



Główny Inspektorat Ochrony Środowiska

**Monitoring rozkładu pionowego ozonu, całkowitej
zawartości ozonu nad Polską i Europą Środkową
oraz promieniowania UV-B w Polsce
w latach 2023 – 2025**

**Raport syntetyczny o stanie warstwy ozonowej
i natężenia promieniowania UV-B za 2023 rok**

**Sprawdził i zatwierdził
Kierownik
Wydziału Monitorowania Jakości Powietrza
mgr Julita Biszczuk-Jakubowska**

Opracowanie wykonano w Instytucie Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowym Instytucie Badawczym przez zespół w składzie:

Julita Biszczuk-Jakubowska, Aleksander Curyło, Bogumił Kois, Bożena Łapeta, Monika Hajto, przy współpracy zespołu Instytutu Geofizyki Polskiej Akademii Nauk w składzie:

Janusz Jarosławski, Janusz Krzyścin, Aleksander Pietruczuk, Bonawentura Rajewska-Więch, Piotr Sobolewski.



Praca zrealizowana na podstawie umowy z GIOŚ
nr GIOŚ/13/2023/DMŚ/NFOŚiGW z dnia 03.02.2023 r.,
finansowana wyłącznie ze środków NFOŚiGW.

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

Spis treści

Wstęp	2
1. Całkowita zawartość ozonu	3
2. Pionowy rozkład ozonu.....	12
<i>Zimowo-wiosenne ubytki ozonu stratosferycznego 2022/2023.....</i>	19
<i>Analiza wieloletnich zmian koncentracji ozonu nad Legionowem.....</i>	24
3. Promieniowanie UV-B.....	26
Podsumowanie	35
Literatura	37

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 i w podczerwieni.

Zgodnie z klasyczną teorią Chapmana (1930) ozon jest tworzony 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. Przy powierzchni Ziemi ozon 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), powodując że do powierzchni Ziemi dociera tylko kilka procent biologicznie czynnego promieniowania UV. Cieńsza warstwa ozonowa zwiększa ilość słonecznego promieniowania UV-B. Wiadomo, że promieniowanie to 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 człowieka (wzrost liczby 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 w 1987 roku Protokół Montrealski (PM), a po szeregu rewizji w kolejnych latach wytwarzanie freonów i halonów zostało zakazane. Pomiar 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.

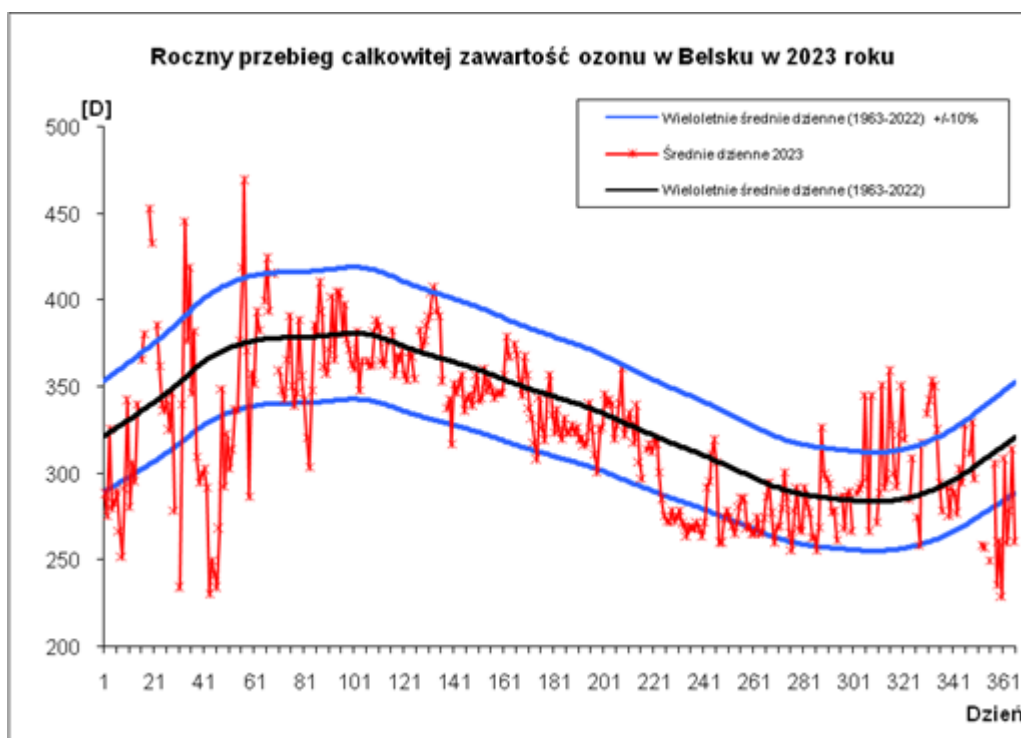
W raporcie przedstawiono analizę stanu warstwy ozonowej i poziomu promieniowania UV-B na podstawie pomiarów wykonanych w Instytucie Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowym Instytucie Badawczym (IMGW-PIB) i Instytucie Geofizyki Polskiej Akademii Nauk (IGF PAN) w 2023 roku.

1. Całkowita zawartość ozonu

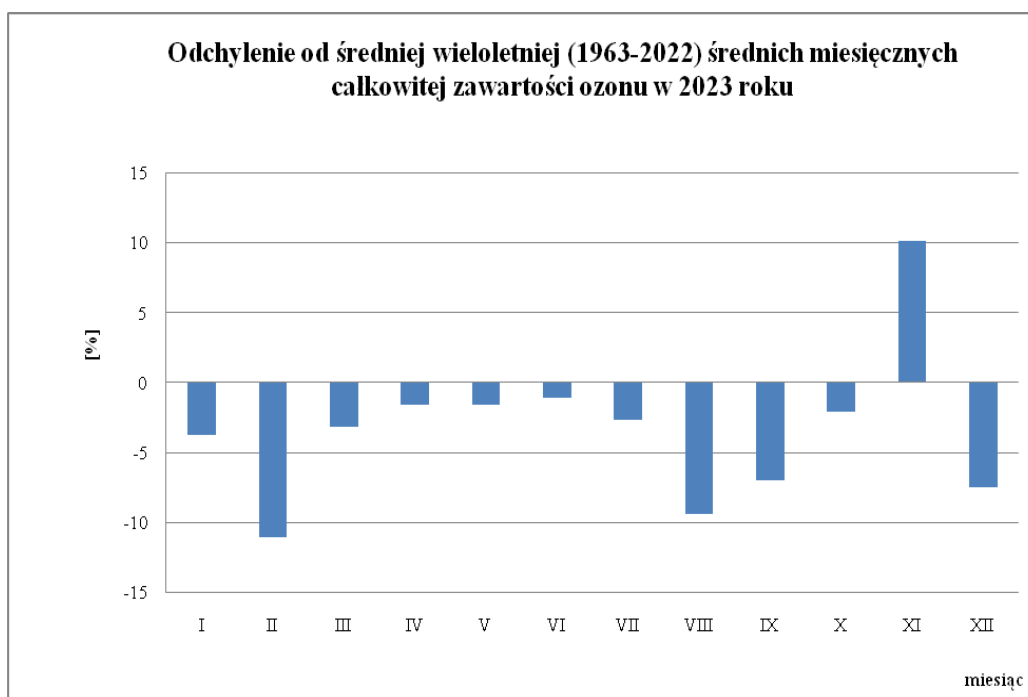
Pomiary całkowitej zawartości ozonu wykonywane są od 1963 roku w Centralnym Obserwatorium Geofizycznym (COG) PAN w Belsku przy pomocy spektrofotometru Dobsona, a od 1992 roku, równoległe, spektrofotometru Brewera.

Przebieg średnich wartości dziennych całkowitej zawartości ozonu w atmosferze w poszczególnych miesiącach przedstawiono na rysunku 1, gdzie linia czerwona – średnie dzienne całkowitej zawartości ozonu w 2023 roku, linia czarna – wieloletnia (1963-2022) 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 2023 roku średnie miesięczne wartości całkowitej zawartości ozonu w Belsku były wyższe od średniej wieloletniej z lat 1963-2022 tylko w listopadzie 10,1%. Ujemne odchylenia średniej miesięcznej całkowitej zawartości ozonu od średniej wieloletniej zaobserwowano w styczniu 3,8%, lutym 11,1%, marcu 3,2%, kwietniu 1,6%, maju 1,6%, czerwcu 1,1%, lipcu 2,7%, sierpniu 9,4%, wrześniu 7,0%, październiku 2,1% i grudniu 7,5%. Przebieg średnich dziennych całkowitej zawartości ozonu w 2023 r., zmierzonych spektrofotometrem Dobsona, w odniesieniu do wieloletniej średniej dziennej (1963-2022) $\pm 10\%$ przedstawiono na rysunku 1. Odchylenia procentowe średnich miesięcznych całkowitej zawartości ozonu od odpowiednich średnich wieloletnich przedstawiono na rysunku 2 i w tabeli 1.



Rys. 1. Roczny przebieg średnich dziennych całkowitej zawartości ozonu w Belsku w 2023 roku

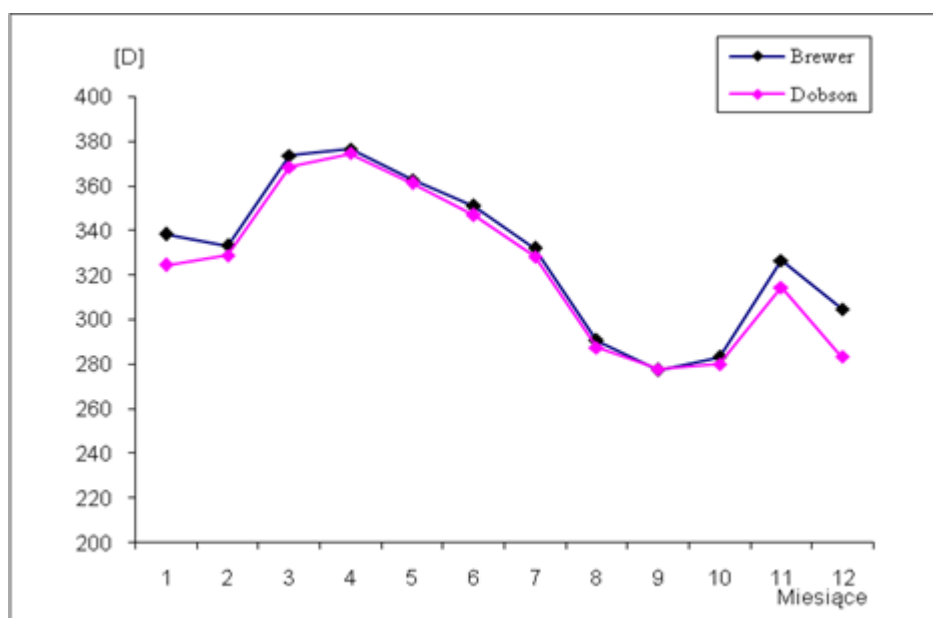


Rys. 2. Odchylenie od średniej wieloletniej (1963-2022) średnich miesięcznych całkowitej zawartości ozonu w 2023 roku

Tabela 1. Średnie miesięczne całkowitej zawartości ozonu [D] w 2023 roku ich odstępstwa od średnich wieloletnich 1963-2022

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Śr. wiel. 1963-2022	338	370	380	381	367	351	337	318	299	286	286	306
Śr. mieś. 2023	325	329	368	375	361	347	328	288	278	280	315	283
Różnica w %	-3,8	-11,1	-3,2	-1,6	-1,6	-1,1	-2,7	-9,4	-7,0	-2,1	10,1	-7,5

Przez cały 2023 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 2,5 D.



Rys. 3. Przebieg średnich miesięcznych całkowitej zawartości ozonu zmierzonych spektrofotometrem Dobsona i Brewera w Belsku w 2023 roku

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).

