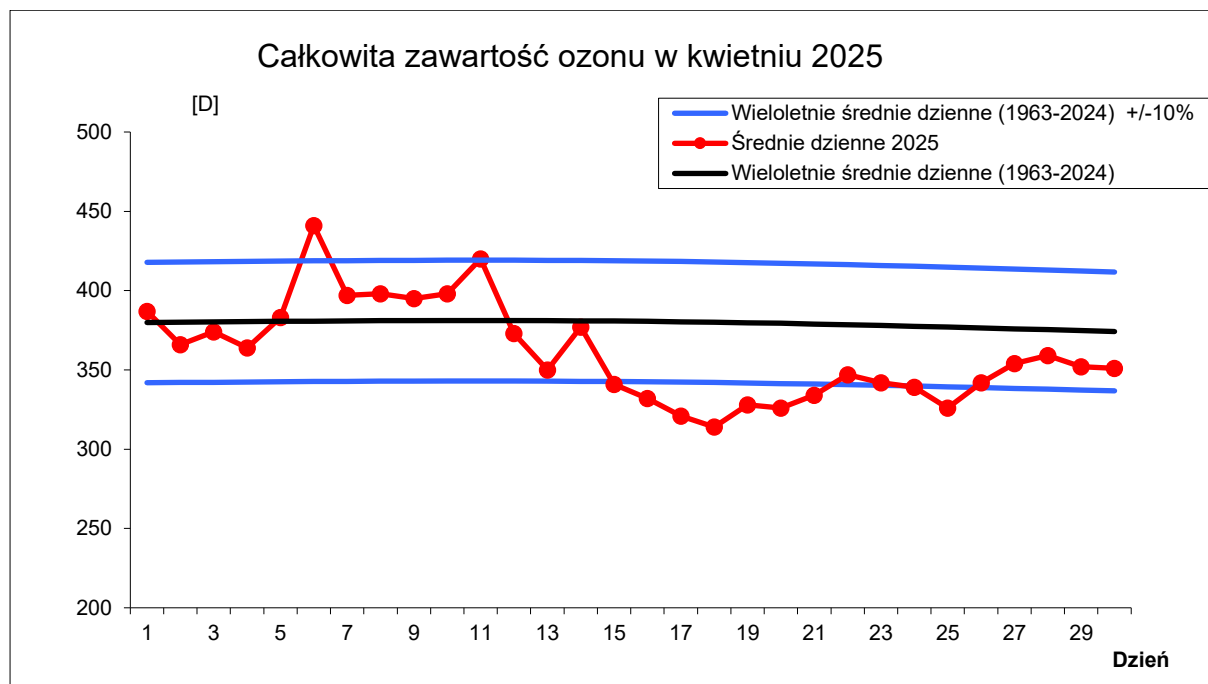
Rys. 1.1.2. Przebieg średnich dziennych całkowitej zawartości ozonu, styczeń 2025r.



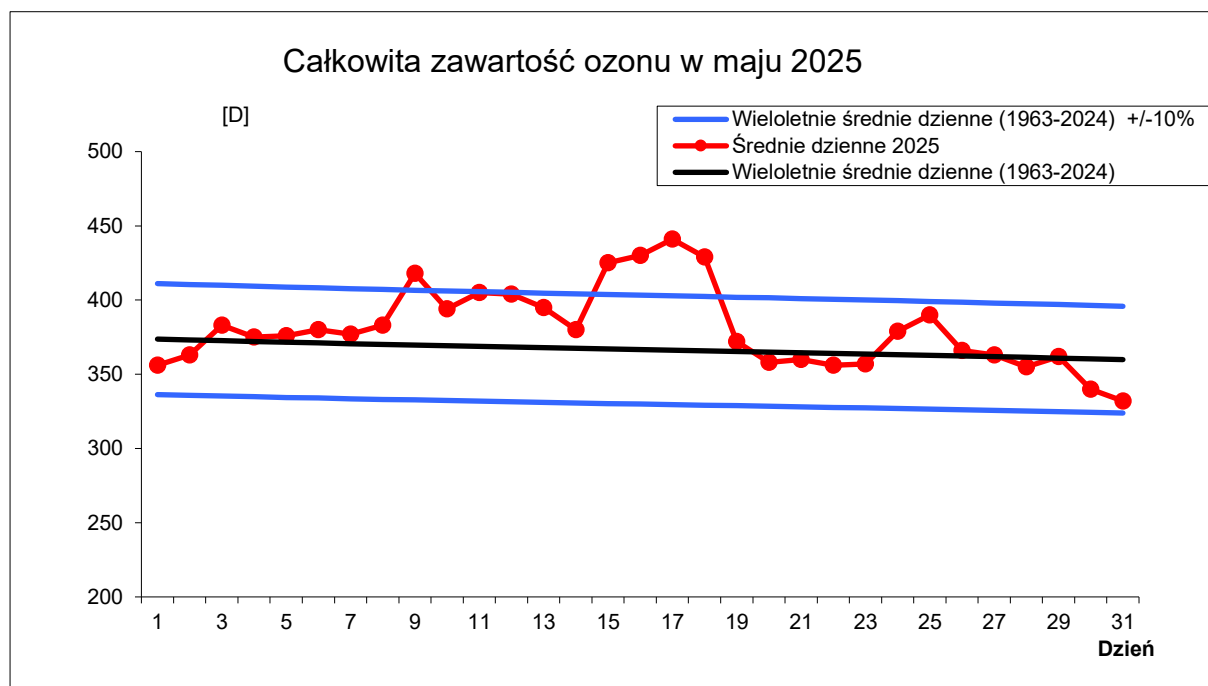
Rys. 1.1.3. Przebieg średnich dziennych całkowitej zawartości ozonu, luty 2025r.



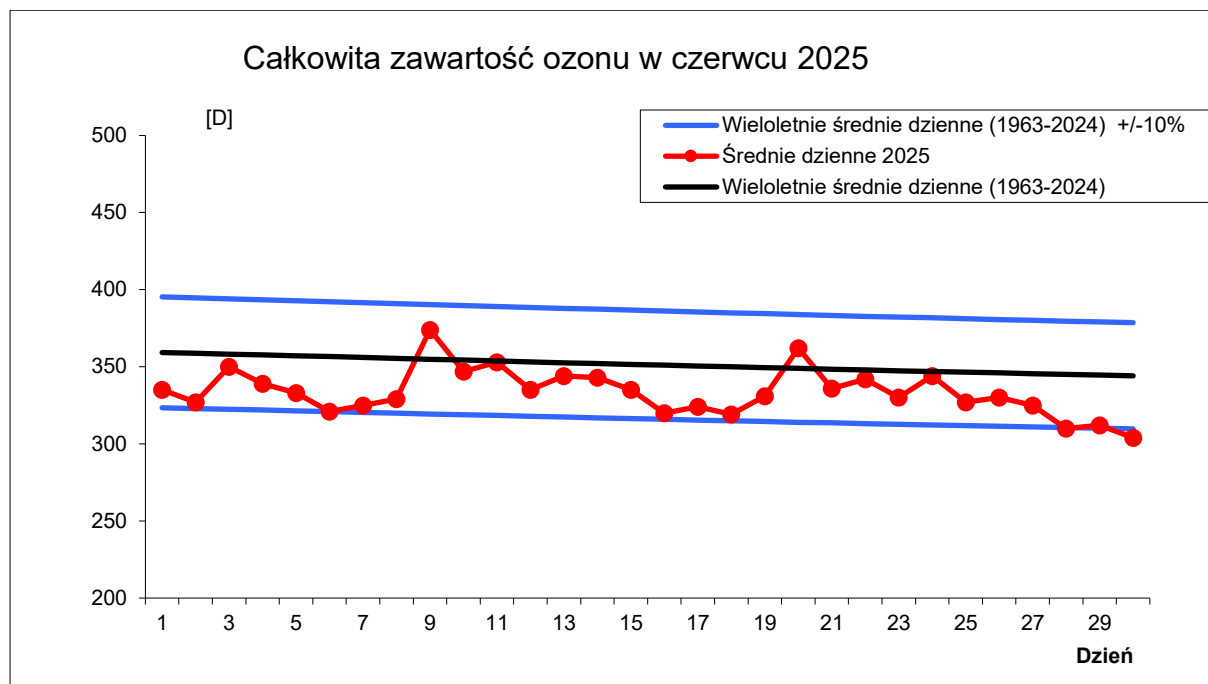
Rys. 1.1.4. Przebieg średnich dziennych całkowitej zawartości ozonu, marzec 2025r.



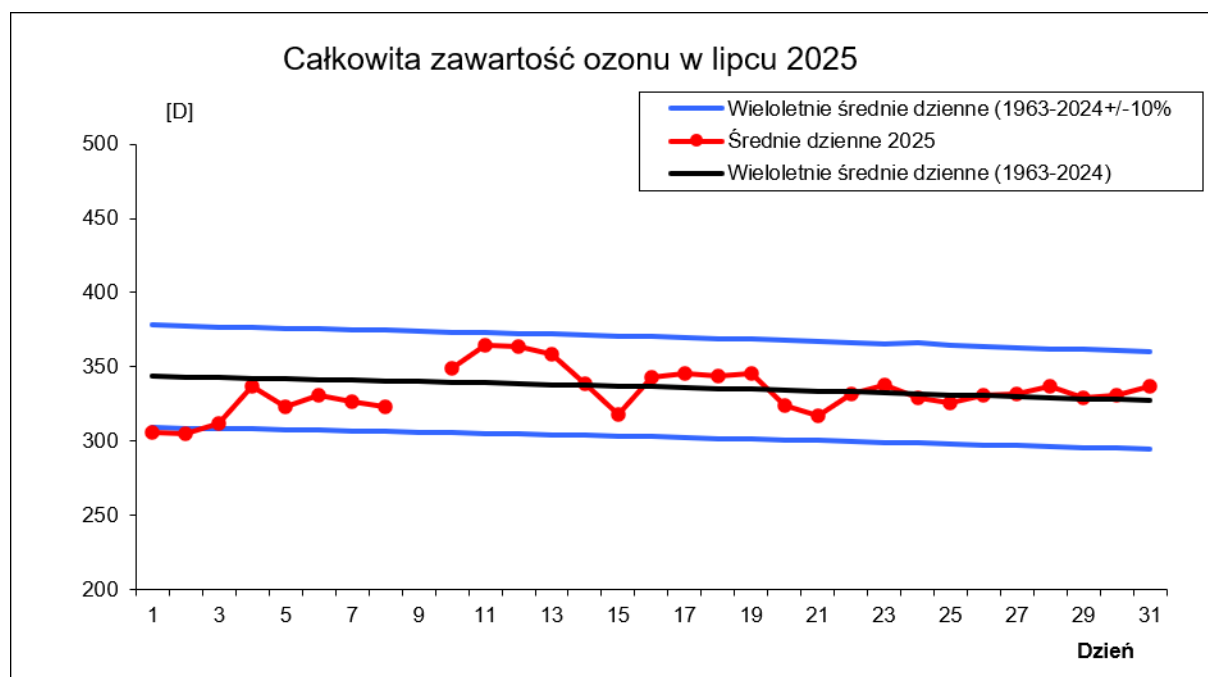
Rys. 1.1.5. Przebieg średnich dziennych całkowitej zawartości ozonu, kwiecień 2025.



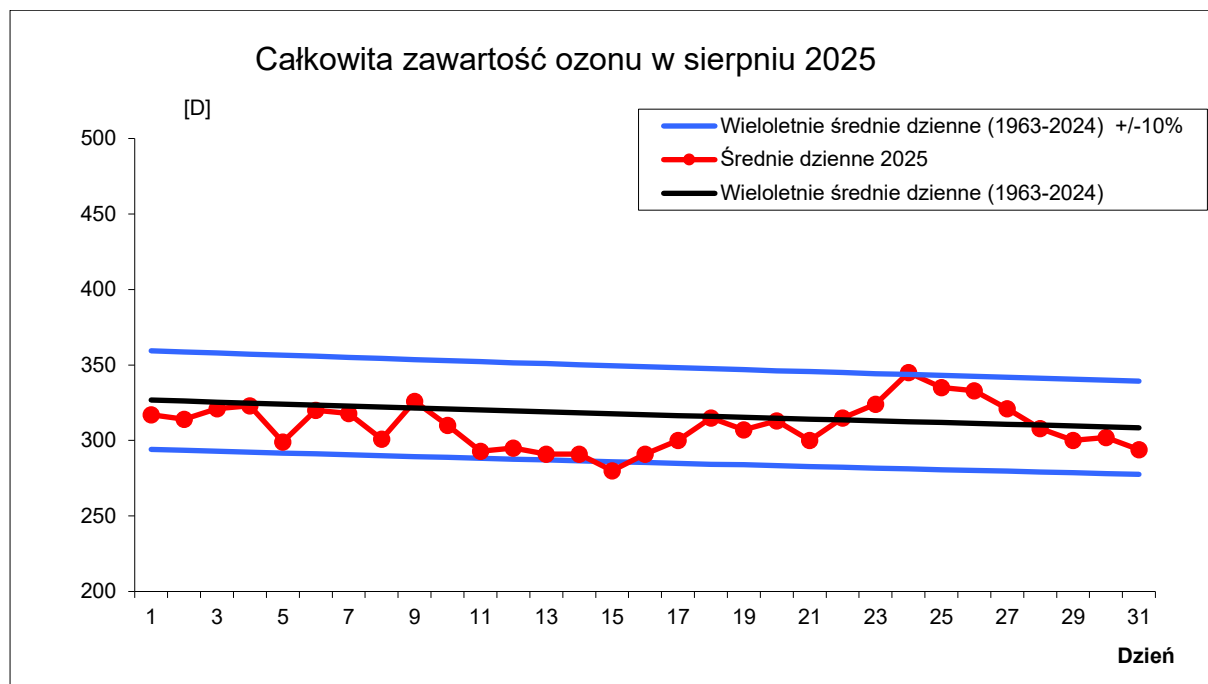
Rys. 1.1.6. Przebieg średnich dziennych całkowitej zawartości ozonu, maj 2025r.



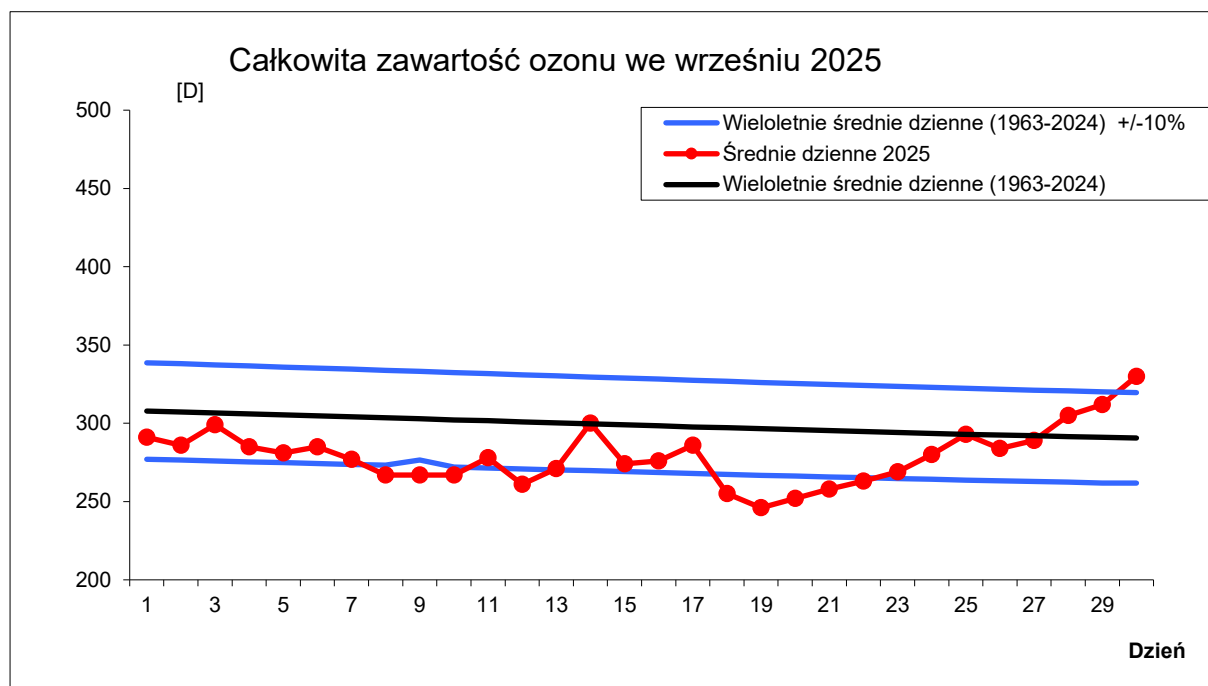
Rys. 1.1.7. Przebieg średnich dziennych całkowitej zawartości ozonu, czerwiec 2025r.



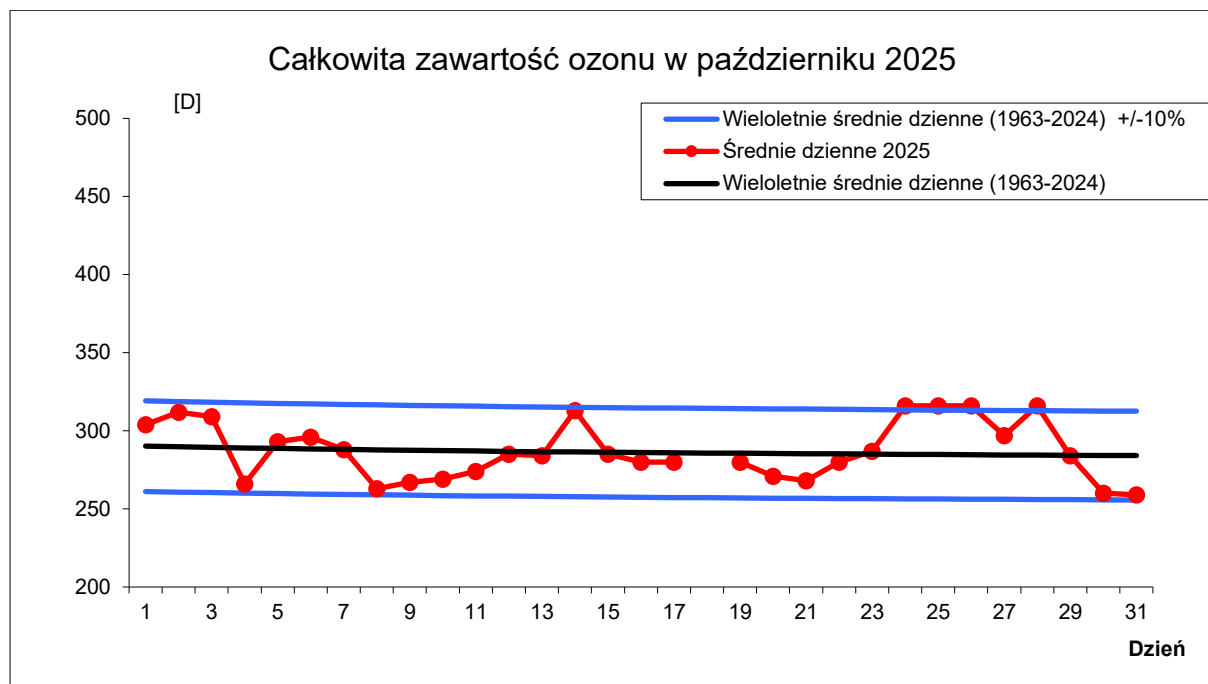
Rys. 1.1.8. Przebieg średnich dziennych całkowitej zawartości ozonu, lipiec 2025r.



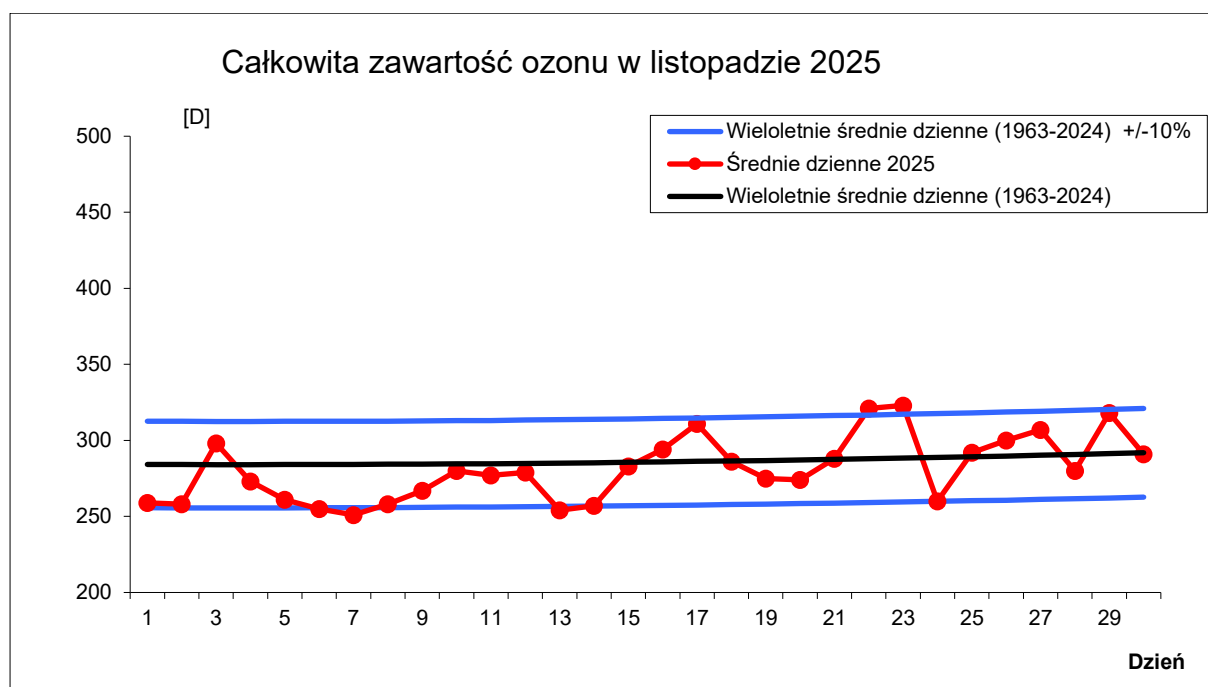
Rys. 1.1.9. Przebieg średnich dziennych całkowitej zawartości ozonu, sierpień 2025r.



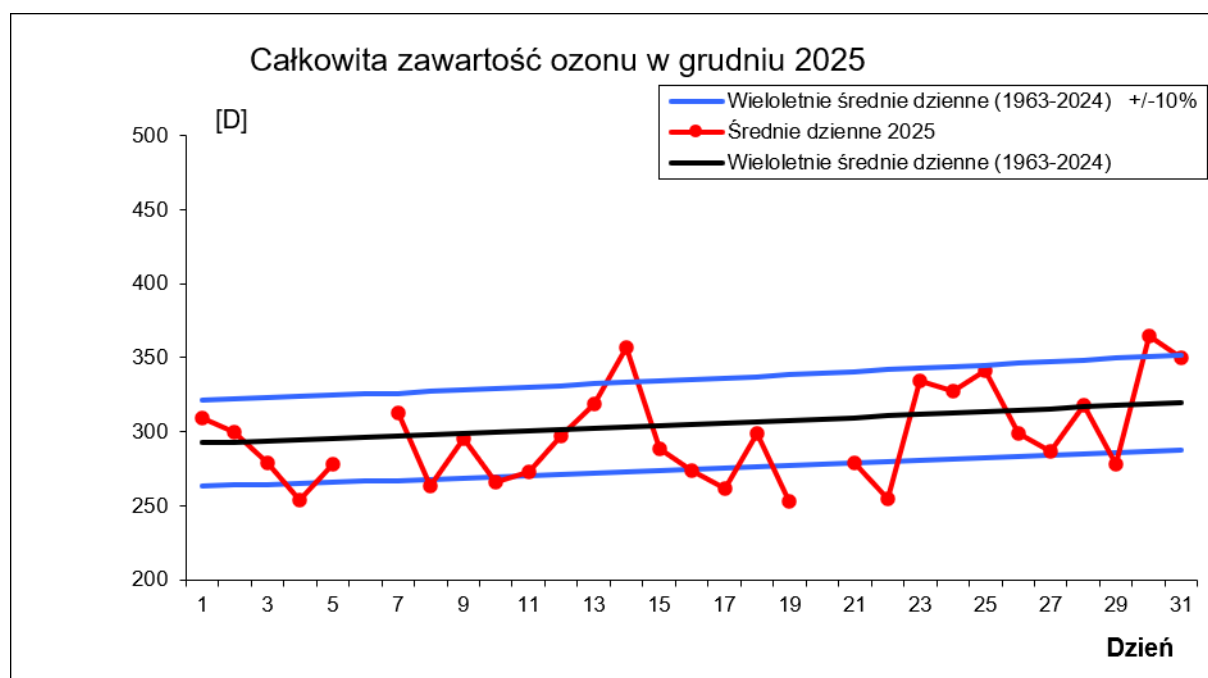
Rys. 1.1.10. Przebieg średnich dziennych całkowitej zawartości ozonu, wrzesień 2025r.



Rys. 1.1.11. Przebieg średnich dziennych całkowitej zawartości ozonu, październik 2025r.



Rys. 1.1.12. Przebieg średnich dziennych całkowitej zawartości ozonu, listopad 2025r.



Rys. 1.1.13. Przebieg średnich dziennych całkowitej zawartości ozonu, grudzień 2025r.

W miesiącach letnich 2025 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 (1963–2024) wynosiły -4,8% w czerwcu, -1,2% w lipcu i -2,2% w sierpniu (Tabela 1.1.1).

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 2025 roku, linia czarna – wieloletnia (1963–2024) średnia dzienna całkowitej zawartości ozonu, linia niebieska – odchylenie o 10% od wieloletniej średniej dziennej. Jeśli odniesiemy te przebiegi do miesięcznych średnich wieloletnich, to widzimy, że największe niedobory całkowitej zawartości ozonu obserwowano w styczniu, marcu, kwietniu, czerwcu i wrześniu. W styczniu (Rys. 1.1.2), marcu (Rys. 1.1.4), kwietniu (Rys. 1.1.5), czerwcu (Rys. 1.1.7) i wrześniu (Rys. 1.1.10) średnie dzienne wartości całkowitej zawartości ozonu były poniżej średniej wieloletniej 1963–2024 przez wszystkie dni miesiąca z wyjątkiem odpowiednio: siedmiu dni w styczniu, jednego dnia w marcu, sześciu dni w kwietniu, dwóch dni w czerwcu i trzech dni we wrześniu. Wyjątkowo interesujący przebieg całkowitej zawartości ozonu w 2025 roku obserwowaliśmy w marcu. W miesiącu tym średnia dzienna całkowitej zawartości ozonu była tylko jednego dnia na poziomie średniej wieloletniej (1963–2024) dla tego dnia. W ciągu dwunastu dni marca 2025 roku średnie dzienne całkowitej zawartości ozonu były poniżej 20% wobec średniej wieloletniej. W lutym (Rys. 1.1.3) i grudniu (Rys. 1.1.13) średnie dzienne całkowitej zawartości ozonu były odpowiednio przez dziesięć i jedenaście dni niższe od średniej wieloletniej (1963–2024). W maju (Rys. 1.1.6) średnie dzienne całkowitej zawartości ozonu z wyjątkiem dziewięciu dni były wyższe od średniej wieloletniej 1963–2024. W lipcu, sierpniu, październiku i listopadzie wartości średnich dziennych całkowitej zawartości ozonu mieściły się w granicach 10% średniej

wieloletniej 1963–2024. Niedobory całkowitej zawartości ozonu w miesiącach letnich (maj, czerwiec, lipiec, sierpień) w stosunku do średniej wieloletniej mogą stanowić potencjalne zagrożenie wzmożonym dopływem promieniowania ultrafioletowego.

Przebieg zmienności z dnia na dzień całkowitej zawartości ozonu w Belsku w 2025 roku w odniesieniu do przebiegu średnich wieloletnich (1963–2024) i ich odchyień 10% od średniej wieloletniej przedstawiono na Rys. 1.1.1.

Stacja ozonu w COG PAN w Belsku uczestniczy w programie sporządzania codziennych map całkowitej zawartości ozonu dla półkuli północnej przez Northern Hemisphere Ozone Mapping Centre w Laboratorium Fizyki Atmosfery Uniwersytetu w Salonikach, Grecja oraz w Światowym Centrum Danych Ozonowych w Toronto, Kanada. Program ten realizowany jest w ramach Systemu Globalnego Monitoringu Ozonu (GO3OS), działającego pod egidą Światowej Organizacji Meteorologicznej (WMO).

W załączeniu (Załącznik 1, Załącznik 3) przedstawiono wyniki wszystkich pomiarów całkowitej zawartości ozonu wykonane za pomocą spektrofotometru Dobsona i spektrofotometru Brewera w Belsku od stycznia do grudnia 2025 roku.

1.2. Całkowita zawartość ozonu uzyskana z pomiaru spektrofotometrem Brewera

Janusz Jarosławski, Bonawentura Rajewska-Więch

Przez cały 2025 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.

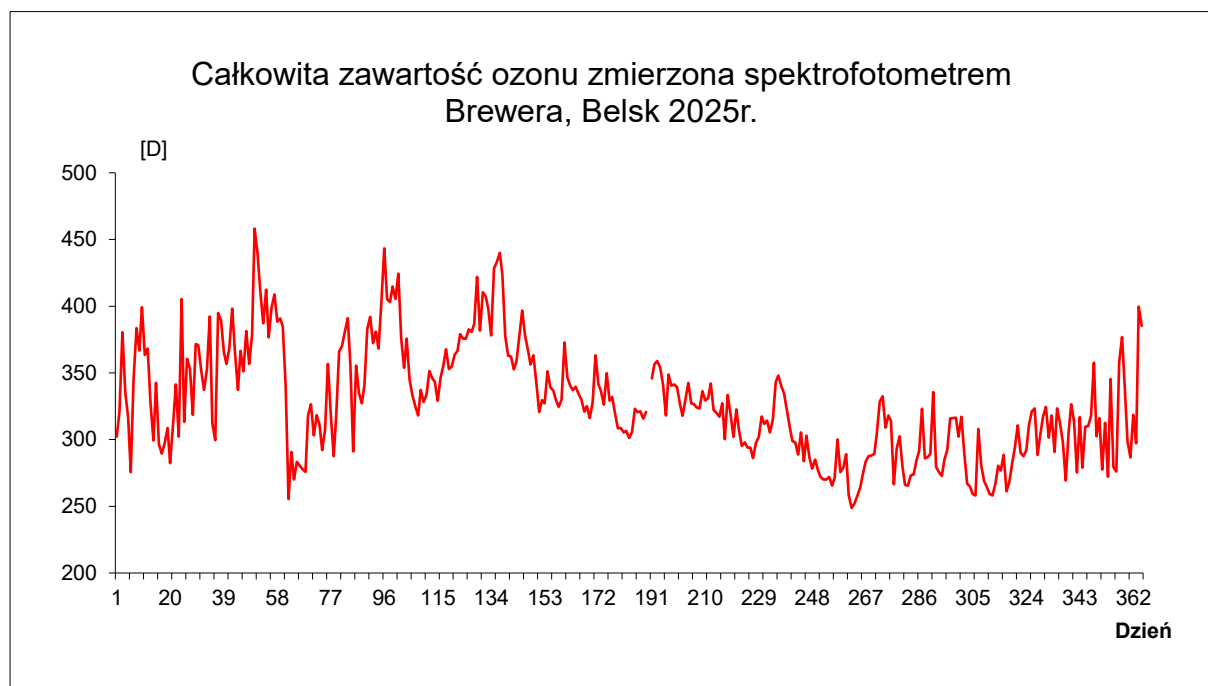
Metodę pozwalającą wyznaczyć całkowitą zawartość ozonu na podstawie pomiarów w świetle rozproszonym z zenitu opracowano w 1995 roku. Pozwoliło to na wykonywanie pomiarów również w okresie pochmurnej pogody, co ma istotne znaczenie szczególnie w okresie jesienno-zimowym ze względu na ograniczoną liczbę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

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 2% w ciągu całego roku. Należy dodać, że wyniki tych pomiarów różnią się między innymi dlatego, że spektrofotometr Brewera dostarcza danych, w których uwzględniony jest błąd wynikający z obecności w atmosferze zaburzającego absorbera, jakim jest dwutlenek siarki (SO_2). Mimo wymienionych różnic pomiarowych, średnie miesięczne całkowitej zawartości ozonu uzyskane przy pomocy obydwu przyrządów różnią się niewiele (Rys. 1.2.2).

