



Główny Inspektorat Ochrony Środowiska

Stan warstwy ozonowej i natężenia promieniowania za 2024 rok

RAPORT SYNTETYCZNY: ANALIZA I INTERPRETACJA DANYCH, OCENA TRENDÓW I SKALI ZJAWISKA W POLSCE NA TLE GLOBALNYCH ZMIAN WARSTWY OZONOWEJ W 2024 ROKU



Praca wykonana zgodnie z umową zawartą z Głównym Inspektoratem Ochrony Środowiska
nr GIOŚ/31/2023/DMŚ/NFOŚiGW z dnia 20.02.2023 r.
Praca finansowana wyłącznie ze środków Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej

Opracowanie wykonano w Instytucie Geofizyki Polskiej Akademii Nauk przez zespół w składzie: Janusz Jarosławski, Janusz Krzyściński, Aleksander Pietruczuk, Bonawentura Rajewska-Więch, Piotr Sobolewski, przy współpracy zespołu Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowego Instytutu Badawczego w składzie: Julita Biszczyk-Jakubowska, Aleksander Curyło, Bogumił Kois, Bożena Łapeta, Monika Hajto.

Przy cytowaniu danych należy podawać źródło danych:
Państwowy Monitoring Środowiska, Główny Inspektorat Ochrony Środowiska

Warszawa, 2025

SPIS TREŚCI

1. Wstęp	
2. Całkowita zawartość ozonu	4
3. Pionowy rozkład ozonu	14
4. Sondaże ozonowe	19
5. Długoterminowe zmiany ozonu stratosferycznego nad Legionowem	21
6. Interpretacja trendów ozonu stratosferycznego nad Legionowem	21
7. Promieniowanie UV-B	23
8. Podsumowanie	30

1. Wstęp

Ozon (O_3) jest gazem występującym w atmosferze w śladowych ilościach, ale mimo to o kluczowym znaczeniu dla biosfery i zmieniającego się klimatu. Znaczenie to wynika z właściwości fizycznych ozonu pochłaniania promieniowania w pasmach UV.

Zgodnie z klasyczną teorią Chapmana (1930) ozon tworzy się w procesie fotochemicznym inicjowanym pochłanianiem intensywnego promieniowania UV przez tlen cząsteczkowy. Po dysocjacji O_2 na atomy, tlen atomowy łączy się szybko z inną cząsteczką O_2 . Warunkiem powstania ozonu jest obecność trzeciej dowolnej cząsteczki, która przejmie nadmiar energii. Główne źródło ozonu znajduje się w strefie międzyzwrotnikowej na wysokościach powyżej 25km. Maksymalne nasycenie atmosfery ozonem występuje latem na wysokości ~35km i wynosi ~10 cząsteczek O_3 na milion cząsteczek powietrza. Ozon tworzy się także w niewielkich ilościach podczas burz, a przy powierzchni Ziemi jest wtórnym zanieczyszczeniem powietrza, produkowanym w obecności tlenków azotu i lotnych węglowodorów, działającym toksycznie na drogi oddechowe podczas epizodów tzw. smogu fotochemicznego.

Ozon ze strefy zwrotnikowej jest przenoszony w stronę biegunów. W rezultacie powstaje warstwa ozonowa, która rozprzestrzenia się nad całym globem. Pochłanianie przez ozon promieniowania UV powoduje wzrost temperatury powietrza i powstanie stratosfery na wysokościach od 6-18km do ~50km. Dolna granica stratosfery (tropopauza) ogranicza zasięg konwekcji, stabilizuje klimat na powierzchni Ziemi. Stratosferyczna warstwa ozonowa, zawierająca średnio ~90% ozonu całkowitego, absorbuje w pełni zabójcze promieniowanie UV-C (100-280nm) i pochłania większość promieniowania UV-B (280-320nm), tak, że do powierzchni Ziemi dociera tylko kilka procent biologicznie czynnego promieniowania UV. Cieńsza warstwa ozonowa zwiększa ilość słonecznego UV-B. Wiadomo, że promieniowanie UV-B może być szkodliwe dla wszelkich organizmów żyjących, a wzrost jego natężenia może spowodować szkody w naturalnych ekosystemach, w tym może również wywierać niekorzystny wpływ na zdrowie ludzi (wzrost zachorowań na raka i zaćmę, osłabienie układu odpornościowego).

W roku 1974 sugerowano możliwość zmniejszenia koncentracji ozonu w górnej stratosferze wywołane antropogeniczną emisją freonów. W następnych latach wzrost zawartości tych substancji w atmosferze doprowadził do przyspieszenia procesów niszczenia ozonu, w skali globalnej w końcu lat 1970., szczególnie drastycznie od wczesnych lat 1980., na półkuli południowej w rejonie polarnym na wiosnę – „antarktyczna dziura ozonowa”. W obawie o dalszy los warstwy ozonowej podpisano Protokół Montrealski (PM) w roku 1987, a po szeregu rewizji w kolejnych latach wytwarzanie freonów i halonów zostało zakazane. Pomiary atmosferyczne potwierdzają skuteczność PM w zmniejszaniu ilości substancji szkodliwych dla warstwy ozonowej.

Konwencja Narodów Zjednoczonych o ochronie warstwy ozonowej z 1985 r. (Dz. U. z 1992 r. Nr 98, poz. 488) i Protokół Montrealski dotyczący ograniczenia emisji substancji niszczących warstwę ozonową z 1987 r. wraz z uzupełnieniami (Dz. U. z 1992 r. Nr 98, poz. 490), których Polska jest sygnatariuszem, nakładają obowiązek monitorowania stanu warstwy ozonowej i natężenia promieniowania nadfioletowego przy powierzchni Ziemi.

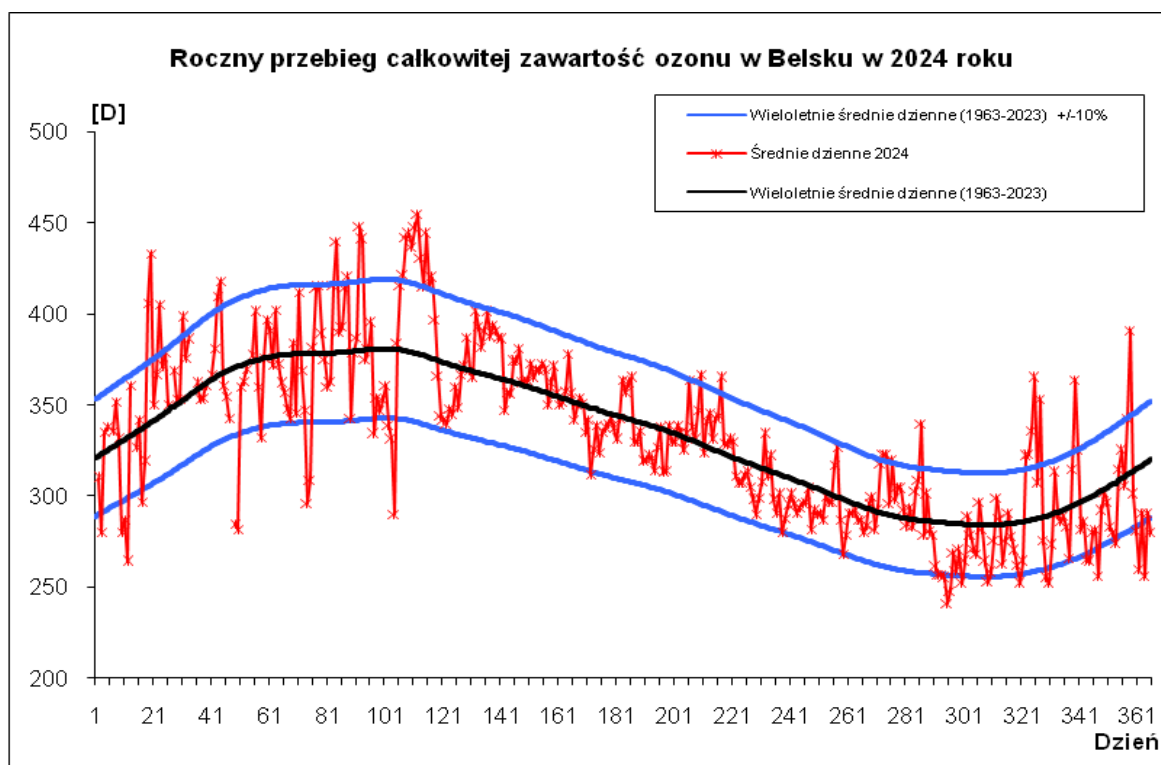
W raporcie przedstawiono analizę stanu warstwy ozonowej i poziomu promieniowania UV-B na podstawie pomiarów wykonanych w IGF PAN i IMGW-PIB w 2024 roku.

2. Całkowita zawartość ozonu

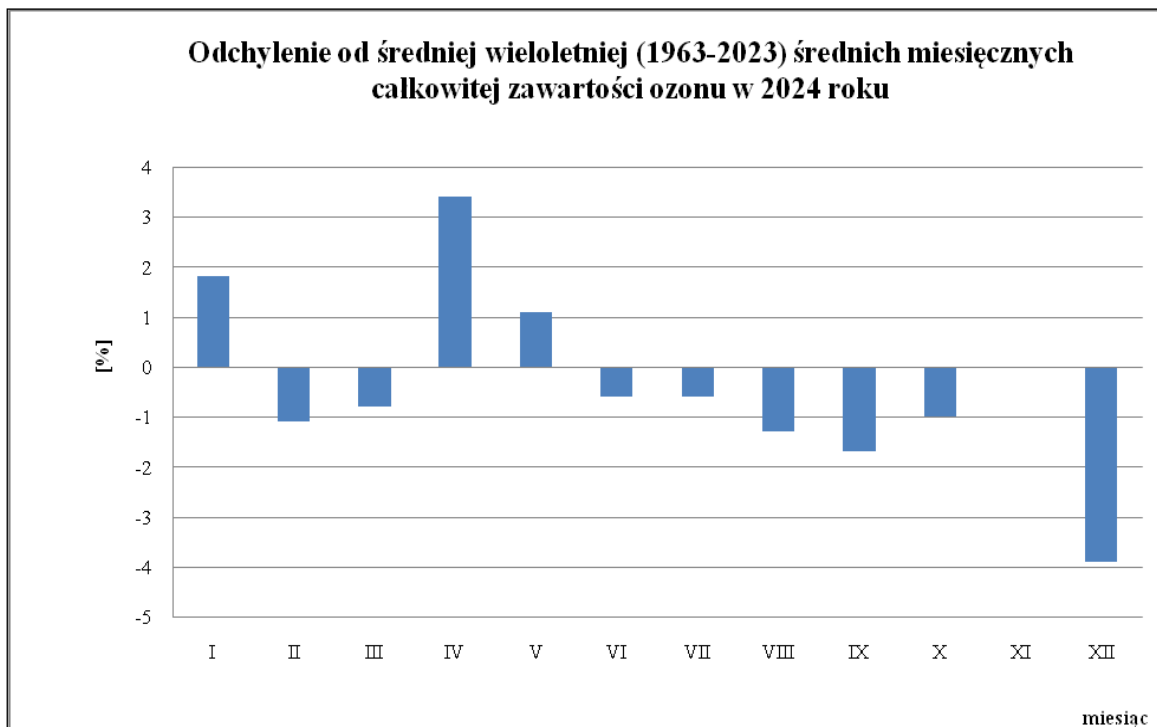
Pomiary całkowitej zawartości ozonu wykonywane są od 1963 roku w Centralnym Obserwatorium Geofizycznym PAN w Belsku przy pomocy spektrofotometru Dobsona, a od 1992 roku, równolegle, spektrofotometru Brewera.

Przebieg średnich wartości dziennych całkowitej zawartości ozonu w atmosferze w poszczególnych miesiącach przedstawia Rys.1, gdzie czerwona linia – średnie dzienne całkowitej zawartości ozonu w 2024 roku, linia czarna – wieloletnia (1963-2023) średnia dzienna całkowitej zawartości ozonu, linia niebieska – odchylenie o $\pm 10\%$ od wieloletniej średniej dziennej.

Analiza danych o całkowitej zawartości ozonu uzyskanych przy pomocy spektrofotometru Dobsona pozwala stwierdzić, że w 2024 roku średnie miesięczne wartości całkowitej zawartości ozonu w Belsku były wyższe od średniej wieloletniej z lat 1963-2023 w styczniu 1,8%, kwietniu 3,4%, maju 1,1%. Ujemne odchylenia średniej miesięcznej całkowitej zawartości ozonu od średniej wieloletniej zaobserwowano w lutym 1,1%, marcu 0,8%, czerwcu 0,6%, lipcu 0,6%, sierpniu 1,3%, wrześniu 1,7%, październiku 1,0% i grudniu 3,9%. W listopadzie średnia miesięczna całkowitej zawartości ozonu w 2024 roku była na poziomie średniej wieloletniej (1963-2023). Przebieg średnich dziennych całkowitej zawartości ozonu w 2024 roku, zmierzonych spektrofotometrem Dobsona, w odniesieniu do wieloletniej średniej dziennej (1963-2023) $\pm 10\%$ przedstawiono na Rys.1. Odchylenia procentowe średnich miesięcznych całkowitej zawartości ozonu od odpowiednich średnich wieloletnich przedstawia Rys.2. i Tab.1.