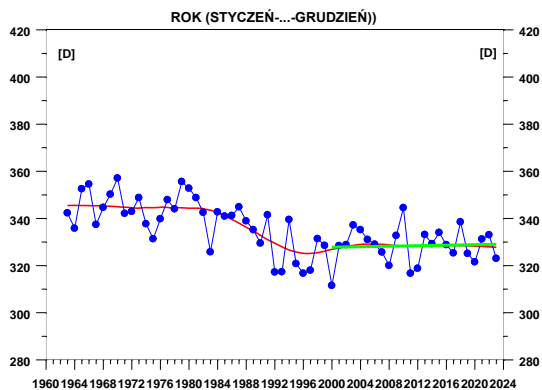
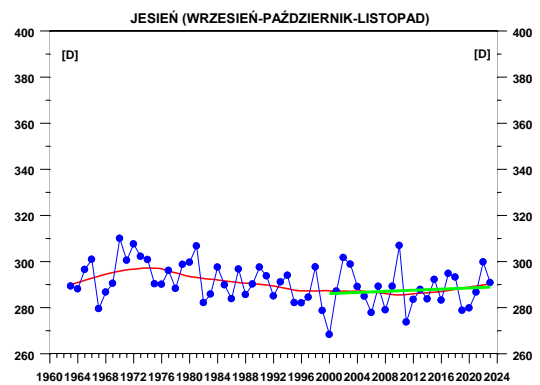
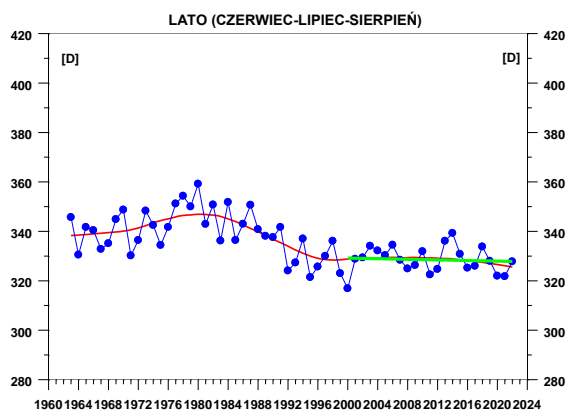
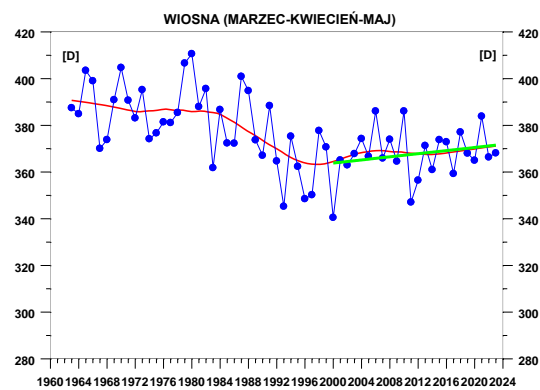
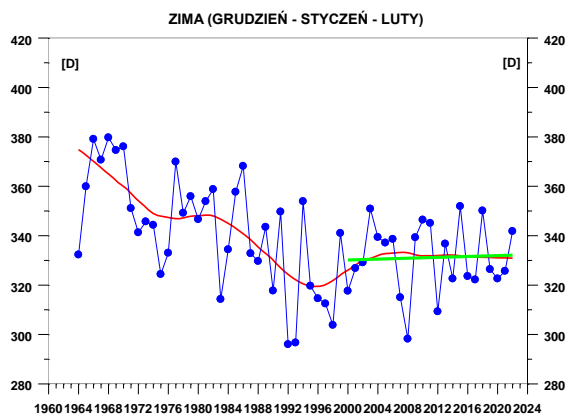
Jakkolwiek podstawowym przyrządem sieci pomiarów całkowitej zawartości ozonu nadal pozostaje spektrofotometr Dobsona, to jednak możliwość kontynuacji pomiarów

i analiz porównawczych obu przyrządów jest niezwykle ważna, chociażby ze względu na zapewnienie ciągłości serii pomiarów.

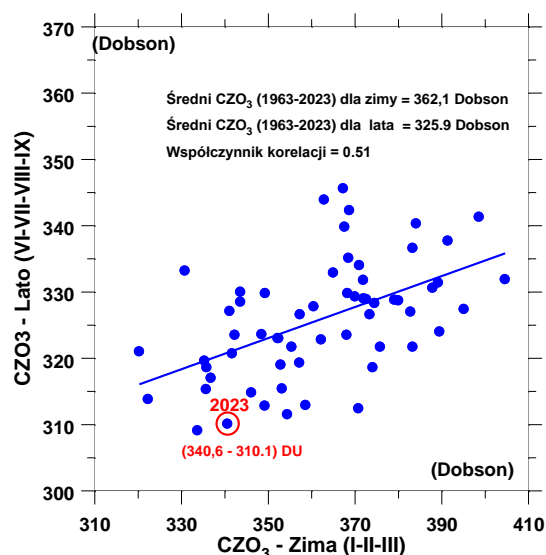
W Centralnym Obserwatorium Geofizycznym w Belsku w ciągu całego 2023 r. monitorowano całkowitą zawartość ozonu. Przez cały rok za wyjątkiem listopada wartości średnich miesięcznych całkowitej zawartości ozonu (CZO_3) były niższe od wieloletnich (1963-2022) średnich miesięcznych (Rys. 2). Wartości odchyłek średnich dziennych od średnich wieloletnich przekraczały -10%, zwłaszcza w sezonie zimowym (Rys. 1). Niskie dzienne wartości CZO_3 w stosunku do średnich wieloletnich pojawiły się styczniu, lutym, sierpniu, wrześniu i grudniu.

Analizując długookresowe zmiany średnich sezonowych CZO_3 w Belsku (Rys. 4 - krzywe w kolorze czerwonym reprezentujące wygładzone metodą lokalnej regresji przebiegi średnich sezonowych) można stwierdzić, 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 obserwuje się 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 (Rys. 4 – proste w kolorze zielonym) w danych sezonowych i rocznych CZO_3 są nieistotne statystycznie w okresie 2000-2023. Natomiast stabilizację wartości ozonu na poziomie minimum z połowy lat 90-tych XX wieku obserwuje się w sezonach letnim i jesiennym po 1996 r.

W 2023 r. średnia CZO_3 w okresie czerwiec – wrzesień (310,1D) była około 4,8% poniżej wieloletniej normy (325,9D) z okresu 1963–2022. W tej sytuacji przy braku zachmurzenia poziom promieniowania UV przy powierzchni Ziemi powinien być wyższy o około 5,3% w stosunku do wieloletniej normy. Wartości CZO_3 w sezonie letnim 2023 wskazują, że wcześniej w sezonie zimowym (styczeń–luty–marzec) poziom CZO_3 był także poniżej średniej wieloletniej (Rys. 5). W 2023 r. powyższa zima średnia wynosiła 340,6D, czyli około 5,9% poniżej wieloletniej normy (362,1D). 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 uzupełnione, gdyż niskie wartości CZO_3 pojawiają się w skali całej północnej półkuli poza strefą równikową.

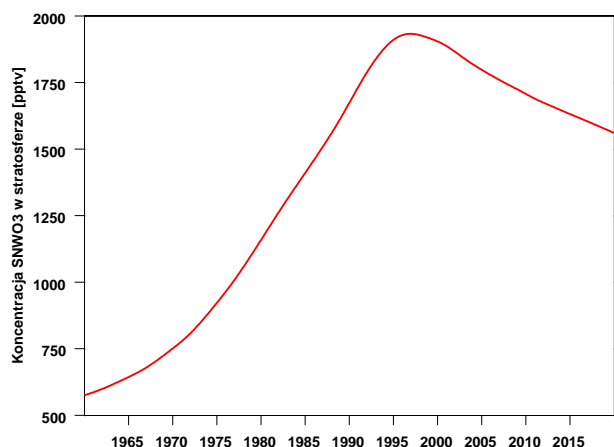


Rys. 4. Średnie sezonowe całkowitej zawartości ozonu uzyskane z pomiarów spektrofotometrem Dobsona w COG IGF PAN, Belsk, w okresie 1963-2023. Krzywa czerwona przedstawia wygładzone dane, a zielona liniowy trend w okresie 2000-2022



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). Punkt zaznaczony kolorem czerwonym oznacza wartość w 2023 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 dot. ochrony warstwy ozonowej wprowadziły szereg ograniczeń w produkcji substancji niszczących warstwę ozonową. Od połowy lat 90-tych ubiegłego wieku koncentracja tych 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 modelowych (krzywa czerwona)

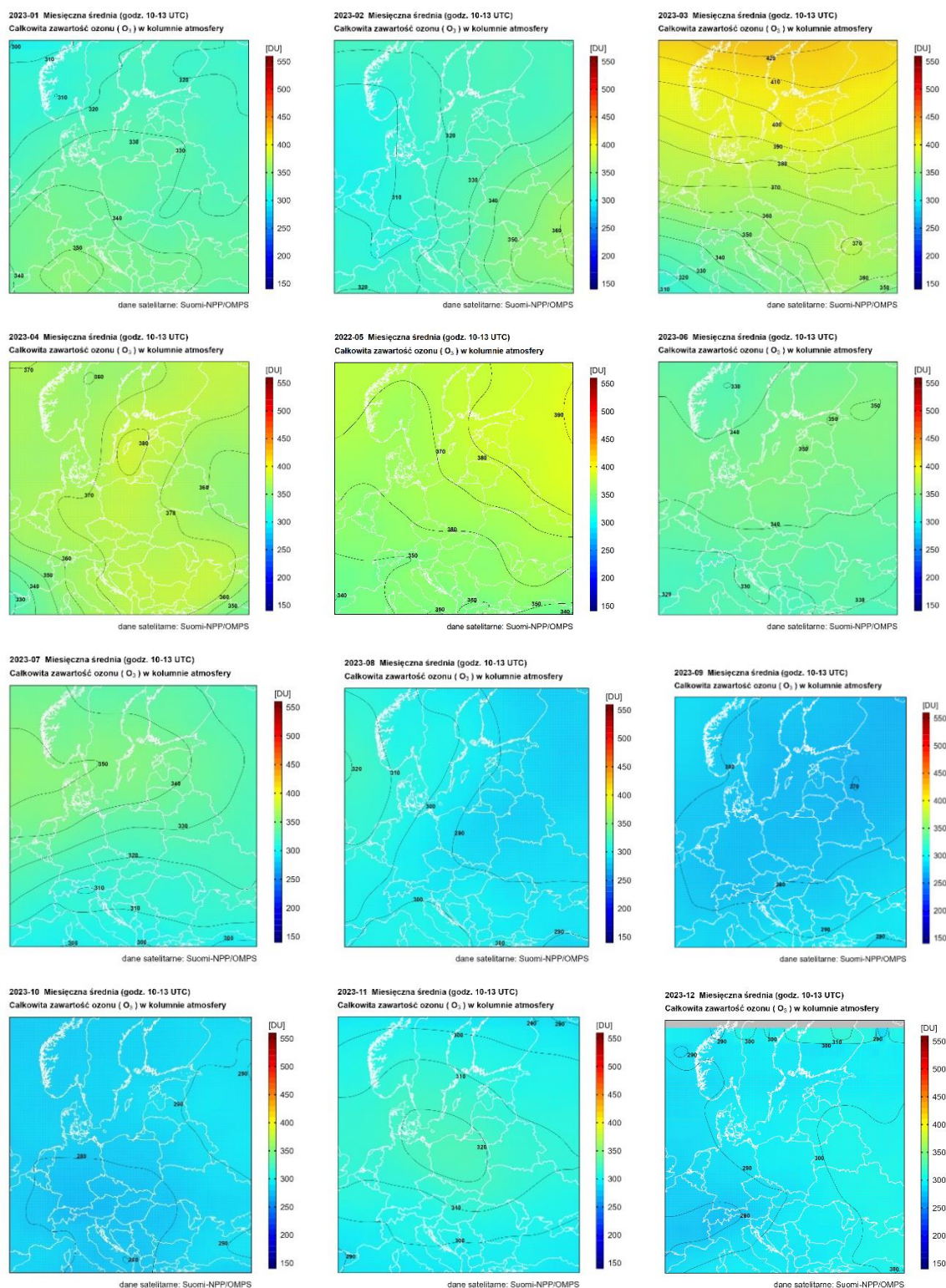
Zatrzymanie spadkowej tendencji w ozonie atmosferycznym w połowie lat 90-tych ubiegłego wieku zostało potwierdzone w licznych pracach między innymi także

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 2023 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 spektrum, 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.

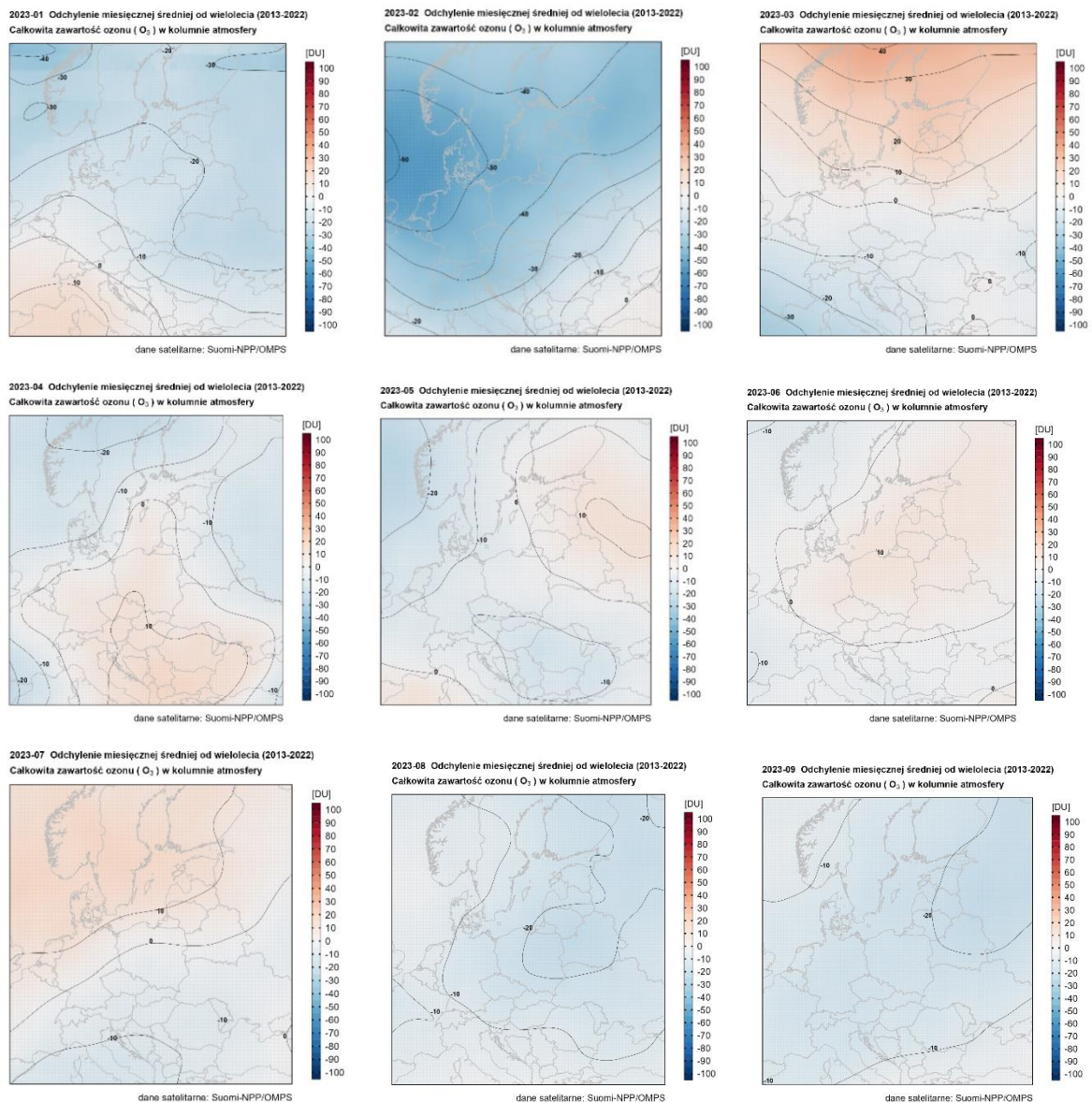
Dane o rozkładzie CZO_3 zostały wykorzystane do wyznaczenia średnich miesięcznych rozkładów całkowitej zawartości ozonu (Rys. 7).