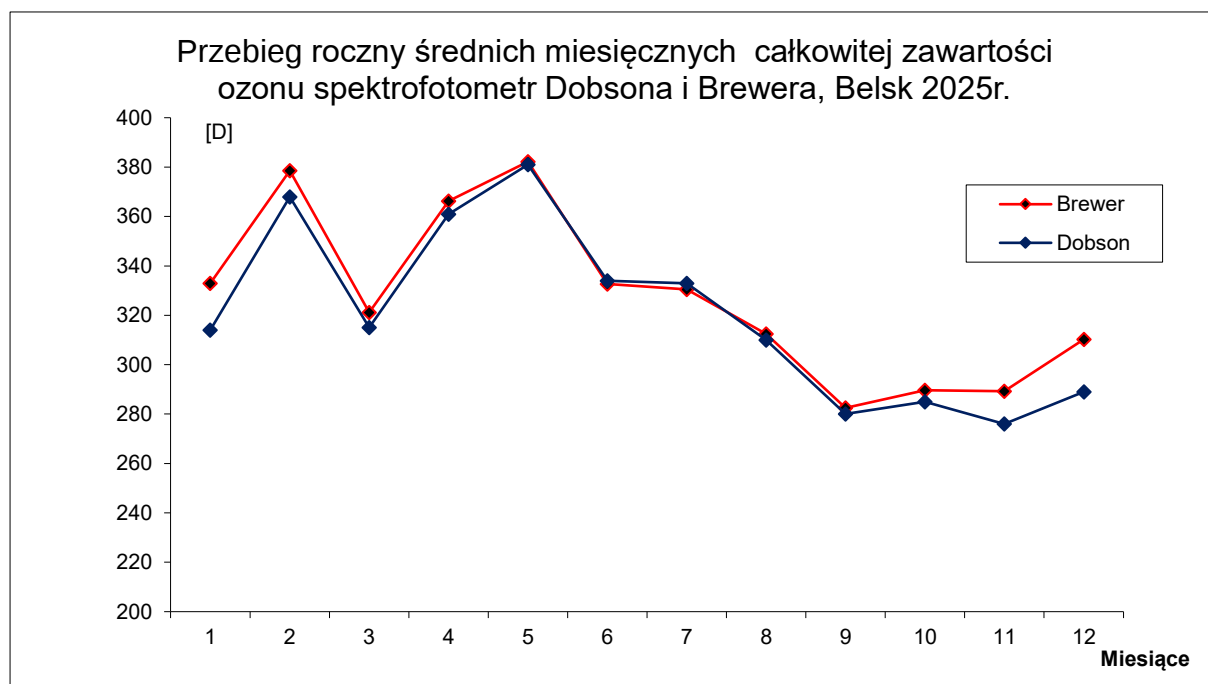
Tabela 1.2.1. Średnie dzienne wartości całkowitej zawartości ozonu uzyskane z pomiaru spektrofotometrem Brewera w Belsku w 2025 roku.

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1	302,3	337,4	384,7	392,1	363,6	329,5	306,6	322,2	305,3	309	259,2	323,3
2	321,4	352,6	340,2	372,3	366,5	327,3	301,4	319,9	283,7	318,1	258	312,5
3	380,4	392,2	255,4	380,9	379,1	351,2	305,7	317,1	303	314	308	298,1
4	335,3	312	290,8	368,2	375,7	339,2	323,1	327,1	287	266,4	280,6	269,3
5	316,3	299,7	270	402,8	375,7	336,7	320,5	300,3	278,3	293,3	269	305,7
6	275,6	395	283,2	443,4	382,6	329,4	321,1	333,5	285	302,5	264,8	326,4
7	345,7	389,5	280,4	405,2	380,8	324,5	315,7	318,9	277	279,6	259,3	313,5
8	383,6	365,7	277,7	403,1	386,8	330	320,7	302	271,9	266	258,1	275,3
9	366,9	356,7	275,8	414,8	422,1	372,9	-	322,6	270	265,5	266,6	317
10	399,2	368,5	318,3	405,5	381,6	346,7	346	307,5	270	273,2	280,5	279
11	363,5	398,2	326,5	424,4	410,6	340,3	356,5	295,3	271,9	273,9	276,9	309,7
12	368,3	364,4	303,1	375,7	407,3	337,1	359	298	265,5	284,7	288,6	310,2
13	326,4	337,4	318,3	353,9	397,9	339,8	354,2	294,1	271,1	291,5	261,3	317,6
14	299,4	366,6	310,8	375,7	378,1	334,4	341,2	293,8	300,2	323,1	268,7	357,6
15	342,5	351,3	292,1	345,3	428,5	329,8	318,1	286,1	275,5	286	282,7	302,5
16	296,5	381,4	307,1	333,3	433,3	321	348,7	297,4	278,9	287	293,8	316,2
17	289,6	356,8	356,8	325,1	440,1	325	340,4	302	289	289,2	310,6	277,6
18	297,2	378,4	319,1	318,1	423,7	316,2	341,4	317,3	258,4	335,7	290,1	312,6
19	308,8	458,2	287,5	337,2	377,5	328	339,3	311,8	248,8	279,5	287,7	272,2
20	282,3	440,1	318,1	328,2	362,9	363,2	326,4	314,3	252,2	275,5	292,1	345,4
21	310,6	410,4	366	333,7	362,2	341,7	317,8	305,3	257,9	272,8	310,6	279,4
22	341,3	387,1	370,2	351,4	352,7	336,4	330,2	314,9	264,2	284,9	321,1	276
23	302,3	412,3	381	345,9	358,6	326,3	342,5	343	274	292,4	323,4	358,4
24	405,5	376,6	391	343,4	377,7	349,7	327,2	348,1	283,5	316	288,6	377
25	313,2	399	357,1	329,1	396,7	329,2	326,4	340,5	287,7	316,1	304,3	341,3
26	360,5	408,8	291,3	346,5	377,8	331,9	324,1	334,7	288,2	316,4	317,2	298,7
27	353,2	388,4	355,6	355,9	367,1	319,5	323,3	321,9	289,4	302,2	324,6	286,7
28	318,6	390,9	335	367,8	356,2	308,5	336,4	309,3	305	317,1	301,6	318,5
29	371,6		327,1	352,8	363,3	308,7	329,3	298,9	328,7	290,1	318,2	297,3
30	370,9		340,4	354,9	343	305,4	331,1	298	332,5	267	290,8	399,8
31	352,1		383,2		320,8		342,1	288,9		264,9		385,3

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.



Rys. 1.2.1. Przebieg średnich dziennych całkowitej zawartości ozonu zmierzonej spektrofotometrem Brewera, Belsk, w 2025 roku.



Rys. 1.2.2. Przebieg średnich miesięcznych całkowitej zawartości ozonu zmierzonych spektrofotometrem Dobsona i Brewera, Belsk 2025.

1.3. Rozkład pionowy ozonu metodą Umkehr

Bonawentura Rajewska-Więch, Janusz W. Krzyścin

Serie pomiarów wykonywanych w świetle rozproszonym pochodzącym z niezachmurzonego 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. Do wyznaczenia rozkładu pionowego ozonu konieczna też jest znajomość całkowitej zawartości ozonu.

W 2025 roku wykonano 207 serii pomiarowych przy pomocy spektrofotometru Brewera pozwalających wyznaczyć pionowy rozkład ozonu metodą Umkehr.

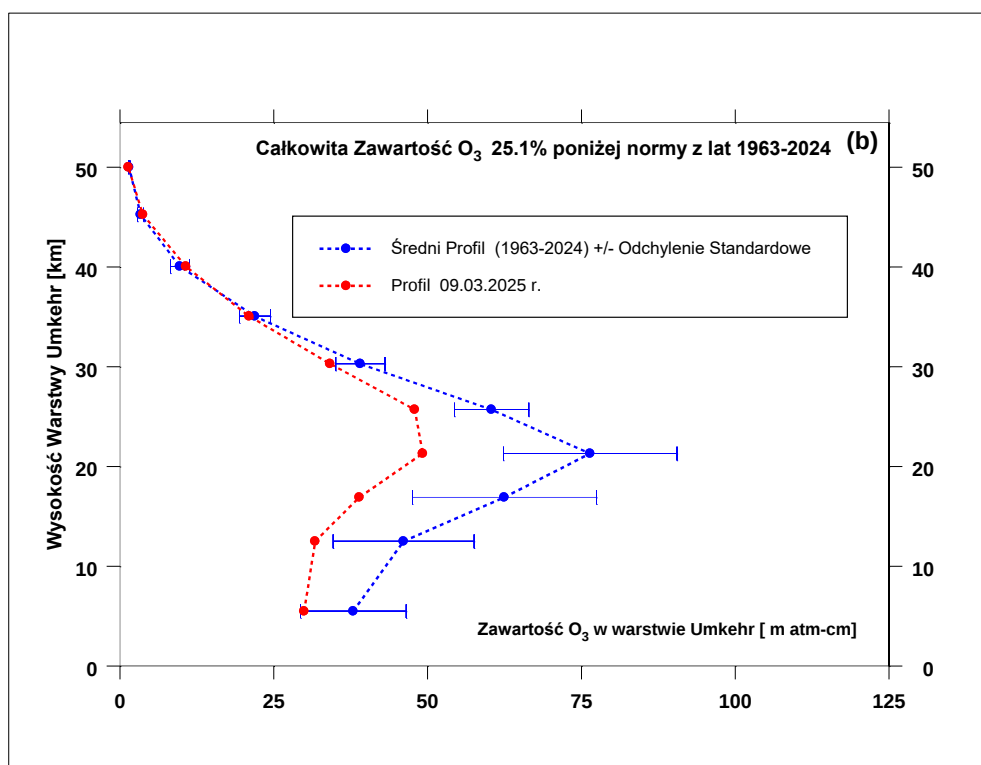
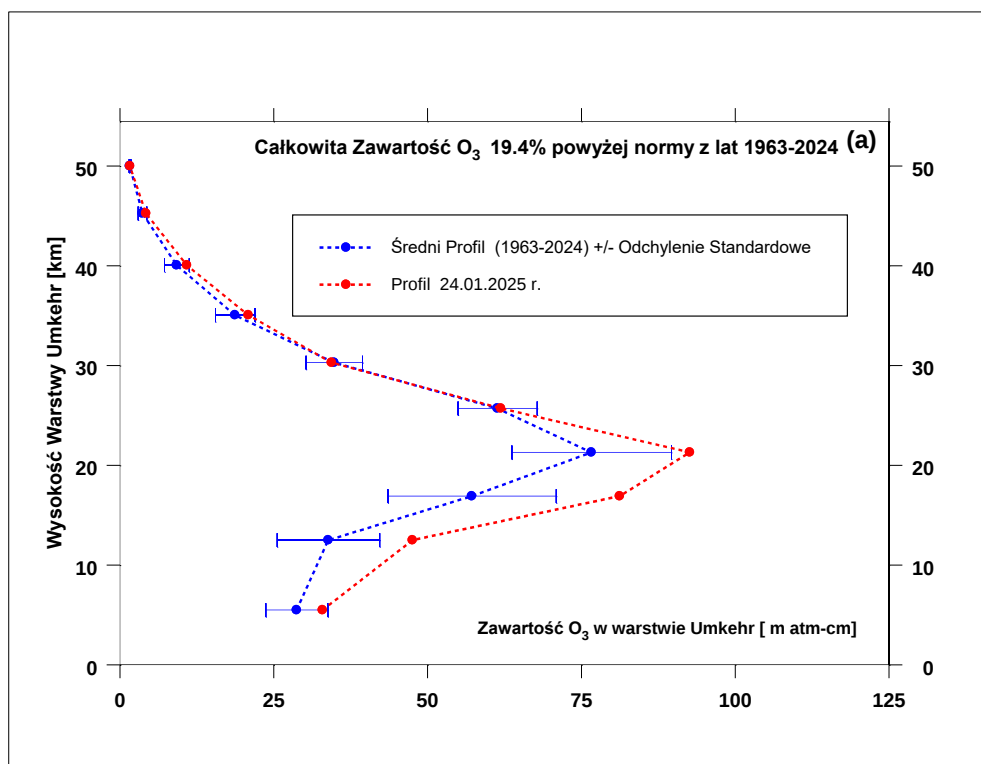
W Tabeli 1.3.1 przedstawiono średnie miesięczne zawartości ozonu w poszczególnych warstwach umkehrowskich, gdzie AVE – średnia arytmetyczna, SD – odchylenie standardowe, n – ilość obserwacji Umkehr w miesiącu, O_3 – średnia całkowitej zawartości ozonu z dni kiedy wykonywano pomiar Umkehr.

Na Rys. 1.3 przedstawiono interesujące przykłady zmian zawartości ozonu w poszczególnych umkehrowskich warstwach atmosfery. Jak widać zmiany te w odniesieniu do średniej wieloletniej 1963–2024 (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 można zauważyć znacznie większą zmienność średnich zawartości ozonu w dolnej stratosferze w okresie zimowo-wiosennym w porównaniu do lata, ponadto profile w poszczególnych dniach mogą znacznie odbiegać od średnich wieloletnich, zarówno co do wartości w poszczególnych warstwach jak i wysokości wystąpienia maksimum ozonu.

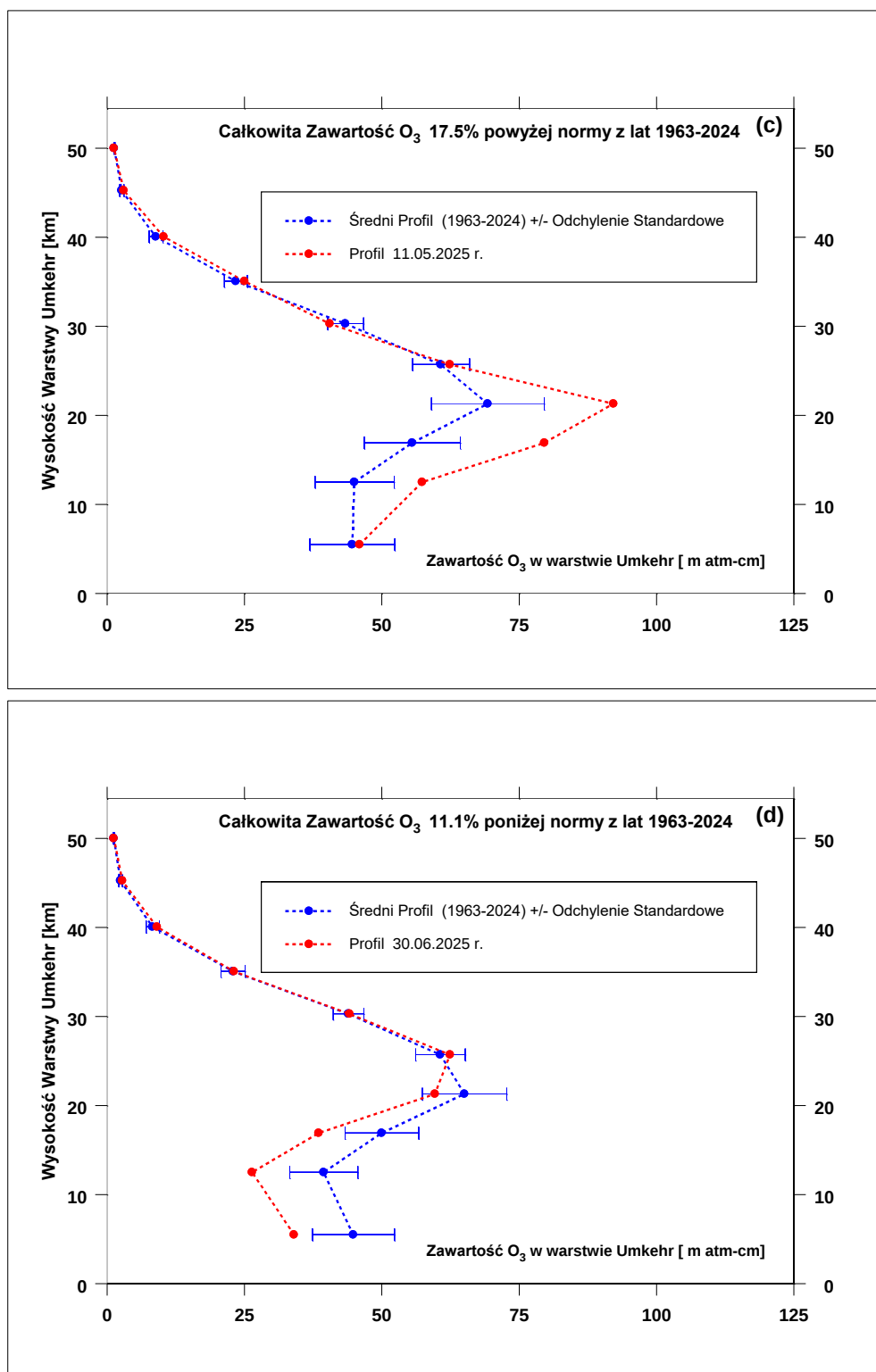
Należy dodać, że zmiany profilu ozonu przy ustalonej całkowitej zawartości ozonu są jednym z czynników wpływających na wielkość natężenia promieniowania UV-B dochodzącego do powierzchni Ziemi. Dane ozonowe ze stacji dysponujących długimi, ciągłymi i wiarygodnymi seriami pomiarowymi są szczególnie cenione w analizach statystycznych, mających na celu poznanie zmian zawartości ozonu na różnych wysokościach w atmosferze. W Europie są tylko trzy stacje wykonujące spektrofotometryczne pomiary rozkładu pionowego ozonu metodą Umkehr, w których tego typu pomiary wykonywane są ponad dwadzieścia lat. Należy do nich Belsk z ponad 50-letnią zrewaloryzowaną serią pomiarową. Wyniki pomiarów rozkładu pionowego ozonu metodą Umkehr w Belsku są szeroko stosowane w najpoważniejszych analizach statystycznych i metodycznych.

Tabela 1.3.1. Średnie miesięczne zawartości ozonu w poszczególnych warstwach umkehrowskich w 2025 roku.

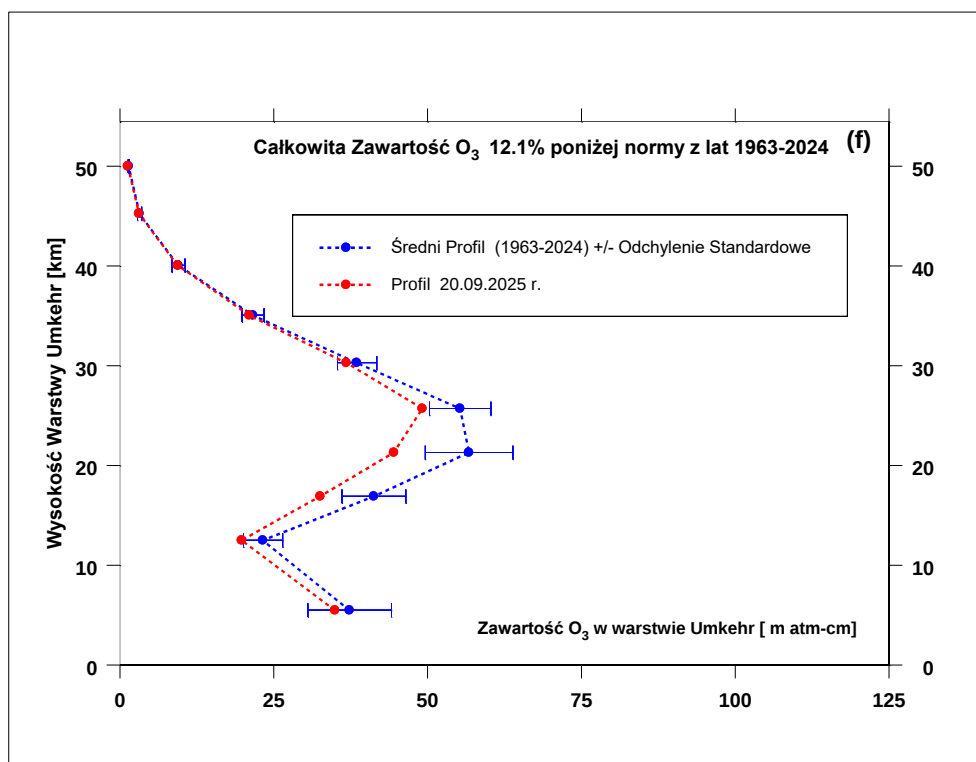
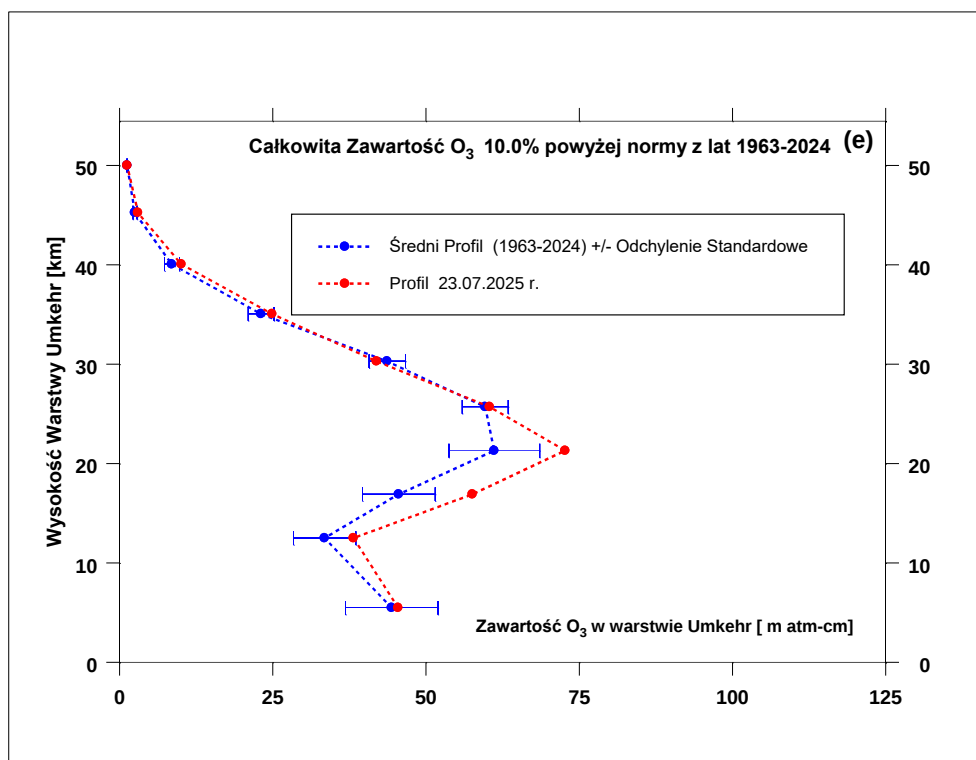
Miesiąc	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	n	O ₃ [D]
AVE I / SD	1,64 0,16	4,29 0,71	10,89 1,86	20,8 2,6	34,4 3,0	59,3 5,1	74,8 10,9	55,6 13,0	31,1 8,6	25,7 4,3	12	380,3 32,0
AVE II / SD	1,56 0,19	4,39 0,80	11,66 1,82	22,5 2,3	37,2 5,2	64,0 10,4	88,5 13,4	71,9 10,6	41,7 8,3	30,0 4,8	15	372,7 31,8
AVE III / SD	1,23 0,09	3,18 0,42	10,16 1,39	23,7 2,8	39,6 3,2	53,9 6,8	58,7 10,9	49,2 9,1	40,6 6,7	36,9 6,2	26	317,6 28,2
AVE IV / SD	1,24 0,09	3,11 0,39	10,25 0,97	23,7 1,7	39,6 3,2	62,6 6,8	80,7 7,5	61,7 6,1	42,5 4,2	36,1 5,1	30	361,4 20,3
AVE V / SD	1,28 0,22	3,19 0,86	10,65 1,12	25,1 2,4	41,1 3,2	62,5 3,0	83,8 11,3	68,0 6,6	48,7 5,1	42,4 7,6	14	387,0 18,5
AVE VI / SD	1,77 0,07	2,72 0,3	9,01 1,18	23,5 2,1	43,4 2,9	60,5 4,8	65,4 4,8	50,1 6,1	38,1 7,3	42,2 8,2	24	336,4 15,3
AVE VII / SD	1,15 0,05	2,61 0,22	8,94 0,73	25,2 2,4	46,0 3,6	59,1 3,4	58,9 7,6	44,5 6,0	32,4 3,3	42,1 7,9	16	321,7 14,9
AVE VIII/ SD	1,25 0,07	2,98 0,29	9,75 0,96	23,8 1,4	41,2 2,2	56,7 3,4	59,4 5,9	45,2 5,3	28,3 3,8	42,1 7,5	20	311,5 17,0
AVE IX / SD	1,33 0,09	3,56 0,40	10,50 1,27	22,9 1,9	36,6 3,4	49,5 5,0	53,1 6,9	41,8 5,7	23,2 3,0	35,6 5,0	26	278,9 14,2
AVE X / SD	1,39 0,11	3,77 0,52	10,92 1,46	22,0 2,1	35,0 2,8	51,2 5,0	59,3 8,8	48,4 7,2	25,5 5,2	34,3 8,6	14	292,5 20,8
AVE XI / SD	1,49 0,11	4,18 0,46	11,10 0,85	21,7 0,7	31,4 1,9	57,5 3,1	58,3 5,5	40,8 6,0	20,6 3,2	26,1 3,3	6	279,4 11,3
AVE XII / SD	1,60 0,11	4,24 0,54	10,60 1,28	20,4 1,0	36,4 3,2	61,3 5,9	65,5 6,1	44,5 13,1	23,4 8,7	24,0 4,3	4	299,7 27,5



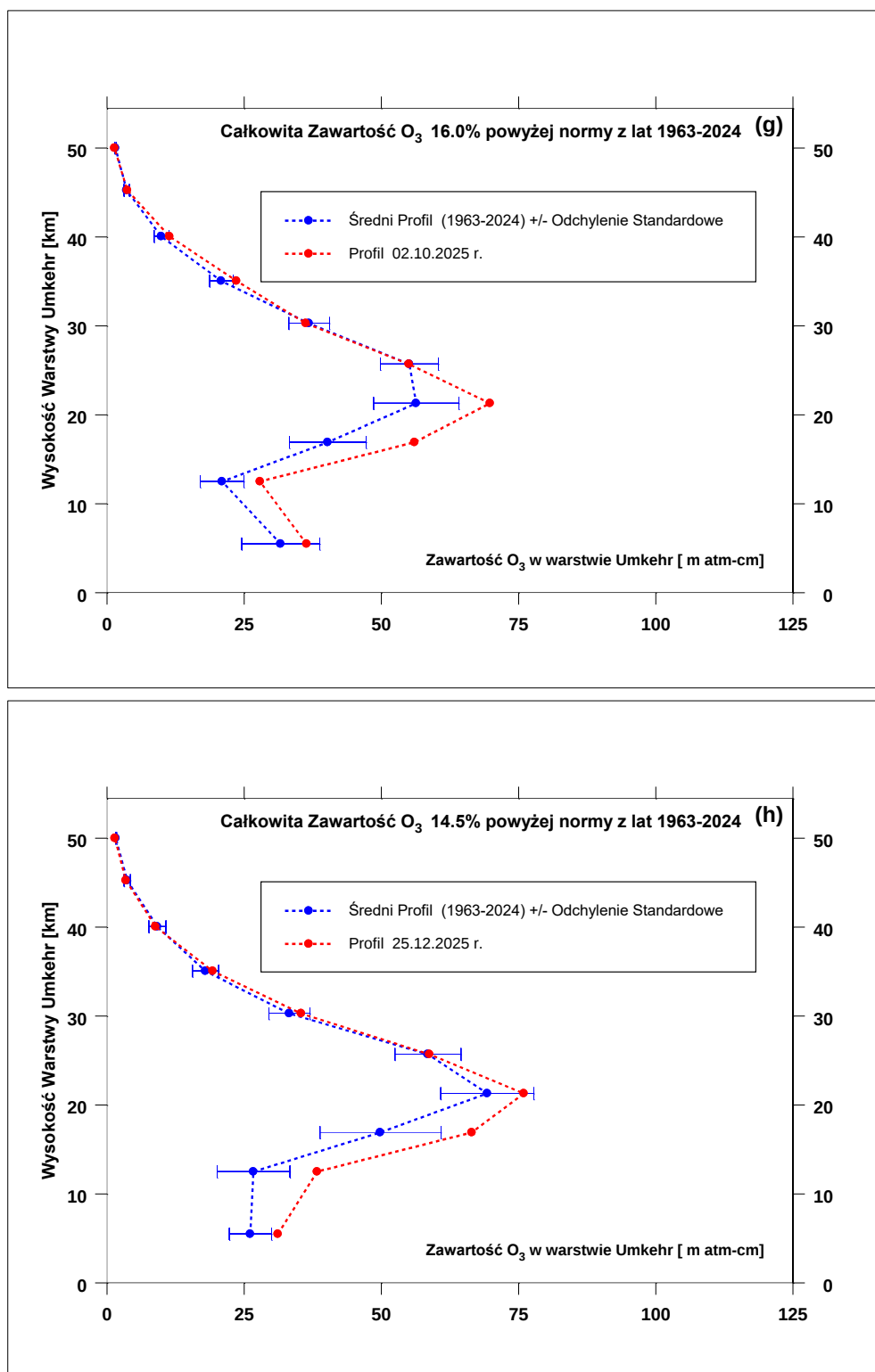
Rys. 1.3. (a, b). Pionowy profil O_3 dla wybranych dni w 2025 r., wyznaczony z pomiarów Umkehr spektrofotometrem Brewera.



Rys. 1.3. (c, d). Pionowy profil O_3 dla wybranych dni w 2025 r., wyznaczony z pomiarów Umkehr spektrofotometrem Brewera.



Rys. 1.3. (e, f). Pionowy profil O_3 dla wybranych dni w 2025 r., wyznaczony z pomiarów Umkehr spektrofotometrem Brewera.