Rys.1. Roczny przebieg średnich dziennych całkowitej zawartości ozonu, Belsk w 2024 r.

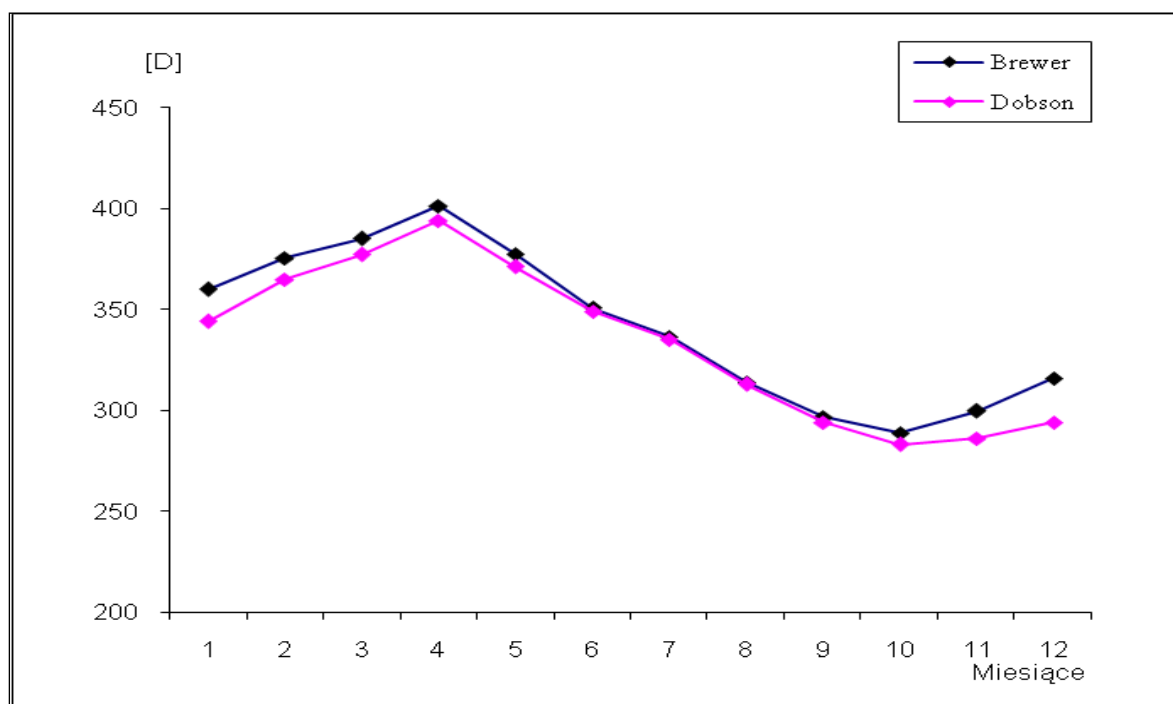


Rys.2. Odchylenie od średniej wieloletniej (1963-2023) średnich miesięcznych całkowitej zawartości ozonu w 2024 roku

Tabela 1. Średnie miesięczne całkowitej zawartości ozonu [D] w 2024 roku i ich odstępstwa od średnich wieloletnich 1963-2023

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Śr. wiel. 1963-2023	338	369	380	381	367	351	337	317	299	286	286	306
Śr. mieś. 2024	344	365	377	394	371	349	335	313	294	283	286	294
Różnica w %	1,8	-1,1	-0,8	3,4	1,1	-0,6	-0,6	-1,3	-1,7	-1,9	0	- 3,9

Przez cały 2024 rok wykonywano również pomiary całkowitej zawartości ozonu przy pomocy spektrofotometru Brewera. Wartości średnie dzienne całkowitej zawartości ozonu uzyskiwane są z pomiarów, dla których rozrzut nie przekracza 2,5D.



Rys.3. Przebieg średnich miesięcznych całkowitej zawartości ozonu zmierzonych spektrofotometrem Dobsona i Brewera, Belsk 2024

Zgodność danych o całkowitej zawartości ozonu uzyskanych ze spektrofotometru Brewera z danymi otrzymanymi przy pomocy spektrofotometru Dobsona może być oceniona jako dobra. Różnica średnich miesięcznych całkowitej zawartości ozonu uzyskanych za pomocą spektrofotometru Dobsona i Brewera mieści się w granicach około $\pm 2\%$ w ciągu całego roku. Należy dodać, że wyniki tych pomiarów różnią się między innymi dlatego,

że spektrofotometr Brewera dostarcza danych, w których uwzględniony jest błąd wynikający z obecności w atmosferze zaburzającego absorbera, jakim jest dwutlenek siarki (SO_2). Mimo wymienionych różnic pomiarowych, średnie miesięczne całkowitej zawartości ozonu uzyskane przy pomocy obydwu przyrządów różnią się niewiele (Rys.3).

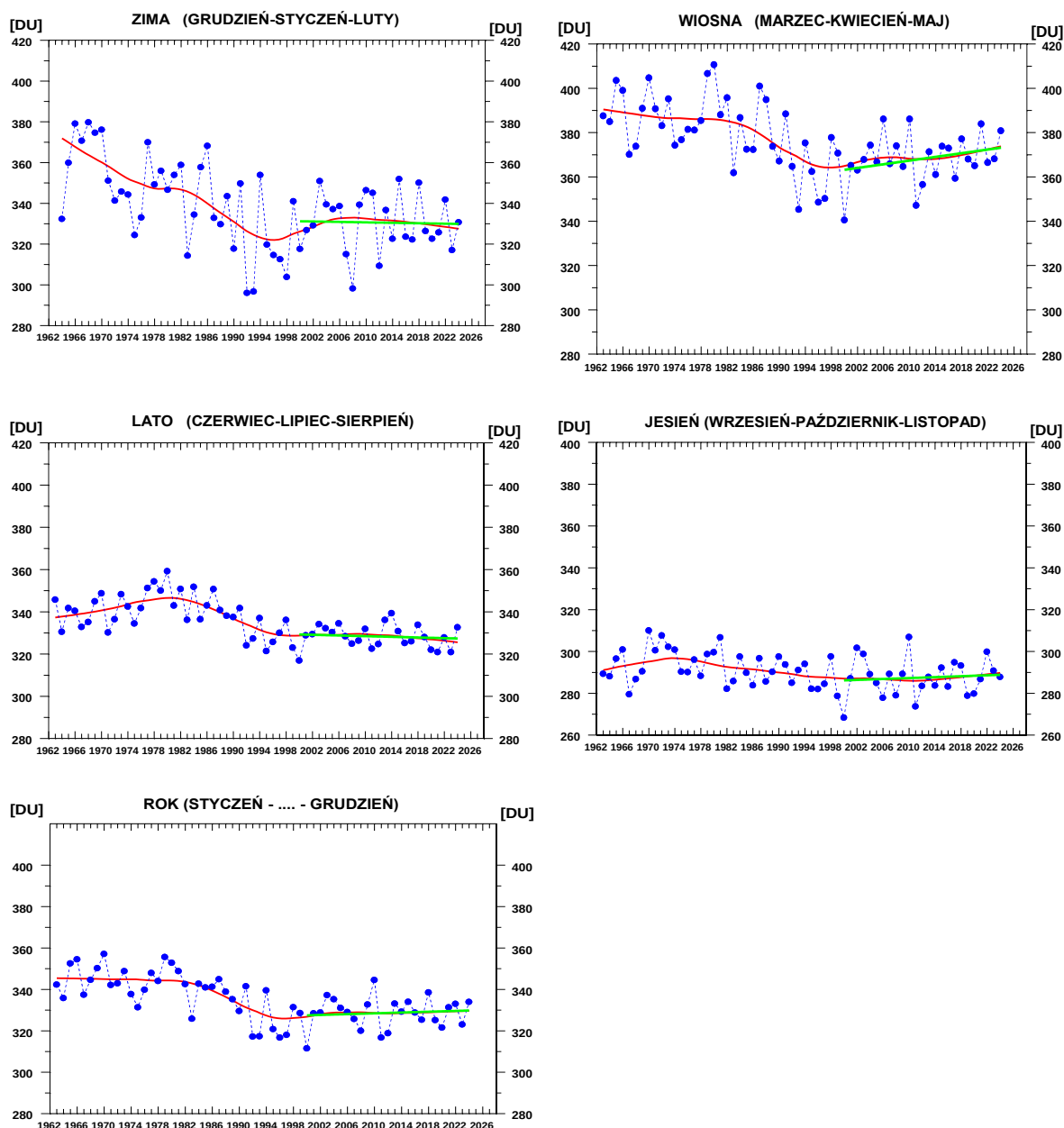
Jakkolwiek podstawowym przyrządem sieci pomiarów całkowitej zawartości ozonu nadal pozostaje spektrofotometr Dobsona, to jednak możliwość kontynuacji pomiarów i analiz porównawczych obu przyrządów jest niezwykle ważna, chociażby ze względu na zapewnienie ciągłości serii pomiarów.

W Centralnym Obserwatorium Geofizycznym w Belsku w ciągu całego 2024 r. wykonywano pomiary całkowitej zawartości ozonu (CZO_3). Wartości średnich (CZO_3) niższe od wieloletnich (1963–2023) średnich miesięcznych obserwowano w lutym (1,1%), marcu (0,8%), czerwcu (0,6%), lipcu (0,6%), sierpniu (1,3%), wrześniu (1,7%), październiku (1,9%) i grudniu (3,9%). Średnie miesięczne odchyłki CZO_3 od wieloletniej średniej (1963–2023) były dodatnie w styczniu (1,9%), kwietniu (3,4%), maju (1,1%). W listopadzie 2024 roku średnia (CZO_3) była na poziomie średniej wieloletniej (1963–2023). Wartości odchyłek średnich dziennych od średnich wieloletnich przekraczały –10%, zwłaszcza w sezonie zimowym (Rys.1.).

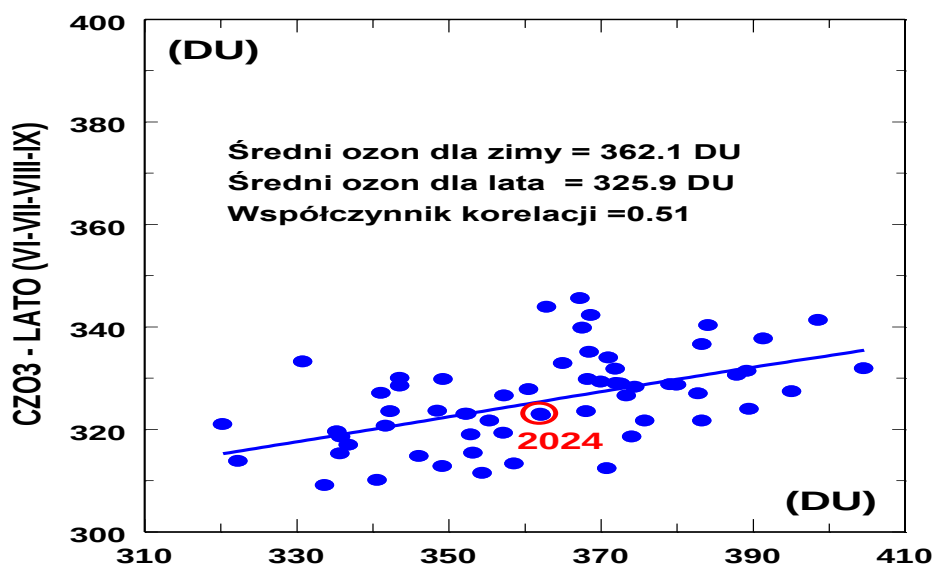
Analizując długookresowe zmiany średnich sezonowych CZO_3 w Belsku (krzywe w kolorze czerwonym na Rys.4. reprezentujące wygładzone metodą lokalnej regresji przebiegi średnich sezonowych) stwierdzamy, że od połowy lat 90-tych XX wieku następuje zmiana kierunku trendu w średnich sezonowych i w średniej rocznej CZO_3 . Wyraźna spadkowa tendencja, która pojawiła się z końcem lat 70-tych została zatrzymana około 1996 r. Od tego momentu obserwujemy wzrostową tendencję w średnich rocznych CZO_3 , a także w zimowych i wiosennych średnich wartościach CZO_3 . Na początku XXI wieku powyższa tendencja zostaje zahamowana i średnie wartości CZO_3 oscylują wokół ustalonego poziomu bez wyraźnego trendu. Liniowe trendy (proste w kolorze zielonym na Rys.4) w danych sezonowych i rocznych CZO_3 są nieistotne statystycznie w okresie 2000–2024. Natomiast stabilizację wartości ozonu na poziomie minimum z połowy lat 90-tych XX wieku obserwujemy w sezonach letnim i jesiennym po 1996 r.