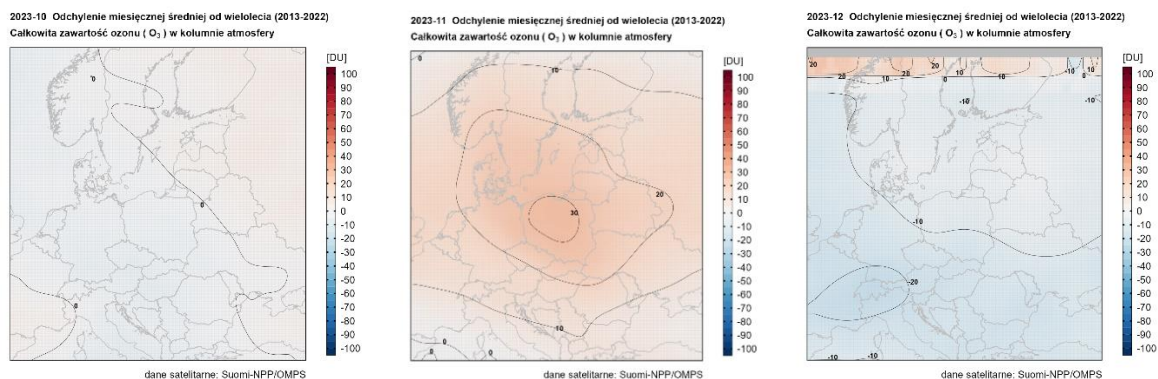


Rys. 7. Średnie miesięczne rozkłady całkowitej zawartości ozonu w kolumnie atmosfery, wyznaczone z satelitarnych danych OMPS w 2023 r.

Otrzymana zmienność średnich miesięcznych rozkładów CZO₃ jest zgodna z cyklem rocznym tego parametru, który charakteryzuje się najwyższymi wartościami wiosną i najniższymi jesienią. Wyjątek stanowią rozkłady CZO₃ otrzymane dla stycznia i lutego 2023, które charakteryzują się wartościami typowymi dla lata. W tych miesiącach

2023 roku wystąpiły największe ujemne odchylenia średnich miesięcznych wartości CZO₃ w stosunku do średnich miesięcznych wieloletnich z lat 2013-2022 (Rys. 8). W większości miesięcy 2023 roku obserwowano ujemne odchylenia od średnich wieloletnich. Największe ujemne odchylenia CZO₃ od średniej wieloletniej wystąpiły nad Europą Centralną w lutym. Z kolei listopad charakteryzował się wyraźnie podwyższonymi wartościami CZO₃ nad obszarem Europy Centralnej, w tym Polski (Rys. 8). Wyższe wartości w stosunku do średnich miesięcznych wieloletnich wystąpiły również w marcu w północnej części Europy.





Rys. 8. Rozkłady odchyleń średnich miesięcznych zawartości ozonu wyznaczonych z danych OMPS w 2023 r. od średnich miesięcznych wieloletnich z okresu 2013-2022

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 (20,3°E, 49°N). Pomiary na tych stacjach wykonywane są spektrofotometrem Brewera (Poprad, 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 wszystkich czterech stacji zgodność całkowitej zawartości ozonu wyznaczonej z danych OMPS z pomiarami naziemnymi jest bardzo dobra – średni błąd procentowy waha się w granicach od 2,63% do 2,97%. W przypadku wszystkich stacji, z wyjątkiem Belska, CZO₃ wyznaczona z danych satelitarnych OMPS jest zaniżona w stosunku do pomiarów naziemnych. Na uwagę zasługuje również bardzo wysoka korelacja, która dla wszystkich stacji jest większa lub równa 0,97.

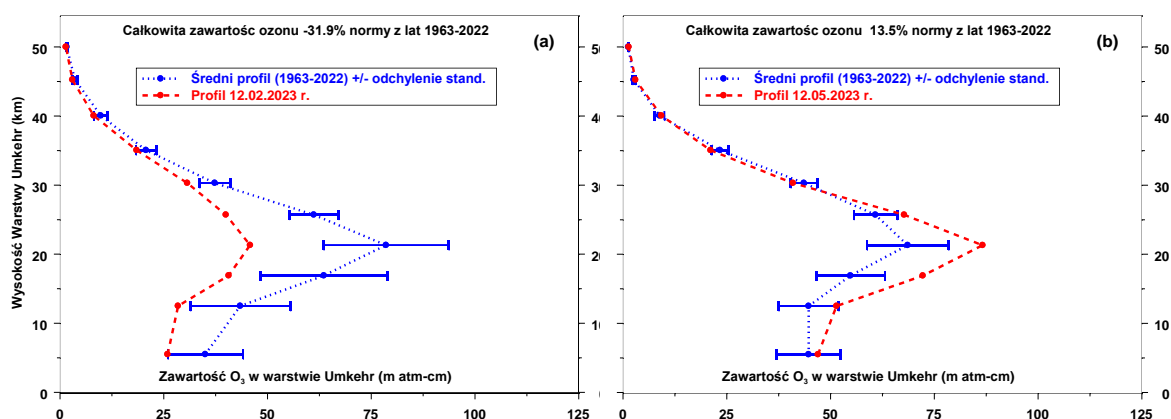
2. Pionowy rozkład ozonu

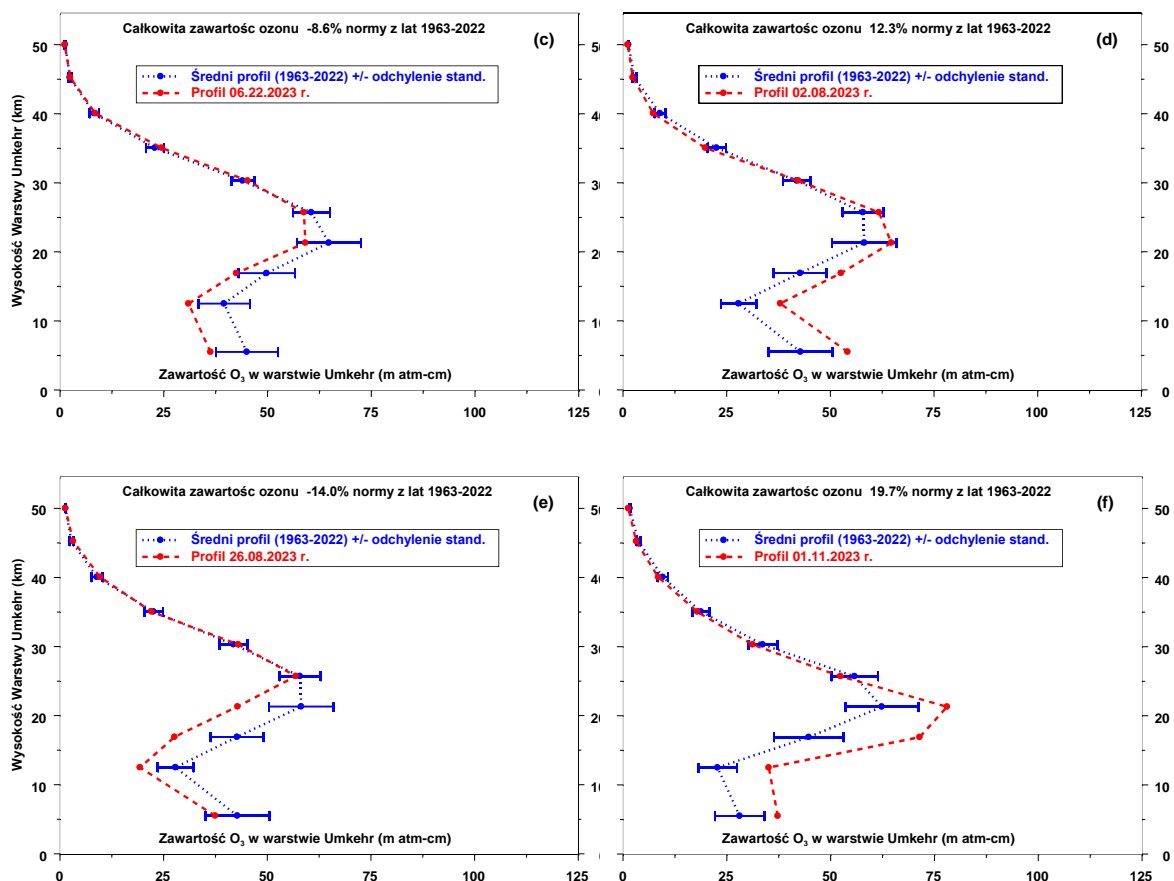
Serie pomiarów wykonywanych w świetle rozproszonym pochodzące z niezachmurzonego zenitu przy odległościach zenitalnych Słońca 60° – 90° umożliwiają wyznaczenie rozkładu pionowego ozonu tzw. metodą Umkehr. Ze względu na wymagania pogodowe (około 3,5 godzin bezchmurnej pogody) liczba serii pomiarów Umkehr zmienia się znacznie z roku na rok.

W 2023 roku wykonano 203 serii pomiarowych przy pomocy spektrofotometru Brewera pozwalających wyznaczyć pionowy rozkład ozonu metodą Umkehr.

Na rysunku 9 przedstawiono interesujące przykłady zmian zawartości ozonu w poszczególnych umkehrskich warstwach atmosfery. Jak widać zmiany te w odniesieniu do średniej wieloletniej 1963-2022 (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 rysunku 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.

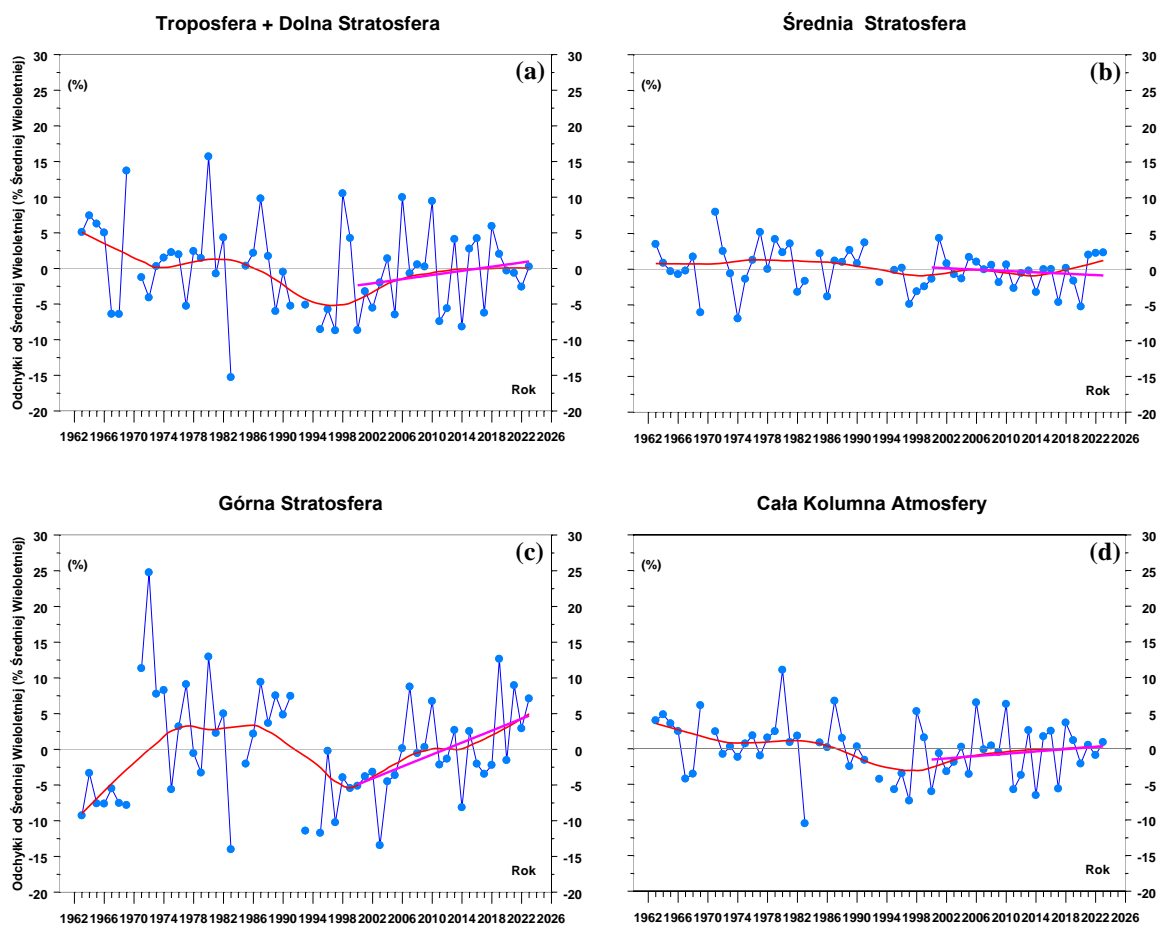
Należy dodać, że zmiany profilu ozonu przy ustalonej całkowitej zawartości ozonu są jednym z czynników wpływających na wielkość natężenia promieniowania UV-B docierającego do powierzchni Ziemi. Dane ozonowe ze stacji dysponującymi długimi, ciągłymi i wiarygodnymi seriami pomiarowymi są szczególnie cenione 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.