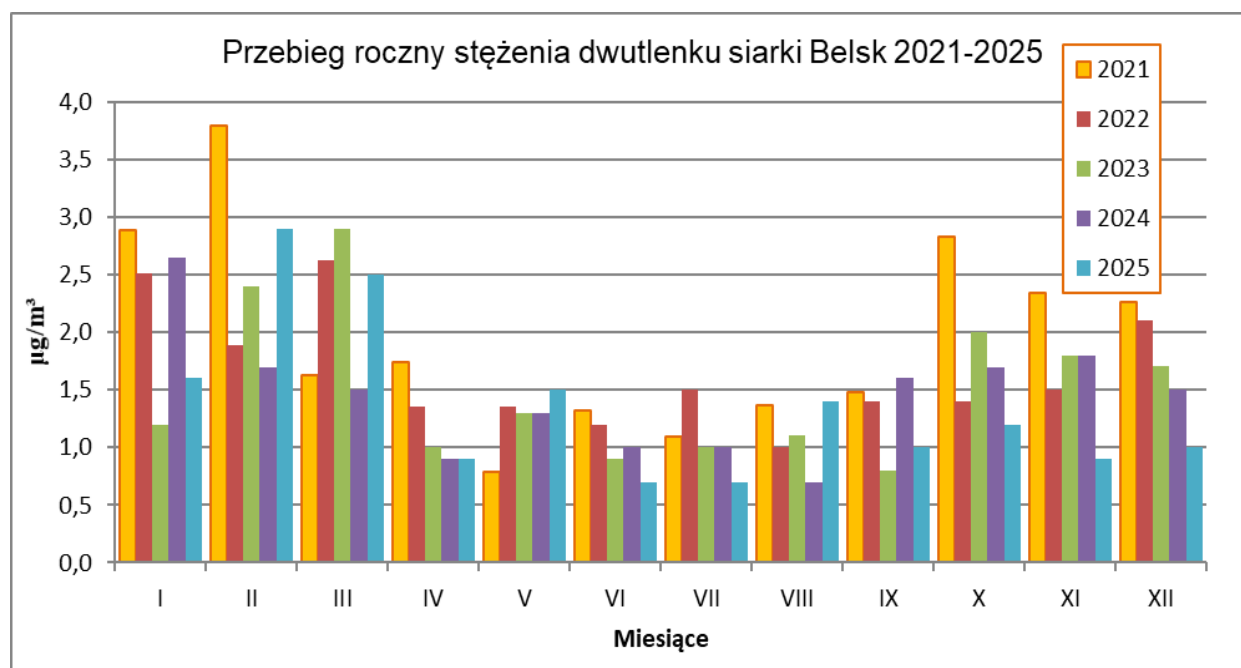
Rys. 1.3. (g, h). Pionowy profil O₃ dla wybranych dni w 2025 r., wyznaczony z pomiarów Umkehr spektrofotometrem Brewera.

2. ZAWARTOŚĆ DWUTLENKU SIARKI, OZONU, DWUTLENKU AZOTU I TLENKU WĘGLA PRZY POWIERZCHNI ZIEMI W CENTRALNYM OBSERWATORIUM GEOFIZYCZNYM PAN W BELSKU W 2025 R.

Janusz Jarosławski

2.1. Dwutlenek siarki

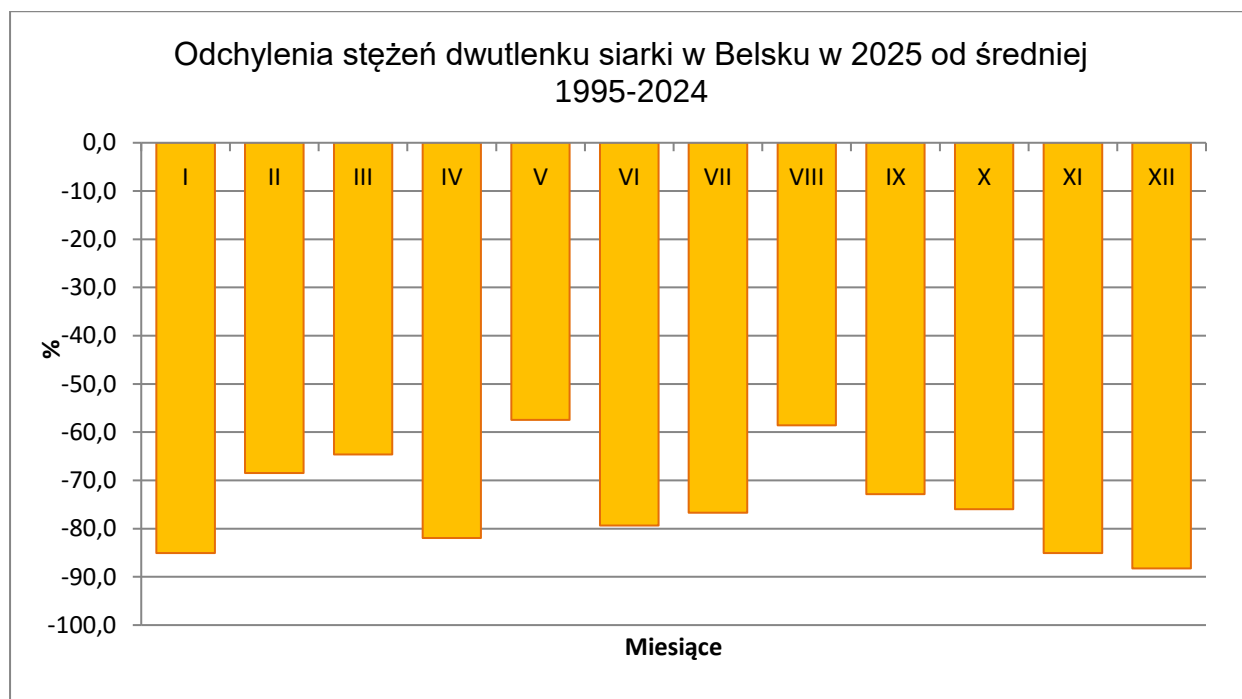
Rok 2025 był kolejnym rokiem systematycznych pomiarów stężeń dwutlenku siarki na stacji w Belsku. Pomiar wykonywany był analizatorem firmy Horiba APSA 370 działającym w oparciu o zjawisko fluorescencji SO_2 w promieniowaniu UV. Wyniki ciągłych pomiarów w postaci średnich 60-min obejmują okres od stycznia do grudnia.



Rys. 2.1.1. Przebieg roczny stężenia SO_2 przy powierzchni ziemi, Belsk 2025 na tle lat 2021–2024.

Przebieg roczny średnich miesięcznych stężeń SO_2 charakteryzował się występowaniem bardzo niskich stężeń w okresie całego roku, ze średnimi miesięcznymi oscylującymi pomiędzy 0,7 a 2,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Rys. 2.1.1.). Maksymalne średnie miesięczne stężenie SO_2 w roku 2025 zostało zmierzone w lutym (2,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) i było wyższe od maksymalnego średniego miesięcznego stężenia SO_2 zmierzonego w roku 2024 o 0,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (w styczniu). W roku 2025 średnie miesięczne stężenia SO_2 były niższe od średnich wieloletnich zmierzonych w okresie 1995–2024 od około 80%–90% w miesiącach zimowych do około 60%–80% w pozostałych miesiącach (Rys. 2.1.2). Najniższe średniomiesięczne stężenie SO_2 w ciągu roku zmierzono w czerwcu i w lipcu (średnia miesięczna 0,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Było ono takie samo jak najniższa wartość

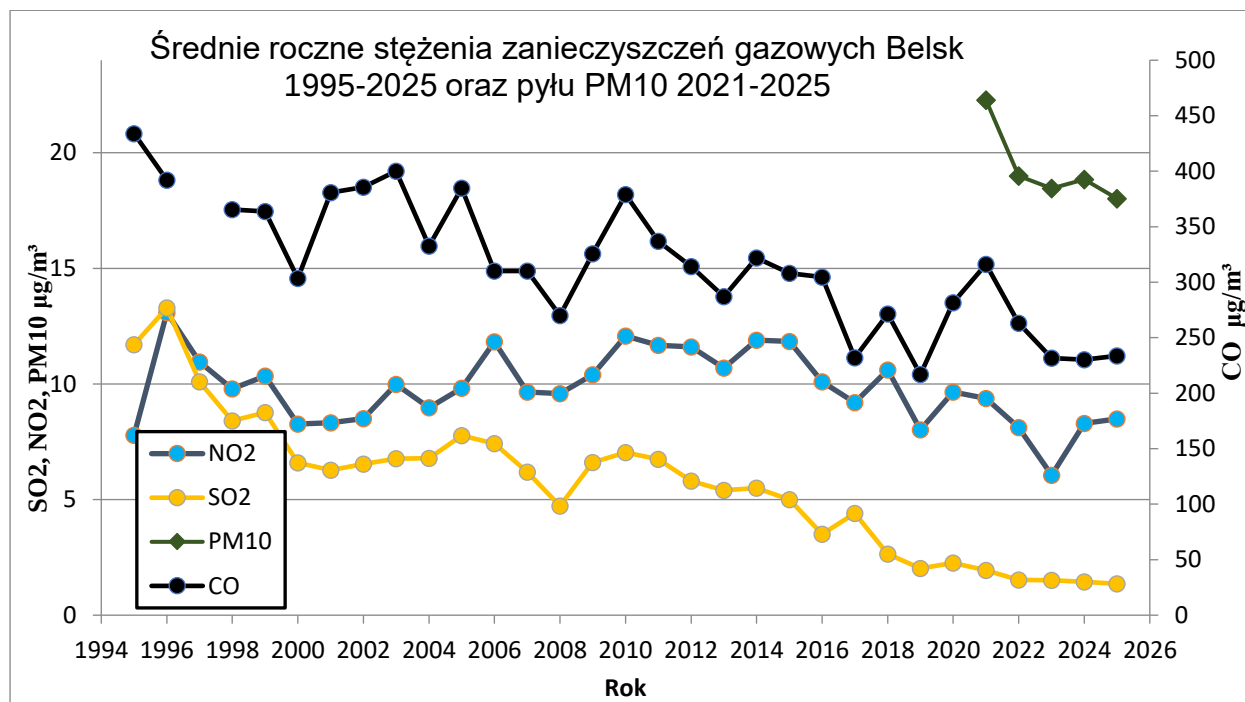
średniomiesięcznego stężenia SO_2 zmierzonego w sierpniu roku 2024 i było to jedno z najniższych średniomiesięcznych stężeń SO_2 w całej dotychczasowej historii pomiarów tego zanieczyszczenia (od 1995). W roku 2025 zaobserwowano wyraźnie wyższe stężenia SO_2 na początku roku – do $2,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ w lutym, natomiast od kwietnia do końca roku nie wystąpił bieg sezonowy, obserwowano stężenia od $0,7$ do $1,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$.



Rys. 2.1.2. Odchylenia średnich miesięcznych stężeń SO_2 w 2025 roku od średniej z lat 1995–2024 w Belsku.

Duże względne odchylenia procentowe od wartości średnich spowodowane są bardzo niskimi wartościami bezwzględными stężenia SO_2 – niewielkie zmiany wartości stężeń powodują duże zmiany procentowe względnych odchyśleń. Amplituda roczna zmian poziomów stężeń SO_2 pomiędzy zimą a latem była podobna jak w ostatnich latach i wynosiła około $2,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Średnia roczna wartość stężenia SO_2 w roku 2025 była po raz kolejny najniższa w całej serii pomiarowej z lat 1995–2024 i wynosiła $1,36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Rys. 2.1.3). Od czterech lat jednakże, obserwuje się stabilizację średnich rocznych stężeń na bardzo niskim poziomie około $1,45 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Przebieg średniorocznych stężeń SO_2 od roku 1995 przedstawia Rys.2.1.3. Maksymalne wartości chwilowe (śr. 60-min) stężeń dwutlenku siarki w poszczególnych miesiącach roku 2025 charakteryzowały się jeszcze mniejszą zmiennością, niż w latach poprzednich oraz znacznie mniejszymi wartościami maksymalnymi w ciągu całego roku od analogicznych wartości mierzonych poprzednich latach. Najwyższe chwilowe stężenie SO_2 zmierzone w roku 2025 wyniosło $29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (w lutym) i było o $58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ niższe niż maksymalne stężenie SO_2 zmierzone w roku 2024. Wartości chwilowe (średnie 60-min) stężeń SO_2 znajdują się w Załączniku 2 dołączonym do niniejszego raportu. Wartości średnich miesięcznych wraz z wartościami maksymalnymi SO_2 przedstawia Tabela 2.1.1.



Rys. 2.1.3. Średnie roczne stężenie zanieczyszczeń gazowych CO, SO₂ i NO₂ Belsk 1995–2025 oraz pyłu zawieszonego PM10 2021–2025.

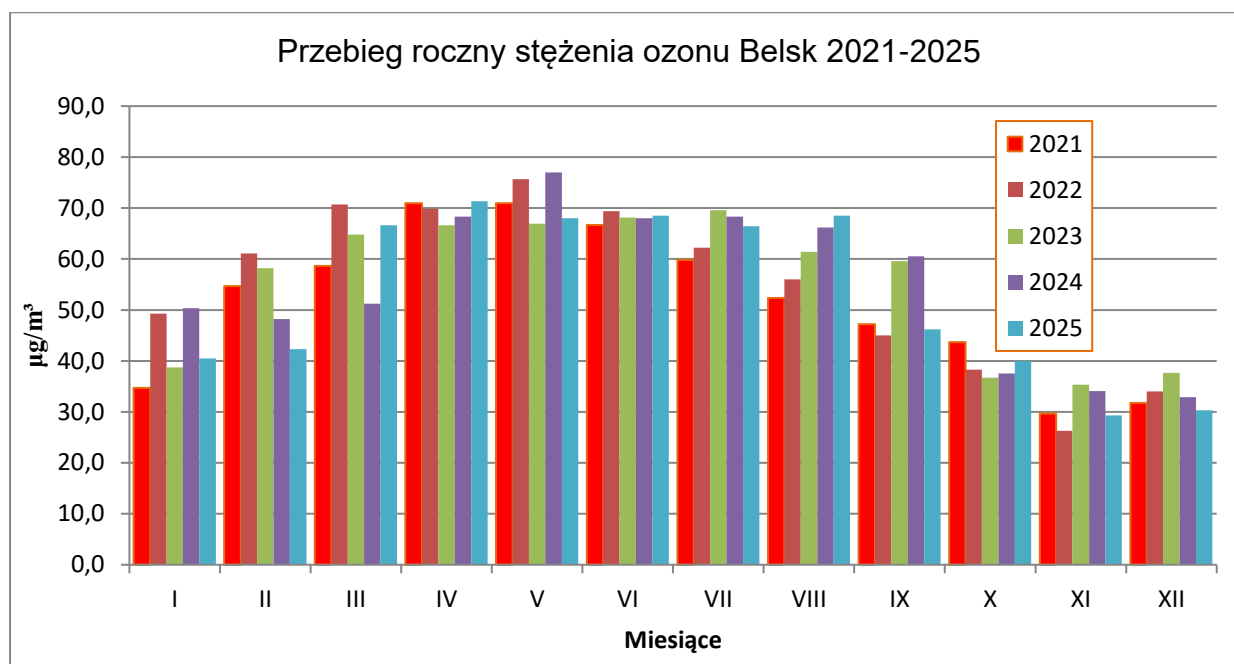
Tabela 2.1.1. Średnie miesięczne i wartości maksymalne koncentracji SO₂ w przyziemnej warstwie atmosfery w Belsku w roku 2025 (µg/m³).

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Śr. [µg/m ³]	1,6	2,9	2,5	0,9	1,5	0,7	0,7	1,4	1	1,2	0,9	1
max. [µg/m ³]	12	29	16	7	6	4	6	13	8	5	4	4

2.2. Ozon przyziemny i dwutlenek azotu

Rok 2025 był kolejnym rokiem pomiarów koncentracji ozonu oraz dwutlenku azotu na stacji w Belsku. Pomiary 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 2025 przebieg cyklu rocznego ozonu był bardzo zbliżony do średniego przebiegu rocznego z ostatnich kilkunastu lat. Na uwagę zasługuje zaobserwowane zjawisko nieprzerwanego pięcioletniego wzrostu średnich stężeń ozonu w sierpniu. Maksimum roczne średnich miesięcznych wystąpiło w kwietniu (średnia miesięczna wartość stężeń ozonu 71,3 µg/m³). Było o 5,7 µg/m³ niższe od maksimum z roku 2024 (w maju). Odchylenia średnich miesięcznych stężeń ozonu od wartości średnich z okresu 1991–2024 były mniejsze niż w latach

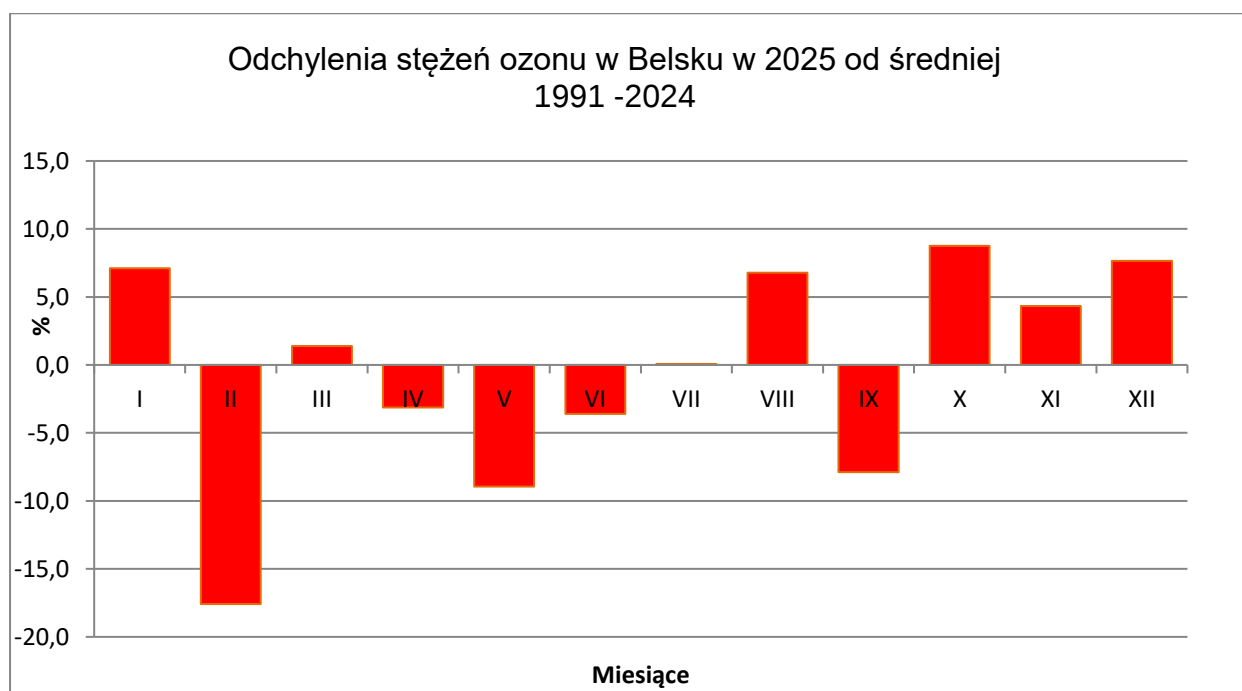
ubiegłych i były dodatnie dla siedmiu miesięcy (głównie jesienią i zimą – w październiku do +9%) i ujemne w pozostałym okresie, najbardziej w lutym (-18%).



Rys. 2.2.1. Przebieg roczny stężenia ozonu przy powierzchni Ziemi, Belsk 2025 na tle lat 2021–2024.

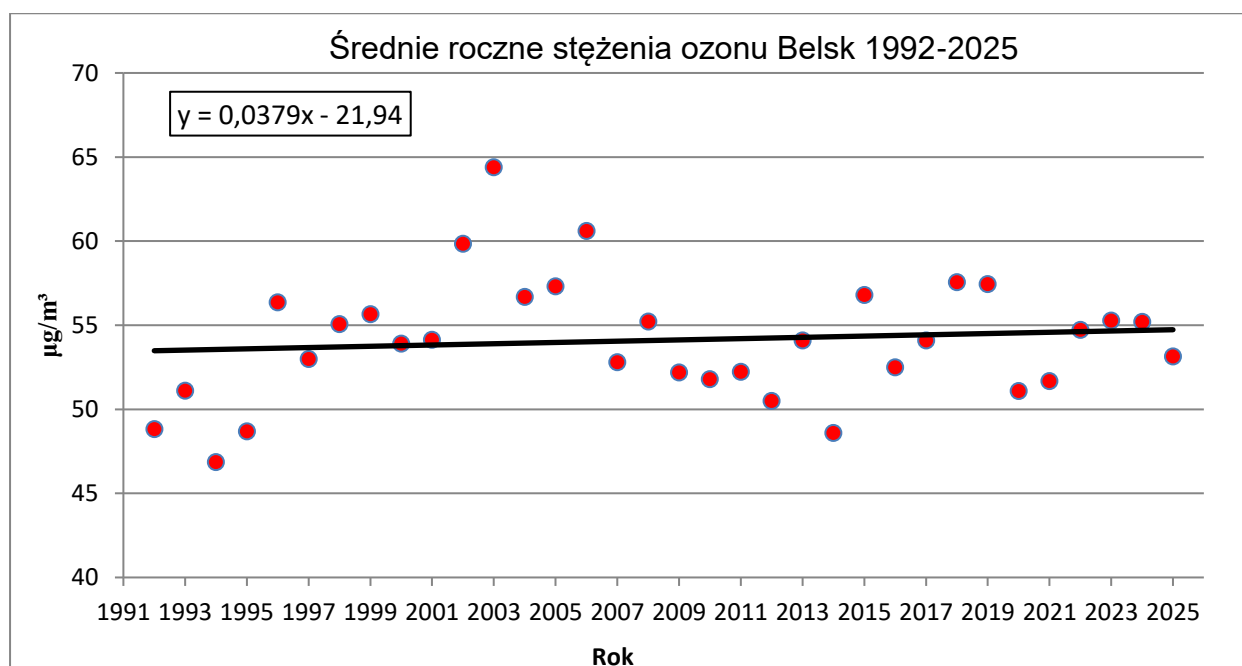
Przebieg roczny stężenia ozonu w przyziemnej warstwie atmosfery (średnie miesięczne) dla ostatnich pięciu lat przedstawia Rys. 2.2.1, a odchylenia od średnich miesięcznych z lat 1991–2024 przedstawia Rys. 2.2.2.

W roku 2025 maksymalne wartości chwilowe stężeń ozonu były porównywalne z obserwowanymi w ostatnich latach, szczególnie w okresie letnim. Maksymalne stężenie chwilowe ozonu (śr. 60-min) wyniosło $157 \mu\text{g}/\text{m}^3$ i zostało zmierzone w lipcu. Od marca do sierpnia z wyjątkiem czerwca i lipca wartości maksymalne stężenia ozonu były wyrównane i zawierały się w granicach od 123 do $157 \mu\text{g}/\text{m}^3$. W roku 2025 zwraca uwagę wczesne wiosenne maksimum stężeń średniomiesięcznych (w kwietniu) oraz stabilizacja stężeń ozonu w ciągu następnych miesięcy do końca sierpnia. Wartości chwilowe stężeń ozonu zawiera Załącznik nr 2 dołączony do niniejszego raportu.



Rys. 2.2.2. Odchylenia średnich miesięcznych stężeń ozonu przyziemnego w roku 2025 od średniej z lat 1991–2024 w Belsku.

Średnie roczne stężenie ozonu w przyziemnej warstwie atmosfery w roku 2025 wyniosło $53,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ i było niższe niż w roku 2024 ($55,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$) oraz zbliżone do średnich wartości w całej serii obserwowanych w latach 1991–2024. Można stwierdzić, że obserwowane w 2025 roku, zwłaszcza w okresie letnim poziomy stężenie ozonu były porównywalne do tych, jakie mierzono w Belsku pod koniec lat 90-tych. Rok 2025 był rokiem średnich stężeń ozonu w całym regionie, wskaźnik AOT40 (suma wartości przekroczeń stężeń ozonu ponad 40 ppb) wyniósł 18947 i był niższy od tego z roku 2024 o 4912 przy 24 przekroczeniach wartości średnich 8-godzinnych kroczących stężeń. Biorąc pod uwagę wyniki pomiarów z ostatnich trzydziestu lat, można stwierdzić, że obserwujemy kontynuację niewielkiego dodatniego długookresowego trendu stężeń ozonu. Przebieg średnich rocznych stężeń ozonu w latach 1992–2025 przedstawia Rys. 2.2.3. Wartości średnich miesięcznych wraz z wartościami maksymalnymi ozonu w roku 2025 przedstawia Tabela 2.2.1.

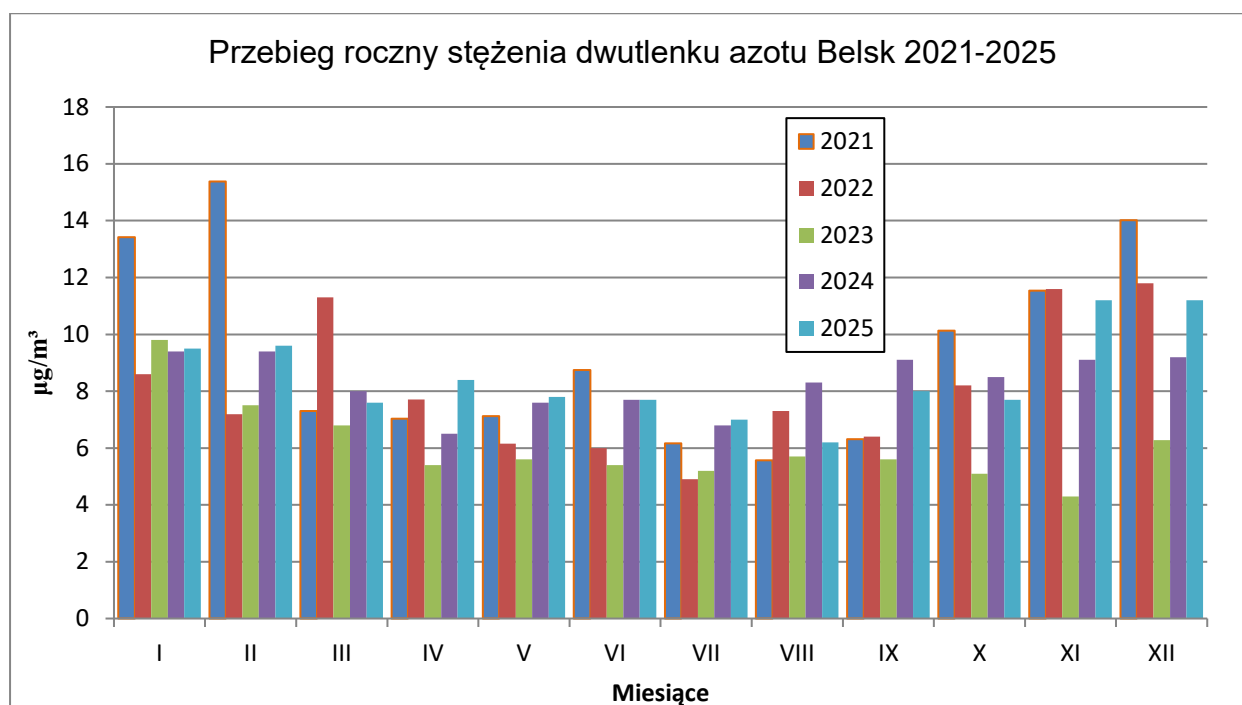


Rys. 2.2.3. Średnie roczne stężenia ozonu przy powierzchni Ziemi, Belsk 1992–2025.

Tabela 2.2.1. Średnie miesięczne i wartości maksymalne koncentracji ozonu w przyziemnej warstwie atmosfery w Belsku w roku 2025 (µg/m³).

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Śr. [µg/m³]	40,5	42,3	66,6	71,3	68	68,5	66,4	68,5	46,2	40	29,3	30,3
Max. [µg/m³]	73	94	125	123	128	146	157	127	114	73	60	69

Stężenie dwutlenku azotu w roku 2025 w Belsku osiągało wartości porównywalne do obserwowanych w ostatnich latach oraz wyższe niż w roku 2024, trend stężeń obserwowany w ciągu ostatnich 13 lat stabilizuje się na poziomie zerowym. Przebieg sezonowy stężeń dwutlenku azotu w roku 2025 był słabo zaznaczony, ale wciąż najniższe stężenia występowały w sezonie letnim, a najwyższe w sezonie zimowym. W okresie wiosenno-letnim średnie miesięczne zawierały się między 6,2 a 8,4 µg/m³, jesienią i zimą między 7,7 a 11,2 µg/m³ (Rys. 2.2.4). Odchylenia średniomiesięcznych stężeń NO₂ od średniej z lat 1995–2024 w roku 2025 były ujemne dla 9 miesięcy, do -31% a dodatnie dla 3 miesięcy, do +13%. (Rys. 2.2.5).

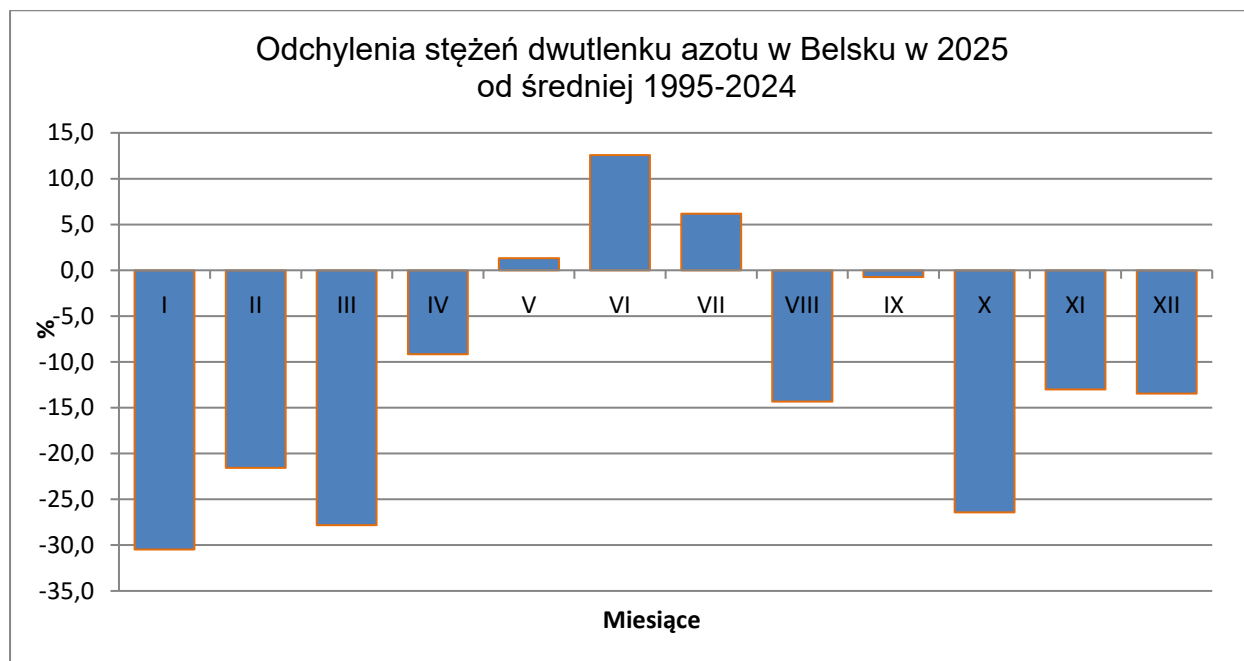


Rys. 2.2.4. Przebieg roczny stężenia NO_2 przy powierzchni Ziemi, Belsk 2025 na tle lat 2021–2024.

Najwyższe w roku 2025 średnie miesięczne stężenie dwutlenku azotu zmierzono w listopadzie i grudniu (po $11,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ – wyższe niż w roku 2024) a najniższe w sierpniu ($6,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ – wyższe niż w roku 2024). Przebieg średnich miesięcznych stężeń dwutlenku azotu w latach 2021–2025 przedstawia Rys. 2.2.4.