W 2024 r. średnia CZO_3 w okresie czerwiec-wrzesień (323,0D) była około 0,9% poniżej wieloletniej normy (325,9D) z okresu 1963–2023. W tej sytuacji przy braku zachmurzenia poziom promieniowania UV przy powierzchni ziemi powinien być wyższy o około 1,0% w stosunku do wieloletniej normy. Wartości CZO_3 w sezonie letnim 2024 wskazują, że wcześniej w sezonie zimowym (styczeń–luty–marzec) poziom CZO_3 był również zbliżony do średniej wieloletniej (Rys.5.). W 2024 r. powyższa zimowa średnia wynosiła 362,1 D i była równa wieloletniej normie. Wystąpienie zimą wartości CZO_3 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 CZO_3 , które wystąpiły w okresie zimowym nie zostaną w późniejszych miesiącach zlikwidowane, gdyż niskie wartości CZO_3 pojawiają się w skali całej północnej półkuli poza strefą równikową.

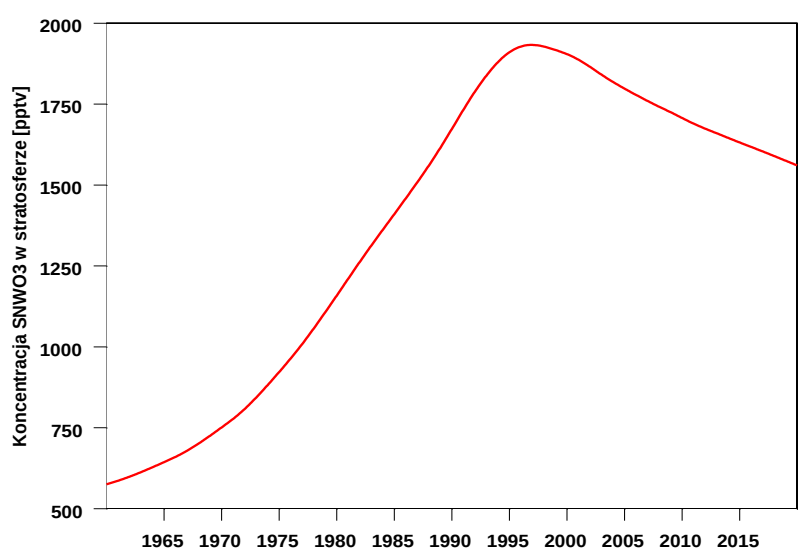


Rys.4. Średnie sezonowe całkowitej zawartości ozonu uzyskane z pomiarów spektrofotometrem Dobsona w COG IGF PAN, Belsk, w okresie 1963–2024. Krzywa czerwona przedstawia wygładzone dane, a zielona liniowy trend w okresie 2000–2024.



Rys.5. 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 2024 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.6.). W związku z tym oczekiwano zatrzymania, a następnie odwrócenia spadkowej tendencji w zawartości ozonu w atmosferze.



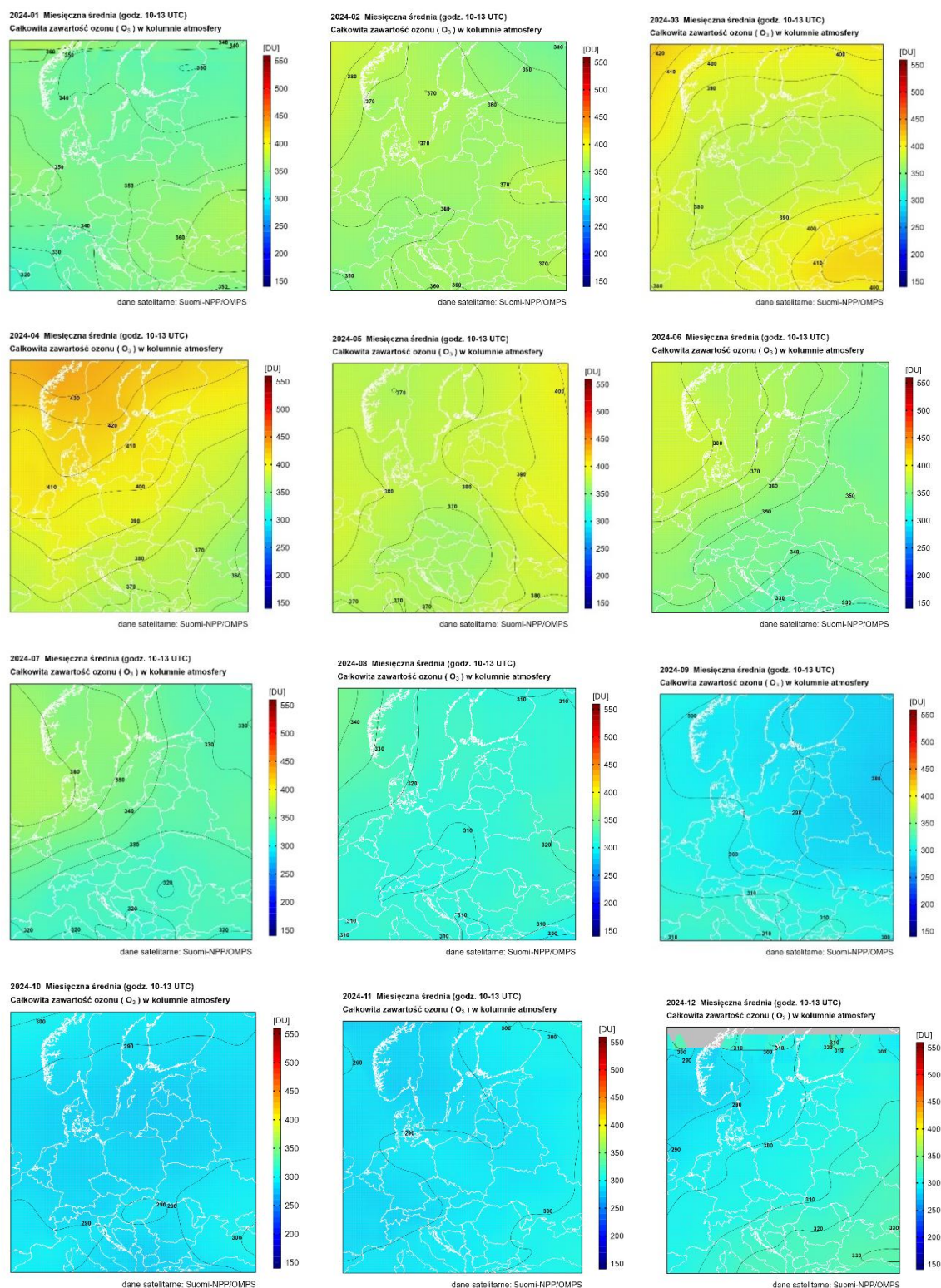
Rys.6. Zawartość substancji niszczących warstwę ozonową (SNWO₃) w stratosferze (1960-2020) w średnich szerokościach geograficznych według obliczeń modelowy (krzywa czerwona)

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). Jednak regeneracja warstwy ozonowej nad Belskiem przebiega powoli i w ostatnich 10 latach raczej widać stabilizację poziomu CZO_3 niż jego stopniowy wzrost, który byłby oczekiwany w związku z systematycznie malejącą koncentracją substancji niszczących warstwę ozonową.

Satelitarny monitoring całkowitej zawartości ozonu w 2024 roku, podobnie jak w latach ubiegłych, był prowadzony z wykorzystaniem danych satelitarnych z czujnika Ozone Mapping and Profiler Suite (OMPS), znajdującego się na pokładzie satelitów meteorologicznych Suomi-NPP (S-NPP) i NOAA-20. Satelity te przelatują nad Polską dwa razy na dobę: w godzinach od 09:15 UTC do 13:00 UTC oraz od 23:30 UTC do 02:30 UTC. Ponieważ czujnik OMPS mierzy promieniowanie w paśmie optycznym, do monitoringu całkowitej zawartości ozonu mogły być wykorzystane jedynie dane z dziennych przelotów satelitów S-NPP.

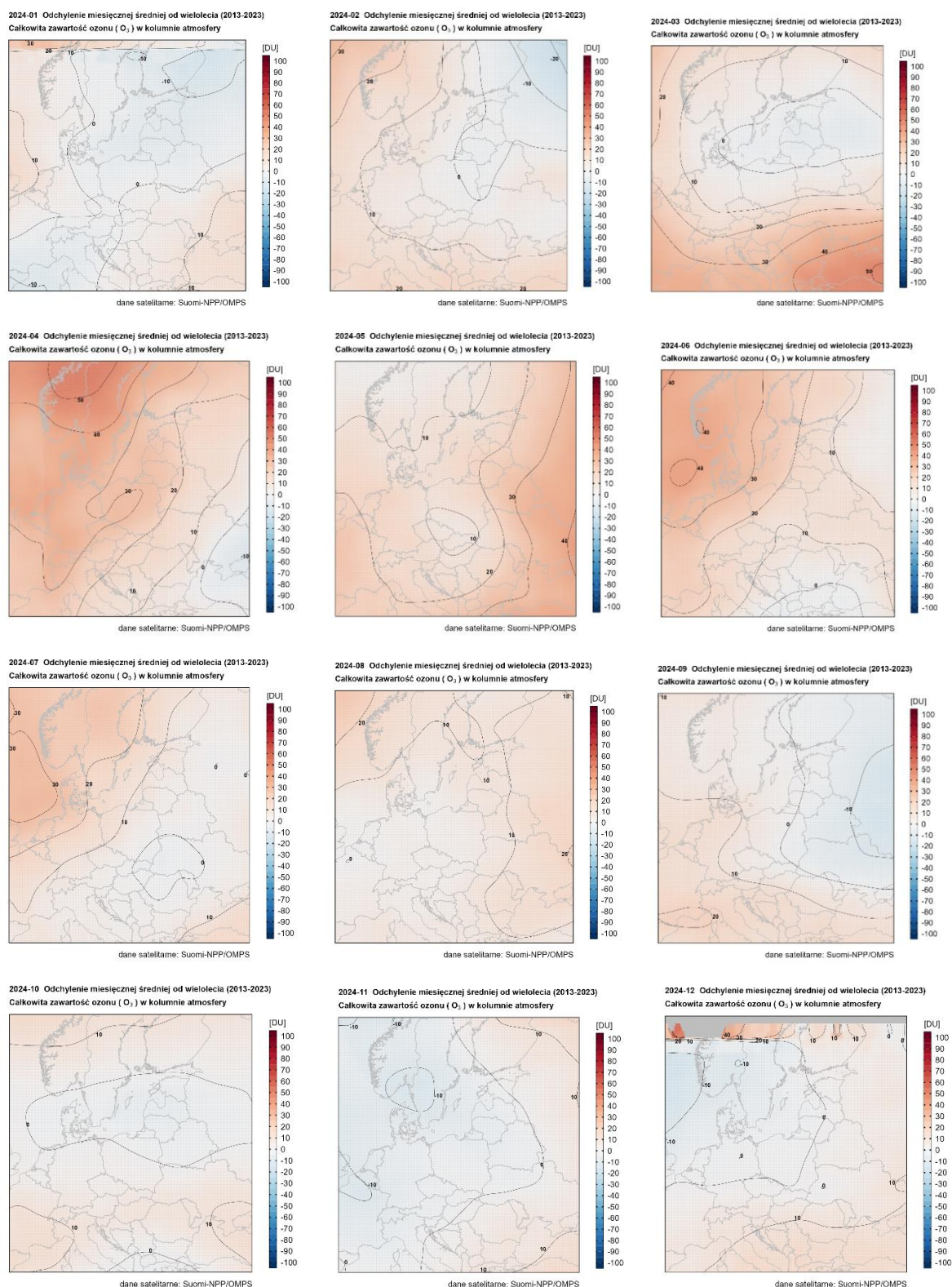
Pola całkowitej zawartości ozonu wygenerowane z danych OMPS były przekształcane do regularnej siatki współrzędnych w zakresie 40° - 64° szerokości geograficznej północnej i 10° - 28° długości geograficznej wschodniej z krokiem $0,25^\circ$. Interpolację przestrzenną wykonano metodą odwróconych odległości.

Na podstawie danych o dziennym rozkładzie CZO_3 wyznaczanym dla godzin okołopołudniowych, obliczone zostały średnie miesięczne rozkłady całkowitej zawartości ozonu (Rys.7.)



Rys. 7. Średnie miesięczne rozkłady całkowitej zawartości ozonu w kolumnie atmosfery, wyznaczone z satelitarnych danych OMPS w 2024 r.

Otrzymana zmienność średnich miesięcznych rozkładów CZO₃ jest zgodna z cyklem rocznym tego parametru, który charakteryzuje się najwyższymi wartościami wiosną i najniższymi jesienią.