Rys. 9. Pionowy profil O_3 dla wybranych dni w 2023 r. wyznaczony z pomiarów Umkehr spektrofotometrem Dobsona z zastosowaniem algorytmu obliczeniowego UMK04

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).



Rys. 10. Odchyłki średnich wiosennych (marzec-kwiecień-maj) od średniej wieloletniej zawartości ozonu (1963-2023) w wybranych warstwach atmosfery z pomiarów Umkehr spektrofotometrem Dobsona (1963-2020) i spektrofotometrem Brewera (w latach 2021-2023) w Belsku. Profil ozonu wyznaczono stosując algorytm UMK04. (a) troposfera i dolna stratosfera 0-23,5km, (b) średnia stratosfera 23,5-37,5km, (c) wysoka stratosfera >37,5km, (d) cała kolumna atmosfery. Krzywa w kolorze czerwonym przedstawia wygładzone dane, a prosta w kolorze fioletowym trend w okresie 2000-2023.

Na rysunku 10 przedstawiono przebiegi średnich sezonowych (marzec-kwiecień-maj) zawartości ozonu w wybranych warstwach atmosfery (troposfera + dolna stratosfera, środkowa stratosfera, górna stratosfera, cała kolumna atmosfery) z pomiarów Umkehr w Belsku z zastosowaniem spektrofotometru Dobsona w latach 1963-2020 i spektrofotometru Brewera w 2021-2023 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 wykorzystano procedurę obliczeniową stosowaną w europejskiej sieci spektrofotometrów Brewera – EUBREWNET. W sezonie wiosennym 2023 r. obserwowano zawartość ozonu w trzech wybranych warstwach atmosfery w pobliżu normy tj. odchyłki od średnich wartości (1963-2023) były w przedziale $\pm 5\%$.

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 zmiana całkowitej zawartości ozonu była mniejsza o 1%. Wtedy oczekuje się zbliżonych dziennych (przed- i popołudniowych) przebiegów profili pionowych zawartości ozonu w atmosferze.

W celach porównawczych w 2023 r. wykonano 20 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 18 przypadkach. Średnie różnice między profilami pionowymi ozonu wynosiły poniżej 5% w warstwach: 10–14,5km, 19–23,5km, 23,5–28km, 33–38,5km, 38,5–43km, 43–48km, 48km – górna granicy atmosfery. Średnia różnica między zawartościami ozonu w warstwach 0–10km i 28–33km wynosiła około 7%, najwyższą różnicę, 11,5%, znaleziono w warstwie 14,5–19km. Współczynnik korelacji między zawartością ozonu w kolejnych 10 warstwach Umkehr wynosił odpowiednio 0,66, 0,98, 0,97, 0,96, 0,79, 0,87, 0,70, 0,60, 0,84, 0,27. Należy kontynuować pomiary profilu ozonu stosując oba spektrofotometry, aby w przyszłości ujednoczyć serię czasową profili ozonowych.

Linijowe trendy zmian ozonu w sezonie wiosennym (marzec–kwiecień–maj) w latach 2020–2023 wskazują na stabilizację zawartości ozonu w troposferze i dolnej stratosferze (Rys. 10a), w środkowej stratosferze (Rys. 10b) i w całej kolumnie atmosfery (Rys. 10d). W górnej stratosferze (Rys. 10c) wyznaczono istotnie statystycznie wzrostowy trend, $4,2\% \pm 1,5\%$ (1σ) na 10 lat. Podobną sytuację stwierdzono w sezonie letnim (czerwiec–lipiec–sierpień) i jesiennym (wrzesień–październik– listopad). Trendy wynosiły $2,5\% \pm 1,5\%$ (2σ) na 10 lat latem i $1,4\% \pm 1,0\%$ (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 (2017–2023) 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 w średnich szerokościach geograficznych od połowy lat 90-tych XX wieku w związku z funkcjonowaniem ustaleń Protokołu Montrealskiego 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 2000-2023 znaleziono w warstwie 23,5–28km (tj. warstwie Umkehr numer 5) w sezonie letnim, $-2,2\% \pm 0,8\%$ (1σ) oraz danych całorocznych, $-1,8\% \pm 0,7\%$ (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; Szeląg i inni, 2020) na podstawie danych satelitarnych.

W 2023 roku na Stacji Pomiarów Aerologicznych w Legionowie wykonywano systematycznie, co najmniej raz w tygodniu sondáže ozonowe, elektrochemiczną sondą ozonową ECC6A produkcji Science Pump Corporation, USA. Sondáže wykonywano w systemie sondażowym DigiCORA MW41/RS41-SG i w systemie nawigacyjnym GPS.

W średnich miesięcznych zawartościach ozonu nad Legionowem w roku 2023 nie odnotowano anomalii (Tabela 2). Występowały jednak znaczące spadki (przekraczające 1σ): w lutym, w warstwie 50/30hPa, w sierpniu, w warstwie 30/20hPa i we wrześniu w warstwie 150/100hPa.

Tabela 2. Zawartość ozonu w warstwach atmosfery nad Legionowem w 2023r.

WYSZCZEGÓLNIENIE		Warstwy atmosfery między standardowymi powierzchniami izobarycznymi (hPa)											
		$\frac{\sim 1000}{700}$	$\frac{700}{500}$	$\frac{500}{300}$	$\frac{300}{200}$	$\frac{200}{150}$	$\frac{150}{100}$	$\frac{100}{70}$	$\frac{70}{50}$	$\frac{50}{30}$	$\frac{30}{20}$	$\frac{20}{10}$	$\frac{10}{00}$
Styczeń	a	10,2	8,2	8,0	4,6	10,1	21,6	28,4	35,9	60,8	40,4	37,2	43,9
	b	8,3	7,6	8,7	11,2	15,8	28,9	34,2	39,8	62,0	39,4	41,2	41,9
	c	1,1	0,8	-0,4	-1,0	-0,8	-0,6	-0,5	-0,5	-0,2	0,2	-0,6	0,5
Luty	a	10,5	8,3	8,5	9,8	10,6	19,1	25,3	33,0	58,1	36,8	42,8	46,0
	b	9,4	8,0	9,7	15,1	19,6	32,6	37,4	42,8	63,3	40,0	43,4	46,1
	c	0,6	0,3	-0,4	-0,5	-1,2	-1,0	-1,0	-1,2	-0,7	-0,7	-0,1	-0,0
Marzec	a	11,0	8,7	9,0	13,7	22,9	36,7	40,8	45,6	70,0	41,5	48,4	49,2
	b	11,1	8,8	10,9	17,8	22,2	33,3	36,7	41,3	62,3	38,9	44,9	49,8
	c	-0,1	-0,1	-0,6	-0,4	0,1	0,3	0,4	0,6	1,1	0,5	0,6	-0,1
Kwiecień	a	11,9	10,1	11,0	28,5	27,0	32,6	33,3	43,2	60,2	36,9	42,6	48,2
	b	12,8	10,0	12,4	17,2	21,1	31,0	34,7	39,5	60,3	38,7	47,9	50,6
	c	-0,5	0,0	-0,3	1,1	0,8	0,1	-0,2	0,6	-0,0	-0,5	-0,9	-0,8
Maj	a	13,9	10,5	10,5	12,1	21,5	32,9	30,3	34,1	58,6	41,1	53,9	51,5
	b	13,6	10,7	12,5	16,6	20,7	28,0	30,2	36,0	56,2	38,3	50,5	50,4
	c	0,2	-0,1	-0,7	-0,5	0,1	0,7	0,0	-0,5	0,6	0,8	0,8	0,5
Czerwiec	a	14,8	11,8	15,1	20,5	18,5	25,5	31,8	32,4	54,6	40,9	54,1	50,4
	b	13,2	10,8	13,0	14,5	17,1	24,3	25,5	31,7	53,0	39,4	52,8	49,8
	c	0,6	0,7	0,8	0,7	0,3	0,2	1,2	0,2	0,4	0,4	0,4	0,3
Lipiec	a	15,9	11,4	13,4	11,1	13,4	19,2	24,6	32,3	55,9	40,2	53,9	50,9
	b	13,0	10,6	13,2	14,7	14,9	21,0	23,9	30,5	51,9	39,3	53,1	50,1
	c	1,1	0,6	0,1	-0,5	-0,3	-0,4	0,2	0,7	0,9	0,3	0,2	0,2
Sierpień	a	13,9	10,6	12,9	14,3	11,4	20,1	20,4	27,6	45,5	33,1	50,7	50,3
	b	12,5	10,2	12,3	11,0	11,6	19,3	23,8	29,0	48,1	37,7	50,9	50,3
	c	0,6	0,4	0,3	0,6	-0,0	0,2	-0,9	-0,6	-0,7	-1,1	-0,0	-0,0
Wrzesień	a	13,6	9,9	10,5	6,7	4,2	9,7	18,5	28,7	44,4	33,7	46,1	52,2
	b	11,1	9,4	10,7	9,5	9,3	17,8	24,3	29,7	47,9	34,7	45,4	49,5
	c	1,1	0,4	-0,1	-0,5	-1,2	-1,5	-1,3	-0,4	-0,9	-0,2	0,1	1,3
Październik	a	9,6	9,2	10,1	8,8	8,8	17,9	22,4	29,4	49,1	36,9	42,6	48,7
	b	9,6	8,2	9,6	8,5	8,7	16,7	23,4	29,2	47,8	34,9	41,7	47,3
	c	0,0	0,8	0,2	0,1	0,0	0,2	-0,2	0,1	0,3	0,5	0,1	0,5
Listopad	a	8,7	8,0	9,2	14,7	12,2	26,3	34,0	36,8	57,4	39,5	44,3	46,1
	b	8,3	7,7	8,7	8,3	9,4	19,4	26,1	30,4	50,4	36,5	39,9	43,5
	c	0,2	0,3	0,3	1,4	0,7	1,1	1,2	1,4	1,6	0,8	0,7	0,8
Grudzień	a	8,1	7,8	8,3	10,3	14,6	30,4	30,9	33,8	51,6	33,9	34,2	39,7
	b	8,2	7,7	8,6	8,4	10,6	22,8	28,6	33,6	54,5	38,0	39,2	41,0
	c	-0,0	0,2	-0,2	0,4	0,9	0,8	0,3	0,0	-0,4	-0,9	-0,9	-0,2

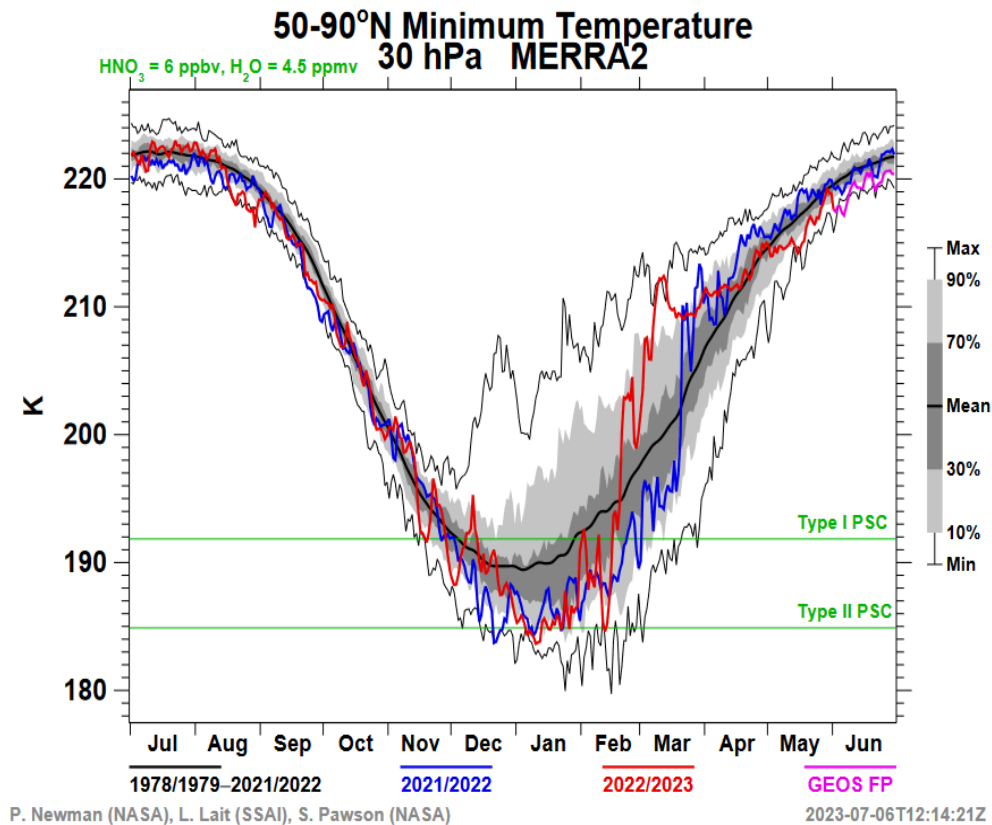
a – średnie miesięczne (D) w 2023 roku

b – średnie miesięczne wieloletnie (D) z lat 1994-2022

c – standaryzowane odchylenie: $(a-b)/\sigma$, gdzie σ jest odchyleniem standardowym średnich miesięcznych z lat 1994-2022

Zimowo-wiosenne ubytki ozonu stratosferycznego 2022/2023

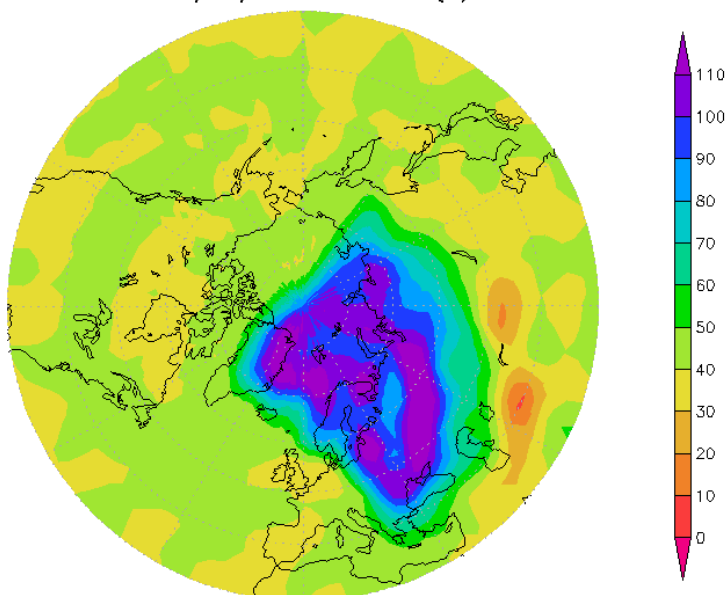
Ilość ozonu niszczonego w stratosferze w sezonie zimowo-wiosennym na półkuli północnej jest bardzo zmienna z roku na rok, zwykle dużo niższa niż na półkuli południowej.