Średnie roczne stężenie dwutlenku azotu w przyziemnej warstwie atmosfery w roku 2025 wyniosło $8,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ i było wyższe od tego w roku 2024 o $0,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Obserwowany wzrost poziomu średniorocznych stężeń NO_2 wystąpił równolegle z obserwowanym wzrostem wartości stężeń CO w roku 2025 oraz spadkiem stężeń ozonu w roku 2025.

Wartości chwilowe stężeń dwutlenku azotu zawiera Załącznik nr 2 dołączony do niniejszego raportu. Maksymalne wartości chwilowe dwutlenku azotu były przeciętne w stosunku do wartości zaobserwowanych w ubiegłych latach. Wartość maksymalna – śr. 60-min wyniosła $51 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (w lutym) i była niższa o $9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ od tej zmierzonej w roku 2024 (w czerwcu). Wartości średnich miesięcznych wraz z wartościami maksymalnymi dwutlenku azotu w roku 2025 przedstawia Tabela 2.2.2.



Rys. 2.2.5. Odchylenia średnich miesięcznych stężeń NO_2 w roku 2025 od średniej z lat 1991–2024 w Belsku.

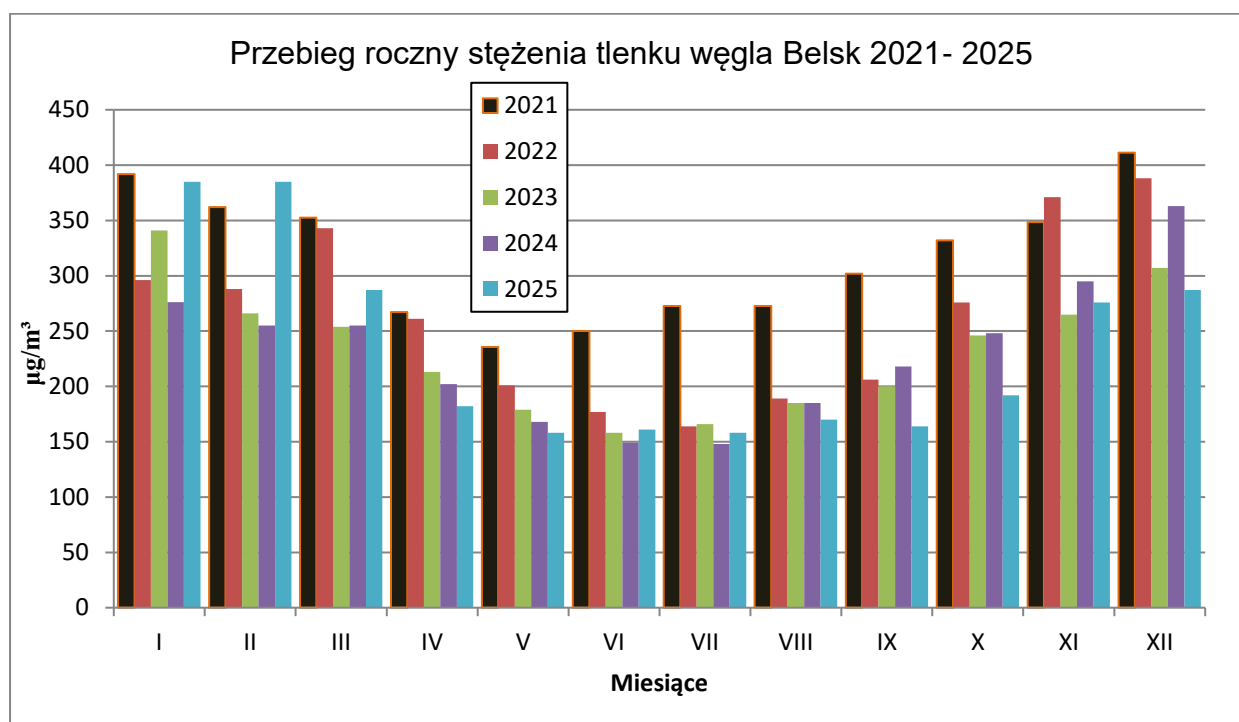
Tabela 2.2.2. Średnie miesięczne i wartości maksymalne koncentracji NO_2 w przyziemnej warstwie atmosfery w Belsku w roku 2025 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
śr. [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	9,5	9,6	7,6	8,4	7,8	7,7	7	6,2	8	7,7	11,2	11,2
Max. [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	36	51	27	32	19	22	20	24	26	32	43	36

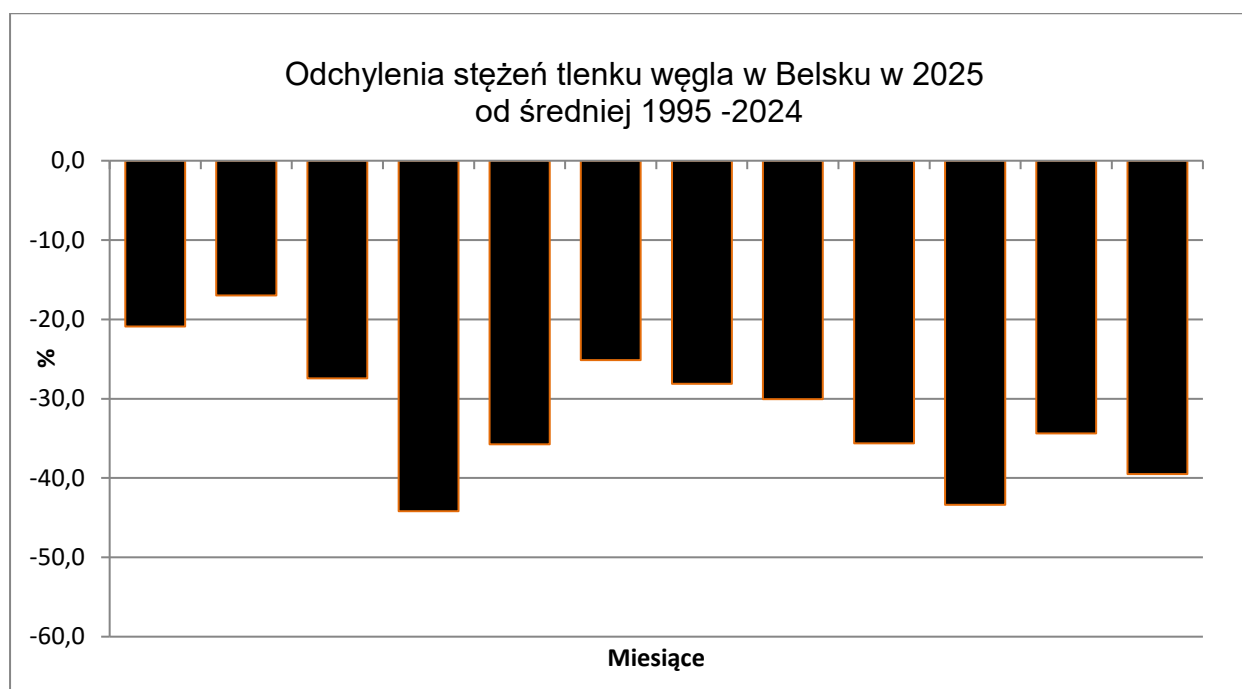
2.3. Tlenek węgla

W roku 2025 kontynuowano w Belsku pomiary stężeń tlenu węgla w przyziemnej warstwie atmosfery. Pomiar wykonywany był przyrządem firmy Horiba model APMA 370. 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 znacznie poniżej $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Próg wykrywalności nowego analizatora jest szacowany na ok. $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (dla poprzedniego analizatora wynosił ok. $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$), co skutkuje większą dokładnością danych uzyskiwanych w okresie letnim, kiedy stężenia tlenu węgla w rejonie Belska okresowo spadają do $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Również bardzo ograniczony dryf punktu zerowego stosowanego analizatora umożliwia dokładniejszy pomiar niskich (rzędu $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$) stężeń CO w powietrzu otaczającym.

W roku 2025 przebieg roczny stężenia CO charakteryzował się wyraźną sezonowością podobnie jak w latach poprzednich z porównywalną amplitudą zmienności stężeń. Względnie niskie stężenia tlenu węgla zmierzono od kwietnia do października z minimum w lipcu i w maju – $158 \mu\text{g}/\text{m}^3$ o $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ wyżej od lipcowego minimum roku 2024. Maksymalne stężenie średniomiesięczne wyniosło $385 \mu\text{g}/\text{m}^3$ w styczniu i lutym, więcej o $22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ niż w roku 2024. Odchylenia stężeń w stosunku do średniej wieloletniej były dla wszystkich miesięcy roku ujemne; odchylenia sięgały ok. -44% dla kwietnia (Rys. 2.3.2). Średnie roczne stężenie tlenu węgla było niższe o $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ od tego z roku 2024 i wyniosło $233 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Maksymalne wartości chwilowe stężeń tlenu węgla (średnie 60-min) charakteryzowały się sezonowością jak średnie miesięczne w granicach $230\text{--}1118 \mu\text{g}/\text{m}^3$ – patrz Tabela 2.3.1. Maksymalne stężenie chwilowe w roku wyniosło $1118 \mu\text{g}/\text{m}^3$ i było o ok. $259 \mu\text{g}/\text{m}^3$ wyższe od maksymalnych wartości z roku 2024. Przebieg roczny stężenia CO w Belsku w roku 2025 (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 2025 na tle lat 2021–2023.



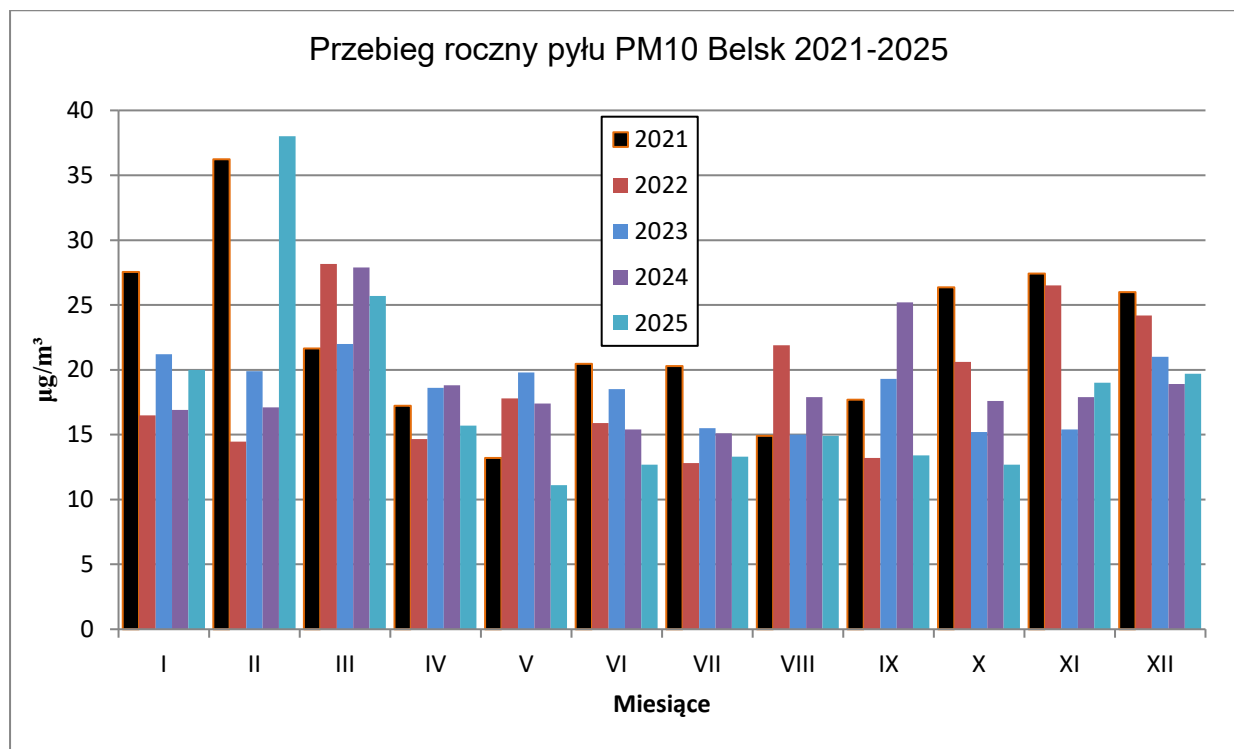
Rys. 2.3.2. Odchylenia średnich miesięcznych stężeń CO w roku 2025 od średniej z lat 1995–2024 w Belsku.

Tabela 2.3.1. Średnie miesięczne i wartości maksymalne koncentracji CO w przyziemnej warstwie atmosfery w Belsku w roku 2025 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
śr. [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	385	385	287	182	158	161	158	170	164	192	276	287
max [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	1118	913	868	445	459	488	230	475	270	478	594	692

2.4. Pył zawieszony PM10

Rok 2025 był piątym kompletnym rokiem ciągłych pomiarów w Belsku pyłu zawieszonego PM10. Pomiar wykonywany był przyrządem firmy Environnement model MP101M. Analizator działa w oparciu o zjawisko absorpcji promieniowania beta przez filtr, na którym jest osadzany zbierany pył. Średnioroczne stężenie wyniosło $18,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, co jest zbliżoną do najniższych wartości zmierzonych w województwie mazowieckim w roku 2025 oraz nieznacznie (o $0,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$) niższą niż w roku 2024. Najwyższe stężenia mierzono w sezonie zimowym, z maksimum rocznym w lutym – $38,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (skutek epizodu pyłowego o szerszym zasięgu), najniższe w pozostałych miesiącach roku z minimum w maju – $11,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$.



Rys. 2.4.1. Przebieg roczny stężenia PM10 przy powierzchni Ziemi, Belsk 2025 na tle lat 2021–2024.

Maksymalne stężenie pyłu PM10 (średnia 1-godzinna) zmierzone w roku 2025 w Belsku wyniosło $92 \mu\text{g}/\text{m}^3$ i zostało zmierzone w lutym. Nie zanotowano przekroczeń wartości dopuszczalnej. Przebieg roczny stężeń pyłu zawieszonego PM10 przedstawiono na rys 2.4.1, wartości średnich miesięcznych stężeń oraz maksymalnych wartości chwilowych przedstawia Tabela 2.4.1.

Tabela 2.4.1. Średnie miesięczne i wartości maksymalne koncentracji PM10 w przyziemnej warstwie atmosfery w Belsku w roku 2025 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
śr. [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	20	38	25,7	15,7	11,1	12,7	13,3	14,9	13,4	12,7	19	19,7
max [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	82	92	81	50	37	56	37	39	40	37	48	55

Wybrane wyniki pomiarów stężeń zanieczyszczeń powietrza w roku 2025 (średnich 1-godz i średnich kroczących 8 godz.) przedstawione są w Tabelach 2.4.2 i 2.4.3.

Tabela 2.4.2. Wybrane wyniki pomiarów zanieczyszczeń gazowych powietrza – średnie 1-godz.

Parametr	Jednostki	SO ₂	O ₃	NO ₂	PM10	CO
Kompletność serii pomiarowej	%	98,3%	98,8%	98,4%	98,9%	98,7%
Percentyl S10	µg/m ³	0,3	21	3	6	142
Percentyl S50	µg/m ³	1,0	51	7	15	186
Percentyl S90	µg/m ³	2,5	88	15	32	387
Percentyl S98	µg/m ³	6,0	109	23	55	565
Percentyl S99,8	µg/m ³	13,5	127	32	79	915
Wartość najwyższa	µg/m ³	29,2	157	51	92	1118
Liczba wyników pomiarów przewyższających poziom informowania		0	0	0	0	0

Tabela 2.4.3. Wybrane wyniki pomiarów zanieczyszczeń gazowych powietrza – średnie 8-godz kroczące oraz wskaźnik ozonowy AOT 40.

Parametr	Jednostki	O ₃	CO
Kompletność serii pomiarowej	%	98,3%	98,3%
Percentyl S10	µg/m ³	23	144
Percentyl S50	µg/m ³	52	186
Percentyl S90	µg/m ³	85	381
Percentyl S98	µg/m ³	103	547
Percentyl S99,8	µg/m ³	121	867
Wartość najwyższa	µg/m ³	143	978
Liczba wyników pomiarów przewyższających wartość dopuszczalną		24	0
Wartość wskaźnika ozonowego AOT 40	µg/m ³ ·godz	18947	

Wszystkie analizatory zanieczyszczeń powietrza pracujące na stacji COG 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.

3. NADFIOLETOWE PROMIENIOWANIE SŁONECZNE UV-B

Aleksander Pietruczuk, Jakub Wink, Piotr Sobolewski

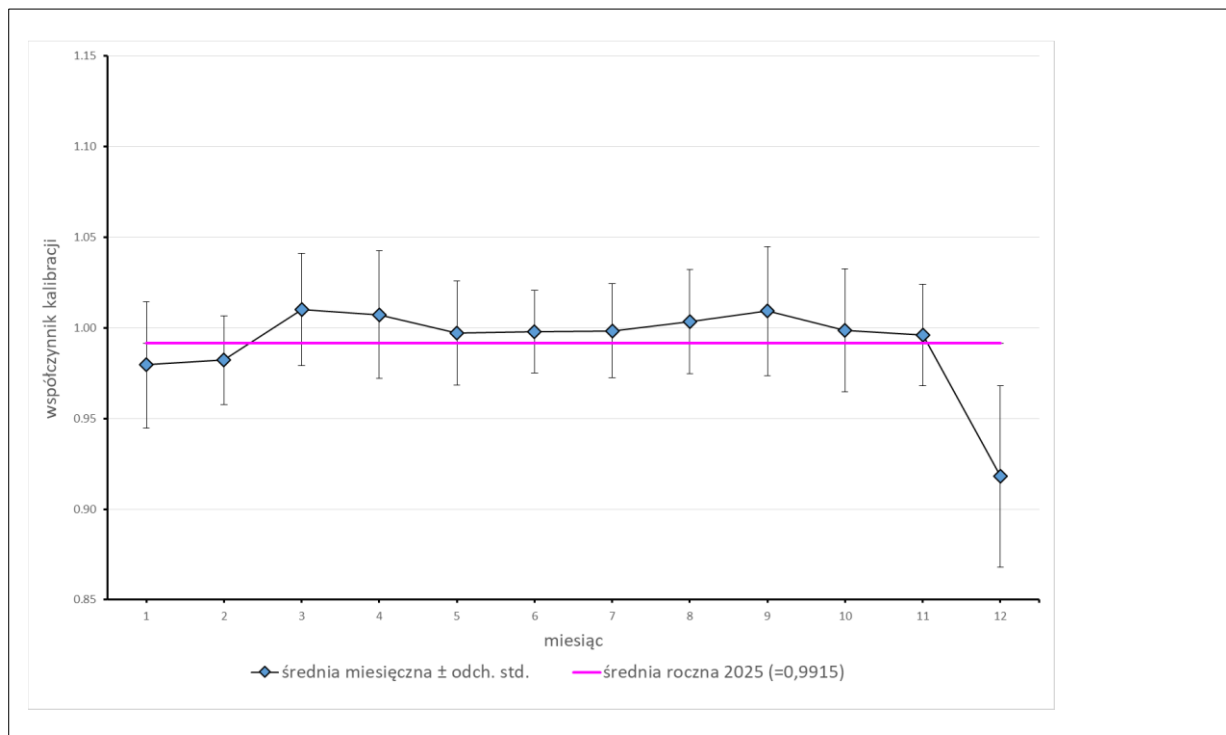
W roku 2025 w COG PAN w Belsku kontynuowano monitoring promieniowania ultrafioletowego Słońca w zakresie erytemalnym (UV-B) oraz czasu usłonecznienia. Wykonane pomiary były podstawą do wyznaczenia dawek dobowych napromienienia promieniowaniem o skuteczności erytemalnej (tzw. napromienienie erytemalne tj. wywołujące rumień na skórze) oraz indeksu UV-B, który określa maksymalną moc napromienienia erytemalnego zarejestrowanego danego dnia.

Pomiary promieniowania słonecznego w zakresie UV-B prowadzone są w Obserwatorium w Belsku od połowy lat siedemdziesiątych. W latach 1976–1994 pomiary te wykonywane były przy pomocy miernika Robertsona-Bergera (R-B). Od roku 1993 monitoring promieniowania UV-B prowadzony był przy pomocy mierników firmy Solar Light (SL) Co., Filadelfia, USA. Jeden rok wspólnej pracy miernika R-B i UV-biometru firmy 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. Równolegle 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-B w COG Belsk.

Przez cały rok wyniki uzyskiwane z miernika K&Z poddawane są bieżącej kontroli, która polega na porównywaniu wartości chwilowych mocy promieniowania UV-B uzyskiwanych z miernika K&Z oraz 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-1. 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 w roku 2025 wynosiła 0,9915, a jego sezonowe wahania wynosiły $\pm 2\%$, z wyjątkiem grudnia, kiedy obliczona odchyłka wyniosła -7% . Grudzień cechowało małe

ustonecznienie (vide Rys. 3.3), co przekładało się na niedostateczną ilość dni odpowiednich do porównania, a tym samym powodowało jego mniejszą dokładność.



Rys. 3.1. Zmienność roczna współczynnika kalibracyjnego miernika Kipp&Zonen w 2025 roku.

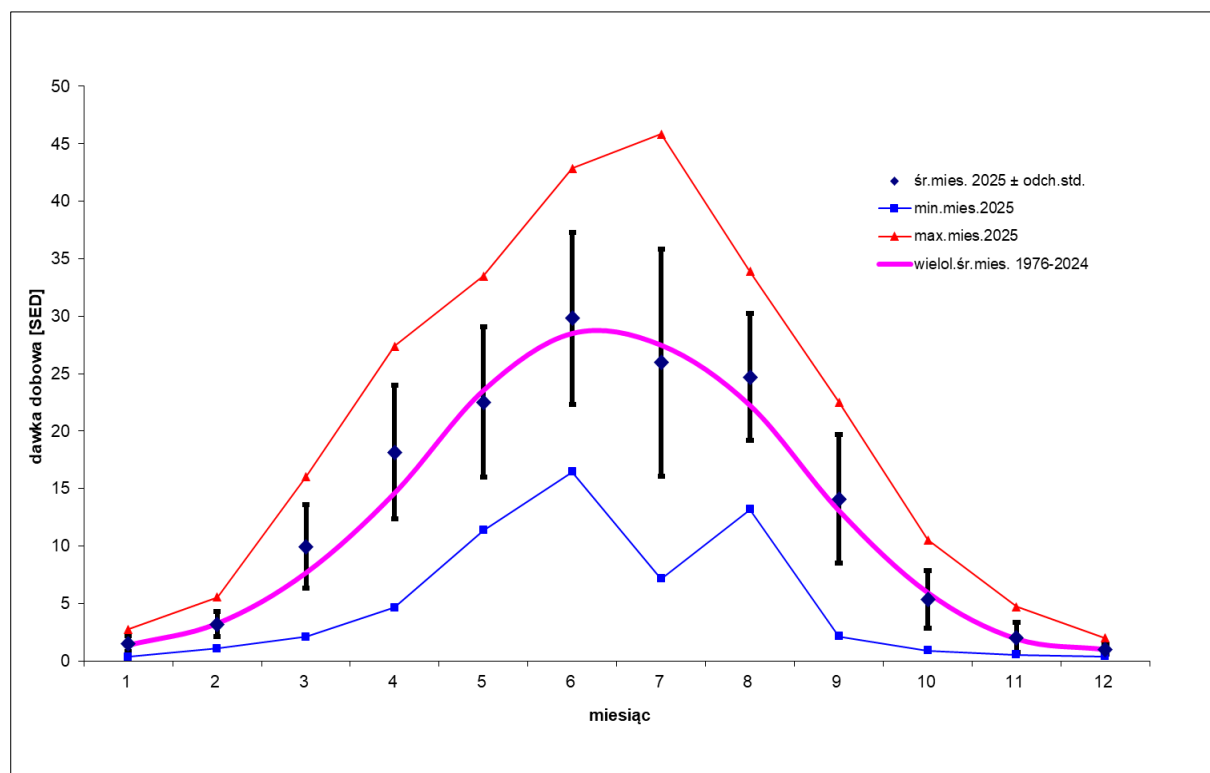
Wyniki pomiarów dokonanych w roku 2025, dla poszczególnych miesięcy, przedstawiono w Załączniku 3 w postaci dawek dobowych oraz indeksu UV-B. Dawki dobowe wyrażone są w SED (Standard Erythema Dose). 1 SED jest równy 100 J/m^2 napromienienia erytemalnego. Jednostka SED jest proponowana przez International Organization for Standardization (ISO) zgodnie ze standardem ISO 17166:1999 w miejsce jednostki MED. Indeks UV-B jest iloczynem maksymalnej mocy promieniowania UV-B [W/m^2] zmierzonej danego dnia i czynnika 40 [m^2/W]. Jest to bezwymiarowy parametr określający maksymalną zarejestrowaną moc promieniowania UV-B, a jego wartość zawiera się w przedziale od 0 do 16.

Tabela 3.1. Średnie miesięczne wartości dziennych słonecznego promieniowania UV-B.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
	UV-B	UV-B	UV-B	Indeks UV	US	Ozon	UV-B	Odch.
							1976-2024	
2025	[SED]	[SED]	[SED]		[Godz.]	[D]	[SED]	
Mies.	Średnia	Min.	Max.	Średnia	Średnia	Średnia	Średnia	[%]
1	1,50	0,35	2,76	0,5	1,7	314	1,38	9,13
2	3,19	1,08	5,56	0,9	2,9	368	3,25	-1,95
3	9,96	2,09	16,03	2,3	5,8	315	7,66	29,93
4	18,15	4,63	27,39	3,8	8,9	361	14,62	24,13
5	22,53	11,36	33,49	5,0	7,9	381	23,55	-4,33
6	29,81	16,46	42,84	6,4	9,4	334	28,50	4,58
7	25,95	7,13	45,83	5,9	7,2	333	27,47	-5,52
8	24,71	13,19	33,88	5,3	9,6	310	22,23	11,14
9	14,10	2,15	22,52	3,6	5,7	280	13,08	7,80
10	5,36	0,90	10,53	1,5	3,3	285	8,94	-9,90
11	2,02	0,53	4,73	0,6	1,7	281	1,92	5,27
12	1,01	0,38	2,00	0,3	0,6	297	0,99	2,43

Objaśnienia: US – uśłonecznienie, średnia miesięczna liczba godzin ze słońcem [godz.];
 Odch. – odchylenie średniej miesięcznej z dawek dobowych UV-B w 2025 r. od średniej wieloletniej 1976–2024 [%].

Na Rys. 3.2 przedstawiono średnie miesięczne dawki dobowe napromienienia erytemalnego w 2025 r. wraz z odchyleniami standardowymi w odniesieniu do średnich wieloletnich oraz maksymalne i minimalne wartości dawek dobowych, zarejestrowanych w kolejnych miesiącach roku. W Tabeli 3.1 przedstawiono wybrane parametry (wartości średnie) promieniowania słonecznego dla poszczególnych miesięcy 2025 r.



Rys. 3.2. Średnie miesięczne z dawek dobowych napromienienia erytemalnego oraz największe i najmniejsze wartości zarejestrowane w danym miesiącu.

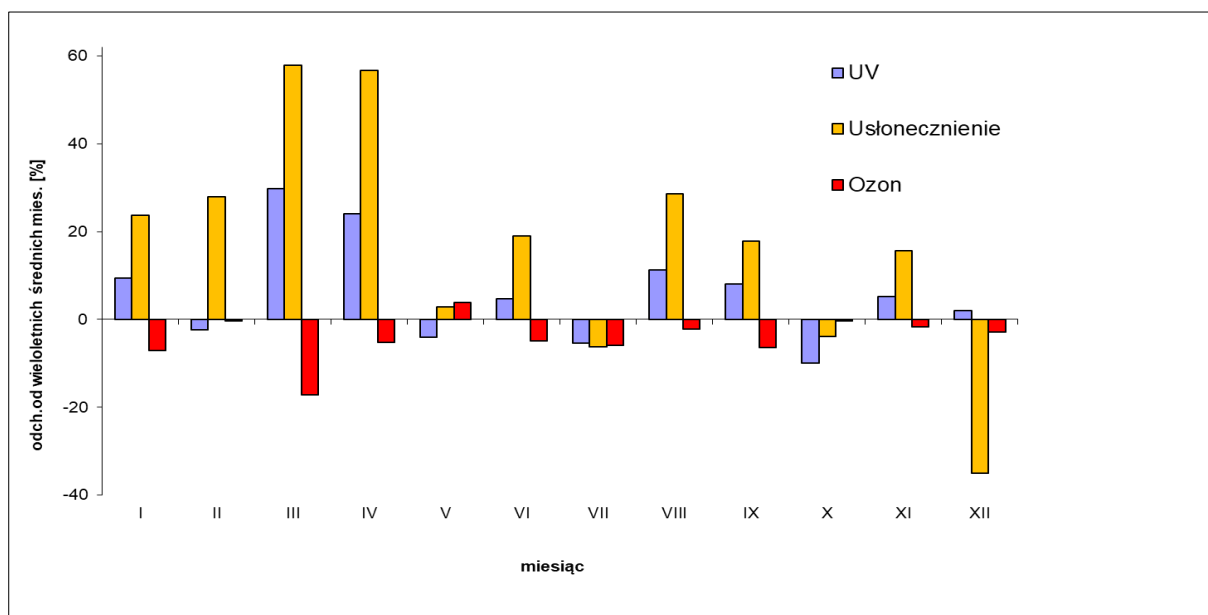
Na Rys. 3.3 przedstawione zostały odchylenia procentowe zarejestrowanych w 2025 roku średnich miesięcznych dawek dobowych napromienienia erytemalnego od średniej wieloletniej (1976–2024) w kolejnych miesiącach roku. Na tym samym rysunku przedstawiono także odchylenia procentowe zarejestrowanych w roku 2025 średnich miesięcznych wartości ustłonecznienia i koncentracji ozonu od ich średnich wieloletnich.

Rok 2025, w porównaniu z poprzednim, charakteryzował się większą zmiennością odchyleń od średniej wieloletniej z przewagą nadwyżek nad niedoborami. Największe niedobory napromienienia erytemalnego zanotowano w październiku i w lipcu, wyniosły one tylko 10% i 6%. Były one stosunkowo niewielkie, w porównaniu do poprzedniego roku, kiedy to w lutym i grudniu największe niedobory wynosiły odpowiednio 22% i 17%. Kolejne, bardzo małe, niedobory rzędu 4% i 2% wystąpiły w maju i lutym.

Niedobory napromienienia UV-B we wspomnianych miesiącach wiążą się głównie z niskim ustłonecznieniem. Natomiast większość jego nadwyżek wiąże się zarówno z nadwyżkami ustłonecznienia, jak też z niedoborami ozonu, znacznie większymi niż w roku ubiegłym. Nadwyżki te wyniosły: 30% w marcu, 24% w kwietniu, 11% w sierpniu, 9% w styczniu, 8% we wrześniu, 5% w listopadzie i czerwcu oraz 2% w grudniu. Największe nadwyżki ustłonecznienia wystąpiły w marcu (58%) i kwietniu (57%), natomiast największy niedobór miał miejsce w grudniu i wynosił 35%.