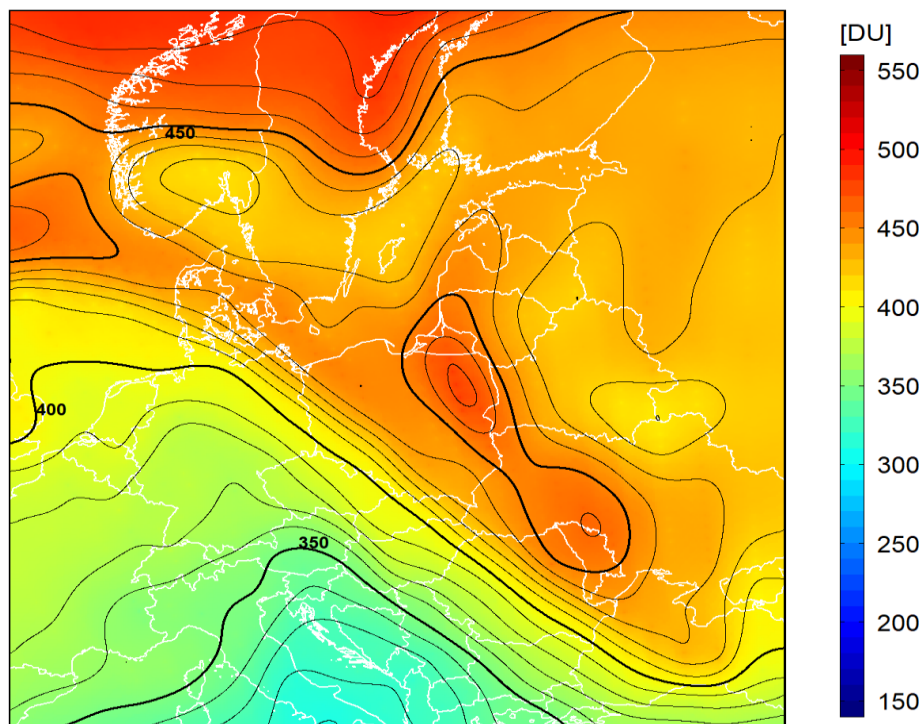
Rys.8. Rozkłady odchyłeń średnich miesięcznych zawartości ozonu wyznaczonych z danych OMPS w 2024 r. od średnich miesięcznych wieloletnich z okresu 2013-2023

Analiza rozkładów różnic średnich miesięcznych wartości CZO₃ nad Europą środkową w 2024 roku i średnich miesięcznych wieloletnich z lat 2013-2023 pokazuje, że 2024 rok charakteryzował się typowymi lub podwyższonymi wartościami CZO₃ (Rys.8.). Największe

dodatnie odchylenia od średniej z wielolecia, zanotowano w miesiącach kwiecień i czerwiec. Na początku kwietnia całkowita zawartość ozonu wynosiła nad północno-wschodnią Polską osiągnęła blisko 500D (Rys.9.).

2024-04-03 godz. 11:28:44 - 11:36:13 UTC

Całkowita zawartość ozonu (O_3) w kolumnie atmosfery



dane satelitarne: Suomi-NPP/OMPS

Rys.9. Całkowita zawartość ozonu w kolumnie atmosfery w dniu 03.04.2024 wyznaczona z danych S-NPP/OMPS

W ramach monitoringu prowadzono również weryfikację dokładności całkowitej zawartości ozonu wyznaczonej z danych satelitarnych OMPS poprzez porównanie z pomiarami naziemnymi dla czterech stacji z obszaru Europy Środkowej, które znajdują się w obrębie każdej transmisji S-NPP. Stacje te to: Belsk (21°E, 52°N), Hohenpeissenberg (11°E, 47,8°N), Hradec-Kralove (15,8°E, 50,2°N) oraz Poprad-Ganovce (20,3°E, 49°N). Pomiary na tych stacjach wykonywane są spektrofotometrem Brewera (Poprad-Ganovce, Hradec-Kralove, Hohenpeissenebrg) oraz Dobsona (Belsk). Wszystkie dane naziemne wykorzystane w analizie pobrane zostały ze Światowego Centrum Danych Ozonowych i UV, znajdującego się w Toronto (Kanada) (www.woudc.org). Dla stacji Hradec-Kralove i Poprad nie było danych pomiarowych z maja, a dla stacji Hohenpeissenberg – z września i października.

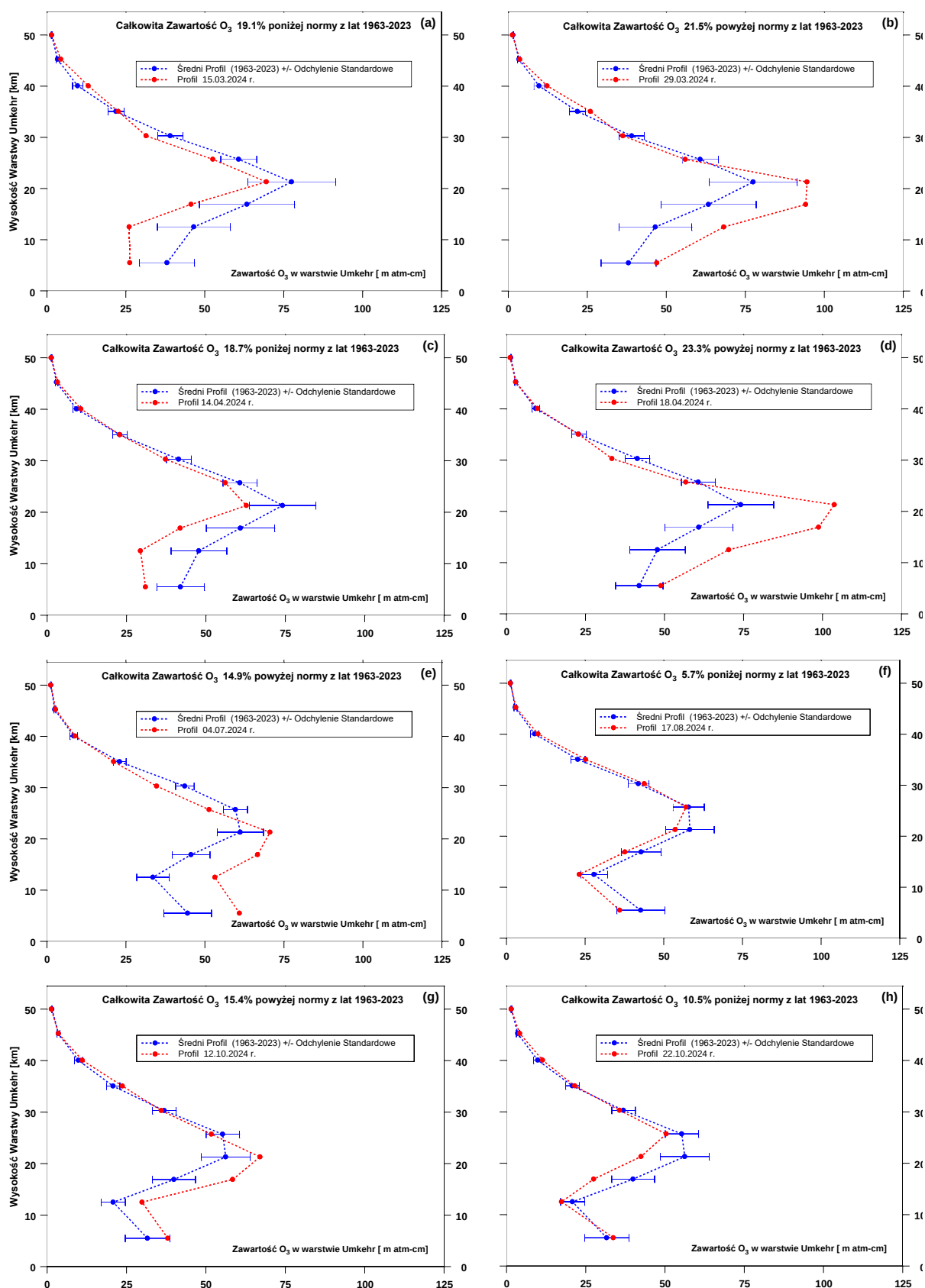
Dla wszystkich czterech stacji otrzymano wysoką korelację pomiędzy serią danych naziemnych i satelitarnych, jednak średni błąd procentowy dla Hradec-Kralove i Popradu był wyższy niż błąd procentowy uzyskany w latach ubiegłych. W 2023 roku średni błąd procentowy wahał się w granicach od 2,63% do 2,97% dla wszystkich czterech stacji, podczas gdy w 2024 mieści się w przedziale 2,31% a 4,68%.

3. Pionowy rozkład ozonu

Serie pomiarów wykonywanych w świetle rozproszonym pochodzącym z niezachmurzonego zenitu przy odległościach zenitalnych Słońca 60° – 90° 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 wyznaczone są z tego rodzaju obserwacji dla całej sieci światowej pomiarów spektrofotometrycznych. Ze względu na wymagania pogodowe (około 3,5 godzin bezchmurnej pogody) liczba serii pomiarów Umkehr zmienia się znacznie z roku na rok.

W 2024 roku wykonano 240 serii pomiarowych przy pomocy spektrofotometru Brewera pozwalających wyznaczyć pionowy rozkład ozonu metodą Umkehr.

Na Rys.10 przedstawiono interesujące przykłady zmian zawartości ozonu w poszczególnych umkehrowskich warstwach atmosfery. Jak widać zmiany te w odniesieniu do średniej wieloletniej 1963-2023 (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.9 można zauważyć znacznie większą zmienność średnich zawartości ozonu w dolnej stratosferze w okresie zimowo-wiosennym w porównaniu do lata. Ponadto profile ozonu w poszczególnych dniach mogą znacznie odbiegać od średnich wieloletnich, zarówno co do wartości w poszczególnych warstwach jak i wysokości wystąpienia maksimum ozonu.

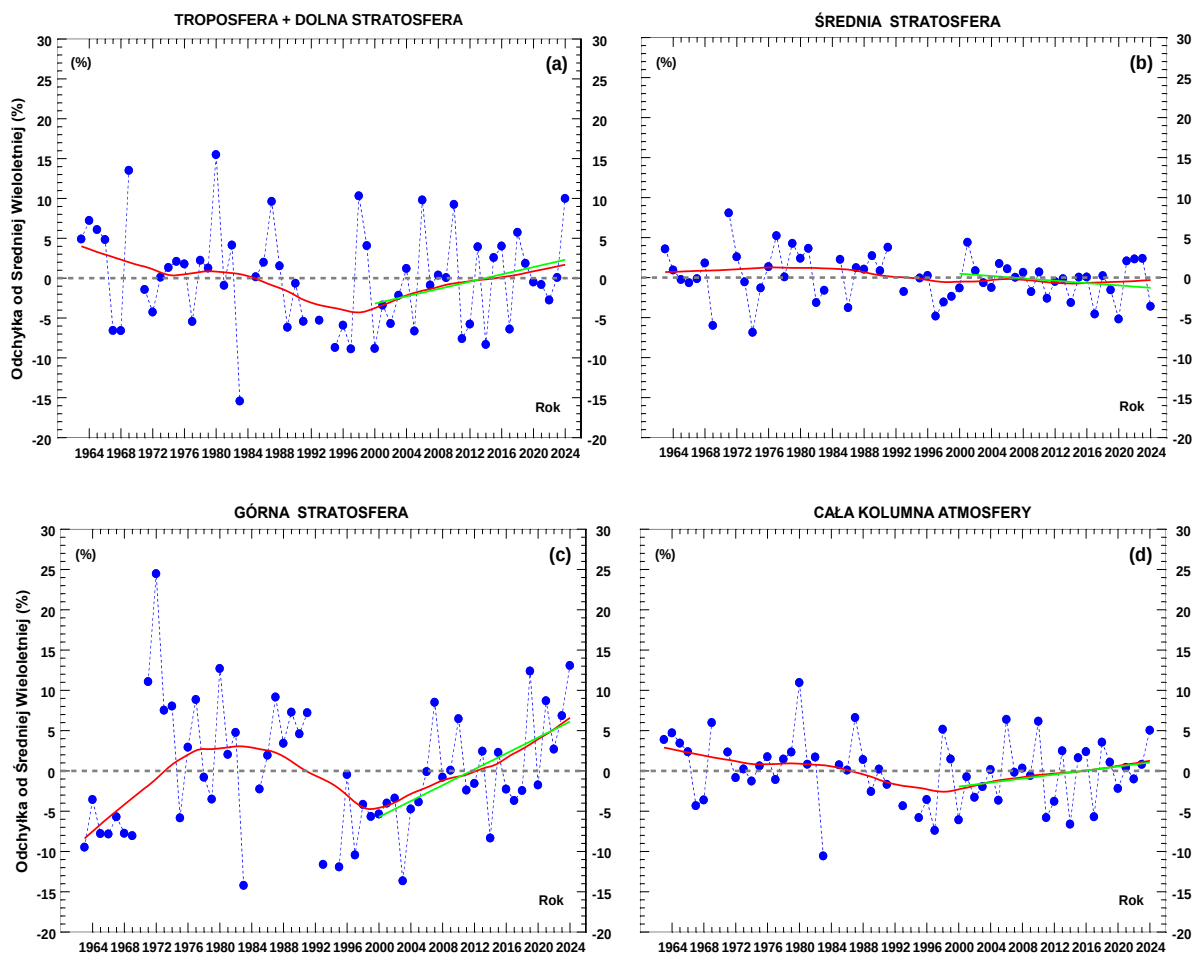


Rys.10. Pionowy profil O₃ dla wybranych dni w 2024 r. wyznaczony z pomiarów Umkehr spektrofotometrem Brewera.