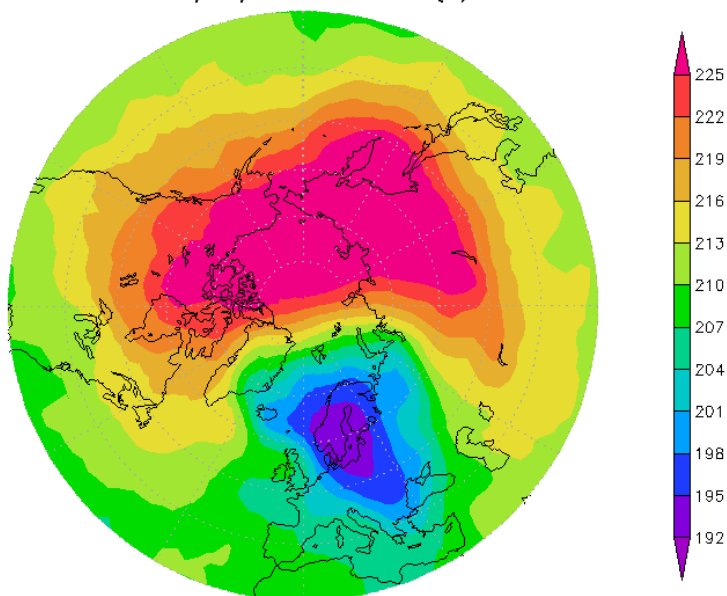
Rys. 11. Najniższe temperatury w stratosferze na półkuli północnej w obszarze 50-90°N dla powierzchni izobarycznej 30hPa, na tle zmienności wieloletniej

Duży potencjał destrukcji ozonu w sezonie zimowo-wiosennym 2022/2023 zapowiadały bardzo niskie temperatury w arktycznej stratosferze. Nagłe ogrzanie stratosferyczne w połowie lutego spowodowało jednak szybki zanik polarnych chmur stratosferycznych PSC (Rys. 11).

NIES STRAS potential vorticity ($10^{-6} \text{m}^2 \text{s}^{-1} \text{kg}^{-1} \text{K}$) NCEP Reanalysis
2023/02/15 12Z $\theta=550(\text{K})$



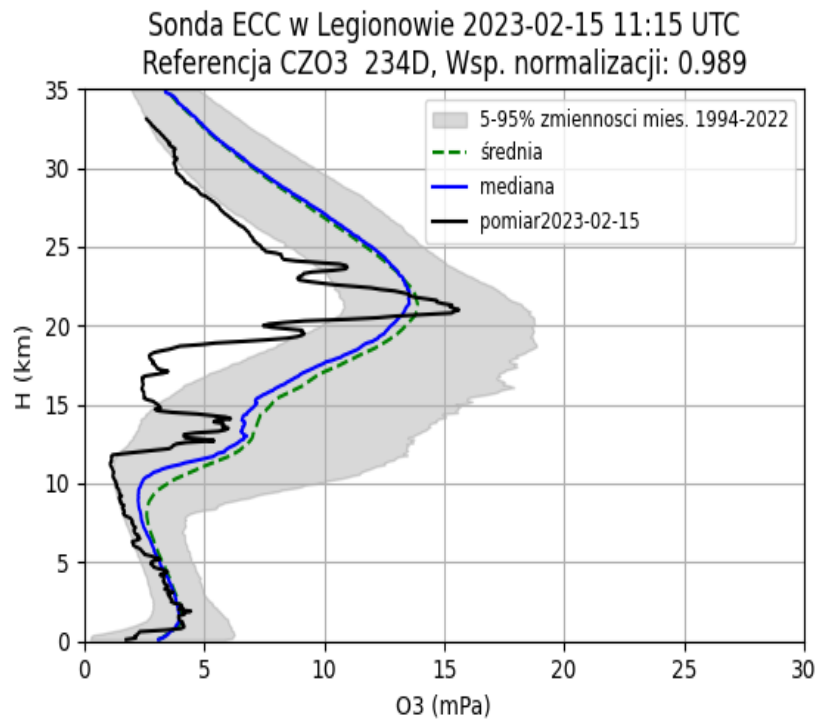
NIES STRAS temperature (K) NCEP Reanalysis
2023/02/15 18Z $\theta=550(\text{K})$



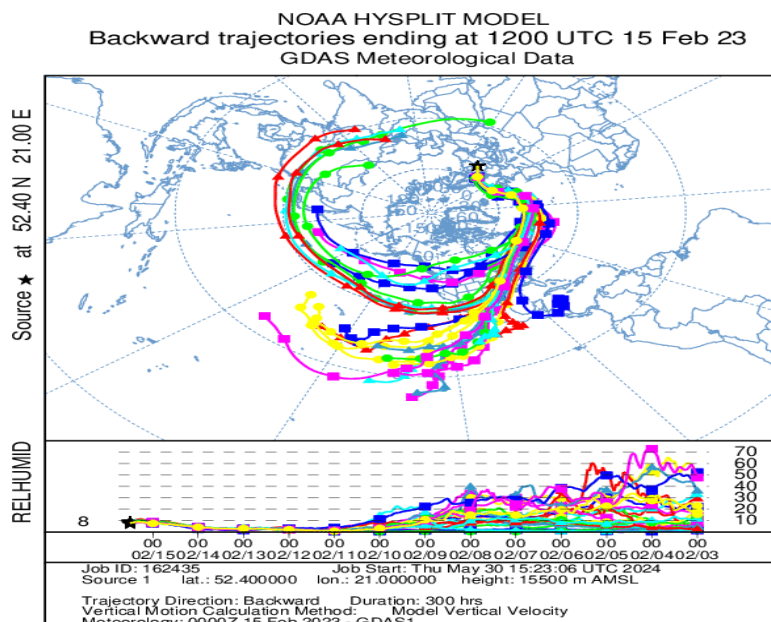
Rys. 12. Wirowość potencjalna oraz temperatura powietrza nad półkulą północną na powierzchni izentropowej 550K (~21km) opracowana przez NIES <https://db.cgcr.nies.go.jp/gem/stras/en/reanalysis.html?date=20230215&polar=n&k=550>

Mapy wirowości potencjalnej i temperatury powietrza opracowane przez Japoński Instytut Badań Środowiska obrazują położenie chłodnego wiru polarnego na powierzchni izentropowej 550K (~21km) (Rys. 12). Na mapach jest widoczne przesunięcie arktycznego wiru polarnego na południe. 15 lutego stacja w Legionowie znalazła się na jego brzegu na wysokości 21km, a na większych wysokościach w jego wnętrzu. Poza warstwą

największej koncentracji ozonu (~21km) obserwowano skrajnie niskie koncentracje ozonu praktycznie w całej stratosferze (Rys. 13).



Rys. 13. Profil ozonu nad Legionowem podczas adwekcji wiru polarnego nad Polskę 15 lutego 2023 r., na tle zmienności wieloletniej

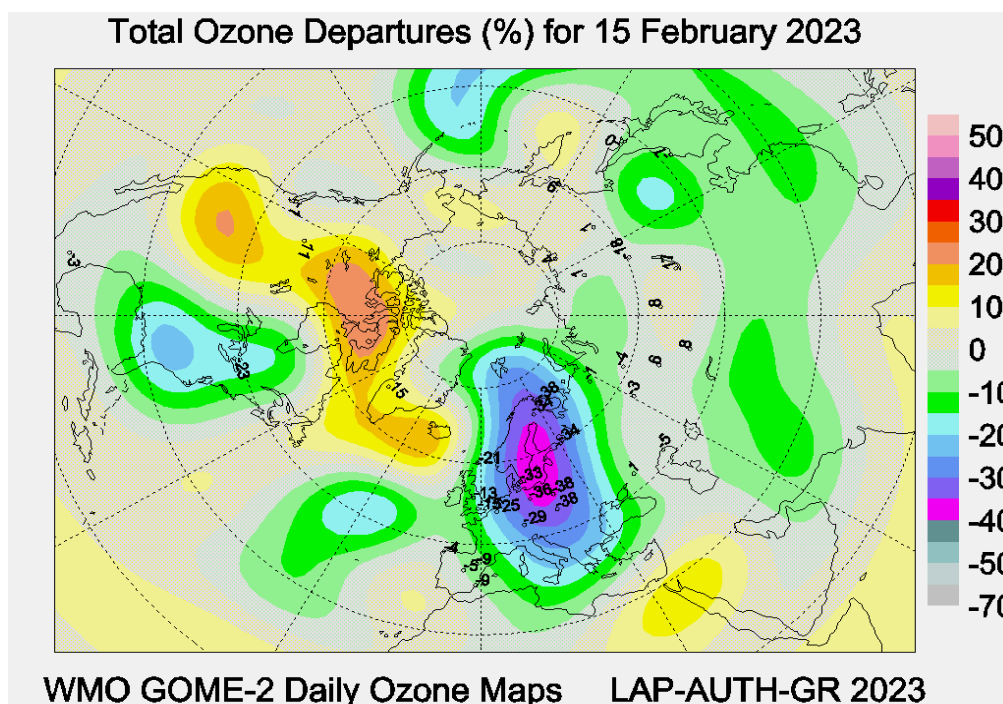


Rys. 14. Wsteczne trajektorie NOAA HYSPLIT oraz wilgotność względna dla cząstek powietrza docierającego nad Legionowo w warstwie 15-16km 15 lutego 2023

Analiza zespołu cząstek NOAA na trajektoriach wstecznych w modelu HYSPLIT (Rys. 14) pokazuje dwa źródła masy dla niskich koncentracji ozonu nad Legionowem

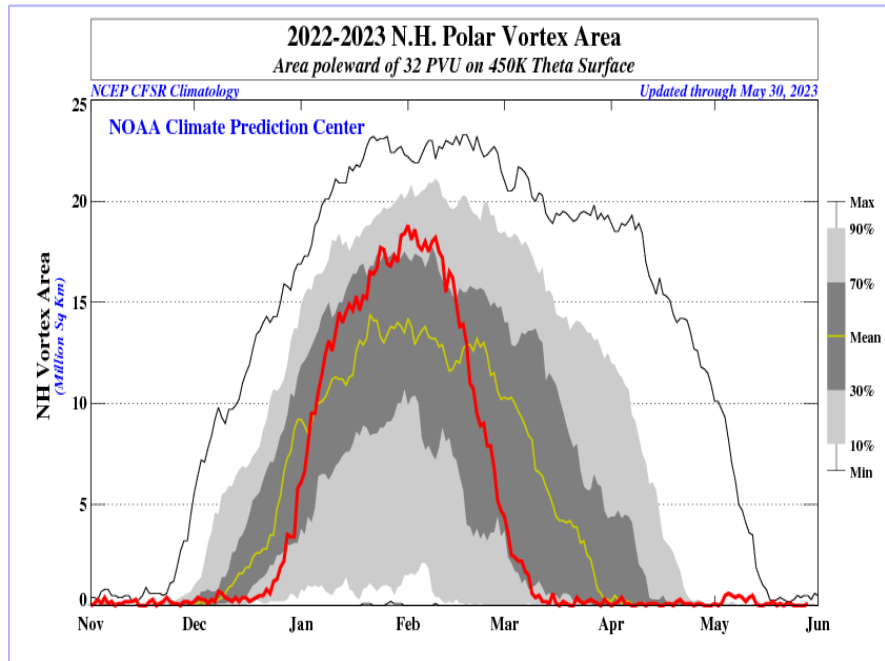
w dolnej stratosferze. Cząstki o wyższej wilgotności z górnej troposfery pochodziły z ciepłych regionów blisko równika, nad Pacyfikiem. Natomiast powietrze arktyczne zostało przetransportowane z regionów polarnych. Intensywne mieszanie zubożonych w ozon mas powietrza i ewentualne zmiany w chemii ozonu w wilgotnym powietrzu mogłyby wyjaśniać niedobory ozonu w dolnej stratosferze nad Legionowem (Rys. 13).

Ball i in. (2020), wykazali, że mieszanie w stratosferze powietrza równikowego z natury ubożego w ozon z powietrzem w średnich szerokościach geograficznych osłabia tempo naprawy warstwy ozonowej w wybranych rejonach na kuli ziemskiej.



Rys. 15. Mapa WMO GOME-2 procentowych odchyleń CZO₃ nad półkulą północną w dniu 15 lutego 2023 r.