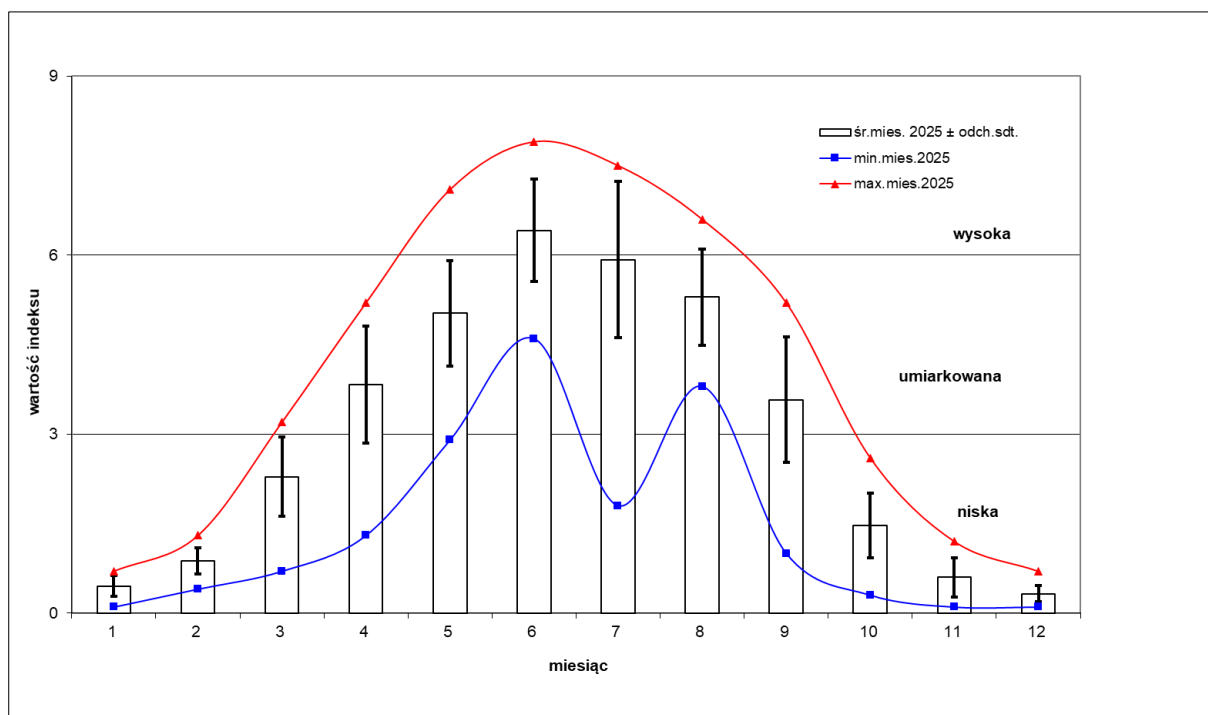
Jak wspomniano, w roku 2025 wystąpiły zarówno większe niedobory ozonu, jak też znacznie większe odchylenia jego zawartości od średniej wieloletniej, w porównaniu z rokiem 2024. Wtedy odchylenia te wynosiły jedynie $\pm 3\%$ (z wyjątkiem grudnia – deficyt 4,6%). W roku 2025

niedobory występowały przez cały rok, z wyjątkiem maja, kiedy to nadwyżka wyniosła 4%. Największe niedobory miały miejsce: w marcu (17%), styczniu (7%), w lipcu i wrześniu (6%) oraz w kwietniu i czerwcu (5%).

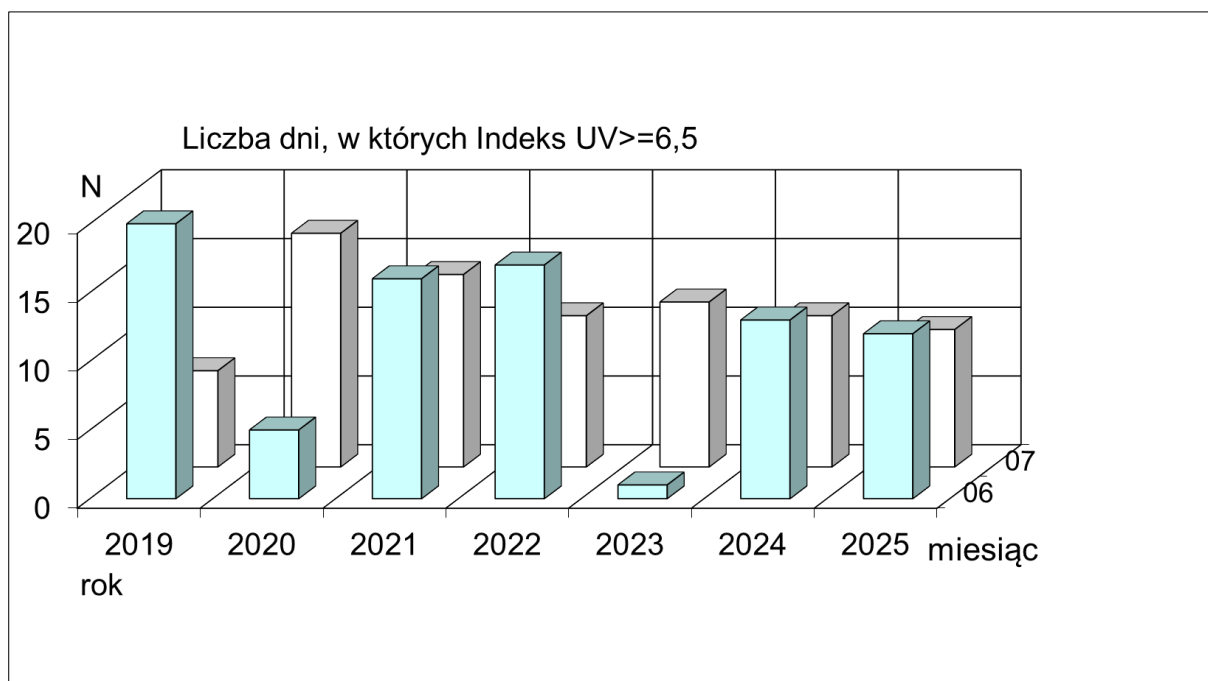


Rys. 3.3. Odchylenie od średniej wieloletniej dawek miesięcznych napromienienia erytemalnego, usłonecznienia oraz całkowitej zawartości ozonu.

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-B zanotowano w miesiącach letnich, co wiąże się z małymi kątami zenitalnymi Słońca w tym okresie. Warto zwrócić uwagę na prezentowane wartości maksymalne i minimalne. Wartości maksymalne są podobne do tych z lat poprzednich i nie ma tu żadnych znaczących przekroczeń. Najwyższy indeks zarejestrowano w czerwcu i wynosił on 7,9 w porównaniu do 7,7 zarejestrowanego w lipcu, w roku 2024. Wartość minimalna w lipcu wyniosła 1,8 i była dwukrotnie mniejsza niż w roku poprzednim, kiedy to wynosiła 3,7. Wspomniany, najwyższy indeks UV-B wynoszący 7,9 zarejestrowano dwa razy, kolejno 28 i 29 czerwca. Wartość indeksu większa lub równa 6,5 została przekroczona 22 razy, tj. o dwa razy mniej niż w roku ubiegłym, co zostało zilustrowane na rysunku 3.5. Dla przypomnienia – w roku 2025 największą wartość indeksu UV-B wynoszącą 7,7 zarejestrowano 2 lipca. Wartość indeksu 7 i więcej była zanotowana 11 razy, czyli o trzy razy więcej niż w roku ubiegłym.



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



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

Podsumowując, w roku 2025 kontynuowano monitoring promieniowania słonecznego z zakresu UV-B w Centralnym Obserwatorium Geofizycznym w Belsku. Prowadzono również stałą weryfikację pomiarów przez porównanie ich ze spektrofotometrem Brewera. W miesiącach

letnich, czyli w okresie z największymi rejestrowanymi wartościami indeksu UV-B i napromienienia erytemalnego nie rejestrowano znaczących odchyleń od średniej wieloletniej w lipcu i w czerwcu (Rys. 3.5). Liczba dni z wysokim indeksem UV-B wyniosła w 2025 roku 12 w czerwcu i 10 w lipcu, była więc w obu miesiącach porównywalna i bardzo zbliżona do wartości z roku 2024. Wartości te były nieznacznie mniejsze od średnich wartości liczonych za okres 2019–2024 (po 12 dni dla czerwca i lipca). Liczbę dni z indeksem UV-B $\geq 6,5$ podaje się jedynie dla czerwca i lipca, ponieważ w innych miesiącach takie wartości występują bardzo rzadko. Jednakże trzeba zaznaczyć, że w 2025 r. wartość 6,5 została osiągnięta lub przekroczona jeszcze dwa razy w pierwszej połowie sierpnia, co nie jest ujęte na tym rysunku. Przekroczenie to związane jest zarówno z niedoborem ozonu jak również z większym usłonecznieniem, zanotowanym w tym czasie. Dla porównania, w roku 2024 nie zanotowano takich przekroczeń poza czerwcem i lipcem.

4. ZMIANA ZAWARTOŚCI OZONU W ATMOSFERZE NAD BELSKIEM W 2025 R.

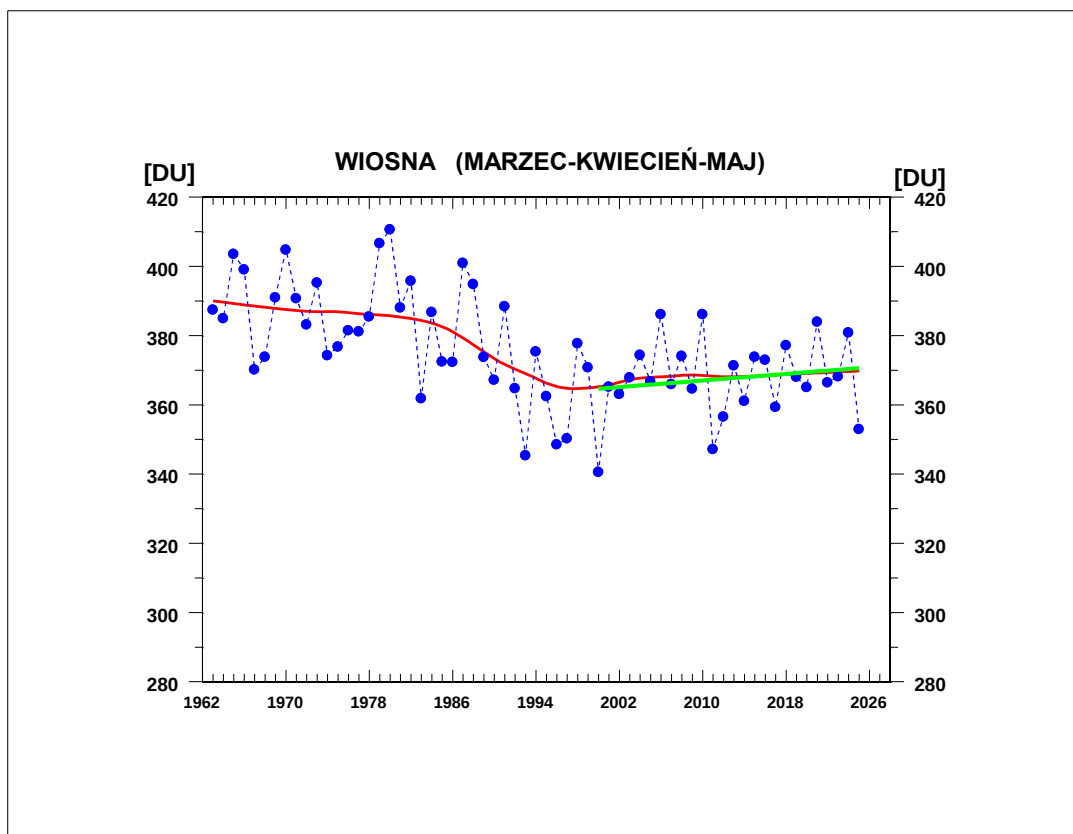
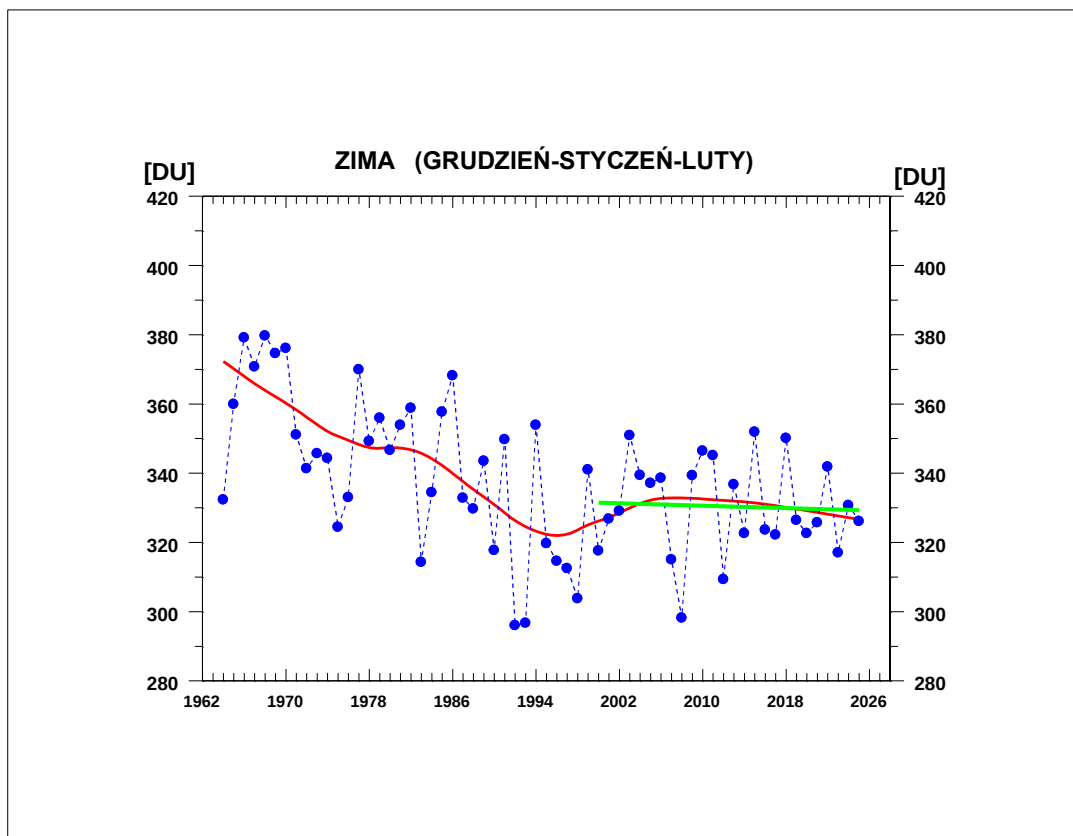
Janusz Krzyścin, Bonawentura Rajewska-Więch, Agnieszka Czerwińska

4.1. Całkowita zawartość ozonu w Belsku

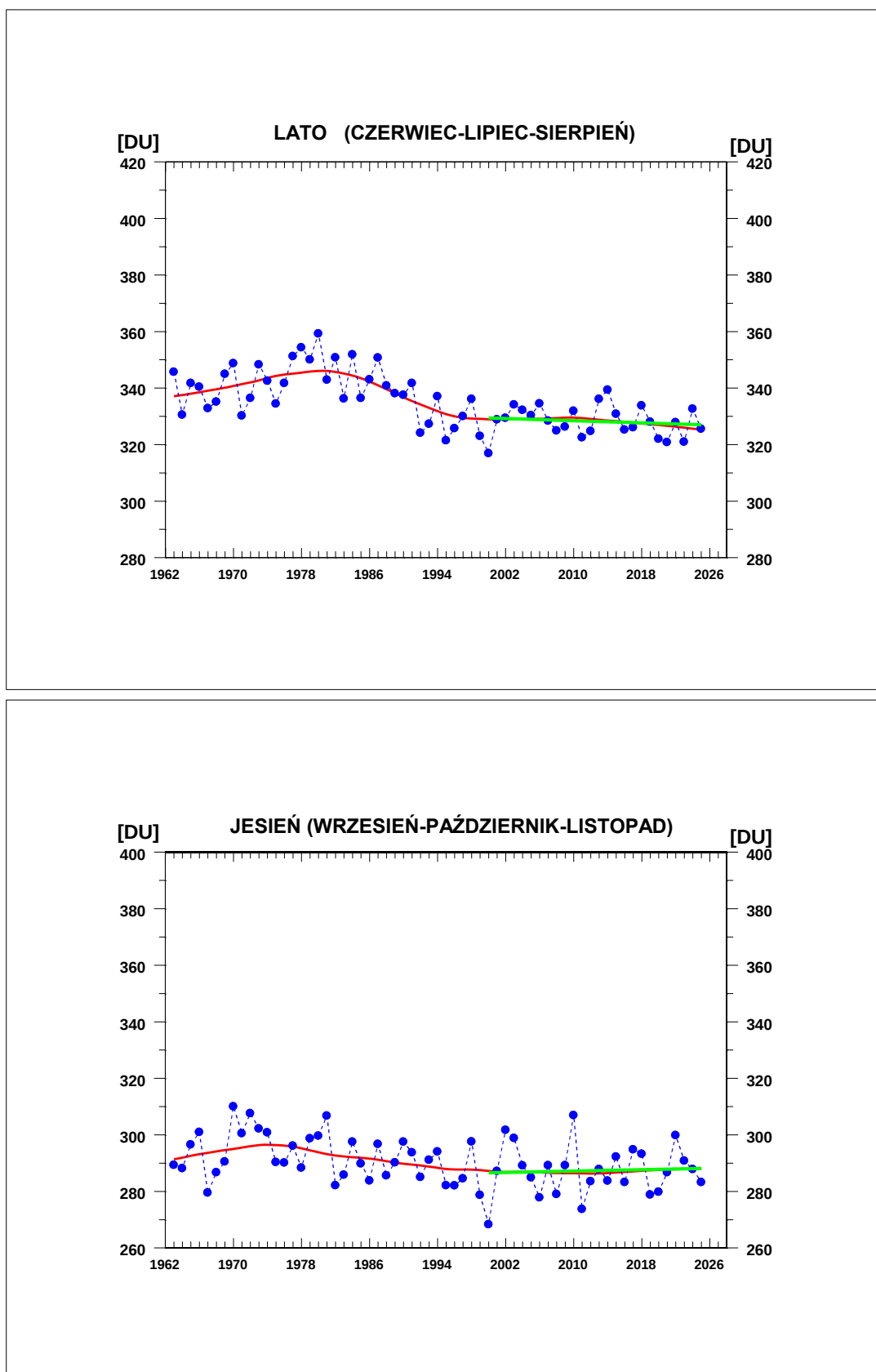
W COG w Belsku w ciągu całego 2025 r. wykonywano pomiary całkowitej zawartości ozonu (CZO3). Wartości średnie (CZO3) niższe od wieloletnich (1963–2024) średnich miesięcznych obserwowano w styczniu (7,1%), lutym (0,3%), marcu (17,1%), kwietniu (5,2%), czerwcu (4,8%), lipcu (1,2%), sierpniu (2,2%), wrześniu (6,4%), październiku (0,3%), listopadzie (2,7%) i grudniu (2,9%), (Rys. 1.1.1a). Średnie miesięczne odchyłki CZO3 w 2025 roku od wieloletniej średniej (1963–2024) były dodatnie tylko w maju (3,8%). Wartości odchyłek średnich dziennych od średnich wieloletnich przekraczały –10%, zwłaszcza w sezonie zimowym (Rys. 4.1.1).

Analizując długookresowe zmiany średnich sezonowych CZO3 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 CZO3. Wyrażna spadkowa tendencja, która pojawiła się z końcem lat 70-tych została zatrzymana około 1996 r. Od tego momentu obserwujemy wzrostową tendencję w średnich rocznych CZO3, a także w zimowych i wiosennych średnich wartościach CZO3. Na początku XXI wieku powyższa tendencja zostaje zahamowana i średnie wartości CZO3 oscylują wokół ustalonego poziomu bez wyraźnego trendu. Liniowe trendy (proste w kolorze zielonym na Rys. 4.1.1) w danych sezonowych i rocznych CZO3 są nieistotne statystycznie w okresie 2000–2025. Natomiast stabilizację wartości ozonu na poziomie minimum z połowy lat 90-tych XX wieku obserwujemy w sezonach letnim i jesiennym po 1996 r.

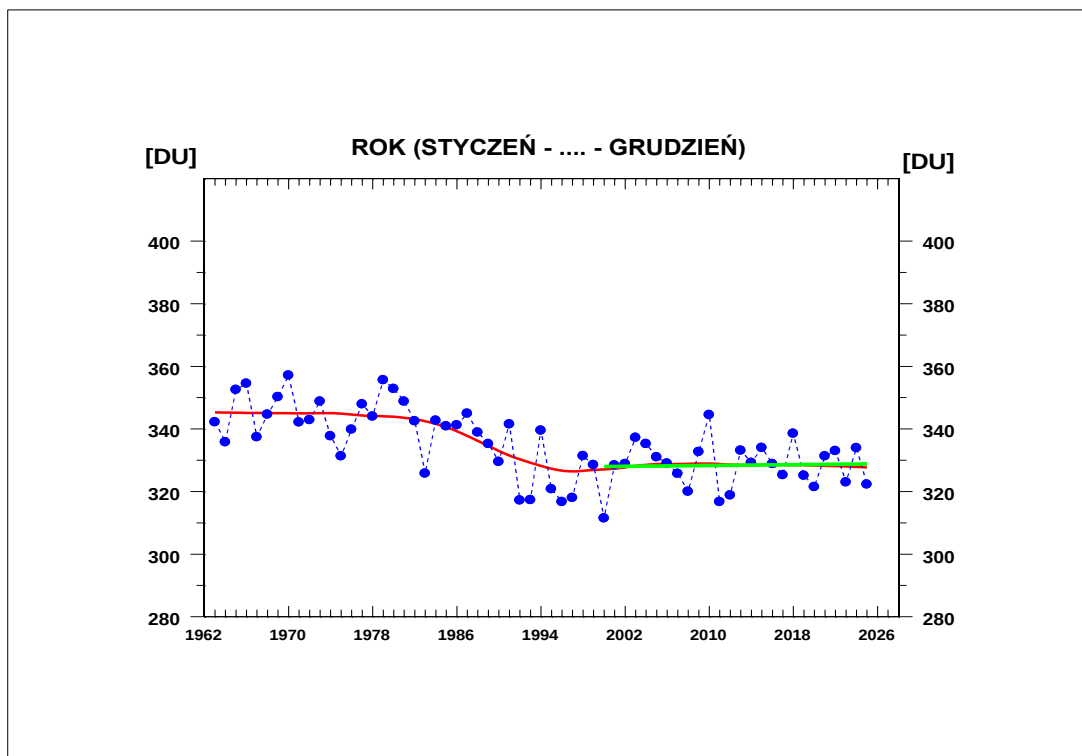
W 2025 r. średnia CZO3 w okresie czerwiec-wrzesień (314,0 D) była około 3,6% poniżej wieloletniej normy (325,7 D) z okresu 1963–2025. W tej sytuacji przy braku zachmurzenia poziom promieniowania UV-B przy powierzchni ziemi powinien być wyższy o około 4,0% w stosunku do wieloletniej normy. Wartości CZO3 w sezonie letnim roku 2025 wskazują, że wcześniej w sezonie zimowym (styczeń–luty–marzec) poziom CZO3 był również poniżej średniej wieloletniej (Rys. 4.1.2). W 2025 r. powyższa zimowa średnia wynosiła 333,7 D i była 7,7% poniżej wieloletniej normy. Wystąpienie zimą wartości CZO3 znacznie poniżej wieloletniej normy jest sygnałem osłabienia wielkoskalowej komórki cyrkulacyjnej w stratosferze prowadzącej do wymiany masy między równikiem a biegunem północnym (tzw. cyrkulacja Brewera-Dobsona), która w zimie powoduje akumulację ozonu w średnich i wysokich szerokościach geograficznych. Niedobory CZO3, które wystąpiły w okresie zimowym nie zostaną w późniejszych miesiącach zlikwidowane, gdyż niskie wartości CZO3 pojawiają się w skali całej północnej półkuli poza strefą równikową.



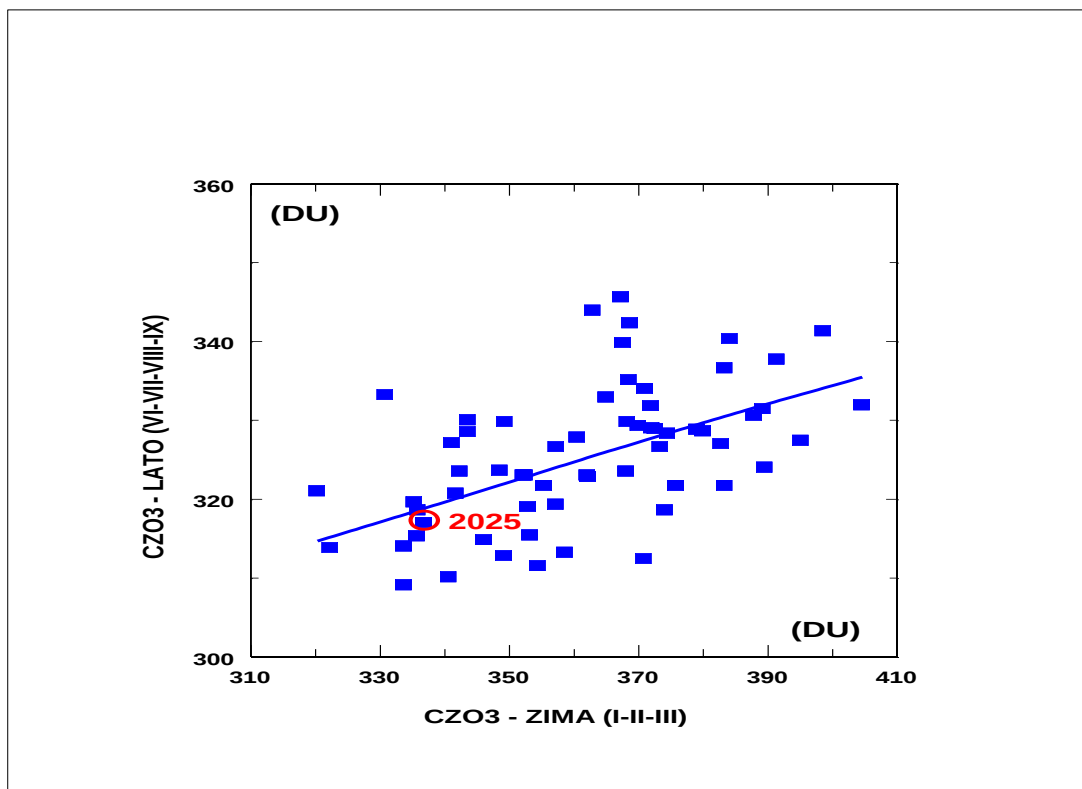
Rys. 4.1.1. (a). Średnie sezonowe całkowitej zawartości ozonu dla zimy i wiosny uzyskane z pomiarów spektrofotometrem Dobsona w COG PAN, Belsk, w okresie 1963–2025. Krzywa czerwona przedstawia wygładzone dane, a zielona liniowy trend w okresie 2000–2025.



Rys. 4.1.1. (b). Średnie sezonowe całkowitej zawartości ozonu dla lata i jesieni uzyskane z pomiarów spektrofotometrem Dobsona w COG PAN, Belsk, w okresie 1963–2025. Krzywa czerwona przedstawia wygładzone dane, a zielona liniowy trend w okresie 2000–2025.



Rys. 4.1.1. (c). Średnie roczne całkowitej zawartości ozonu uzyskane z pomiarów spektrofotometrem Dobsona w COG PAN, Belsk, w okresie 1963–2025. Krzywa czerwona przedstawia wygładzone dane, a zielona liniowy trend w okresie 2000–2025.

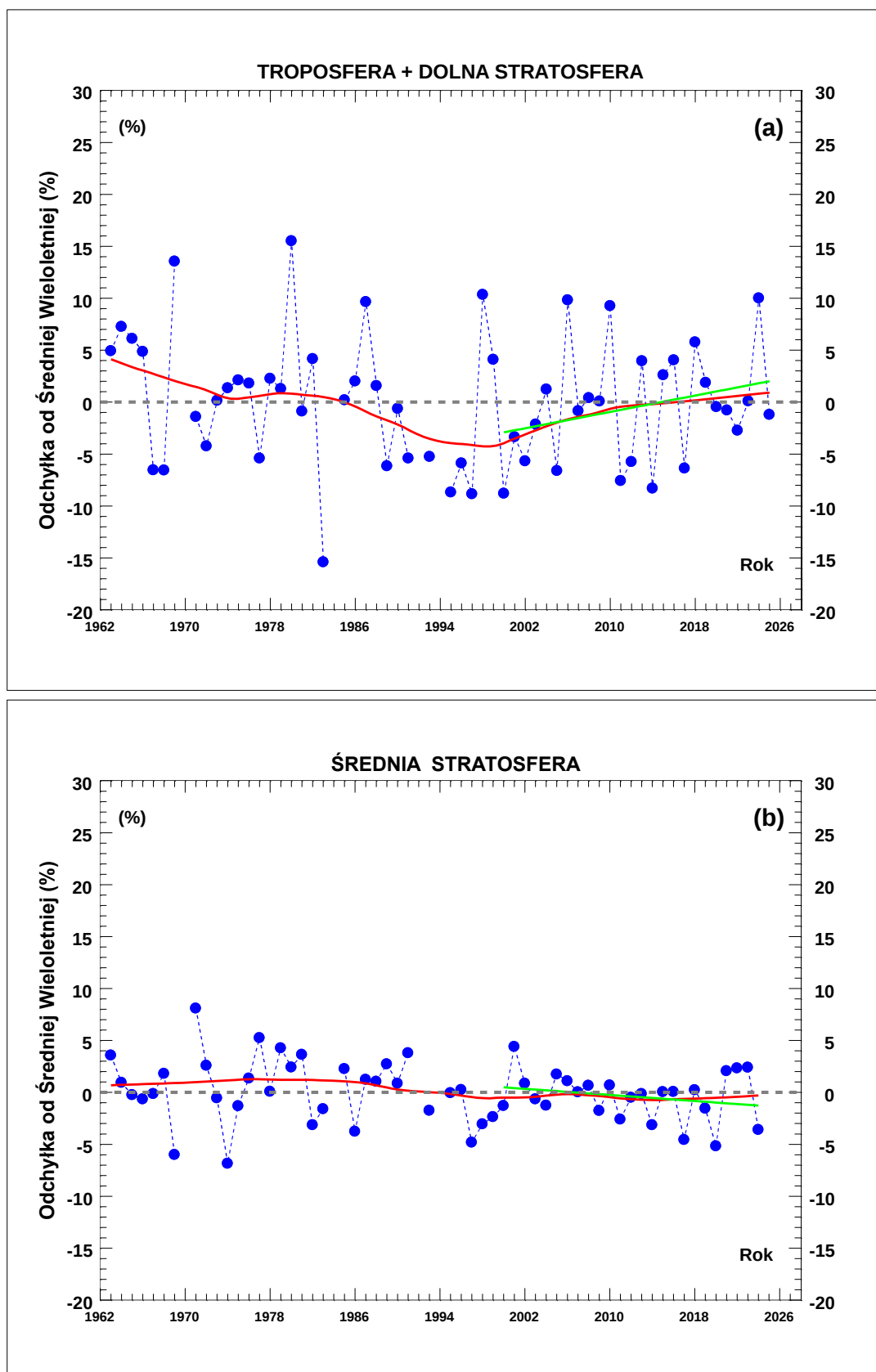


Rys. 4.1.2. Średnia całkowitej zawartości ozonu w Belsku w sezonie letnim (czerwiec–lipiec–sierpień–wrzesień) w funkcji średniej w poprzedzającym sezonie zimowym (styczeń–luty–marzec). Czerwony punkt oznacza wartości w 2025 r.