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

Obecnie w literaturze światowej toczy się dyskusja nad tempem powrotu warstwy ozonowej do stanu nie zaburzonego działalnością człowieka. W seriach czasowych całkowitej zawartości ozonu w atmosferze i na wybranych poziomach w stratosferze poszukiwana jest zmiana kierunku trendu z ujemnego na dodatni, którą należałoby oczekiwać wraz z obserwowanym spadkiem zawartości w troposferze i stratosferze substancji niszczących warstwę ozonową. Badanie zmienności trendu w profilu pionowym ozonu jest szczególnie interesujące bowiem uważa się, że naprawa warstwy ozonowej rozpocznie się od obszarów w wysokiej stratosferze, gdzie zmiany w procesach chemicznej destrukcji ozonu są najłatwiejsze do zaobserwowania, wobec ograniczonego wpływu zmian w dynamice atmosfery i jej składzie chemicznym (np. wzrost CO_2) na koncentrację ozonu na tych wysokościach (Newchurch i inni, 2003).

Na Rys.11 przedstawiono przebiegi średnich sezonowych (marzec-kwiecień-maj) zawartości ozonu w wybranych warstwach atmosfery (troposfera + dolna stratosfera, środkowa stratosfera, górną stratosfera, cała kolumna atmosfery) z pomiarów Umkehr w Belsku z zastosowaniem spektrofotometru Dobsona w latach 1963–2020 i spektrofotometru Brewera w 2021–2024 r. Profile ozonu w latach 1963–2020 uzyskano stosując procedurę wyznaczania rozkładu pionowego ozonu metodą Umkehr, *UMK04*, która zalecana była przez Centrum Danych Ozonowych w Toronto (Kanada). Następnie stosowano procedurę obliczeniową stosowaną w europejskiej sieci spektrofotometrów Brewera – EUBREWNET. W sezonie wiosennym 2024 r. obserwowano w troposferze + dolnej stratosferze i w górnej stratosferze zawartości ozonu powyżej normy z lat 1963-2024 o około 10–15%. W średniej stratosferze zawartość ozonu była w pobliżu normy tj. odchyłka wynosiła około –1%. Wygładzony profil z ozonu zsumowanego po wszystkich warstwach Umkehr (Rys.10d) odpowiada profilowi uzyskanemu z pomiarów CZO_3 (Rys.4.– wiosna).



Rys. 11. Odchyłki średnich wiosennych (marzec-kwiecień-maj) od średniej wieloletniej zawartości ozonu (1963–2024) w wybranych warstwach atmosfery z pomiarów Umkehr spektrofotometrem Dobsona (1963–2020) i spektrofotometrem Brewera (w latach 2021–2024) w Belsku. Profil ozonu wyznaczono stosując algorytm *UMK04*. (a) troposfera i dolna stratosfera 0–23,5 km, (b) średnia stratosfera 23,5–37,5 km, (c) wysoka stratosfera >37,5 km, (d) cała kolumna atmosfery. Krzywa w kolorze czerwonym przedstawia wygładzone dane, a prosta w kolorze zielonym trend w okresie 2000–2024.

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 2021 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 całkowitej zawartości ozonu była mniejsza o 1%. Wtedy należało oczekiwać zbliżonych dziennych (przed- i popołudniowych) przebiegów profili pionowych zawartości ozonu w atmosferze.

W celach porównawczych w 2024 r. wykonano 12 profili ozonu stosując spektrofotometr Dobsona i algorytm obliczeniowy UMK04, który obowiązywał w latach 1963-2020. Terminy pomiarów Umkehr spektrofotometrem Brewera i Dobsona były zgodne w 10 przypadkach. Średnie różnice między profilami pionowymi ozonu wynosiły poniżej 5% w warstwach: 14,5–19km 1923,5km, 23,528km, 28–33km, 43–48km, 48km – górna granicy atmosfery. Średnia różnica między zawartościami ozonu w warstwach 0–10km, 10–14,5km, wynosiła odpowiednio –20%, –8%, a w warstwach 33–38,5 km i 38,5–43km około –11%. Współczynnik korelacji między zawartością ozonu w kolejnych 10 warstwach Umkehr wynosił odpowiednio 0,54, 0,98, 0,97, 0,99, 0,94, 0,74, 0,96, 0,58, 0,96, 0,97. Należy kontynuować pomiary profilu ozonu stosując oba spektrofotometry, aby w przyszłości ujednolicić serię czasową profili ozonowych.

Liniowe trendy zmian ozonu w sezonie wiosennym (marzec–kwiecień–maj) w latach 2020-2024 wskazują na stabilizację zawartości ozonu w troposferze i dolnej stratosferze (Rys.11a), w środkowej stratosferze (Rys.11b) i w całej kolumnie atmosfery (Rys.11.d). W górnej stratosferze (Rys.11c) wyznaczono istotnie statystycznie wzrostowy trend, $4,9\% \pm 1,5\%$ (1σ) na 10 lat. Podobną sytuację stwierdzono w sezonie letnim (czerwiec–lipiec–sierpień) i jesiennym (wrzesień–październik– listopad). Trendy wynosiły $3,5\% \pm 1,5(1\sigma)$ na 10 lat latem i $2,4\% \pm 1,1\%$ (1σ) na 10 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 (2017–2024) zatrzymało wzrostowy trend ozonu w tej warstwie. Natomiast dodatni trend w wysokiej stratosferze (Rys.10c), 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 2000-2024 znaleziono w warstwie 23,5–28,0km (tj. warstwie Umkehr numer 5) w sezonie letnim, $-1,7\% \pm 0,8\%$ (1σ), oraz jesiennym, $-1,8\% \pm 0,8\%$ (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; Szeląg i inni, 2020) na podstawie danych satelitarnych. Jednak przyczyna takiej zmienności ozonu nie jest obecnie znana.

4. Sondaże ozonowe

W okresie od stycznia do grudnia 2024 roku na Stacji Pomiarów Aerologicznych (SPA) w Legionowie wykonywano systematycznie, co najmniej raz w tygodniu sondaże ozonowe, elektrochemiczną sondą ozonową ECC6AB produkcji Science Pump Corporation, USA. Pomiary wykonywano w systemie sondażowym DigiCORA MW41/RS41-SG i w systemie nawigacyjnym GPS, a od 14 sierpnia w zaktualizowanej wersji systemu MW41/RS41-SGP.

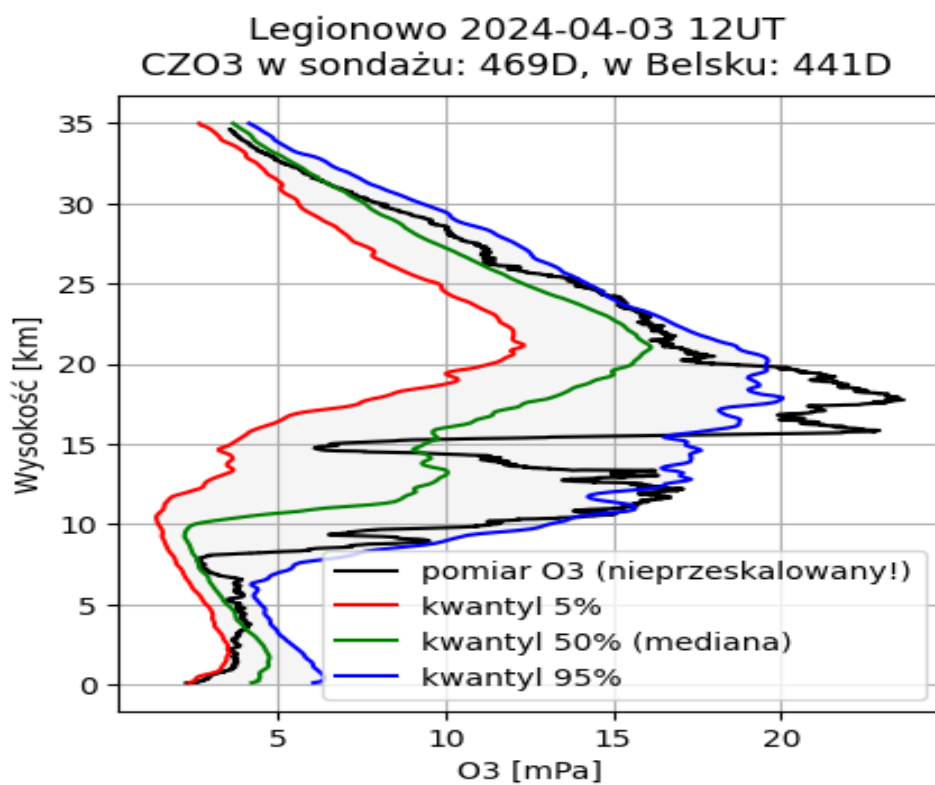
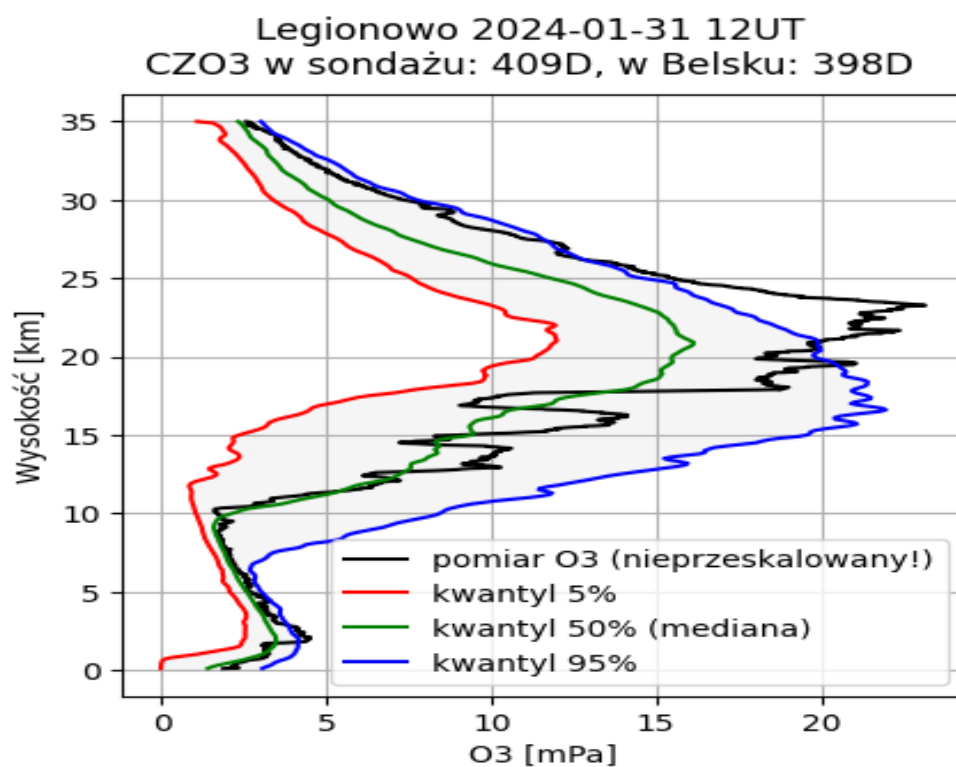
Tabela 2. Zawartość ozonu w warstwach atmosfery nad Legionowem w 2024 r.