Na rysunku 15 przedstawiono mapę WMO procentowych odchyleń zawartości ozonu w kolumnie atmosfery (CZO₃) nad półkulą północną, na podstawie pomiarów satelitarnych GOME-2 i naziemnych, dla 15 lutego 2023 r. Największe ubytki CZO₃, sięgały blisko 40%, występowały nad Arktyką oraz w rejonie północnej Europy, w tym nad Polską. Zasięg geograficzny tych ubytków obejmował szerokości geograficzne od około 50°N do bieguna północnego, a największe anomalie koncentrowały się w strefie arktycznej i subarktycznej. Wielkość i zasięg przestrzenny obserwowanej anomalii CZO₃ kwalifikuje się jako mini-dziura ozonowa.



Rys. 16. Powierzchnia arktycznego wiru polarnego na powierzchni izentropowej 450K (~20km) podczas zimy stratosferycznej 2022/2023 nad półkulą północną https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/stratosphere/polar/gif_files/vtx_nh_2022-2023.png

Od połowy lutego postępował proces erozji wiru polarnego. W wyniku kilku impulsów ogrzania stratosferycznego temperatura we wnętrzu wiru na poziomie głównego maksimum koncentracji ozonu wzrosła znacznie powyżej -78°C (Rys. 11), co zakończyło sezonowy proces niszczenia ozonu. Przedwczesny rozpad arktycznego wiru polarnego na początku marca zapobiegł dużym stratom ozonu na wiosnę.

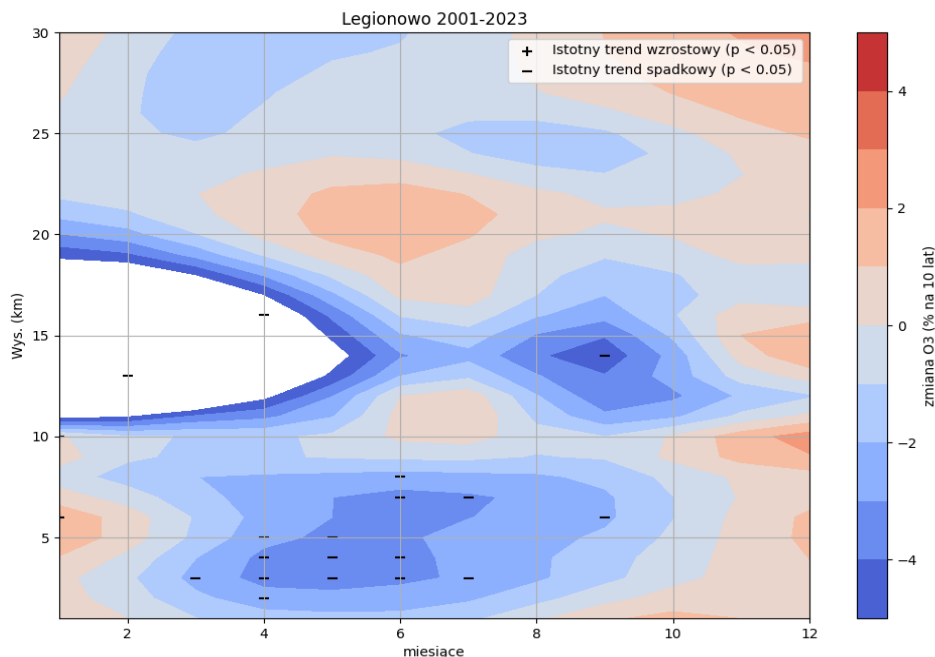
Istnieje wiele potencjalnych przyczyn powtarzających się epizodów letnich ubytków ozonu, które przypominają uwarstwienie mas powietrza jak w przypadkach mini-dziur ozonowych w chłodnej porze roku. Mogą to być zmiany w wielkoskalowej cyrkulacji atmosferycznej, ocieplenie klimatu jak również wpływ zanieczyszczeń powietrza. Dokładne zrozumienie tych zjawisk i ich potencjalnych konsekwencji wymaga bardziej szczegółowych badań i analiz. W przypadku dużych spadków poziomu ozonu w okresie letnim, przy sprzyjającej pogodzie i najwyższym położeniu Słońca, może dojść do rekordowego natężenia promieniowania UV.

Analiza wieloletnich zmian koncentracji ozonu nad Legionowem

Aby dokładnie zrozumieć trendy w zawartości ozonu w okresie zmniejszania ilości substancji niszczących warstwę ozonową, konieczna jest analiza zmian zarówno w troposferze, jak i w stratosferze. Istnieją dowody na to, że brak zmian w CZO_3 w strefie zwrotnikowej jest wynikiem wzrostu ozonu troposferycznego, który rekompensuje spadek ozonu w dolnej stratosferze (WMO, 2022). Ten spadek jest spowodowany przyspieszeniem cyrkulacji atmosferycznej związanej ze zmianami klimatycznymi i jest zgodny z wynikami modelowania. Diallo i in. (2018, 2019) wykazali istnienie strukturalnej zmiany cyrkulacji prowadzącej do osiadania ozonu w sezonie zimowym na półkuli północnej w warstwie maksimum ozonu. Niemniej jednak, analizy tych zmian przy użyciu różnych zestawów danych obserwacyjnych wykazują znaczące niepewności.

Sondaże ozonowe są szczególnie przydatne do analizy trendów ozonu w stratosferze do wysokości około 30-35km ze względu na ich dużą rozdzielczość pionową (~100m) i relatywnie niską niepewność pomiarową (~5-10%).

Na podstawie rutynowych sondaży ozonowych z lat 2001-2023 obliczono interpolowane wartości nieunormowanego ciśnienia cząstkowego ozonu, dla sondaży które osiągnęły powierzchnię 10hPa oraz ze współczynnikiem normalizacji Dobsona w zakresie 0,9-1,1. Przygotowanie danych do analizy obejmowało filtrację eksponentjalną (odrzućenie par danych z nienaturalnymi skokami danych), wygładzanie przerw w danych metodą spline, wyznaczenie średnich biegnących w warstwach 1km. Wybrano podzbiór danych ciśnienia cząstkowego ozonu przypisany do wysokości 1:30km; dane uśrednione w 1km warstwach, centrowane na środku. Obliczono średnie miesięczne profile w tych warstwach. Odrzucono anomalie w częściach profili przekraczające 3σ od średnich miesięcznych wieloletnich. Wyznaczono liniowe trendy w miesiącach metodą liniowej regresji. Przy prezentacji wyników na rysunku 17 zastosowano wygładzanie trendu z użyciem filtru gaussowskiego. Zaznaczono trendy istotne statystycznie ($p < 0,05$). Biały obszar oznacza, że przy dostępnej ilości danych wyznaczenie znaku trendu nie zawsze jest możliwe. Do bardzo dużej zmienności ozonu w dolnej stratosferze w sezonie zimowo-wiosennym przyczyniają się interakcje ozonu z dynamicznymi zmianami cyrkulacji.



Rys. 17 Zmiany zawartości ozonu nad Legionowem w okresie 2001-2023. Zaznaczono trendy istotne statystycznie ($p < 0,05$)

Wyniki analizy i dyskusja trendów w profilach ozonu:

- W dolnej stratosferze, po okresie silnego spadku ozonu w sezonie zimy i wiosny w szczytowym okresie nasycenia atmosfery (1979-1993) substancjami niszczącymi warstwę ozonową, następuje teraz wyraźne wyhamowanie.
- Równolegle, w średniej stratosferze, rozwija się nowa tendencja spadku ozonu. Spadki zaczynają się na wysokości 30km w końcu zimy i przenoszą się do nieco niższych wysokości (~24km) w końcu lata.

Analiza przypadków letnich ubytków ozonu nad Legionowem w raportach z lat poprzednich sugeruje powolny transport ozonu w warstwie 23-28km z wysokich szerokości geograficznych półkuli północnej.

Badania Sagi i in. (2017) wieloletnich (2002-2013) obserwacji Odin/SMR wykazały, że ozon jest niszczone w średniej stratosferze, w fotochemicznym cyklu z tlenkami azotu. Głównym źródłem NO_x w stratosferze jest produkcja NO przez reakcję N_2O ze wzbudzonym atomem tlenu $\text{O}(^1\text{D})$, która pojawia się w niskich i umiarkowanych szerokościach geograficznych na wysokości około 30km (Brasseur i Solomon, 2005). Niszczenie ozonu powodowane przez NO_x może się rozpoczynać jeszcze w czasie zimy i/lub na wiosnę, kiedy słabnie wir polarny.

- We wrześniu obserwuje się zmniejszanie zawartości ozonu w warstwie UTLS. W porównaniu do stratosfery, dynamika ozonu w tej warstwie jest bardziej

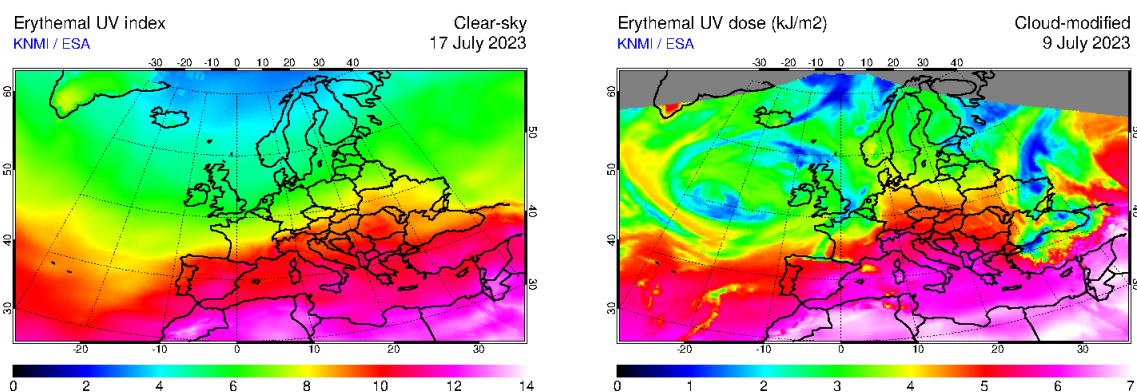
skomplikowana. Jedną z potencjalnych przyczyn może być wydłużanie się okresu ciepłego, które prowadzi do częstszej adwekcji powietrza zwrotnikowego. Jeśli do górnej troposfery trafia zwrotnikowe powietrze o niskiej zawartości ozonu, może to przyczynić się do obniżenia ogólnej koncentracji ozonu w tej warstwie.

- Spadki ozonu w troposferze swobodnej w cieplejszych miesiącach mogą być z jednej strony wynikiem przenikania ozonu w zubożonych polarnych masach po rozpadzie wiru polarnego na wiosnę, a z drugiej strony mniejszej emisji antropogenicznych prekursorów ozonu w okresie letnim.

3. 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 2023 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.

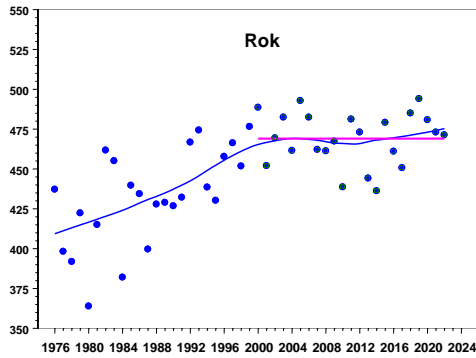
Pomiary natężenia napromienienia o skuteczności rumieniowej z użyciem biometru Kipp & Zonen pokazały w dniu 17 lipca 2023 r. najwyższą w roku wartość tj. 8,0 Indeksu UV ($1 \text{ Index} = 25 \text{ mW/m}^2$). Powyższą wartość potwierdziły pomiary widm UV z zastosowaniem spektrofotometru Brewera. Wysoka wartości Indeksu UV (UVI) w tym dniu była wynikiem niskich wartości CZO_3 (301D, czyli 6,8% poniżej normy). Tego dnia dzienna dawka rumieniowa (2500 J/m^2) nie była rekordowo wysoka w tym roku. Najwyższą w 2023 r. dzienną dawkę rumieniową równą 3981 J/m^2 zanotowano 9 lipca, wtedy UVI wynosił 6,4. Satelitarne pomiary (Rys. 18) pokazały zbliżone wartości UVI i dziennej dawki.