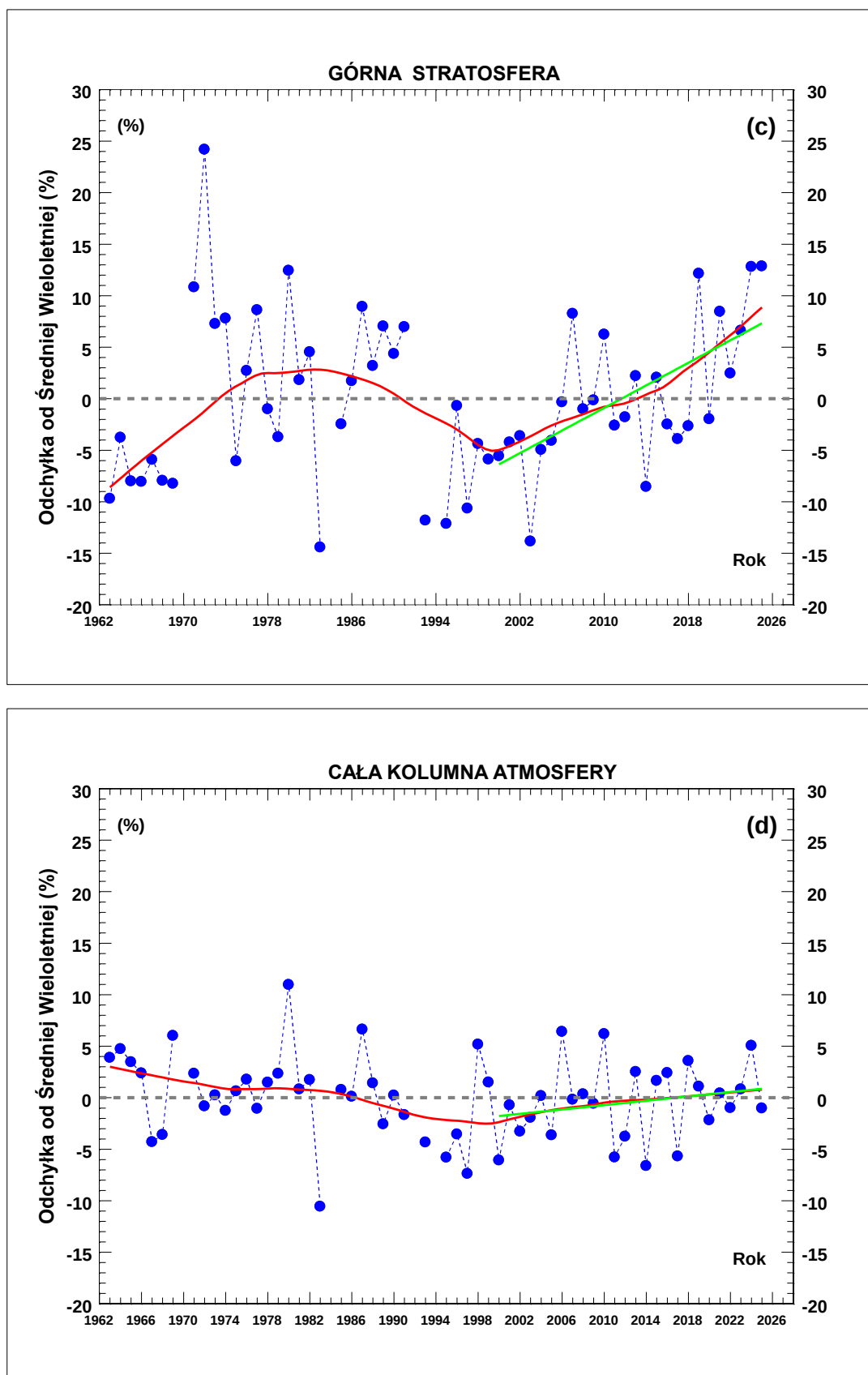
Zmiany w warstwie ozonowej nad Belskiem obserwowane od połowy lat 90-tych XX wieku potwierdzają skuteczność ustaleń Protokołu Montrealskiego z 1987 r. Protokół Montrealski i jego późniejsze poprawki wprowadziły szereg ograniczeń w produkcji i stosowaniu substancji niszczących warstwę ozonową. Od połowy lat 90-tych ubiegłego wieku koncentracja takich substancji w stratosferze zaczyna maleć (Rys. 4.5.1). 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, Krzyścin i Baranowski, 2019, Krzyścin i inni, 2020, Krzyścin, 2023). Jednak regeneracja warstwy ozonowej nad Belskiem przebiega powoli i w ostatnich 10 latach raczej widać stabilizację poziomu CZO₃ niż jego stopniowy wzrost, który byłby 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 niezaburzonego 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, której 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 najdostępniejsze do zaobserwowania, wobec ograniczonego wpływu zmian w dynamice atmosfery i jej składzie chemicznym (np. wzrost CO₂) na koncentrację ozonu na tych wysokościach (Newchurch i inni, 2003).



Rys. 4.2.1. (a i b). Odchyłki średnich wiosennych (marzec-kwiecień-maj) od średniej wieloletniej zawartości ozonu (1963–2025) w wybranych warstwach atmosfery z pomiarów Umkehr spektrofotometrem Dobsona (1963–2020) i spektrofotometrem Brewera (w latach 2021–2025) w Belsku. Profil ozonu wyznaczono stosując algorytm UMK04



Rys. 4.2.1. (c i d). Odchyłki średnich wiosennych (marzec-kwiecień-maj) od średniej wieloletniej zawartości ozonu (1963–2025) w wybranych warstwach atmosfery z pomiarów Umkehr spektrofotometrem Dobsona (1963–2020) i spektrofotometrem Brewera (w latach 2021–2025) w Belsku. Profil ozonu wyznaczono stosując algorytm UMK04. Krzywa w kolorze czerwonym przedstawia wygładzone dane, a prosta w kolorze zielonym trend w okresie 2000–2025.

Na Rys. 4.2.1 przedstawiono przebiegi średnich sezonowych (marzec–kwiecień–maj) zawartości ozonu w wybranych warstwach atmosfery (troposfera + dolna stratosfera, średnia stratosfera, górna stratosfera, cała kolumna atmosfery) z pomiarów Umkehr w Belsku z zastosowaniem spektrofotometru Dobsona w latach 1963–2020 i spektrofotometru Brewera w 2021–2025 r. Profile ozonu w latach 1963–2020 uzyskano stosując procedurę wyznaczania rozkładu pionowego ozonu metodą Umkehr, UMK04, która zalecana jest przez Centrum Danych Ozonowych w Toronto (Kanada). Następnie stosowano procedurę obliczeniową stosowaną w europejskiej sieci spektrofotometrów Brewera – EUBREWNET.

W sezonie wiosennym 2025 r. obserwowano w troposferze wraz z dolną stratosferą oraz w średniej stratosferze zawartości ozonu zbliżone do normy z lat 1963–2025, tj. odchyłka wynosiła odpowiednio około –1% i –3%. W wysokiej stratosferze zawartość ozonu była powyżej normy o około 13%. Zawartość ozonu w całej kolumnie atmosfery uzyskana ze zsumowanych zawartości O_3 w poszczególnych warstwach była nieznacznie poniżej normy (około 1%). Wygładzony profil z ozonu zsumowanego po wszystkich warstwach Umkehr (Rys. 4.2.1d) odpowiada profilowi uzyskanemu z pomiarów CZO3 (Rys. 4.1.1 – wiosna).

Wstępne porównanie profili pionowych ozonu z obu spektrofotometrów w okresie 2011–2016 pokazało różnice między profilami, mieszczące się w granicach dokładności pomiarowej profilu (poster E-337 Jarosławski i inni przedstawiony na Quadrennial Ozone Symposium 2021r. w Korei Południowej). Dla każdego spektrofotometru, dokładność pomiaru profilu ozonu w pionowych warstwach atmosfery określono porównując przedpołudniowe i popołudniowe wartości profilu ozonu zmierzone w tym samym dniu w sytuacji, gdy odpowiadająca zmiana całkowitej zawartości ozonu była mniejsza o 1%.

Linijowe trendy zmian ozonu w sezonie wiosennym (marzec–kwiecień–maj) w latach 2020–2025 wskazują na stabilizację zawartości ozonu w troposferze i dolnej stratosferze (Rys. 4.2.1a), w średniej stratosferze (Rys. 4.2.1b) i w całej kolumnie atmosfery (Rys. 4.2.1d). W górnej stratosferze (Rys. 4.2.1c) wyznaczono istotny statystycznie wzrostowy trend tj. $5,5\% \pm 1,4\%$ (1σ) na 10 lat. Podobną sytuację, lecz prawie o połowę mniejszy trend, stwierdzono w sezonie letnim (czerwiec–lipiec–sierpień) i jesiennym (wrzesień–październik–listopad). Trendy wynosiły $2,9\% \pm 2,2$ (1σ) na dziesięć lat latem i $2,7\% \pm 1,4\%$ (1σ) na dziesięć lat jesienią. Przez znaczną część sezonu zimowego z przyczyn technicznych nie można wyznaczać profilu pionowego ozonu metodą Umkehr.

W ostatnich latach obserwowana jest stabilizacja poziomu ozonu za wyjątkiem górnej stratosfery. Taka tendencja nie jest jeszcze dobrze utrwalona w niższych warstwach atmosfery i dodanie kolejnych lat może zmienić kierunek trendu. W sprawozdaniu z 2016 r. wyznaczono dodatni trend (od 1995 r.) w warstwie obejmującej dolną stratosferę. Na zmiany ozonu w tej warstwie atmosfery dodatkowo wpływają procesy dynamiczne i dodanie kolejnych lat (2017–2025) zatrzymało wzrostowy trend ozonu w tej warstwie. Natomiast dodatni trend w wysokiej stratosferze (Rys. 4.2.1c), gdzie dominują procesy chemiczne, jest wynikiem zmniejszającej się koncentracji substancji niszczących warstwę ozonową (freony, halony), zaobserwowanym od połowy lat 90-tych XX wieku w związku z funkcjonowaniem ustaleń Montrealskiego Protokołu z 1987 (i jego późniejszych poprawek) o ochronie warstwy ozonowej.

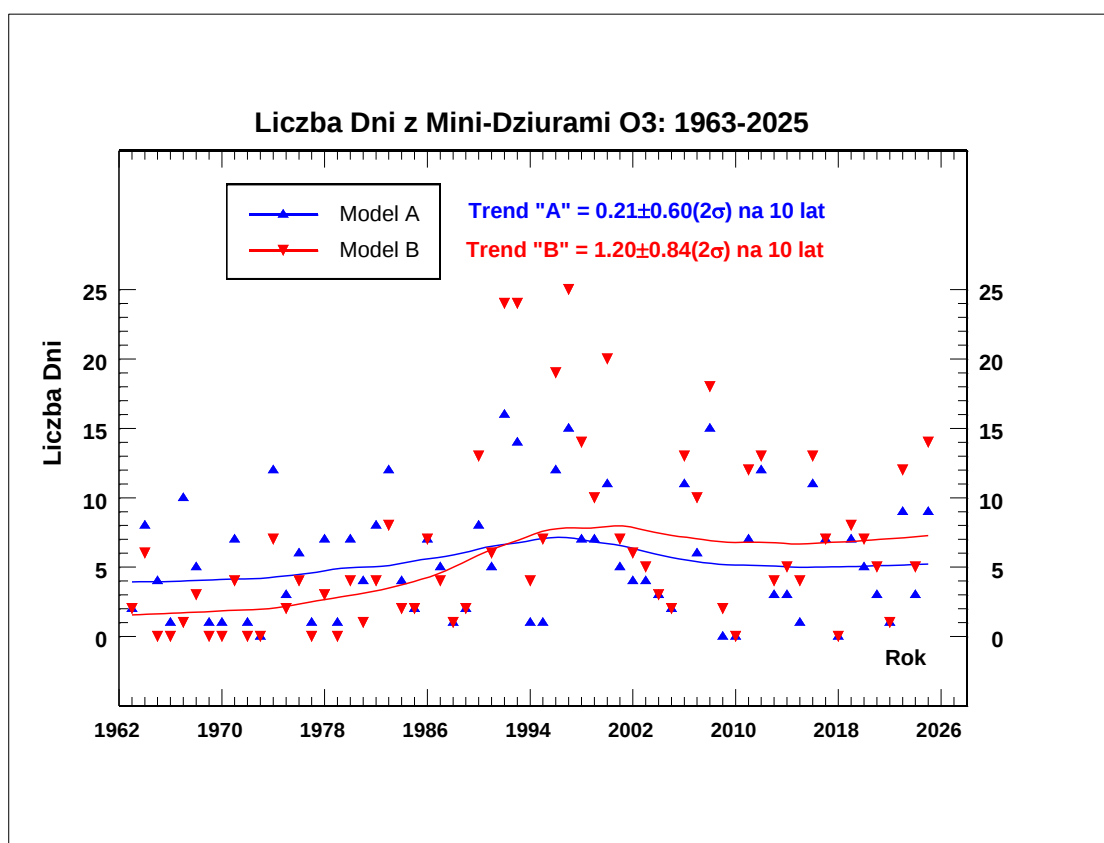
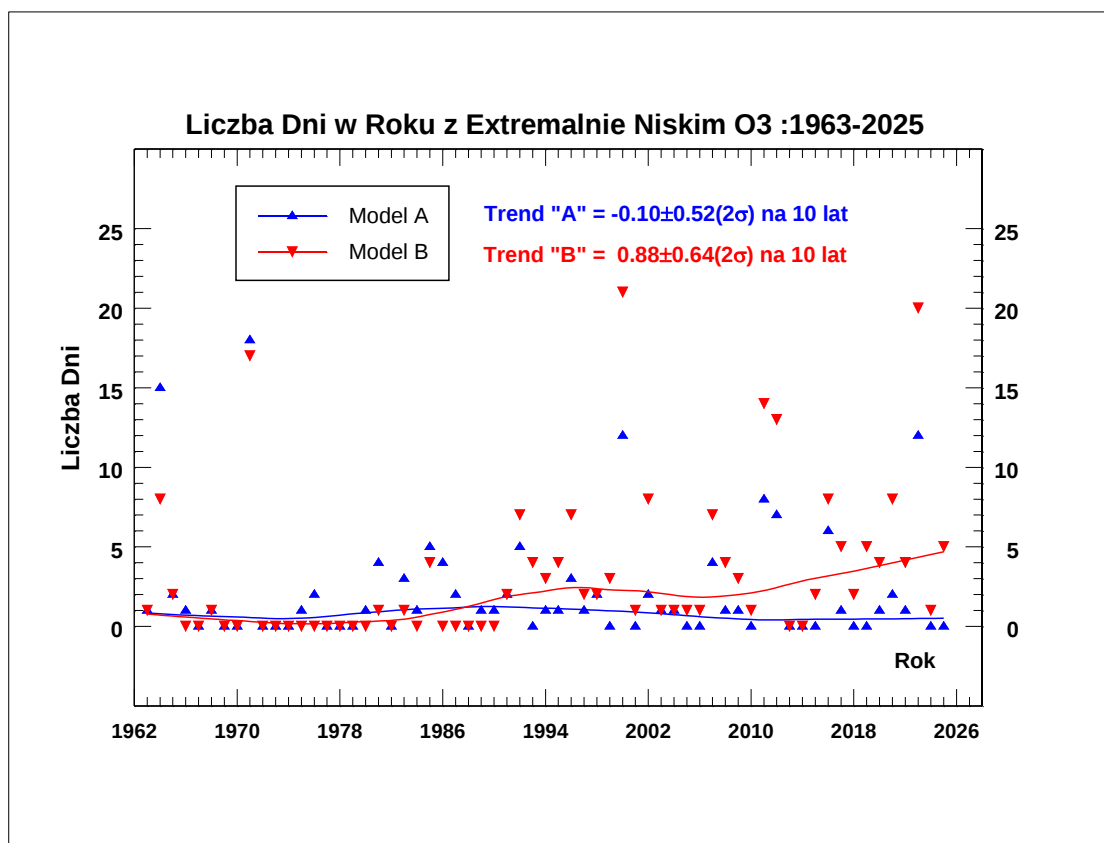
Tendencję wzrostową w tej warstwie raportowano w każdym sprawozdaniu od początku XXI wieku.

Zaskakujące negatywne trendy w latach 2000–2025 znaleziono w warstwie 23,5–28,0 km (tj. warstwie Umkehr numer 5) w sezonie wiosennym i letnim ($-1.6\% \pm 0.8\%$ (1σ)) oraz jesiennym ($-1.9\% \pm 0.7\%$ (1σ)). Występowanie ujemnych trendów w tej warstwie atmosfery w średnich szerokościach geograficznych na półkuli północnej było sygnalizowane przez wielu autorów (np. Ball i inni, 2018; Szełąg i inni, 2020) na podstawie danych satelitarnych. Jednak przyczyna takiej zmienności ozonu nie jest obecnie znana i istnieją sprzeczne hipotezy dot. mechanizmów fizyczno-chemicznych odpowiedzialnych za ubytek ozonu w tym obszarze atmosfery (Chiperfield and Bekki, 2024).

4.3. Ekstremalne wartości całkowitej zawartości ozonu w Belsku

Znaczne lokalne zmniejszenie wartości CZO3 w średnich szerokościach geograficznych, trwające zwykle kilka dni i związane ze zmianami cyrkulacji atmosfery w górnej troposferze i dolnej stratosferze, zwane jest „mini-dziurą” ozonową. Nie należy jej mylić z rozległą „dziurą ozonową” nad Antarktydą, która od połowy lat 1980-tych pojawia się corocznie wczesną wiosną nad tym kontynentem (patrz Roz. 4.5). 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 CZO3 w tych dniach z założenia powinien być co najmniej o 20% poniżej ważonej średniej kroczącej (model A) lub wieloletniej 1963–2025 średniej dziennej (model B).

W nawiązaniu do tej pracy przeprowadzono analizę liczby dni z „mini-dziurami” nad Belskiem w latach 1963–2025, której wyniki przedstawia Rys. 4.3.1 (dolny rysunek). W serii obserwacji w 2025 r. znaleziono 9 dni (Model A) i 14 dni (Model B) z wartościami CZO3 przekraczającymi wartość progową dla pojawienia się „mini-dziury”. Średnia wieloletnia (1963–2021) 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. Wyjątkowo w pewnych latach obie metody wskazują na brak „mini-dziur”. Taka sytuacja miała miejsce w latach 1973, 2010 i 2018.

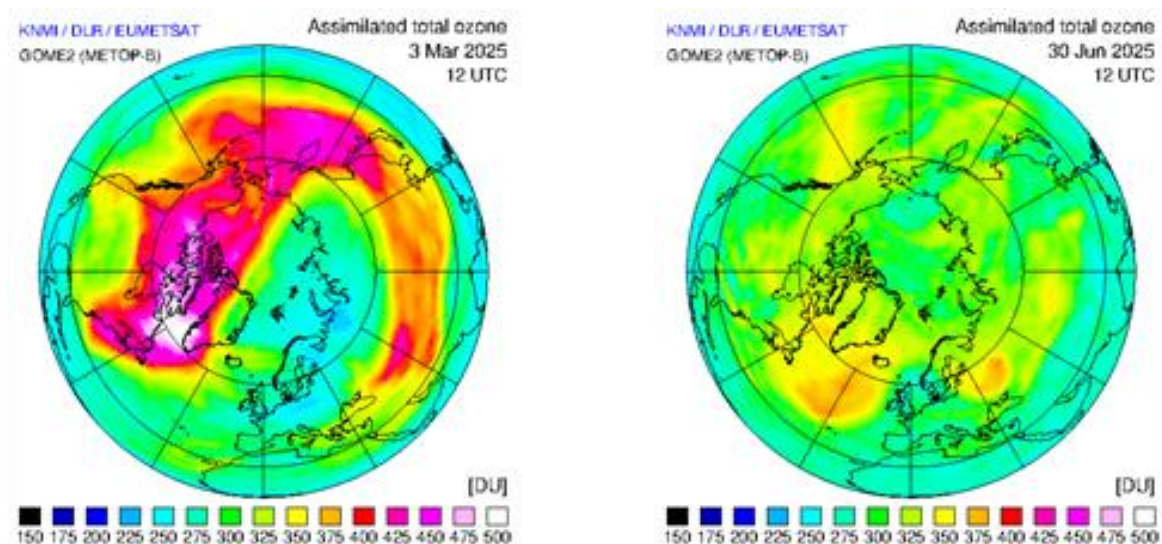


Rys. 4.3.1. Liczba dni w roku z „mini-dziurami” ozonowymi nad Belskiem w latach 1963–2025 (dolny rysunek) i liczba dni w okresie czerwiec-sierpień z deficytem całkowitej zawartości ozonu >10% normy (górny rysunek).

Wygładzone przebiegi czasowe (1963–2025) liczby dni z „mini-dziurami” ozonowymi (Rys. 4.3.1 - dolny rysunek) wskazują, że obecnie znajdujemy się w fazie ustalonej 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 1963–2025 model B przewiduje stopniowy wzrost liczby dni z „mini-dziurami”. Istotna statystycznie (na poziomie ufności 2σ) wzrostowa tendencja wynosi około 1-2 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 1963–2025. 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 całym okresie pomiarów CZO3 w Belsku. Wyniki modelu B sugerują wzrastającą częstotliwość pojawienia się „mini-dziur” w całym okresie pomiarowym w Belsku, ale może to być efektem nałożenia się krótkookresowych dynamicznych spadków ozonu na obniżoną już średnią strefową i przekroczenia bariery –20% normy (wartość progowa pojawienia się „mini-dziury”) są tym samym częstsze. „Mini-dziury” występują nad Belskiem w okresie od początku listopada do końca marca. W tym czasie dzienne dawki promieniowania UV-B mierzone przy powierzchni Ziemi są z natury niewielkie (niska wysokość Słońca) i spodziewany duży procentowo wzrost poziomu UV-B w stosunku do typowych wartości napromienienia nie jest szczególnie niebezpieczny. W dodatku, w tym okresie ludzie zwykle krótko przebywają na wolnym powietrzu.

Wyznaczenie zmian w częstotliwości pojawienia się ekstremalnie niskich wartości CZO3 jest szczególnie ważne w sezonie letnim, kiedy z natury wysoki poziom promieniowania UV-B może stanowić zagrożenie dla zdrowia. W tym sezonie odchyłki CZO3 od normy większe niż 20% nie występują. Arbitralnie przyjęto próg 10% deficytu CZO3 do wyznaczenia okresów z ekstremalnie niskimi wartościami ozonu. W tej sytuacji rumieniowa dawka napromienienia UV-B byłaby ~10% wyższa od normy napromienienia dla bezchmurnego nieba.

Przeprowadzono obliczenia analogicznie do sytuacji dotyczącej „mini-dziur”, ale zastosowano 10% wartość progową. Wyniki przedstawiono na Rys. 4.3.1 (górny rysunek). 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 – górny rysunek). W 2025 r. w okresie letnim (czerwiec–lipiec–sierpień) znaleziono pięć dni i brak takich dni z wartościami CZO3 poniżej progu –10%, odpowiednio według modelu B and A. Takich dni bywa średnio zaledwie kilka w sezonie letnim (znaleziono maksymalnie 22 takich dni w 2000 r.), wtedy bezwzględnie należało ograniczyć czas przebywania w nasłonecznionych miejscach.

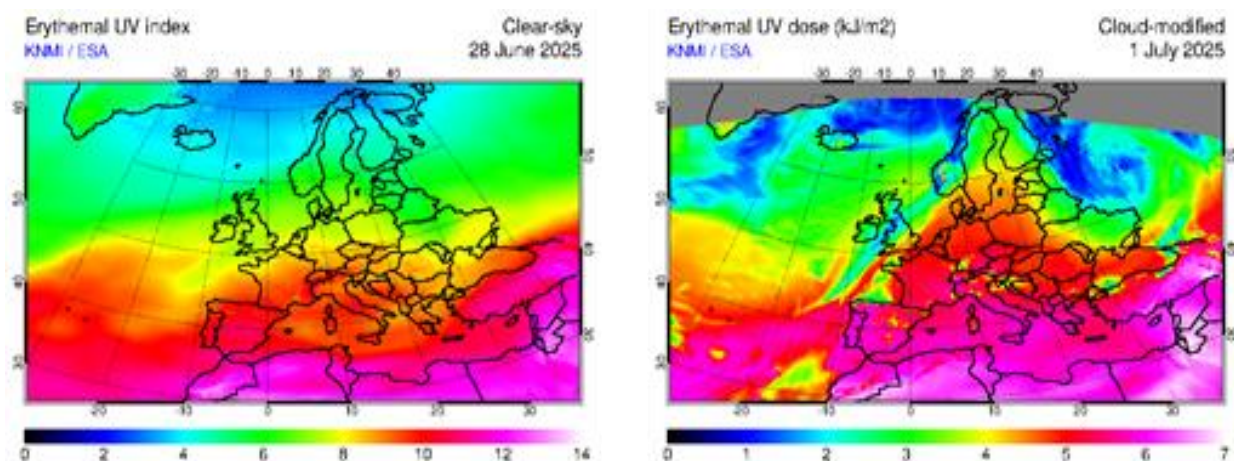


Rys. 4.3.2. Rozkład CZO3 nad półkulą północną z pomiarów spektrofotometrem GOME-2 na platformie satelitarnej Eumetsat w dniu 03.03.2025 (lewa strona) i 30.06.2025 (prawa strona). Pomiary spektrofotometrem Dobsona w tych dniach pokazały odpowiednio 34,2% i 11,7% ubytek ozonu w stosunku do średniej wieloletniej dla tego dnia. Rysunki pochodzą ze strony https://www.temis.nl/protocols/o3field/o3field_gome2b.php

Rys. 4.3.2 (lewa strona) ilustruje przestrzenny rozkład CZO3 na półkuli północnej na podstawie obserwacji satelitarnych w dniu 03.03.2025 tj. w dniu ekstremalnego niedoboru ozonu w Belsku w 2025 r. Pomiar CZO3 spektrofotometrem Dobsona pokazał 248 D, czyli ok. 34,2% poniżej wieloletniej dziennej normy. Rys. 4.3.2 (prawa strona) przedstawia sytuację w dniu 30.06.2025, kiedy zanotowano w Belsku 304 D (ok. 11,7% poniżej wieloletniej normy w sezonie letnim), co było największym procentowym niedoborem ozonu w tym sezonie w 2025 r. Późną wiosną i latem niedobory ozonu rzadko przekraczają poziom 10% normy. W obu przypadkach obszar z ekstremalnym CZO3 obejmował znaczną część centralnej Europy.

4.4. Promieniowanie UV-B w Belsku

Pomiary natężenia napromienienia o skuteczności rumieniowej z użyciem biometru Kipp & Zonen pokazały w dniach 28.06.25 i 29.06.2025 najwyższą w roku wartość tj. 7,9 indeksu UV-B (1 Index = 25 mW/m²). Powyższą wartość potwierdziły pomiary widm UV-B z zastosowaniem spektrofotometru Brewera. Zmierzona spektrofotometrem Dobsona wartość CZO3 w tych dniach wynosiła odpowiednio 310 i 312 D (około 10% poniżej średniej wieloletniej), co przy braku zachmurzenia prowadziłoby do wartości indeksu około 7,7 przy typowej grubości optycznej aerozolu (według symulacji modelem TUV). Dzienna dawki rumieniowe w tych dniach (4075 i 2732 J/m²) wskazywały na wzrost zachmurzenia w dniu 29.06.2025, jednak w tym dniu w południe niebo było bezchmurne, o czym świadczą identyczne wartości indeksu UV-B w dniach 28.06.25 i 29.06.2025. Satelitarne pomiary wskazywały na maksymalne wartości indeksu UV-B na około 7–8 w tych dniach (Rys. 4.4.1 - lewa strona), co odpowiadało wartościom indeksu UV-B mierzonym w Belsku.



Rys. 4.4.1. Indeks UV i dzienna dawka rumieniowa nad Europą z pomiarów spektrofotometrem GOME-2 na platformie satelitarnej MetOp-A w dniach 28.06.2025 (lewa strona) i 01.07.2025 (prawa strona), odpowiednio, kiedy w Belsku zmierzono maksymalną w roku 2025 wartość indeksu UV-B (7,9) i dziennej dawki erytemalnej (4583 J/m²).

Najwyższą w 2025 r. dzienną dawkę rumieniową równą 4583 J/m² zanotowano w dniu 01.07.2025, kiedy przez cały dzień niebo było bezchmurne. Zmierzone w Belsku wartości indeksu UV-B i CZO3 wynosiły wtedy 7,5 i 306 D. Satelitarne pomiary (Rys. 4.4.1) pokazały zbliżone (w granicach błędu pomiarowego) wartości indeksu i dziennej dawki (Rys. 4.4.1).

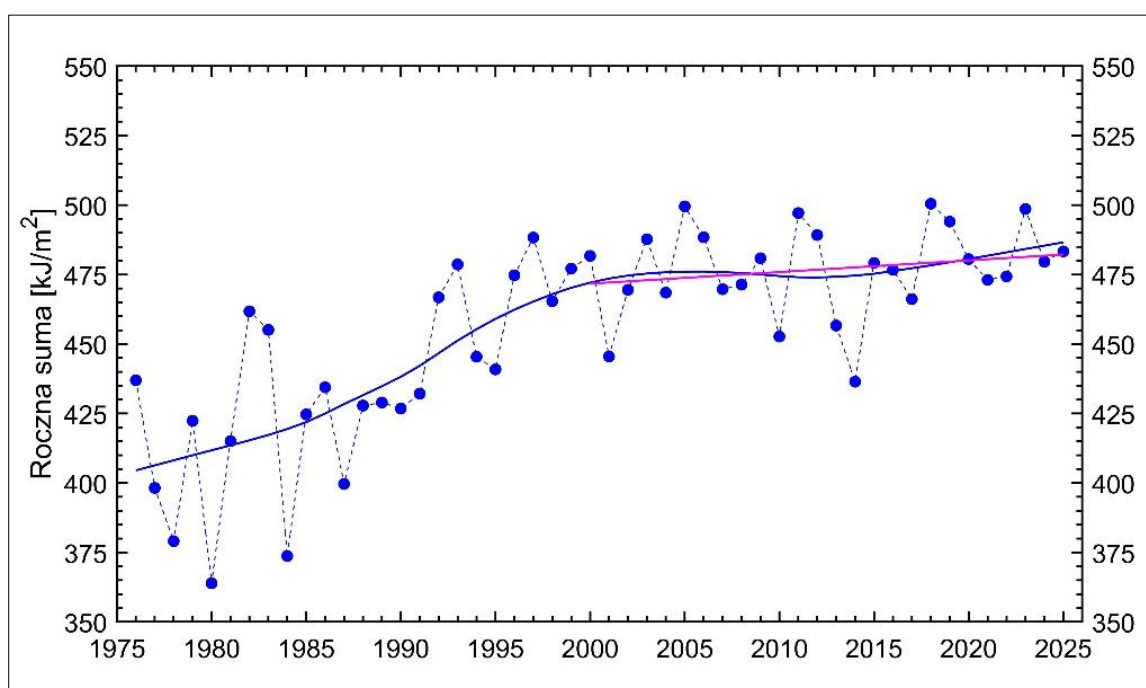
W związku z pojawieniem się niskich wartości ozonu nad Polską w kwietniu 2025 r. wielokrotnie rejestrowano w Belsku wartości indeksu UV-B powyżej 4 tj. około 15% powyżej wieloletniej normy dla tego miesiąca. W całym miesiącu w sumie takich dni było 15. Średnia miesięczna dawka rumieniowa w 2025 była 24,1% powyżej normy kwietniowej. Maksymalna dawka rumieniowa w tym okresie wynosiła 2739 J/m² (30.04.2025), co w przybliżeniu stanowi 13-krotność minimalnej dawki wywołującej rumień skóry (tzw. MED) u osoby z fototypem 2. Największa wartość indeksu UV-B w tym miesiącu wynosiła 5,2 (18.04.2025).