Warstwy / Miesiące	Warstwy atmosfery między standardowymi powierzchniami izobarycznymi (hPa)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	<u>~1000</u> 700	<u>700</u> 500	<u>500</u> 300	<u>300</u> 200	<u>200</u> 150	<u>150</u> 100	<u>100</u> 70	<u>70</u> 50	<u>50</u> 30	<u>30</u> 20	<u>20</u> 10	<u>10</u> 00
Styczeń	a	10,1	8,0	8,4	9,8	18,0	33,6	36,1	50,2	85,2	52,8	54,9
	b	8,1	7,5	8,8	11,6	15,9	29,3	35,4	39,9	61,8	38,8	40,5
	c	1,2	0,7	-0,2	-0,3	0,3	0,3	0,1	1,4	3,2	2,4	2,0
Luty	a	9,4	7,4	8,9	10,9	23,2	53,9	34,6	45,5	71,0	39,0	45,9
	b	9,3	8,0	9,6	14,0	18,4	30,6	36,4	41,6	61,8	39,4	43,3
	c	0,0	-0,6	-0,3	-0,3	0,7	1,8	-0,1	0,5	1,1	-0,1	0,4
Marzec	a	11,6	9,5	10,1	13,1	19,6	33,9	40,2	45,3	64,9	36,1	43,5
	b	11,0	8,7	10,7	16,7	21,4	33,3	36,1	40,1	60,4	37,5	44,0
	c	0,3	0,9	-0,2	-0,3	-0,2	0,1	0,4	0,8	0,5	-0,3	-0,1
Kwiecień	a	11,5	9,2	13,3	27,1	27,6	39,6	46,8	44,7	63,2	43,8	52,8
	b	12,6	9,8	12,6	18,1	21,5	30,6	33,9	39,3	59,7	38,2	47,6
	c	-0,5	-0,6	0,1	0,8	0,8	0,8	1,5	0,8	0,6	1,4	1,0
Maj	a	15,9	11,4	11,9	11,7	20,8	35,0	31,7	39,0	59,0	38,2	45,7
	b	13,3	10,5	12,2	15,8	20,4	28,2	29,7	35,7	55,9	38,0	50,2
	c	1,4	0,6	-0,1	-0,5	0,1	0,9	0,3	0,9	0,8	0,1	-1,1
Czerwiec	a	11,8	9,5	11,3	13,6	23,9	28,4	23,1	31,8	56,7	42,2	56,7
	b	13,0	10,6	12,7	13,1	16,4	24,2	25,3	31,3	52,7	39,0	52,4
	c	-0,5	-0,8	-0,6	0,1	1,3	0,8	-0,4	0,2	1,2	1,0	1,4
Lipiec	a	12,6	11,1	12,5	12,0	12,8	20,8	20,9	31,0	53,0	39,1	55,6
	b	12,7	10,4	13,0	14,0	14,4	20,5	23,3	29,6	51,0	38,3	52,5
	c	-0,0	0,5	-0,2	-0,3	-0,3	0,1	-0,6	0,4	0,3	0,2	0,5
Sierpień	a	14,9	11,6	14,5	10,6	11,5	18,5	20,0	29,0	48,0	37,6	51,8
	b	12,5	10,2	12,4	10,9	11,7	19,2	23,4	28,5	47,7	36,9	50,4
	c	0,9	1,1	1,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0,9	0,2	0,1	0,2	0,3
Wrzesień	a	14,4	11,2	11,9	11,5	12,6	20,1	23,3	27,5	47,4	32,0	45,2
	b	11,1	9,2	10,5	9,1	8,7	17,1	23,7	29,4	47,5	34,8	45,5
	c	1,6	1,7	0,7	0,5	1,0	0,6	-0,1	-0,7	-0,0	-0,7	-0,1
Październik	a	10,4	8,6	8,5	5,5	8,1	16,2	23,1	28,6	46,6	35,8	43,6
	b	9,5	8,2	9,7	8,8	8,6	16,6	23,1	28,9	47,6	34,7	41,9
	c	0,5	0,4	-0,5	-0,6	-0,1	-0,1	0,0	-0,1	-0,2	0,3	0,3
Listopad	a	9,8	8,6	9,8	8,9	13,1	28,4	27,5	30,5	50,1	36,3	38,2
	b	8,3	7,7	8,9	8,6	9,7	19,0	25,7	30,6	50,3	36,2	39,9
	c	0,9	0,9	0,5	0,1	0,7	1,3	0,3	-0,0	-0,0	0,0	-0,3
Grudzień	a	10,1	8,2	11,8	10,2	10,7	25,4	28,5	35,4	54,2	39,9	41,4
	b	8,1	7,6	8,6	8,9	11,0	22,6	28,6	32,9	54,4	37,4	39,3
	c	1,3	0,7	1,7	0,3	-0,1	0,3	-0,0	0,4	-0,0	0,6	0,3

a – średnie miesięczne (D) w 2024 roku

b – średnie miesięczne wieloletnie (D) z lat 1994-2023

c – standaryzowane odchylenie: $(a-b) / \sigma$, gdzie σ jest odchyleniem standardowym średnich miesięcznych



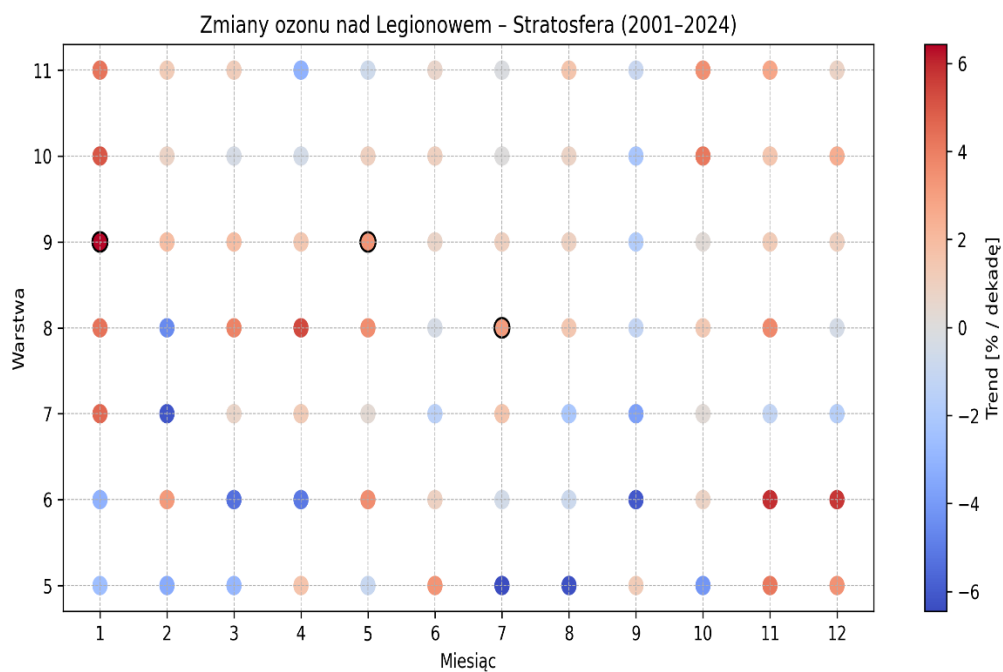
Rys.12. Profile ozonu nad Legionowem z 31 stycznia i 3 kwietnia 2024 r.

W średnich miesięcznych zawartościach ozonu nad Legionowem w roku 2024 odnotowano dodatnią anomalię ozonu – ekstremalny wzrost ozonu na początku zimy (styczeń) powyżej powierzchni 50hPa (Tabela 2). Ten wzrost obrazuje dobrze profil ozonu nad Legionowem z 31 stycznia – wartości powyżej 95percentyla rozkładu statystycznego na wysokościach 20-25km (Rys.12., panel górny). Na wiosnę, w sondażu z 3 kwietnia (Rys.12., panel dolny) widać anomalię przesuniętą do niższych wysokości (15-20km). Oba profile pokazują intensyfikację cyrkulacji Brewera–Dobsona, osiadanie w polarnej masie oraz praktycznie brak śladów destrukcji ozonu na peryferiach wiru polarnego.

5. Długoterminowe zmiany ozonu stratosferycznego nad Legionowem

Okres 2001–2024 wybrano do analizy ze względu na rozpoczęty po 2000 roku systematyczny spadek stężeń substancji niszczących ozon (ODS), będący efektem realizacji Protokołu Montrealskiego. W tym czasie stężenia ODS w stratosferze spadły o 15–20%, co umożliwiło pojawienie się oznak odbudowy ozonu. Według danych NOAA do 2024 roku stężenia reaktywnych halogenów spadły o ok. 28% nad Antarktydą i 48% w szerokościach umiarkowanych względem poziomów szczytowych, potwierdzając kontynuację pozytywnego trendu.

Trend analizy miesięcznych zawartości ozonu w stratosferze nad Legionowem (10–200hPa) pokazuje wyraźne dodatnie zmiany, szczególnie w warstwie 9 (50–30hPa), z maksymalnym wzrostem do +6% na dekadę — istotnym statystycznie w styczniu i maju. W warstwie 8 (70–50hPa), odpowiadającej maksimum ozonu (~18–22km), również zaobserwowano istotny wzrost, zwłaszcza w lipcu (Rys.13.).



Rys.13. Sezonowe trendy ozonu stratosferycznego w okresie 2001–2024 w warstwach. Zmiany wyrażono w %/dekadę. Numery warstw odpowiadają zakresom ciśnienia zdefiniowanym w Tabeli 2. Ciemna obwódka oznacza trendy statystycznie istotne ($p < 0,05$).

6. Interpretacja trendów ozonu stratosferycznego nad Legionowem

Warstwa 70–50hPa ma kluczowe znaczenie diagnostyczne — leży w centrum maksimum ozonu i była historycznie podatna na jego zimową destrukcję przez aktywny chlor i brom. Obecny trend wzrostowy w tej warstwie wskazuje na osłabienie tych procesów i stanowi dowód skuteczności Protokołu Montrealskiego. Letni wzrost (lipiec) może być wzmacniany przez stabilne warunki fotochemiczne i mniejszą zmienność dynamiczną.

W warstwie 50–30hPa dodatnie trendy zimą i wiosną są związane z intensyfikacją cyrkulacji Brewera–Dobsona, która transportuje ozon z tropików ku średnim szerokościom. Zjawisko to może być wzmacniane przez rosnące stężenie CO₂.

Obserwowane wzrosty ozonu, szczególnie w 70–50hPa, są zgodne z globalnymi trendami i potwierdzają fizycznie uwarunkowaną regenerację warstwy ozonowej. Warstwa ta powinna być traktowana jako wrażliwy wskaźnik skuteczności działań ochronnych i zmian klimatycznych.

Dalsze monitorowanie ozonu w Polsce i na świecie jest kluczowe dla oceny postępów odbudowy stratosfery i wczesnej identyfikacji nowych zagrożeń (np. emisji N₂O, zmian dynamiki atmosfery).

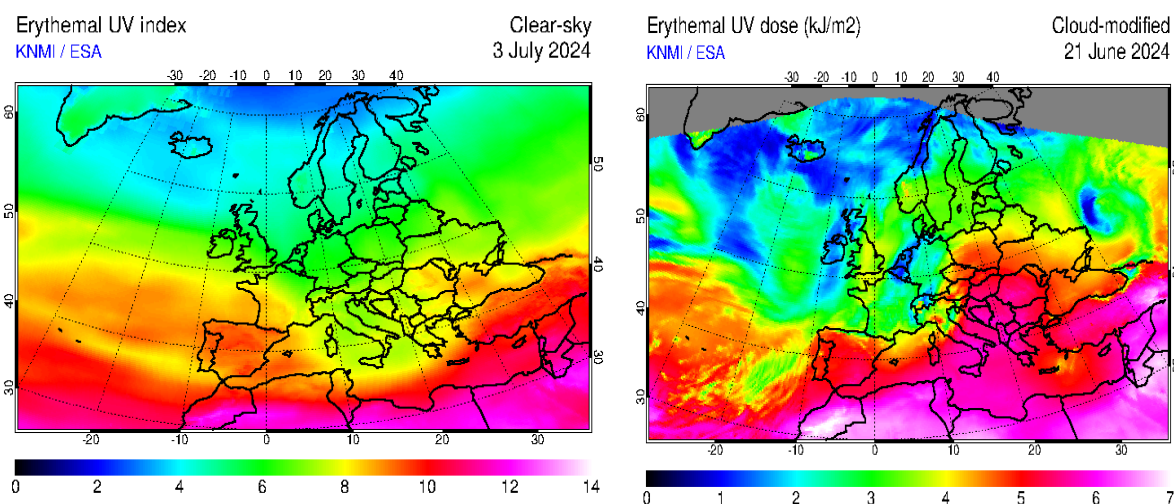
7. Promieniowanie UV-B

W Belsku monitoring promieniowania UV o skuteczności rumieniowej prowadzony jest od 1976 r. z zastosowaniem różnych modeli szerokopasmowych biometrów: Robertson-Berger (1976-1994), Solar Light (1992-2014), Kipp @ Zonen (2006-2022). Seria czasowa w ubiegłych latach, także i w 2024 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 o skuteczności rumieniowej z zastosowaniem spektrofotometru Brewera nr. 64 (metoda stosowana od 1995 r.). Jakość pomiarów ozonu i promieniowania UV belskiego Brewera jest zapewniona przez corocznie porównania (od lata 1995 r.) ze światowym standardem – spektrofotometrem Brewera nr. 17.

Pomiary natężenia napromienienia o skuteczności rumieniowej z użyciem biometru Kipp & Zonen pokazały w dniu 03.07.2024 najwyższą w roku wartość tj. 7,7 Indeksu UV (1 Index = 25mW/m²). Powyższą wartość potwierdziły pomiary widm UV z zastosowaniem spektrofotometru Brewera. Wysoka wartości indeksu w tym dniu była wynikiem tzw. wzmocnienia chmurowego promieniowania, które obserwuje się, gdy słońce świeci

w luce między chmurami i do powierzchni gruntu dochodzi bezpośrednie promieniowanie słoneczne i rozproszone od krawędzi chmur. Zmierzona spektrofotometrem Dobsona wartość CZO_3 w tym dniu była 337D (około 2% poniżej średniej wieloletniej), co przy braku zachmurzenia prowadziłoby do wartości indeksu poniżej 7. Tego dnia dzienna dawka rumieniowa (2060 J/m^2) była o połowę mniejsza niż w sytuacji bezchmurnego nieba przez cały dzień. Satelitarne pomiary wskazywały na maksymalną wartość indeksu na około 6,5 ale dane są uśrednione wokół Belska i lokalny efekt wzmocnienia chmurowego nie mógł być zaobserwowany.