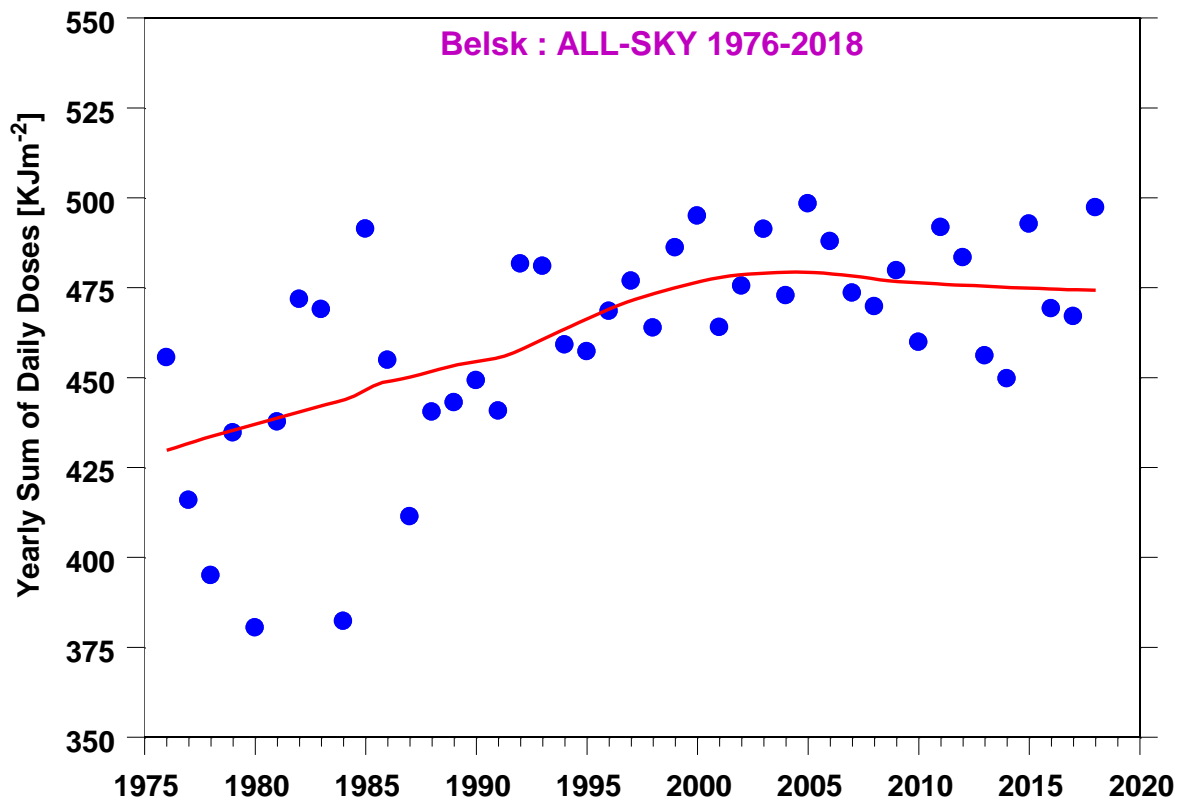
Rys. 18. Indeks UV i dzienna dawka rumieniowa nad Europą z pomiarów spektrofotometrem GOME-2 na platformie satelitarnej MetOp-A w dniach 17.07.2023 (lewa strona) i 09.07.2023 (prawa strona), odpowiednio, kiedy w Belsku zmierzono maksymalną w roku 2023 wartość indeksu UV (8,0) i dziennej dawki erytemalnej (3981 J/m²).

W związku z pojawieniem się niskich wartości ozonu nad Polską w kwietniu 2023 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 8. Maksymalna dawka rumieniowa w tym okresie wynosiła 2644 J/m² (27.04), co w przybliżeniu stanowi 11-krotność minimalnej dawki wywołującej rumień skóry (tzw. MED) u osoby z fototypem 2. Największa wartość UVI w tym miesiącu wynosiła 4,9 (30.04). Wysokie wartości Indeksu UV o tej porze roku są szczególnie niebezpieczne dla zdrowia, gdyż organizm nie jest jeszcze zaadaptowany do długotrwałych ekspozycji na promieniowanie UV, a umiarkowane temperatury (~20°C) zachęcają do nadmiernego opalania bez zastosowania kremów z filtrem ochronnym. Czerwińska i Krzyściń (2020) stwierdzili, że nadmierne napromienienie w kwietniu może być przyczyną wzrastającej gwałtownie zachorowalności 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 ~470 kJ/m². Trend w sumie rocznej w latach 1976-1999 wynosił 5,9% ± 1,6% na 10 lat. W tym okresie suma roczna wzrosła więc o 14,2%. W 2023 r. suma roczna wyniosła 471,3 kJ/m² i była typowa dla wartości w XXI w. W ostatnich latach (od ~2010 r.) pojawiła się lekka tendencja wzrostowa, która w okresie 2010-2023 r. była jeszcze nieistotna statystycznie (Rys. 19).



Rys. 19. Roczna suma dziennych dawek promieniowania rumieniowego w Belsku w latach 1976-2023 (punkty).

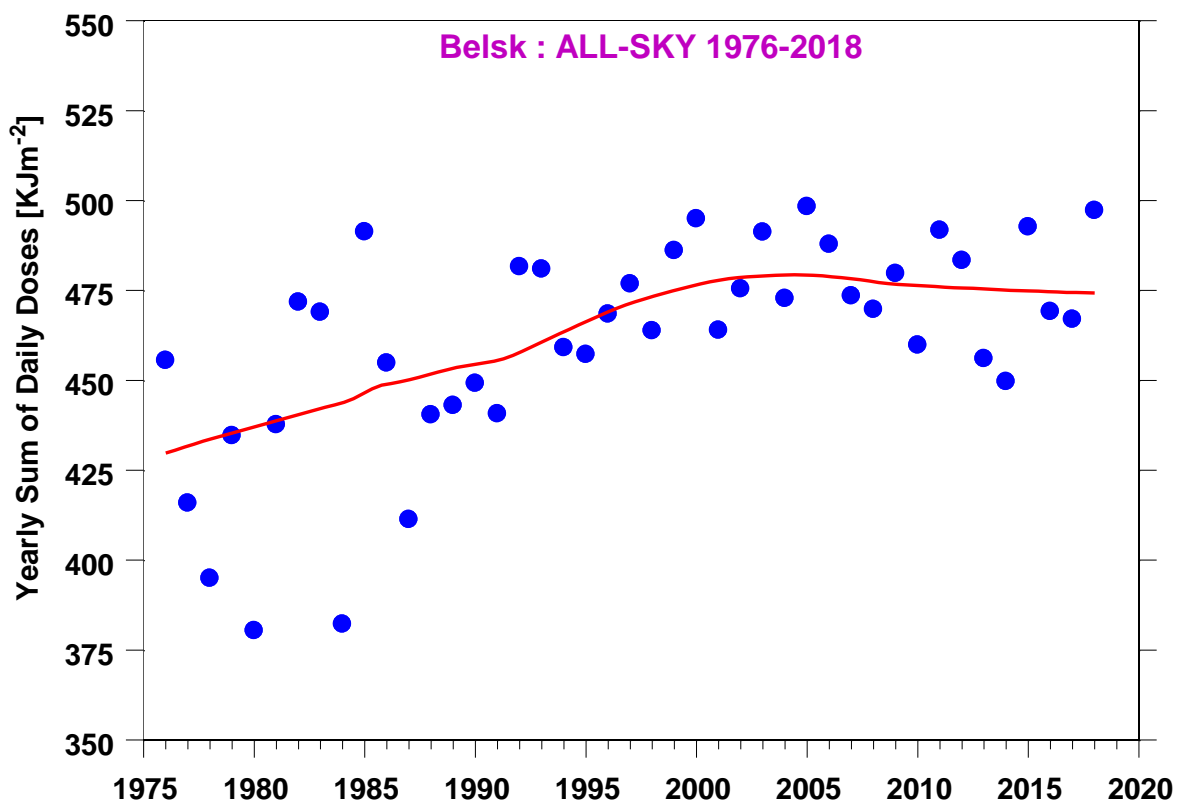


Ciągła krzywa w kolorze niebieskim przedstawia wygładzone dane. Prosta w kolorze fioletowym ilustruje trend w okresie 2000-2023

Rysunek 20 przedstawia serie czasowe sum miesięcznych dziennych dawek rumieniowych składających się na sumę roczną. W niektórych miesiącach przebieg długookresowych zmian w sumach miesięcznych różni się od tego w sumie rocznej. Ale jedynie w maju stwierdzono istotnie statystycznie trend, $-7,5\% \pm 6,4\% (2\sigma)$, w sumach miesięcznych po roku 2000. Przed 2000 r. wzrostowy trend w tym miesiącu wynosił $9,1\% \pm 6,4\% (2\sigma)$. 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. 20. Sumy miesięczne (od stycznia do grudnia) dziennych dawek promieniowania rumieniowego w Belsku w latach 1976-2023 (punkty).

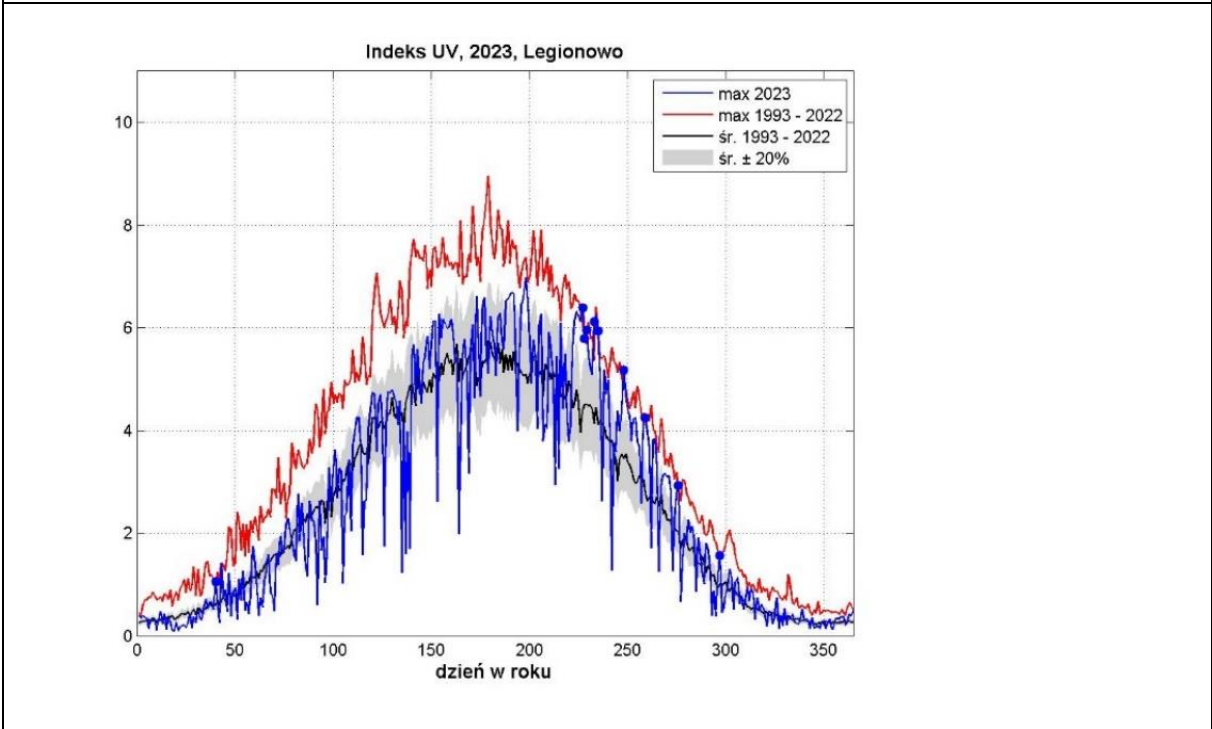
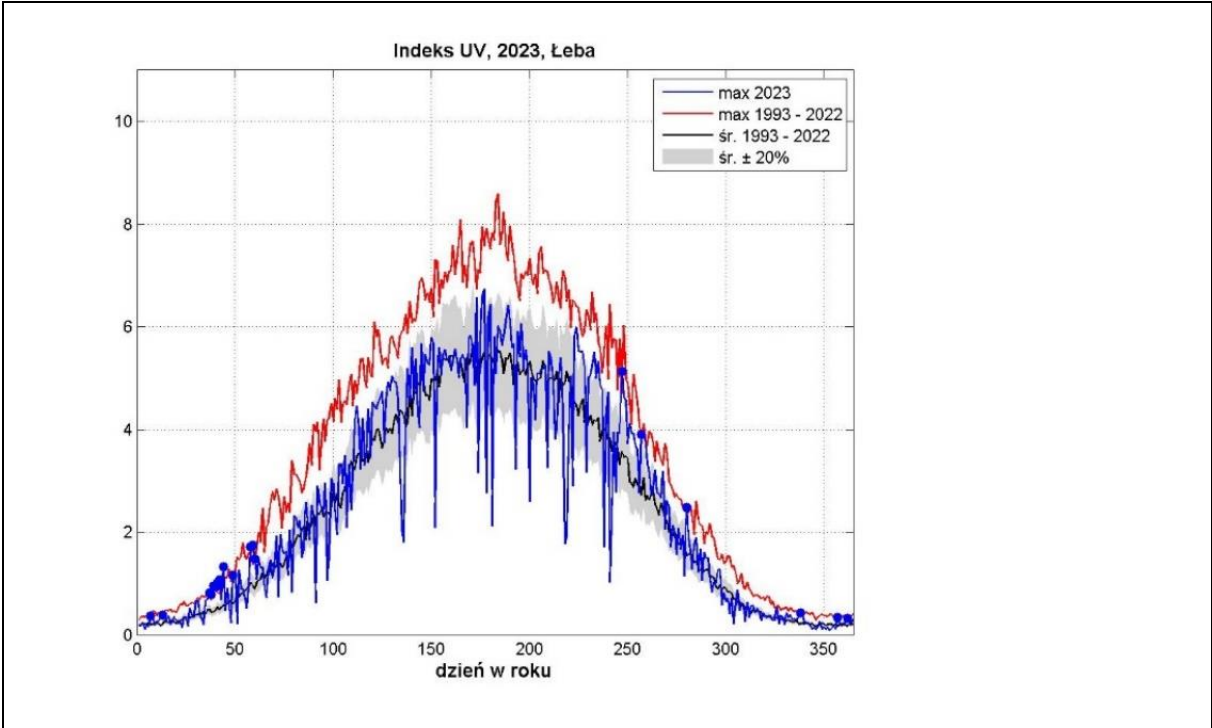