Wysokie wartości indeksu UV-B w kwietniu, a zwłaszcza w okresie poprzedzającym tzw. „długi weekend majowy”, są szczególnie niebezpieczne dla zdrowia, gdyż organizm nie jest jeszcze zaadaptowany do długotrwałych ekspozycji na promieniowanie UV-B, a umiarkowane temperatury (ok. 20°C) zachęcają do nadmiernego opalania bez zastosowania kremów z filtrem ochronnym. Czerwińska i Krzyścin (2020) stwierdzili, że nadmierne napromienienie w kwietniu może być przyczyną wzrastającej gwałtownie zapadalności na czerniaka w Europie.

W Belsku monitoring promieniowania UV-B o skuteczności rumieniowej prowadzony jest od 1 stycznia 1976 r. z zastosowaniem różnych modeli szerokopasmowych biometrów: Robertson-Berger (1976–1994), Solar Light (1992–2014), Kipp&Zonen (2006–2025). Seria czasowa w ubiegłych latach, także i w 2025 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) lub z jednoczesnymi pomiarami

natężenia promieniowania UV-B o skuteczności rumieniowej z zastosowaniem spektrofotometru Brewera nr. 64 (metoda stosowana od 1995 r.). Sposób homogenizacji danych został przedstawiony w publikacji Krzyściń i inni (2025). Jakość pomiarów ozonu i promieniowania UV-B belskiego Brewera jest zapewniona przez coroczne porównania (od lata 1995 r.) ze światowym standardem – spektrofotometrem Brewera nr. 017.

Przebieg sum rocznych dziennych dawek rumieniowych wskazuje na wzrost napromienienia UV-B w Belsku w latach 1976–1999 i późniejszą stabilizację (brak trendu). W XXI wieku sumy roczne dziennych dawek rumieniowych oscylują wokół poziomu ok. 476 kJ/m² (Rys 4.4.2). Trend w sumie rocznej w latach 1976–1999 wynosił $7,2\% \pm 1,6\%$ (1σ) na 10 lat. W tym okresie suma roczna wzrosła więc o 16,6%. W 2025 r. suma roczna wyniosła 483,33 kJ/m² i była typowa dla wartości w XXI w. W ostatnich latach (od ok. 2010 r.) pojawiła się lekka tendencja wzrostowa, która w okresie 2010–2025 r. była nieistotna statystycznie (Rys. 4.4.2).

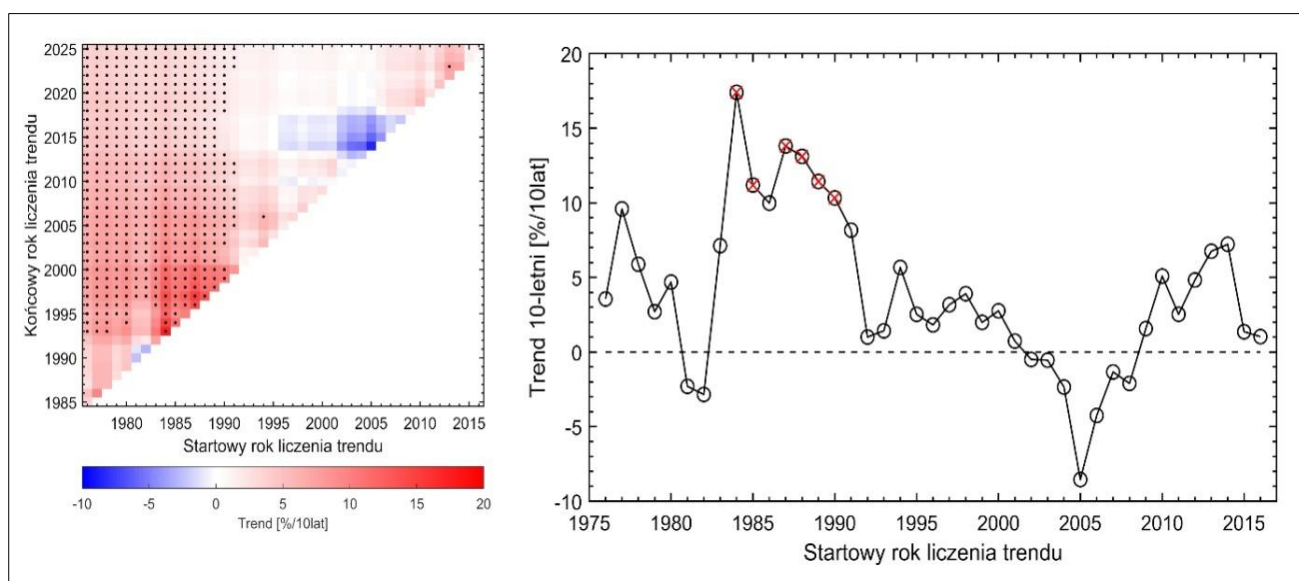


Rys. 4.4.2. Roczna suma dziennych dawek promieniowania rumieniowego w Belsku w latach 1976–2025 (punkty). Ciągła krzywa w kolorze niebieskim przedstawia wygładzone dane. Prosta w kolorze fioletowym ilustruje trend w okresie 2000–2025.

Rysunki 4.4.3 przedstawiają trendy liniowe w % na 10 lat, w zależności od startowego i końcowego roku obliczania trendów (dla okresów nie mniejszych niż 10 lat). Rysunek po lewej stronie przedstawia tzw. „heatmap”, ilustrując zmienność trendu liniowego za pomocą intensywności kolorów, gdzie kolory z palety niebieskiej obrazują trendy ujemne, a kolory czerwone, dodatnie. Na osi poziomej przedstawiony jest rok startowy do obliczeń trendów, rozpoczynając od roku 1976, a kończąc na roku 2016. Na osi pionowej zaś przedstawiony jest rok końcowy dla obliczeń trendów, rozpoczynając od 1985, a kończąc na roku 2025. Trendy istotne statystycznie (dla $p \leq 0,05$) oznaczone są czarną kropką. Najwyższe trendy dodatnie, istotne statystycznie, zaobserwowano dla okresów rozpoczynając od roku 1984 do 1990,

a kończąc na roku 2000 (najwyższy trend 17,4% na 10 lat w okresie 1984–1993). Po roku 2000 istotny statystycznie, dodatni trend, obserwowany jest tylko w latach 2013–2023.

Rozpoczynając od roku 1996–2009, a kończąc na latach 2014–2018, można zaobserwować trend malejący (do -8,6% na 10 lat), jednak nie jest on istotny statystycznie. Rysunek z prawej strony (Rys. 4.4.3) obrazuje tendencje do zmienności poziomu promieniowania UV-B w okresach 10-letnich (zaczynając od 1976–1985, a kończąc na okresie 2016–2025). Istotne statystycznie (dla $p \leq 0,05$) dodatnie trendy 10-letnie na poziomie powyżej 10% na dziesięć lat zaobserwowano w 6 okresach: 1984–1993, 1985–1994, 1987–1996, 1988–1997, 1989–1998 i 1990–1999. Po roku 1999 nie zaobserwowano istotnych statystycznie zmienności w 10-letnich okresach.



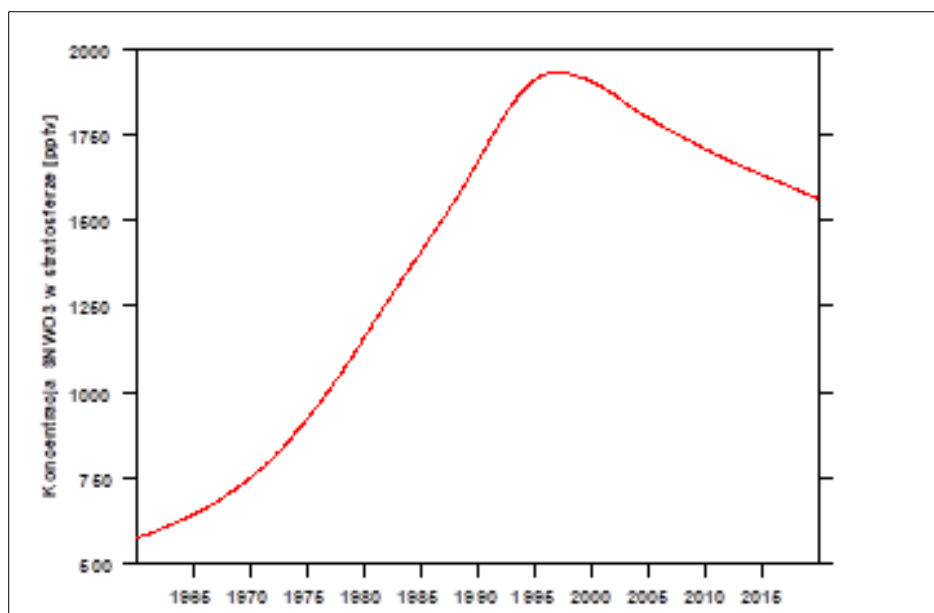
Rys. 4.4.3. Trendy liniowe obliczone dla różnych lat startowych. Lewa strona przedstawia trendy startując od roku 1976 do 2016, a kończąc na latach 1985–2025. Czarne punkty oznaczają trendy istotne statystycznie. Prawa strona przedstawia trendy 10-letnie, zaczynając od roku 1976–1985, a kończąc na latach 2016–2025. Czerwone krzyżyki oznaczają trendy istotne statystycznie.

4.5. Globalne zmiany całkowitej zawartości ozonu

4.5.1. Średnie strefowe (90°S – 65°N)

Zwykle długookresowe zmiany ozonu wiążą się ze zmianami koncentracji w stratosferze substancji niszczących warstwę ozonową (SNWO3). Koncentracja SNWO3 w stratosferze w średnich szerokościach geograficznych zaczyna maleć w drugiej połowie lat 90-tych XX wieku (Rys.4.5.1) w wyniku ograniczeń w produkcji SNWO3 wprowadzonych przez Protokół Montrealski (PM) z 1987 r. i jego późniejsze poprawki. Natomiast początek zmniejszania koncentracji SNWO3 obserwowany jest w wysokich szerokościach geograficznych (Arktyka i Antarktyda) od początku XXI wieku (Montzka i inni, 2024). W tej sytuacji w globalnych danych

ozonowych w XXI wieku powinien pojawić się dodatni trend związany ze stopniowym zmniejszaniem się koncentracji substancji niszczących ozon w stratosferze, którego identyfikacja może być jednak utrudniona ze względu na występowanie naturalnych oscylacji CZO3 związanych z globalnymi i lokalnymi procesami transportu ozonu i jego prekursorów w atmosferze. Zmiany klimatu mogą modyfikować naturalne procesy redystrybucji ozonu (np. intensywność komórki Brewer-Dobson, patrz rozdział 4.1), co w konsekwencji prowadzi do zmniejszenia (lub zwiększenia) CZO3 w pewnych obszarach na kuli ziemskiej, czyli odpowiednio do wolniejszej (lub szybszej) regeneracji warstwy ozonowej.



Rys. 4.5.1. Zawartość substancji niszczących warstwę ozonową (SNWO3) w stratosferze (1960–2020) w średnich szerokościach geograficznych według obliczeń modelowych (krzywa czerwona).

Weber i inni (2023) analizując dane pomiarowe (z sieci naziemnej i obserwacji satelitarnych) i symulacje numeryczne (z zastosowaniem globalnych modeli chemiczno-transportowych) ocenili, że tempo regeneracji CZO3 w średnich szerokościach geograficznych (35°–60° N) wynosiło $0,5 \pm 0,5\%$ (2σ) na 10 lat w okresie 1996–2020. Wydaje się, że tempo regeneracji jest w rzeczywistości mniejsze, gdyż w okresie 1996–2000 wystąpiła silna wzrostowa tendencja CZO3 niezwiązana ze zmianami SNWO3, która wpłynęła na wielkość szacowanych trendów w okresie po 1995 r. Fazę przyspieszonego wzrostu w latach 1996–2000 widać wyraźnie w średnich rocznych CZO3 dla Belska (Rys. 4.1.1).

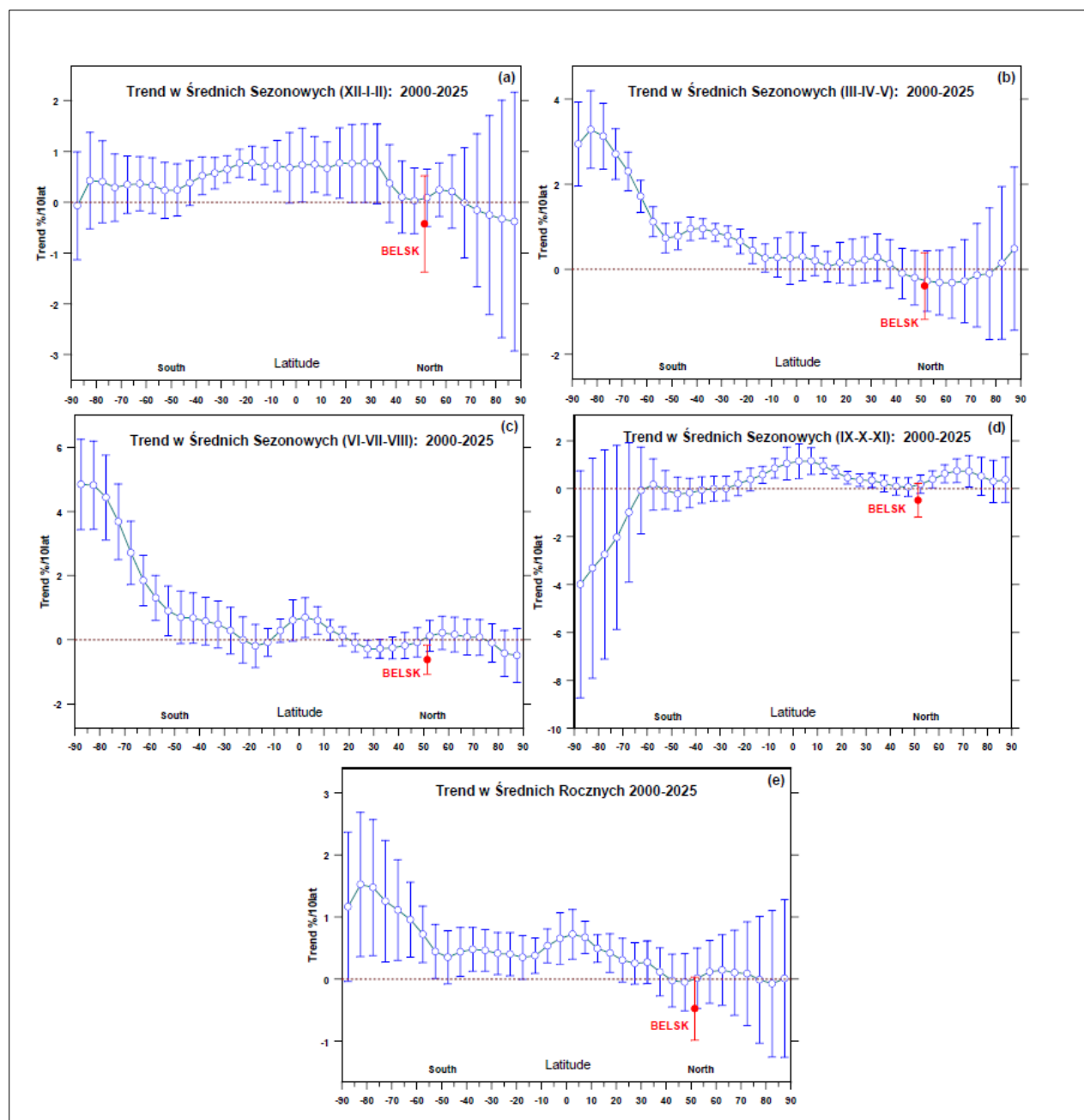
W dalszej części tego podrozdziału będą analizowane globalne zmiany CZO3 w okresie 1980–2025 na podstawie średnich sezonowych i rocznych (tj. średniej z czterech sezonów) wyznaczonych w równoleżnikowych pasach o szerokości 5° tj. od 90°–85°S do 85°–90°N. Wybrano następujące sezony: zima (grudzień–styczeń–luty), wiosna (marzec–kwiecień–maj), lato (czerwiec–lipiec–sierpień) i jesień (wrzesień–październik–listopad). W konstrukcji średnich sezonowych wykorzystano średnie miesięczne CZO3 pochodzące z bazy danych reanaliz

MERRA-2 (1980-2025), które zostały zarchiwizowane na globalnej siatce o rozdzielczości $0,5^\circ$ (szerokość geogr.) $\times$ $0,625^\circ$ (długość geogr.). Dla każdego pasa zostały wyznaczone średnie strefowe uśredniając średnie miesięczne CZO₃ w węzłach siatki znajdujących się w wybranej strefie, a następnie względne różnice między sezonowymi wartościami CZO₃ w danym roku i odpowiadającymi wieloletnimi (2000–2025) sezonowymi średnimi jako procent tych wieloletnich średnich.

Aby wyznaczyć tempo regeneracji warstwy ozonowej w różnych strefach geograficznych w XXI wieku, zastosowano standardową liniową regresję do wyznaczenia trendów (% na 10 lat) w w/w sezonowych względnych różnicach w okresie 2000–2025 (Rys. 4.5.2). Analizując różnicę między wygładzonymi strefowymi wartościami CZO₃ (z zastosowaniem techniki LOWESS, Cleveland, 1979) między końcem (2025) a początkiem serii (1980) jako procent wartości średniej CZO₃ w XXI wieku, przedstawiono (Rys. 4.5.3) także ubytek CZO₃ w całym analizowanym okresie (1980–2025). Stosując w/w metodę obróbki danych, na wykresy naniesiono wyniki wyznaczone dla Belska (czerwony punkt na Rys. 4.5.2 i Rys. 4.5.3).

Regenerację ozonu w XXI wieku, tj. istotny statystycznie (na poziomie 2σ) dodatni trend, wyznaczono nad Antarktydą na jesieni (Rys. 4.5.2b) i w zimie (Rys. 4.5.2c) antarktycznej. Na półkuli południowej, regeneracja pojawiła się także jesienią (Rys. 4.5.2b) w pasie średnich i niskich szerokości (50°S – 20°S) i latem (Rys. 4.5.2a) tylko w niskich szerokościach geograficznych (30°S – 10°S). Na półkuli północnej, wzrostowy trend pojawił się tylko jesienią (Rys. 4.5.2d) w niskich szerokościach geograficznych (5°N – 20°N). W średnich rocznych regenerację widać tylko na półkuli północnej w niskich szerokościach geograficznych (5°N – 15°N). Tempo regeneracji CZO₃ nad Belskiem jest zawsze mniejsze od tempa regeneracji w pasie (50°N – 55°N) w którym znajduje się stacja (Rys. 4.5.2.a–e).

Koncentracja SNWO₃ w stratosferze jest nadal wysoka w latach 20-tych XXI wieku w odniesieniu do tej w latach 1960–1974 (Rys. 4.5.1). Montzka i inni (2024) wyznaczyli czas pełnej regeneracji warstwy ozonowej w średnich szerokościach geograficznych na około 2050 rok w oparciu o tempo zmian w koncentracji SNWO₃ w stratosferze obserwowane w XXI wieku. Wydaje się, że zmiany w procesach chemicznych i dynamicznych w atmosferze, związane ze zmianami klimatu, które prowadzą m.in. do wzrostu gradientu temperatury między stratosferą (spadek temperatury) i troposferą (wzrost temperatury) w związku ze zwiększającą się koncentracją gazów cieplarnianych, w znacznym stopniu osłabiają efekt wzrostu CZO₃ w średnich szerokościach geograficznych w wyniku stopniowego usuwania ze stratosfery związków chemicznych niszczących ozon (Ball i inni 2018 i 2020, Bernhard i inni, 2023).



Rys. 4.5.2. Trendy (%/10 lat) w średnich sezonowych i średniej rocznej CZO3 w 5° pasach szerokościowych od 90°–85°S do 85– 90°N w okresie 2000–2025, wyznaczone standardową regresją liniową (niebieskie okręgi). Kreski pionowe: zakres błęd ($\pm 1\sigma$). W kolorze czerwonym: wyniki dla Belska. Rysunki przedstawiają kolejno trendy dla: zimy (a), wiosny (b), lata (c), jesieni (d) i całego roku (e).

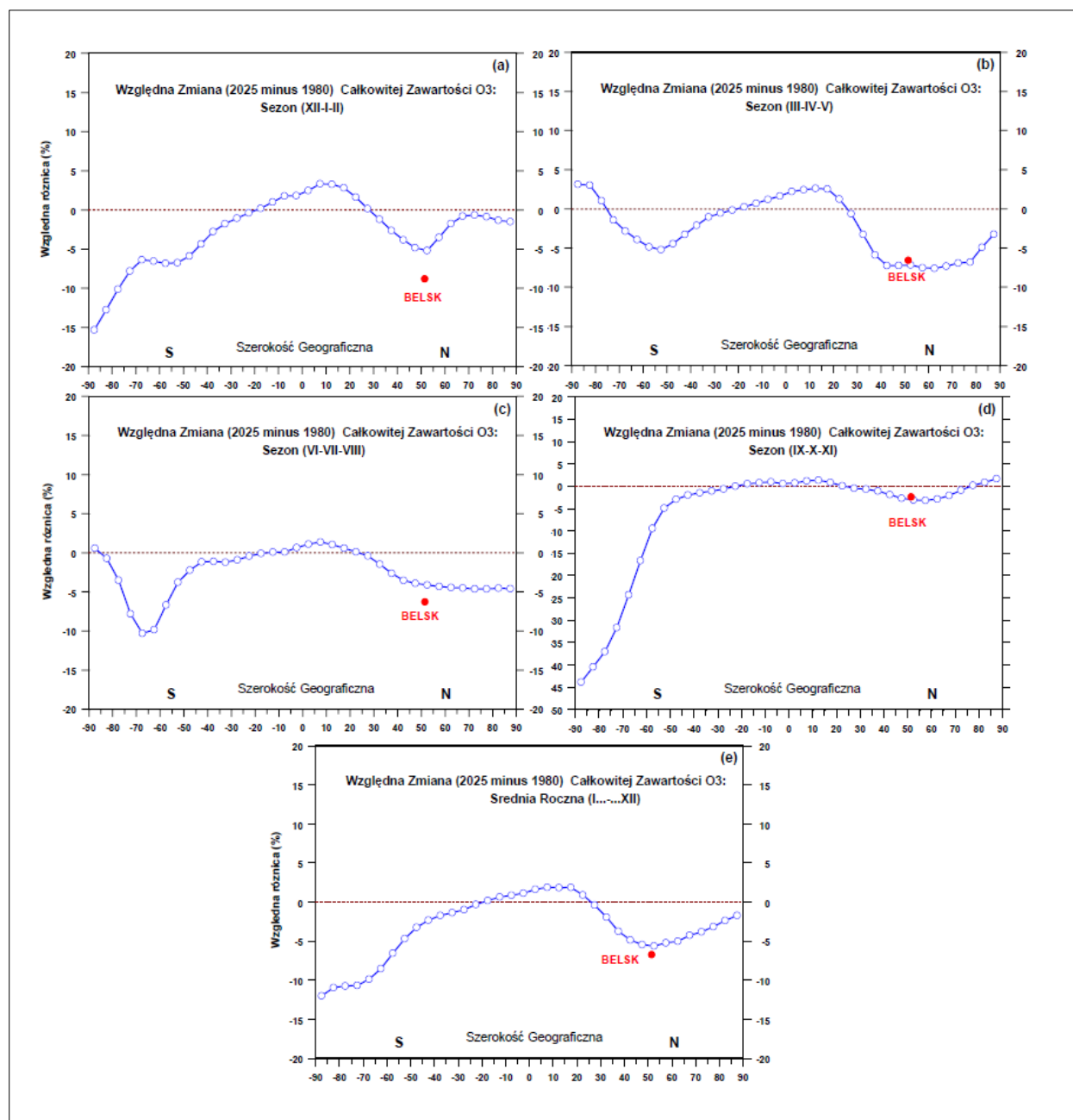
Rys. 4.5.3d wskazuje, że największe obniżenie poziomu CZO3 w okresie 1980–2025 miało miejsce na biegunie południowym (około 45%) w sezonie wiosennym (na półkuli południowej), co jest zgodne z pojawieniem się dziury ozonowej nad Antarktydą na początku lat 80-tych XIX wieku. Dziura rozbudowywała się aż do początku XXI wieku. Rys. 4.5.2d wskazuje, że poziom CZO3 w tym rejonie był praktycznie stały w XXI wieku. Wiosenne zmniejszenie CZO3 stawało się coraz słabsze na półkuli południowej w miarę zbliżania się do

równika (Rys. 4.5.3a). Na granicy Antarktydy zmiana CZO₃ wynosiła około –15% i tylko –5% dla pasa (55°S–50°S).

Rys. 4.5.3b wskazuje, że około 5% wiosenne obniżenie poziomu CZO₃ miało miejsce w całym pasie średnich szerokości geograficznych na półkuli północnej, w tym i w Belsku. W sezonie letnim na półkuli południowej (Rys. 4.5.3a) poziom CZO₃ obniżył się także najbardziej nad biegunem południowym (ok. 15%). Taka tendencja stawiała się mniej wyraźna w miarę zbliżania się do równika i obniżka wynosiła ok. 5% w średnich szerokościach geograficznych i około 0% w pasie 15°S–10°S (Fig.4.5.3a). W pasie 10°S–20°N natomiast poziom CZO₃ wzrósł o kilka procent w okresie 1980–2025. Największą zimową obniżkę poziomu CZO₃ na półkuli północnej (ok. 5%) stwierdzono w pasie 50°N–55°N, a jeszcze większą, dochodzącą do 10%, nad Belskiem (Rys. 4.5.3a). W sezonie zimowym na półkuli południowej największą obniżkę poziomu CZO₃ wyznaczono w strefie 70°S–65°S, czyli w pobliżu wybrzeża Antarktydy. Natomiast brak zmiany poziomu CZO₃ stwierdzono nad biegunem południowym i w strefie od 20°S do równika. Odpowiednio w sezonie letnim na półkuli północnej (Rys. 4.5.3c), kilkuprocentowe zmniejszenie CZO₃ wystąpiło w średnich i wysokich szerokościach geograficznych. W Belsku obniżenie poziomu było większe i dochodziło do 7%, co mogło mieć przełożenie na około 10% wzrost intensywności promieniowania UV stanowiący zagrożenie dla zdrowia przy dłuższym pobycie na wolnym powietrzu.

W średnich rocznych CZO₃ największą obniżkę stwierdzono nad biegunem południowym (–12%) (Rys. 4.5.3e). Natomiast w strefie okołorównikowej (10°S–20°N) występował niewielki wzrost poziomu CZO₃ (ok. 1–2%). Maksymalne zmniejszenie CZO₃ na półkuli północnej wyznaczono w pasie 50°N–55°N (ok. 7%).

Zmienność ozonu w wysokich warstwach atmosfery jest przede wszystkim wynikiem procesów chemicznych, więc statystycznie istotny wzrostowy trend w wysokiej stratosferze nad Belskiem (Rys. 4.2.1c) jest potwierdzeniem skuteczności ograniczeń w produkcji substancji niszczących warstwę ozonową na tych wysokościach w atmosferze, które wprowadził Protokół Montrealski z 1987 r. i jego późniejsze poprawki. Dodatni trend w tej warstwie został stwierdzony na całym globie (Szełąg i inni, 2020).



Rys. 4.5.3. Względna zmiana poziomu CZO3 między końcem (2025) i początkiem (1980) analizowanej serii czasowej w procencie wieloletniej (2000–2025) średniej strefowej CZO3.

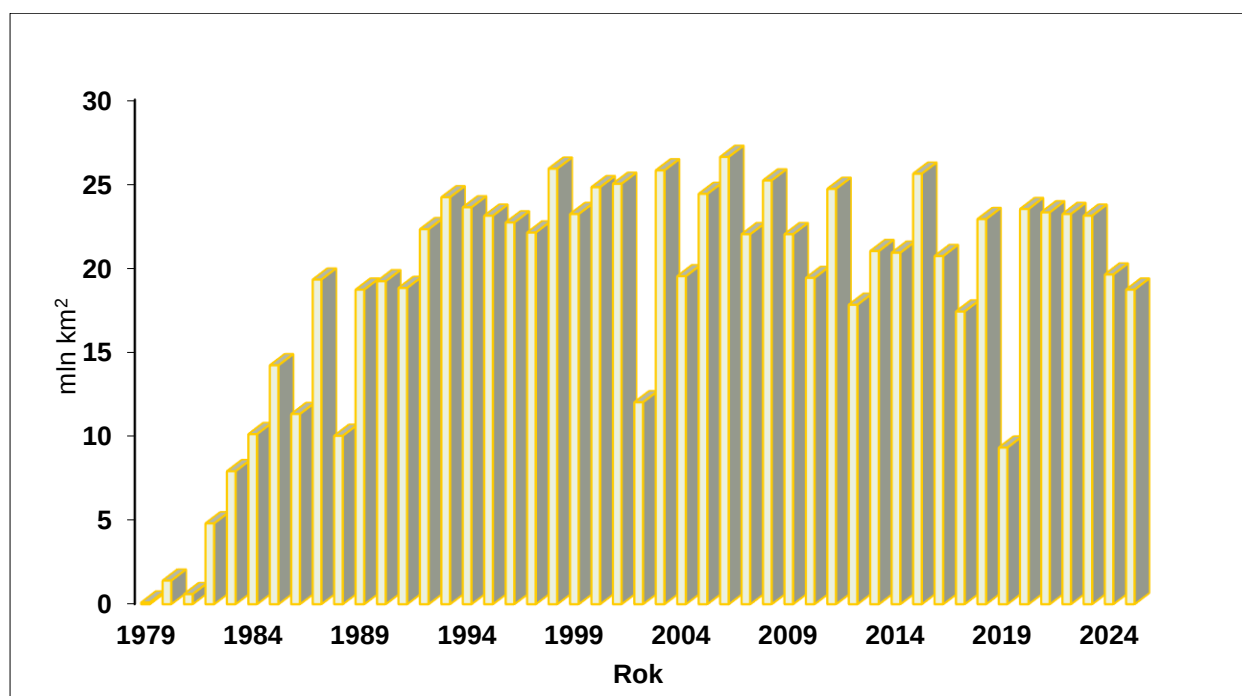
4.5.2. Zmiany całkowitej zawartości ozonu nad Antarktydą i Arktyką

Dziura ozonowa formuje się regularnie już od prawie 40 lat w końcu antarktycznej zimy (sierpień) i zanika kilka tygodni przed początkiem antarktycznego lata. Podobne zjawisko nie występuje z taką regularnością w innych rejonach na kuli ziemskiej. Każdego roku zimą na półkuli południowej formuje się potężny polarny wir, który izoluje ten obszar od napływu cieplejszych mas ze średnich szerokości geograficznych. Dochodzi wtedy do znacznego wychłodzenia stratosfery nad Antarktydą. Niska temperatura stratosfery przyczynia się do tworzenia chmur zwanych polarnymi chmurami stratosferycznymi (PSC). 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 (-78°C), zaczynają się tworzyć chmury zawierające mieszaninę wody i kwasu azotowego. Tego rodzaju chmury są nazywane polarnymi chmurami stratosferycznymi (PSC) 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 rozkładać tysiące cząsteczek ozonu, zanim ulegnie dezaktywacji spowodowanej reakcją z cząsteczką dwutlenku azotu (NO_2). Kiedy temperatura spada jeszcze bardziej (rzędu -90°C) mogą tworzyć się chmury zawierające wyłącznie zamrożoną wodę. Te lodowe chmury nazywane są PSC typu II. Chmury lodowe w stratosferze prowadzą do dużo większych ubytków ozonu w porównaniu do tych generowanych przez PSC typu I, gdyż związki halogenowe szkodliwe dla ozonu są wydajniej aktywowane w reakcjach heterogenicznych zachodzących przy powierzchni lodu.