Najwyższą w 2024 r. dzienną dawkę rumieniową równą 4143 J/m^2 zanotowano w dniu 21.06.2024, kiedy przez cały dzień niebo było bezchmurne. Zmierzane w Belsku wartości Indeksu UV i CZO_3 wynosiły wtedy 7,0 i 312D. Satelitarne pomiary (Rys.14) pokazały zbliżone (w granicach błędu pomiarowego) wartości indeksu i dziennej dawki.

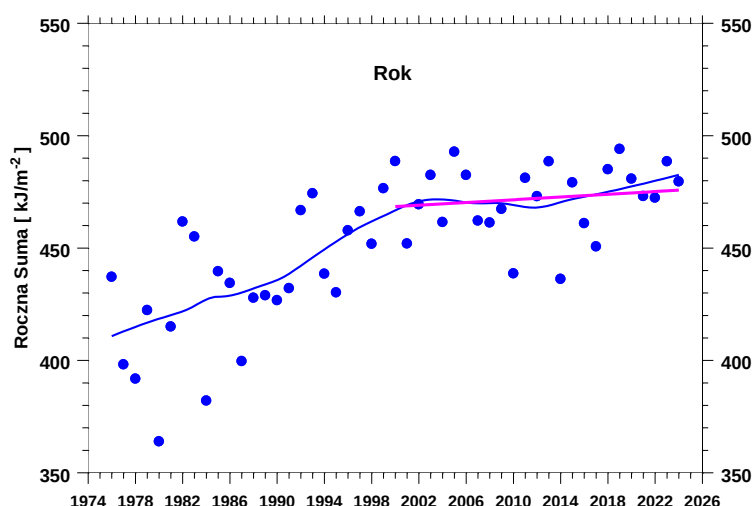


Rys.14. Indeks UV i dzienna dawka rumieniowa nad Europą z pomiarów spektrofotometrem GOME-2 na platformie satelitarnej MetOp-A w dniach 03.07.2024 (lewa strona) i 21.06.2024 (prawa strona), odpowiednio, kiedy w Belsku zmierzono maksymalną w roku 2024 wartość Indeksu UV (7,7) i dziennej dawki erytemalnej (4143 J/m^2)

W związku z pojawieniem się niskich wartości ozonu nad Polską w kwietniu 2024 r. wielokrotnie rejestrowano w Belsku wartości Indeksu UV powyżej 4 tj. około 15% powyżej wieloletniej normy dla tego miesiąca. W całym miesiącu w sumie takich dni było 4. Maksymalna dawka rumieniowa w tym okresie wynosiła 2788 J/m^2 (30.04.2024), co w przybliżeniu stanowi 13 krotność minimalnej dawki wywołującej rumień skóry (tzw. MED) u osoby z fototypem 2. Największa wartość Indeksu UV w tym miesiącu wynosiła 5,1 (30.04). Wysokie wartości Indeksu UV o tej porze roku, a zwłaszcza w okresie poprzedzającym tzw. „długi weekend majowy”, są szczególnie niebezpieczne dla zdrowia, gdyż organizm nie jest jeszcze zaadaptowany do długotrwałych ekspozycji

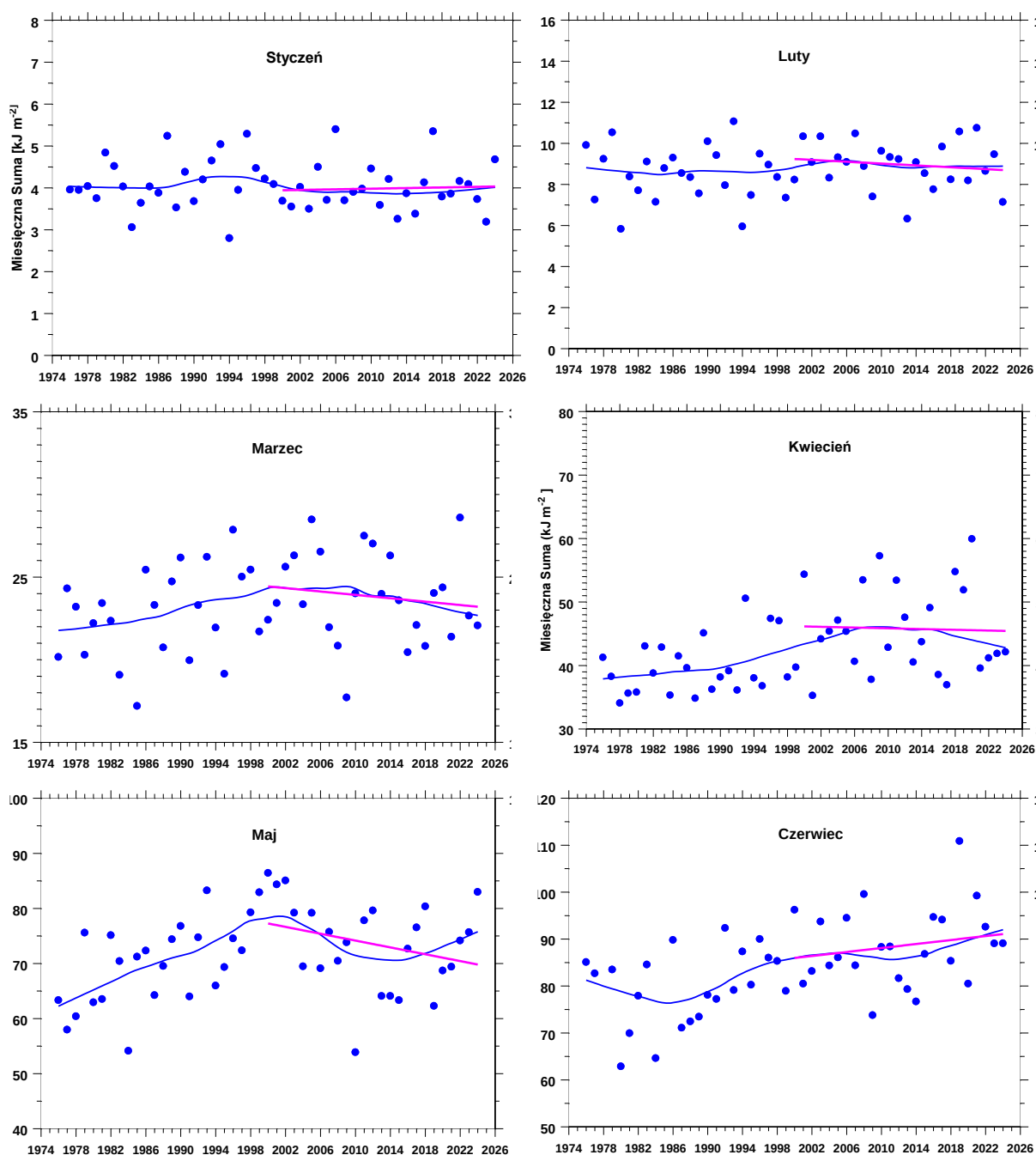
na promieniowanie UV, a umiarkowane temperatury ($\sim 20^{\circ}\text{C}$) zachęcają do nadmiernego opalania bez zastosowania kremów z filtrem ochronnych. Czerwińska i Krzyścin (2020) stwierdzili, że nadmierne napromienienie w kwietniu może być przyczyną wzrastającej gwałtownie zapadalności na czerniaka w Europie.

Przebieg sum rocznych dziennych dawek rumieniowych wskazuje na wzrost napromienienia UV w Belsku w latach 1976-1999 i późniejszą stabilizację (brak trendu). W XXI wieku sumy roczne dziennych dawek rumieniowych oscylują wokół poziomu $\sim 470\text{kJ/m}^2$ (Rys.15.). Trend w sumie rocznej w latach 1976-1999 wynosił $5,9\% \pm 1,6\%$ na 10 lat. W tym okresie suma roczna wzrosła więc o 14,2%. W 2024 r. suma roczna wyniosła $479,6\text{kJ/m}^2$ i była typowa dla wartości w XXI w. W ostatnich latach (od ~ 2010 r.) pojawiła się lekka tendencja wzrostowa, która w okresie 2010-2024 r. była jeszcze nieistotna statystycznie (Rys.15.).

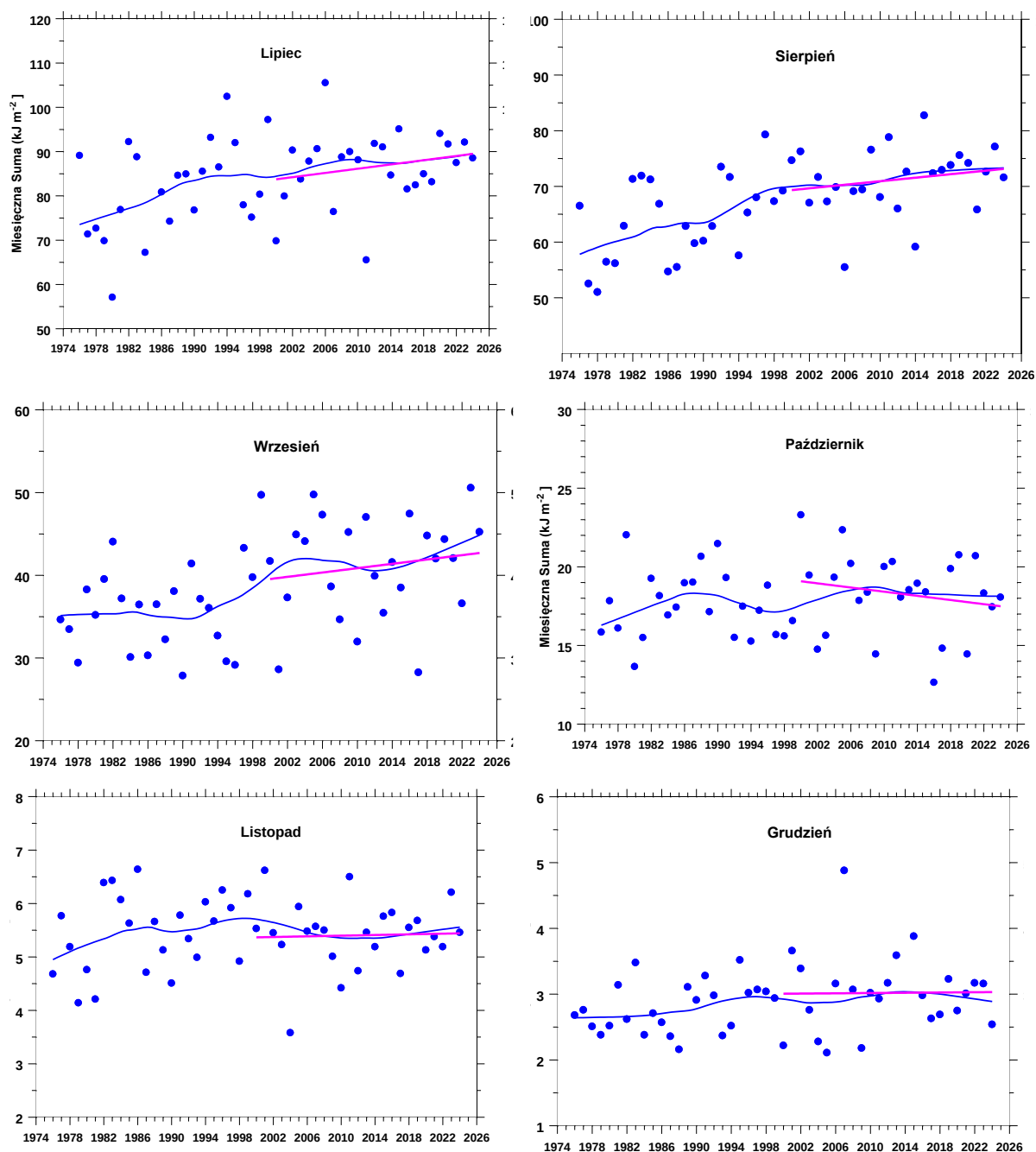


Rys.15. Roczna suma dziennych dawek promieniowania rumieniowego w Belsku w latach 1976-2024 (punkty). Ciągła krzywa w kolorze niebieskim przedstawia wygładzone dane. Prosta kolorze fioletowym ilustruje trend w okresie 2000-2024.