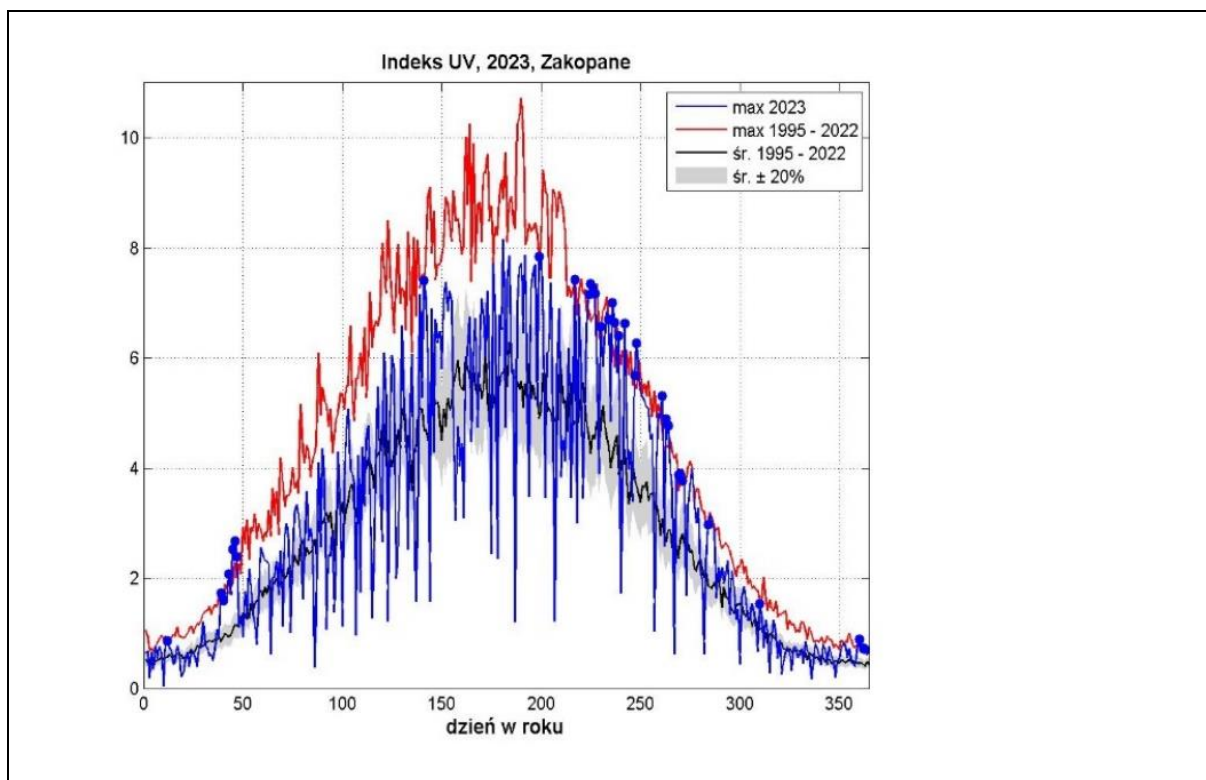
Ciągła krzywa w kolorze niebieskim przedstawia wygładzone dane. Prosta w kolorze czerwonym ilustruje trend w okresie 2000-2023 wyznaczony standardową regresją liniową z zastosowaniem metody najmniejszych kwadratów

Stacje pomiarowe IMGW-PIB monitorujące promieniowanie UV-B w Łebie, Legionowie i w Zakopanem, wykorzystują mierniki Solar Light UV biometer model 501. Od utworzenia sieci monitoringu w 1993 r. pracują bez większych awarii. W roku 2023 program pomiarowy został wykonany w 100%.

W 2023 roku wyróżniają się pomiary z września gdzie promieniowanie UV-B było większe od typowych wartości dla Łeby, Legionowa i Zakopanego (Rys. 21). Jest to skorelowane z mniejszą od średniej ilości ozonu całkowitego oraz większym od średniej usłonecznieniem i związane z występującą w tym okresie wyżową pogodą dającą wiele bezchmurnych dni. W Zakopanem okres podwyższonego promieniowania UV trwał od lipca do września. Także w lutym, na trzech stacjach IMGW-PiB, obserwowano większe od średnich wartości promieniowania UV-B. Można to powiązać z mniejszą od średniej ilości ozonu całkowitego w tym miesiącu.

W pozostałych miesiącach promieniowanie UV-B zwykle oscylowało w pobliżu wartości średnich.



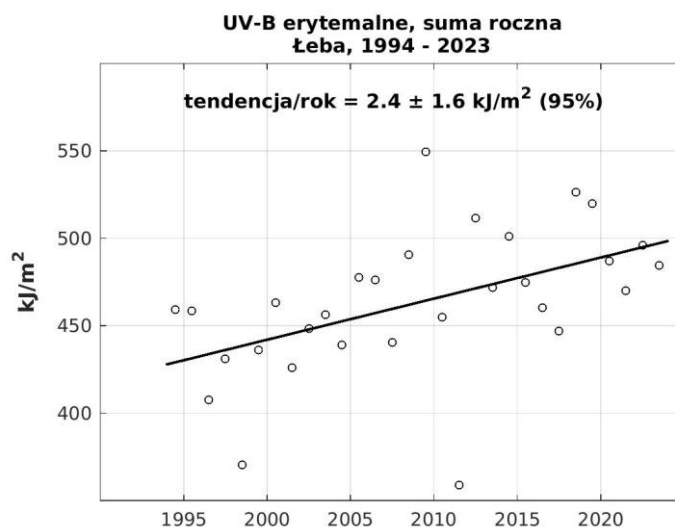


Rys. 21. Przebiegi roczne Indeksu UV z 2023 roku dla stacji w Łebie, Legionowie i Zakopanem na tle średniego oraz maksymalnego Indeksu UV od początku pomiarów do 2022 roku dla każdej stacji. Niebieskie punkty oznaczają ekstremalne wartości w serii dla danego dnia roku zmierzone w 2023 roku

Największe wartości Indeksu UV na stacjach IMGW-PIB w 2023 roku zmierzono odpowiednio: 30 czerwca w Zakopanem (UVI 8,2), 17 lipca w Legionowie (UVI 7,0) i 26 czerwca w Łebie (UVI 6,7).

Dla 2023 roku maksymalną dawkę miesięczną, 451,1MED (94,7kJ/m²) zmierzono w czerwcu dla Łeby. Maksymalną dawkę dobową, 22,85MED (4798,5J/m²) zaobserwowano dla 3 lipca w Zakopanem. Maksymalne dawki dobowe dla Łeby i Legionowa wystąpiły: 26 czerwca (Łeba, 20,27MED = 4256,7J/m²) oraz 9 lipca (Legionowo, 19,50MED = 4095J/m²). Maksymalne sumy miesięczne zmierzono dla Zakopanego i Legionowa w lipcu, odpowiednio 443,3MED (93,1kJ/m²) oraz 436,2MED (91,6kJ/m²).

Z przeprowadzanej analizy serii promieniowania UV otrzymano dodatnią tendencję dla stacji w Łebie $+2,4 \pm 1,6\text{kJ/m}^2$ rocznie (poziom ufności 95%) (Rys. 22) oraz wzrost promieniowania UV dla Legionowa i Zakopanego, które są jednak nieistotne statystycznie.



Rys. 22. Seria homogenizowanych pomiarów promieniowania erytemalnego UV-B dla stacji w Łebie.

Podsumowanie

Analiza danych o całkowitej zawartości ozonu uzyskanych przy pomocy spektrofotometru Dobsona pozwala stwierdzić, że w 2023 roku średnie miesięczne wartości całkowitej zawartości ozonu w Belsku były wyższe od średniej wieloletniej z lat 1963-2022 tylko w listopadzie 10,1%. W pozostałych miesiącach obserwowano ujemne odchylenia od średniej wieloletniej. Największe ujemne odchylenia wystąpiły w lutym (-11,1%).

Wyniki satelitarnego monitoringu ozonu na Europę Centralną, pokazały że w styczniu i lutym 2023 wystąpiły największe ujemne odchylenia średnich miesięcznych wartości CZO_3 w stosunku do średnich miesięcznych wieloletnich z lat 2013-2022. Z kolei listopad 2023 charakteryzował się wyraźnie podwyższonymi wartościami CZO_3 nad obszarem Europy Centralnej, w tym Polski. Wyższe wartości w stosunku do średnich miesięcznych wieloletnich wystąpiły również w marcu 2023 w północnej części Europy.

W 2023 roku wykonano 203 serii pomiarowych przy pomocy spektrofotometru Brewera pozwalających na wyznaczenie pionowy rozkładów ozonu metodą Umkehr.

Liniowe trendy zmian ozonu w sezonie wiosennym (marzec–kwiecień–maj) w latach 2020–2023 wskazują na stabilizację zawartości ozonu w troposferze i dolnej stratosferze, w środkowej stratosferze i w całej kolumnie atmosfery. W górnej stratosferze zaobserwowano istotnie statystycznie wzrostowy trend, $4,2\% \pm 1,5\%$ (1σ) na 10 lat. Podobną sytuację stwierdzono w sezonie letnim (czerwiec–lipiec–sierpień) i jesiennym (wrzesień–październik– listopad).

W średnich miesięcznych zawartościach ozonu nad Legionowem w roku 2023 nie odnotowano anomalii. Występowały jednak znaczące spadki (przekraczające 1σ): w lutym, w warstwie 50/30hPa, w sierpniu, w warstwie 30/20hPa i we wrześniu w warstwie 150/100hPa.

Duży potencjał destrukcji ozonu w sezonie zimowo-wiosennym 2022/2023 zapowiadały bardzo niskie temperatury w arktycznej stratosferze. Nagłe ogrzanie stratosferyczne w połowie lutego spowodowało jednak szybki zanik polarnych chmur stratosferycznych PSC. 15 lutego 2023 stacja w Legionowie znalazła się na brzegu wiru polarnego na wysokości 21km, a na większych wysokościach w jego wnętrzu. Poza warstwą największej koncentracji ozonu (~21km) obserwowano skrajnie niskie koncentracje ozonu praktycznie w całej stratosferze. Na podstawie analizy trajektorii stwierdzono, że intensywne mieszanie zubożonych w ozon mas powietrza i ewentualne zmiany w chemii ozonu w wilgotnym powietrzu mogłyby wyjaśniać niedobory ozonu w dolnej stratosferze nad Legionowem. Przedwczesny rozpad arktycznego wiru polarnego na początku marca zapobiegł dużym stratom ozonu na wiosnę.

Analiza wieloletniej serii danych sondażu ozonowych w Legionowie dla okresu 2001-2023 pokazała, że:

- W dolnej stratosferze, po okresie silnego spadku ozonu w sezonie zimy i wiosny w szczytowym okresie nasycenia atmosfery (1979-1993) substancjami niszczącymi warstwę ozonową, następuje teraz wyraźne wyhamowanie.
- Równolegle, w średniej stratosferze, rozwija się nowa tendencja spadku ozonu. Spadki zaczynają się na wysokości 30km w końcu zimy i przenoszą się do nieco niższych wysokości (~24km) w końcu lata.
- We wrześniu obserwuje się zmniejszanie zawartości ozonu w warstwie UTLS. W porównaniu do stratosfery, dynamika ozonu w tej warstwie jest bardziej skomplikowana. Jedną z potencjalnych przyczyn może być wydłużanie się okresu ciepłego, które prowadzi do częstszej adwekcji powietrza zwrotnikowego. Jeśli do górnej troposfery trafia zwrotnikowe powietrze o niskiej zawartości ozonu, może to przyczynić się do obniżenia ogólnej koncentracji ozonu w tej warstwie.
- Spadki ozonu w troposferze swobodnej w cieplejszych miesiącach mogą być z jednej strony wynikiem przenikania ozonu w zubożonych polarnych masach po rozpadzie wiru polarnego na wiosnę, a z drugiej strony mniejszej emisji antropogenicznych prekursorów ozonu w okresie letnim.

Monitoring promieniowania UV-B w 2023 roku pokazał, że największe wartości Indeksu UV na stacjach IMGW-PIB zmierzono odpowiednio: 30 czerwca w Zakopanem (UVI 8,2), 17 lipca w Legionowie (UVI 7,0) i 26 czerwca w Łebie (UVI 6,7) a na stacji IGF PAN w Belsku w dniu 17 lipca (UVI 8,0).

Maksymalne dawki dobowe zmierzono: 3 lipca w Zakopanem (4798,5J/m²), 26 czerwca w Łebie (4256,7J/m²) oraz 9 lipca w Legionowie (4095J/m²) i w Belsku (3981J/m²).

Literatura

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

Brasseur, G. P. and Solomon, S.: *Aeronomy of the Middle Atmosphere, Chemistry and Physics of the Stratosphere and Mesosphere*, Vol. 32 of Atmospheric and Oceanographic Sciences Library, Springer, Dordrecht, the Netherlands, 2005

Czerwińska, A.E., and Krzyściński, J.W.: Climatological aspects of the increase of the skin cancer (melanoma) incidence rate in Europe, *International Journal of Climatology*, *Int. J. Climatol.*, 40, 3196-3207, <https://doi.org/10.1002/joc.6391>, 2020

Diallo, M., Riese, M., Birner, T., Konopka, P., Müller, R., Hegglin, M. I., Santee, M. L., Baldwin, M., Legras, B., and Ploeger, F.: Response of stratospheric water vapor and ozone to the unusual timing of El Niño and the QBO disruption in 2015–2016, *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 13055-13073, <https://doi.org/10.5194/acp-18-13055-2018>, 2018

Krzyściński, J.W., Long-term changes in ozone mini-hole event frequency over the northern hemisphere derived from ground-based measurements, *Int. J. Climatol.* 22; 1425-1439, 2002

Krzyściński, 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

Krzyściński, 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

Krzyściński, 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

Krzyściński, 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>
- 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
- Sagi K, Pérot K, Murtagh D, and Orsolini Y Two mechanisms of stratospheric ozone loss in the Northern Hemisphere, studied using data assimilation of Odin/SMR atmospheric observations *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 1791–1803, 2017 www.atmos-chem-phys.net/17/1791/2017/ doi:10.5194/acp-17-1791-2017
- Szelaż, 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
- World Meteorological Organization (WMO), *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2022*, GAW Report No. 278, 509 pp., WMO, Geneva, 2022