W sytuacji znacznego zanieczyszczenia atmosfery substancjami niszczącymi warstwę ozonową, które stopniowo, lecz powoli, ulegają zmniejszeniu w wyniku stosowania ograniczeń w produkcji takich substancji wprowadzonych przez Protokół Montrealski z 1987 r., następuje całkowite zniszczenie ozonu w dolnej stratosferze (15–20 km) w sezonie wiosennym. PSC uznawane są jako prekursor destrukcji stratosferycznego ozonu nad tym obszarem (Solomon i inni, 1986). Niezwykle rzadko pojawia się dziura ozonowa nad Arktyką i tylko podczas ekstremalnie chłodnych zim (taka ostatnio była w 2020 r). W średnich i niskich szerokościach geograficznych, temperatura w stratosferze jest za wysoka i nie występują PSC.

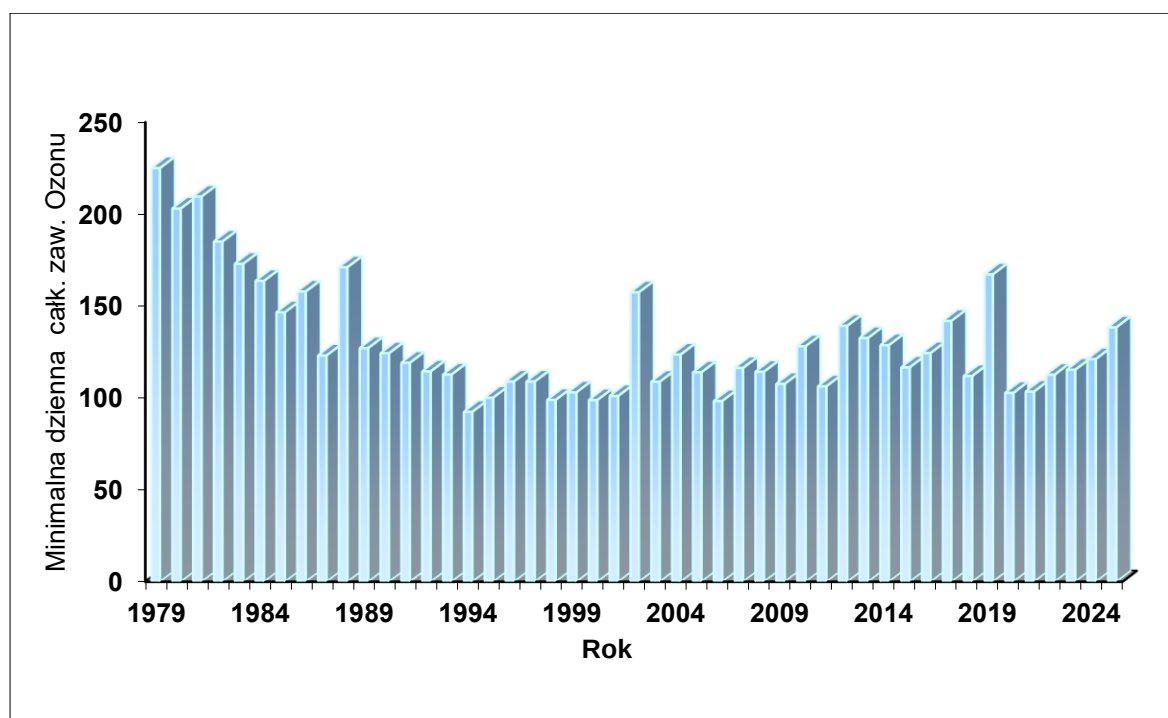
Zwyczajowo mówi się o występowaniu dziury ozonowej, kiedy CZO3 jest poniżej 220 Dobsonów. Taka sytuacja zdarza się regularnie w ostatnich 40 latach w okresie sierpień–grudzień nad obszarami polarnymi półkuli południowej. Przed 1979 rokiem nie notowano nad Antarktydą wartości CZO3 mniejszych od 220 D. Maksymalny średni dzienny rozmiar dziury ozonowej w 2001 roku osiągnął prawie 29 mln km^2 . Na Rys.4.5.4 przedstawiono średni obszar dziury ozonowej w okresie 07.09 – 13.10 w latach 1979–2025. Od połowy lat 90-tych XX wieku powierzchnia dziury ozonowej w tym okresie oscyluje wokół dwudziestu kilku milionów km^2 .



Rys. 4.5.4. Średni obszar dziury ozonowej w milionach km² w okresie 07.09 – 13.10 w latach 1979 – 2025. Dane pochodzą ze strony internetowej:

http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology/annual_data.txt

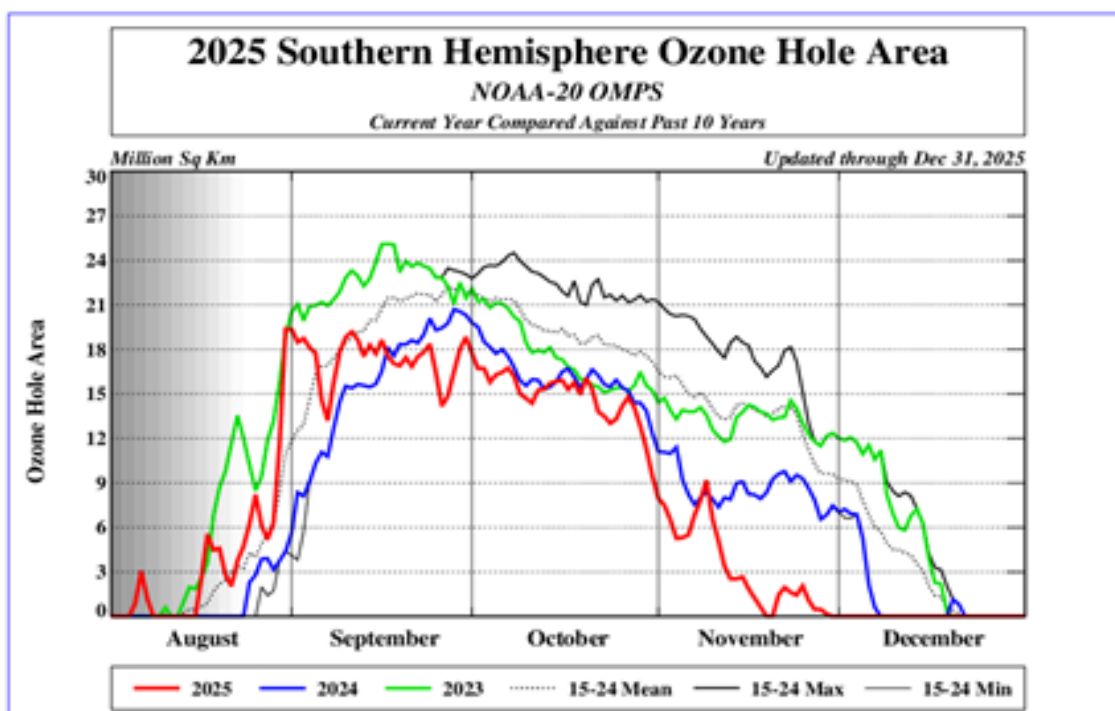
Obszar dziury ozonowej w 2025 r. był piątym z kolei najmniejszym obszarem od 1992 r., kiedy to zaczęto wdrażać Protokół Montrealski – przełomowe międzynarodowe porozumienie w sprawie stopniowego wycofywania substancji chemicznych niszczących warstwę ozonową. W sezonie 2025 średnia powierzchnia dziury ozonowej wynosiła 18,7 mln km². W 2019 r. obserwowano jedną z najmniejszych dziur ozonowych (9,3 mln km²) w XXI wieku. Duże zmiany powierzchni dziury w ciągu ostatnich kilku lat, można wyjaśnić odmiennymi warunkami termicznymi w tych latach. W 2019 r. miało miejsce ocieplenie stratosferyczne, a w latach 2020–2023 antarktyczny wir polarny był odizolowany od cieplejszych mas powietrza zalegających w średnich szerokościach geograficznych, co doprowadziło do wychłodzenia Antarktydy i w konsekwencji do wzmocnienia intensywności heterogenicznych reakcji niszczących ozon w obecności polarnych chmur stratosferycznych i na cząstkach aerozolu, którego koncentracja wzrosła nad Antarktydą po pożarach biomasy w Australii 2020/21 i wybuchu wulkanu Hunga Tonga w 2022 r.



Rys. 4.5.5. Średnia z minimalnych dziennych wartości całkowitej zawartości ozonu w okresie 21.09-16.10 (w Dobsonach) nad Antarktydą w latach 1979–2025. Dane ze strony: http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology/annual_data.txt.

Jednym z parametrów określających rozmiar destrukcji ozonu nad Antarktydą jest średnia wartość minimalnych dziennych wartości CZO3 w tym obszarze w okresie 21.09 – 16.10 (Rys. 4.5.5), kiedy dziura ozonowa zwykle osiąga największy rozmiar (Rys. 4.5.6). 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 D. W 2025 r. średnia wartość CZO3 w okresie 21.09-16.10 wyniosła 138,3 D, co odpowiadało typowej wartości rejestrowanej od połowy lat 90-tych ubiegłego wieku (Rys. 4.5.5).

W pierwszych dniach września powierzchnia dziury ozonowej w 2025 r. była powyżej średniej wieloletniej 2014–2024 i w początkach września osiągnęła największy rozmiar w roku (ok. 19 mln km²). Następnie jej rozmiar był znacznie poniżej średniej wieloletniej. Zwykle maksymalna dziura ozonowa w sezonie wiosennym pojawia się w końcu września i jej powierzchnia w ekstremalnych latach dochodziła do 30 mln km². Dziura ozonowa w 2025 roku zanikła trzy tygodnie wcześniej niż zwykle (Rys.4.5.6). Zwykle ma to miejsce około 15 grudnia i wtedy nie ma obszarów nad Antarktydą, gdzie CZO3 jest poniżej 220 D. Maksymalnie dziura ozonowa istniała do końca grudnia.

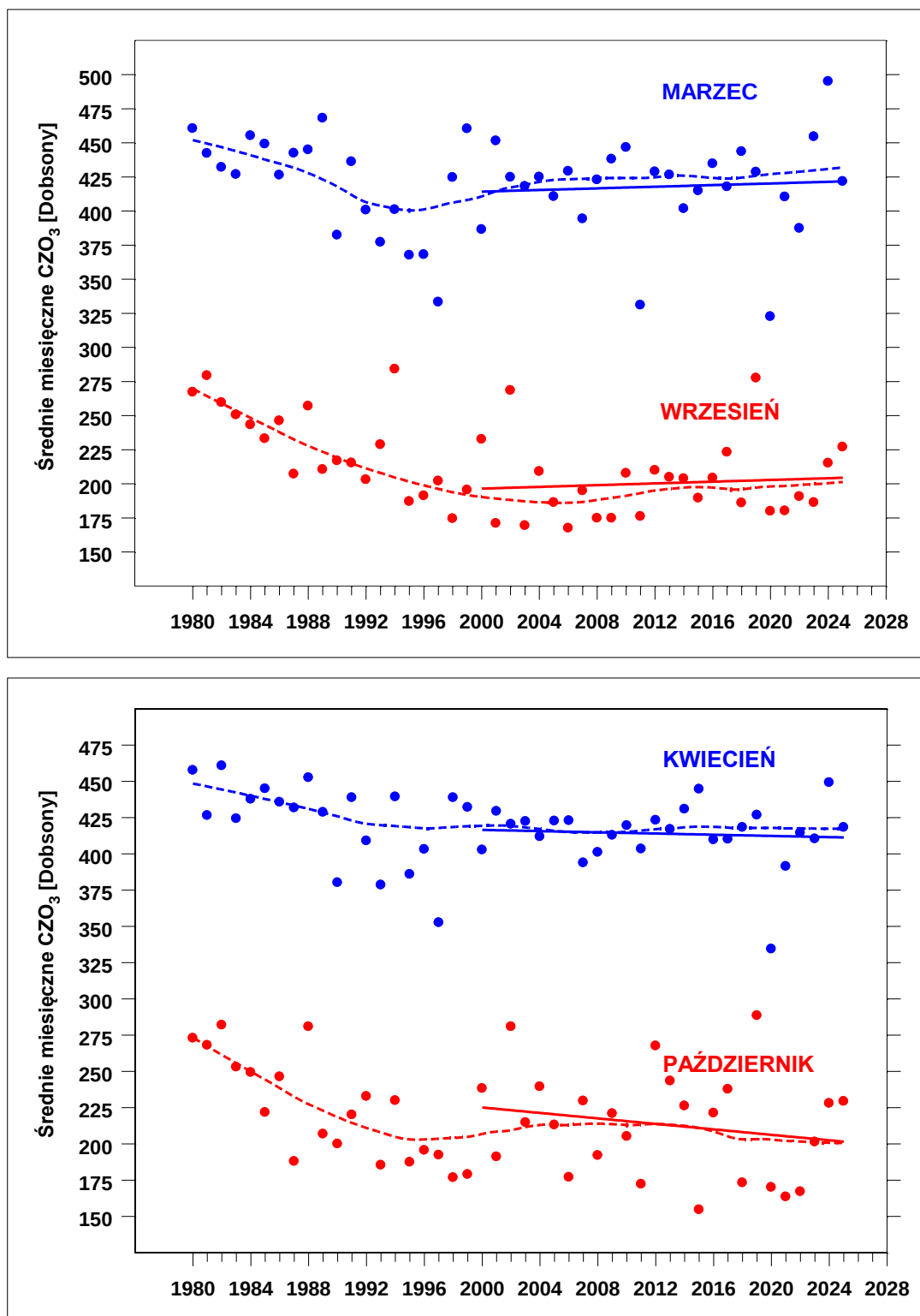


Rys. 4.5.6. Powierzchnia antarktycznej dziury ozonowej w milionach km² w sezonie w latach 2023, 2024 i 2025 (odpowiednio krzywa zielona, niebieska i czerwona) na tle średnich dziennych obszaru dziury ozonowej w okresie 2015–2024 (kropkowana czarna krzywa), oraz maksymalnych i minimalnych dziennych wartości w latach 2015–2024 (ciągłe czarne krzywe nad i pod krzywą dla średnich wartości). (źródło: opracowanie NOAA, USA, www.cpc.ncep.noaa.gov)

Od początku XXI wieku obserwowane są symptomy zmian (może i zaniku?) w rozległości i głębokości dziury. Powierzchnia dziury nie rośnie systematycznie z roku na rok, tak jak to obserwowano w latach 80-tych i wczesnych 90-tych ubiegłego wieku. Obserwowane są duże zmiany z roku na rok rozległości dziury i intensywności destrukcji ozonu w jej obszarze. W związku ze zmianami klimatu i zwiększonymi fluktuacjami w temperaturze stratosfery nad Antarktydą, co wpływa na tempo niszczenia ozonu w tej warstwie atmosfery, obserwuje się coraz częściej anomalny i nieprzewidywalny rozwój dziury ozonowej. Przez cztery kolejne lata 2020–2023 powierzchnia dziury ozonowej w okresie w okresie 07.09–13.10 była zbliżona do tej z końca lat 90-tych XX wieku i początku XXI wieku, co mogło sugerować osłabienie tempa zaniku dziury ozonowej (Rys. 4.5.4) w sprzeczności z obserwowaną redukcją koncentracji substancji niszczących warstwę ozonową w stratosferze (Montzka i inni, 2024). Jednak w 2024 i 2025 r. nastąpił powrót do tendencji stopniowego zaniku antarktycznej dziury ozonowej.

Rysunek 4.5.7 przedstawia serie czasowe średnich miesięcznych CZO₃ z reanalizy MERRA-2 dla obszaru 66,5N–90N (Arktyka) i 66,5S–90S (Antarktyda) dla wybranych wiosennych miesięcy, kiedy efekt destrukcji ozonu związany ze stratosferycznymi chmurami polarnymi powinien być największy (marzec, kwiecień – Arktyka; wrzesień, październik – Antarktyda). W marcu i kwietniu 2020 r. nad Arktyką pojawiły się ekstremalnie niskie średnie miesięczne CZO₃ (najmniejsze w serii czasowej 1979–2020). Poziom ozonu osiągnął 70% średniej dla całego

okresu 1979–2021. W 2025 r. średnie miesięczne CZO₃ we wrześniu i październiku (marcu i kwietniu) były zbliżone do typowych wartości dla XXI wieku nad Antarktydą (Arktyką).



Rys. 4.5.7. Średnie miesięczne CZO₃ w jednostkach Dobsona nad Arktyką (kolor niebieski) i Antarktyką (kolor czerwony) w dwóch pierwszych miesiącach wiosennych w okresie 1980–2025. Proste przedstawiają liniowe trendy w okresie 2000–2025. Wykorzystano dane z reanalizy MERRA-2.

Naprawa warstwy ozonowej rozpoczęła się po 1995 r. (w Arktyce) i po 2000 r. (nad Antarktydą) – Rys. 4.5.7. Stopniowa regeneracja warstwy ozonowej, którą sugerowałaby zmniejszająca się koncentracja substancji niszczących ozon (Montzka i inni, 2024), jest jednak słabo widoczna w obszarach podbiegunowych w XXI wieku. Wydaje się, że poziom ozonu ustabilizował się w ostatnim dziesięcioleciu, a w październiku nad Antarktydą zaczyna się pojawiać zaskakująco spadkowa tendencja, która obecnie jest istotna na poziomie 1σ , lecz nie na 2σ . Oczekiwano wyraźniejszej wzrostowej tendencji. Trudno w tym momencie określić kierunek zmian w warstwie ozonowej w obszarach podbiegunowych, zwłaszcza, że dziura ozonowa w latach 2020–2023 nad Antarktydą była tak rozległa, tak jak na przełomie XX i XXI wieku i trwała wyjątkowo długo, natomiast nad Arktyką w 2020 r. pojawiła się dziura ozonowa nieobserwowana w tym rejonie od 2010 roku. Wydaje się, że jednak przyjdzie jeszcze długo poczekać na moment trwałego zaniku antarktycznej dziury ozonowej.

4.6. Uwagi końcowe

Liczne opracowania wskazują na znaczący wpływ zmian w cyrkulacji atmosfery na obserwowane długookresowe tendencje zmian w warstwie ozonowej. Zmiany w warstwie ozonowej są wypadkowym efektem zmniejszenia zanieczyszczenia atmosfery substancjami niszczącymi warstwę ozonową i specyficznej cyrkulacji w atmosferze prowadzącej do długookresowych oscylacji CZO3. Wzrostowe, bez ustalonego kierunku, lub nawet spadkowe tendencje w CZO3 związane z naturalnymi oscylacjami w dynamice dolnej stratosfery mogą występować na przemian utrudniając ocenę tempa regeneracji warstwy ozonowej.

Krzyżsin i Czerwińska (2024) dyskutowali, że naprawa warstwy ozonowej nad Antarktydą jest ciągle w toku ze względu na stopniowe zmniejszanie koncentracji SNWO3 w dolnej stratosferze zapoczątkowane około 2001 r., które było wynikiem funkcjonowania ograniczeń w produkcji i stosowaniu SNWO3 wprowadzonych przez Protokół Montrealski z 1987 i jego późniejsze poprawki. Szczególna dynamika atmosfery w ostatnich latach i ekstremalne wydarzenia, takie jak rozległe pożary w Australii na przełomie 2019/2020 i erupcja wulkanu Hunga Tonga na Pacyfiku (początek 2022), przyczyniły się do wzmocnienia dziury ozonowej w latach 2020–2023. Wydaje się, że zmiany klimatu w XXI wieku (a szczególnie wzrost zawartości pary wodnej w stratosferze) będą zwiększały objętości PSC, co w konsekwencji doprowadzi do wzrostu tempa destrukcji ozonu. Szacowany czas zaniku dziury ozonowej na około 2070 r. opierający się na założeniu stałego tempa usuwania substancji zubożających warstwę ozonową ze stratosfery, które zaobserwowano w ostatnich dwóch dziesięcioleciach nad Antarktydą, należy traktować z ostrożnością.

Wang i inni (2025) stosując zaawansowane techniki wykrywania źródeł zmian klimatu stwierdzili, że warstwa ozonowa na Antarktydzie wykazuje wyraźne oznaki odbudowy, dzięki globalnym wysiłkom w ramach postanowień Protokołu Montrealskiego z 1987 r. Korzystając z obserwacji satelitarnych i modeli klimatycznych, naukowcy potwierdzili, że naturalna zmienność klimatu może wpływać na fluktuacje warstwy ozonowej w krótkich skalach

czasowych. Jednak redukcja substancji zubożających warstwę ozonową jest głównym czynnikiem napędzającym regenerację. Badanie dostarcza solidnych statystycznych i fizycznych dowodów na to, że międzynarodowa współpraca w zakresie zarządzania środowiskiem przynosi wymierne sukcesy w ochronie atmosfery naszej planety.

Mieszanie w stratosferze powietrza równikowego z natury ubogiego w ozon z powietrzem w średnich szerokościach geograficznych osłabia tempo naprawy warstwy ozonowej w wybranych rejonach na kuli ziemskiej (Ball i in. 2020). Dodatkowo stwierdzony wzrost koncentracji ozonu przyziemnego w strefie tropików sprzyja większej emisji jodu z powierzchni oceanu, powodując zmniejszenie zawartości ozonu w dolnej stratosferze nad równikiem, a następnie także i w strefie średnich szerokości geograficznych (Koenig i in. 2020). Potencjał niszczenia ozonu przez jod jest porównywalny z chlorem i bromem uwalniającym się z antropogenicznych gazów przenikających do stratosfery (Koenig i in. 2020), a których stosowanie zostało zakazane przez Protokół Montrealski z 1987 roku i późniejsze poprawki. Istnieją więc przesłanki do osłabienia regeneracji warstwy ozonowej, a może i chwilowego (?) powrotu do spadkowej tendencji zawartości ozonu w stratosferze nad niektórymi obszarami.

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 wysoką 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.

5. PODSUMOWANIE

W okresie od 1 stycznia do 31 grudnia 2025 r. w Centralnym Obserwatorium Geofizycznym PAN w Belsku zrealizowano wszystkie zadania przewidziane w umowie nr GIOŚ/247/2025/DMŚ/NFOŚiGW.

Prowadzono systematyczne pomiary całkowitej zawartości ozonu spektrofotometrami Dobsona i Brewera, wykonano 207 serii pomiarowych Umkehr pozwalających wyznaczyć pionowy rozkład ozonu.

Kontynuowano rozpoczętą w 1975 r. rejestrację promieniowania UV-B oraz prowadzono ciągłe pomiary stężeń O_3 , SO_2 , NO_2 , CO i pyłu zawieszonego PM_{10} w przyziemnej warstwie atmosfery.

Wyniki pomiarów przekazywano na bieżąco oraz w trybie miesięcznym do GIOŚ.

Dane o całkowitej zawartości ozonu i jego rozkładzie pionowym przekazywano w trybie miesięcznym do Światowego Centrum Danych Ozonowych w Toronto.

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.

W trybie rocznym przekazywano średnie miesięczne całkowitej zawartości ozonu i promieniowania UV-B w Belsku do GUS i europejskiego Centrum Danych Inspire.

W przypadku spadku całkowitej zawartości ozonu o więcej niż 20% średniej wieloletniej informowano GIOŚ.

Średnie miesięczne wartości całkowitej zawartości ozonu w 2025 r. były niższe od średnich wieloletnich (1963–2024) we wszystkich miesiącach z wyjątkiem maja (+3,8%), a najgłębszy niedobór, wynoszący –17,1%, wystąpił w marcu. W miesiącach letnich nie rejestrowano znaczących odchylen napromienienia erytemalnego od średniej wieloletniej, a liczba dni z wysokim indeksem UV-B była zbliżona do obserwowanej w latach poprzednich. Stężenia chwilowe zanieczyszczeń powietrza zmierzone w 2025 r. nie odbiegały znacząco od stężeń zmierzonych w ostatnich latach.

Obserwowane od połowy lat 90. XX wieku zmiany w warstwie ozonowej nad Belskiem potwierdzają skuteczność postanowień Protokołu Montrealskiego, jednak tempo regeneracji warstwy ozonowej pozostaje powolne i jest modyfikowane przez procesy dynamiczne i klimatyczne. Uzasadnia to kontynuację prowadzonego w Belsku wieloletniego monitoringu całkowitej zawartości ozonu, jego profilu pionowego oraz promieniowania UV-B.

Spadek całkowitej zawartości ozonu w Belsku w okresie 1980-2025 dla sezonu zimowego (-10%) i letniego (-7%) jest większy niż dla strefy 50-55°N zawierającej Belsk (odpowiednio -5% i -4%). Natomiast zmiana w okresie 2000-2025 czyli w czasie tzw. naprawy warstwy ozonowej jest w Belsku taka jak w wyżej wymienionej strefie.

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.
- Ball W.T., Chiodo G., Abalos M., Alsing J.: Inconsistencies between chemistry climate model and observed lower stratospheric trends since 1998, *Atmospheric Chemistry and Physics*, DOI: 10.5194/acp-2019-734, 2020.
- Bernhard, G.H., Bais, A.F., Aucamp, P.J. et al. Stratospheric ozone, UV radiation, and climate interactions. *PhotochemPhotobiol Sci* 22, 937-989 (2023). <https://doi.org/10.1007/s43630-023-00371-y>
- 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.
- Chipperfield, M. P. and Bekki, S.: Opinion: Stratospheric ozone – depletion, recovery and new challenges, *Atmos. Chem. Phys.*, 24, 2783–2802, <https://doi.org/10.5194/acp-24-2783-2024>, 2024.
- Czerwińska, A.E., and Krzyścin, J.W.: Climatological aspects of the increase of the skin cancer (melanoma) incidence rate in Europe, *International Journal of Climatology*, *Int. J. Climatolog*, 40, 3196-3207, <https://doi.org/10.1002/joc.6391>, 2020.
- 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.
- Koenig T.K., Baidar S., Campuzano-Jost P., Cuevas C.A., Dix B., Fernandez R.P., Guo H., Hall S.R., Kinnison D., Nault B.A., Ullmann K., Jimenez J.L., Saiz-Lopez A., Volkamer R.: Quantitative detection of iodine in the stratosphere, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117 (4), 1860-1866, DOI: 10.1073/pnas.1916828117, 2020.
- 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.
- Krzyścin, 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.
- Krzyścin, 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.
- Krzyścin J, and Baranowski, D., Signs of the ozone recovery based on multi-sensor reanalysis of total ozone for the period 1979-2017. *Atmospheric Environment*, 199, 334-344, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.11.050>, 2019.
- Krzyścin J., Rajewska-Więch B., i Borkowski J. Stan warstwy ozonowej nad Polską w okresie 1979-2018. *Przegląd Geofizyczny*, 65, Zeszyt 3-4, 103-121, doi: 1032045/PG-2020-011, 2020.
- Krzyścin, J.: Indicators of the ozone recovery for selected sites in the Northern Hemisphere mid-latitudes derived from various total column ozone datasets (1980–2020), *Atmos. Chem. Phys.*, 23, 3119–3132, <https://doi.org/10.5194/acp-23-3119-2023>, 2023.
- Krzyścin, J., and Czerwińska, A., Signs of Slowing Recovery of Antarctic Ozone Hole in Recent Late Winter–Early Spring Seasons (2020–2023). *Atmosphere* 2024, 15(1), 80; <https://doi.org/10.3390/atmos15010080>, 2024.
- Krzyścin, J. W., Czerwińska, A., Rajewska-Więch, B., Jarosławski, J., Sobolewski, P. S., and Pawlak, I.: Biologically effective daily radiant exposure for erythema appearance, previtamin D3 synthesis, and clearing of psoriatic lesions derived from erythema broadband meters at Belsk, Poland, for the period 1976–2023, *Earth Syst. Sci. Data*, 17, 3757–3775, <https://doi.org/10.5194/essd-17-3757-2025>, 2025.
- Lickley M., Solomon S., Fletcher S., Velders G.J.M., Daniel J., Rigby M., Montzka S.A., Kuijpers L.J.M., Stone K.: Quantifying contributions of chlorofluorocarbon banks to emissions and impacts on the ozone layer and climate, *Nature Communications*, 11, 1380, DOI: 10.1038/s41467020-15162-7, 2020.
- Montzka, S.A., Dutton, G., and Vimont, I., The NOAA ozone depleting gas index: Guiding Recovery of the ozone layer. <https://gml.noaa.gov/odgi/>, an official website of the United States government, 2024.
- 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. et al.: 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 Krzyścin J., Changes in total column ozone at Belsk in perspective of ozone changes over Europe 1963-2008 (in Polish), *Przegląd Geofizyczny*, Z. 1-2, s. 49-59, 2010.
- Solomon, S., Garcia, R. R., Rowland, F. S., and Wuebbles, D. J.: On the depletion of Antarctic ozone, *Nature*, 321, 755–758, <https://doi.org/10.1038/321755a0>, 1986.

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.aae.0061, 2016.

Szełąg, M. E., Sofieva, V. F., Degenstein, D., Roth, C., Davis, S., and Froidevaux, L.: Seasonal stratospheric ozone trends over 2000–2018 derived from several merged data sets, *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 7035–7047, <https://doi.org/10.5194/acp-20-7035-2020>, 2020.

Steinbrecht, W. et al.: 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. doi:10.21944/temis-ozone-msr2.

Wang, P. Fingerprinting the recovery of Antarctic ozone, *Nature*, 2025. Doi: 10.1038/s41586-025-08640-9.

Weber, M. et al.: Assessment of ozone trends – ozonesondes, ground-based, and satellite data. W: WMO Scientific Assessment of Ozone Depletion 2022, WMO Report No. 278, 2023.

SPIS ZAŁĄCZNIKÓW

Załącznik 1. Wyniki pomiarów całkowitej zawartości ozonu zmierzonych spektrofotometrem Dobsona na stacji IGF PAN w Belsku 01.01.2025 – 31.12.2025

Wyniki pomiarów całkowitej zawartości ozonu zmierzonych spektrofotometrem Dobsona na stacji IGF PAN w Belsku w okresie 01.01.2025 – 31.12.2025. Zgodnie z nową umową z GIOŚ od września 2025 roku pomiary wykonywane są tylko w dni robocze.

Załącznik 2. Wyniki pomiarów stężeń gazowych zanieczyszczeń powietrza na stacji IGF PAN w Belsku 01.01.2025 – 31.12.2025

Wartości chwilowe (średnie 1-godzinne) stężeń O₃, SO₂, CO, NO₂ i PM₁₀ na stacji IGF PAN w Belsku. Wyniki przekazywano na bieżąco do bazy danych CAS znajdującej się w oddziale CLB GIOŚ w Warszawie i przesyłane do Komisji Europejskiej w trybie miesięcznym.

Załącznik 3. Dane za rok 2025 całkowitej zawartości ozonu, rozkładu pionowego ozonu metodą Umkehr i promieniowania UV-B w Belsku w postaci arkuszy Excel

Dane za rok 2025 całkowitej zawartości ozonu, rozkładu pionowego ozonu metodą Umkehr i promieniowania UV-B w Belsku w postaci arkuszy Microsoft Excel. Zbiory zawierają kompletne serie pomiarowe za okres 01.01.2025 – 31.12.2025.