Rysunki 16 przedstawiają serie czasowe sum miesięcznych dziennych dawek rumieniowych. W niektórych miesiącach przebieg długookresowych zmian w sumach miesięcznych różni się od tego w sumie rocznej. Ale jedynie w maju stwierdzono istotnie statystycznie trend, $-4,2\% \pm 3,0\%$ (1σ), w sumach miesięcznych po 2000. Przed 2000 r. wzrostowy trend w tym miesiącu wynosił $9,1\% \pm 6,4\%$ (2σ). W sezonie letnim (czerwiec, lipiec, sierpień) po 1999 r. wyznaczono wzrostową tendencję w sumach miesięcznych $\sim 2\%$ na 10 lat, jednak duże zmiany sum miesięcznych z roku na rok nie pozwoliły stwierdzić, że zmiana ta jest istotna statystycznie. Wzrost sum miesięcznych promieniowania rumieniowego w okresie letnim prowadzi do wzrostu zagrożenia nadmiernym napromienieniem, gdyż w okresie wakacyjnym czas pobytu na wolnym powietrzu jest zwykle dłuższy niż w innych miesiącach.



Rys.16 a.. Sumy miesięczne (od stycznia do czerwca) dziennych dawek promieniowania rumieniowego w Belsku w latach 1976-2024 (punkty). Ciągła krzywa w kolorze niebieskim przedstawia wygładzone dane. Prosta w kolorze czerwonym ilustruje trend w okresie 2000-2024 wyznaczony standardową regresją liniową z zastosowaniem metody najmniejszych kwadratów.

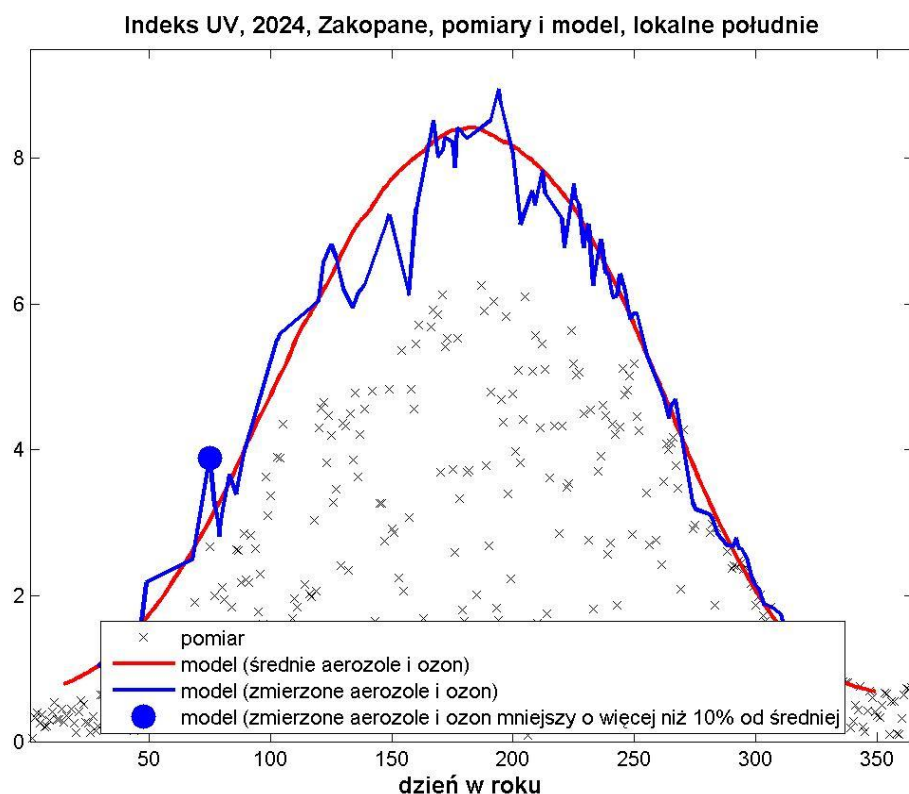


Rys.16 b. Sumy miesięczne (od lipca do grudnia) dziennych dawek promieniowania rumieniowego w Belsku w latach 1976-2024 (punkty). Ciągła krzywa w kolorze niebieskim przedstawia wygładzone dane. Prosta w kolorze czerwonym ilustruje trend w okresie 2000-2024 wyznaczony standardową regresją liniową z zastosowaniem metody najmniejszych kwadratów.

Stacje pomiarowe promieniowania UV-B w Łebie, Legionowie, Belsku i w Zakopanem, wykorzystujące mierniki Solar Light UV biometer model 501 oraz Kipp & Zonen (Belsk), od

utworzenia sieci monitoringu w 1993 r. pracowały bez większych awarii. W roku 2024 program pomiarowy został wykonany w 100%.

W 2024 roku promieniowanie UV-B na obszarze objętym pomiarami na ogół było mniejsze lub oscylowało w obszarze średniej wieloletniej. Szczególnie dobrze to widać dla Zakopanego, gdzie dopiero większe wartości promieniowania pojawiły się w drugiej połowie roku, od września (Rys.17.).



Rys.17. Przebieg roczny Indeksu UV z 2024 roku obliczonego z wykorzystaniem modelu transferu promieniowania słonecznego FastRT dla stacji w Zakopanem z wykorzystaniem pomiarów satelitarnych ozonu całkowitego i aerozoli 2005-2024

Niskie promieniowanie UV-B w pierwszej połowie roku jest skorelowane z większą od średniej wieloletniej ilością ozonu całkowitego, a dodatkowo w lutym większym zachmurzeniem, co można wnioskować na podstawie pomiarów usłonecznienia i promieniowania całkowitego. Podwyższone wartości ozonu najdłużej utrzymywały się dla Łeby, aż do lipca.

Największe wartości Indeksu UV na stacjach IMGW-PIB oraz IGF PAN w 2024 roku zmierzono odpowiednio: 21 czerwca w Legionowie (UVI 7,2), 24 czerwca w Łebie (UVI 6,8), 3 lipca w Belsku (UVI 7,7) i 5 lipca w Zakopanem (UVI 6,4).

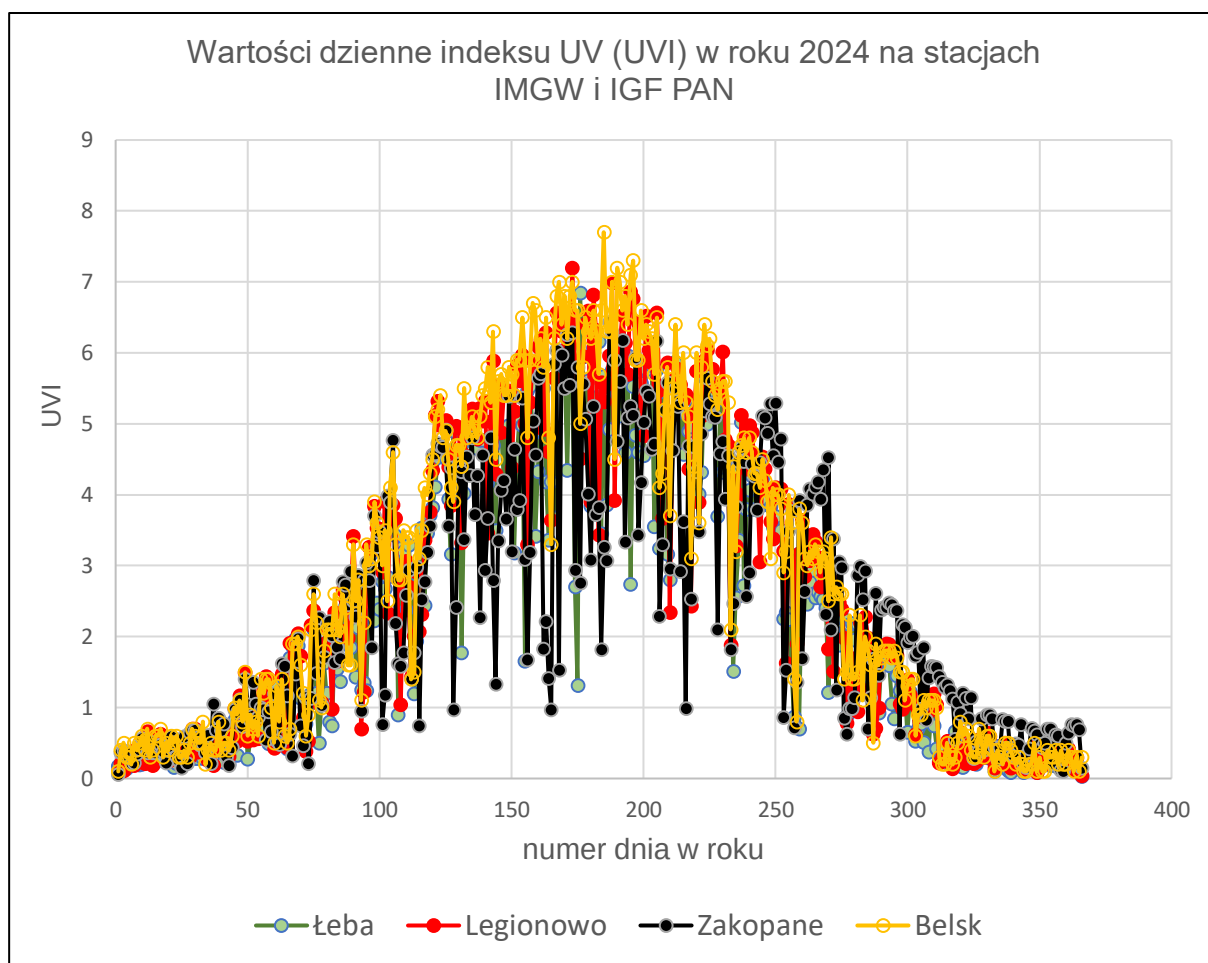
W 2024 roku maksymalną dawkę miesięczną, 448,1MED (94,1kJ/m²) zmierzono w lipcu dla Legionowa. Maksymalną dawkę dobową, 20,63MED (4332,3J/m²) zaobserwowano 21 czerwca w Legionowie. Maksymalne dawki dobowe dla Łeby, Belska i Zakopanego wystąpiły: 24 czerwca, Łeba 19,60MED (4116J/m²), 21 czerwca, Belsk, 20,71 MED (4349 J/m²), oraz 19 czerwca, Zakopane 17,72MED (3721,2J/m²). Maksymalne sumy miesięczne zmierzono dla Łeby, Zakopanego i Belska w lipcu, odpowiednio 407,9MED (85,66kJ/m²); 328,0MED (68,88kJ/m²), 445,1MED (93,47).

Porównanie homogenizowanej serii danych od kwietnia do października pokazuje, że promieniowanie UV w 2024 roku było średnie lub mniejsze, jak w przypadku Łeby, od typowego mierzonego na trzech stacjach IMGW-PIB oraz stacji IGF PAN. Niewiele większe od średniego było tylko dla Legionowo w drugiej połowie roku. Jedną z przyczyn była większa od typowej ilość ozonu całkowitego. Wpływu ilości ozonu na wielkość promieniowania UV nie zrekompensowała mniejsza od typowej ilość aerozoli dla Łeby i Zakopanego.

Średnie dzienne wartości indeksu UV na stacjach Łeba, Legionowo, Belsk i Zakopane przedstawiono na rysunku 18, a średnie miesięczne wartości indeksu dla tych czterech stacji przedstawia Tabela 3.

Tabela 3. Średnie miesięczne wartości indeksu UV na stacjach Łeba, Legionowo, Belsk i Zakopane w roku 2024.

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Łeba	0,3	0,6	1,4	2,7	4,4	4,8	5,0	4,4	2,7	1,4	0,4	0,2
Legionowo	0,4	0,7	1,7	2,9	4,9	5,7	5,6	4,8	3,2	1,4	0,5	0,3
Belsk	0,5	0,8	1,7	3,3	5,1	6,1	6,1	4,9	3,2	1,5	0,6	0,3
Zakopane	0,4	0,8	1,6	2,7	3,8	4,2	4,7	3,9	3,5	1,9	1,0	0,5



Rys.18. Wartości dzienne Indeksu UV dla 2024 roku stacji Łeba, Legionowo, Belsk, Zakopane.

Podsumowanie

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.

Krzyścin 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 dwu 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 zabronione 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 ciągle wieloletnie pomiary zapewniając wysoka jakość danych i tym samym stwarzając podstawy do weryfikacji danych satelitarnych i hipotez dot. ewolucji warstwy ozonowej w wyniku współdziałania procesów dynamicznych i chemicznych zachodzących w atmosferze.

Bibliografia

- Ball, W. T., Alsing, J., Mortlock, D. J., Staehelin, J., Haigh, J. D., Peter, T., Tummon, F., Stübi, R., Stenke, A., Anderson, J., Bourassa, A., Davis, S. M., Degenstein, D., Frith, S., Froidevaux, L., Roth, C., Sofieva, V., Wang, R., Wild, J., Yu, P., Ziemke, J. R., and Rozanov, E. V.: Evidence for a continuous decline in lower stratospheric ozone offsetting ozone layer recovery, *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 1379-1394, <https://doi.org/10.5194/acp-18-1379-2018>, 2018.
- 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.
- 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.
- 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.: 2020, 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., 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., 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>.
- 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.
- 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.
- 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.
- Szeląg, 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.
- Wang, P. Fingerprinting the recovery of Antarctic ozone, *Nature*, 2025. Doi: 10.1038/s41586-025-08640-9, www.nature.com/article/s41586-025-08640-9