



Główny Inspektorat Ochrony Środowiska

**Stan warstwy ozonowej i natężenia promieniowania
za 2022 rok**

**RAPORT SYNTETYCZNY:
ANALIZA I INTERPRETACJA DANYCH,
OCENA TRENDÓW I SKALI ZJAWISKA W POLSCE
NA TLE GLOBALNYCH ZMIAN WARSTWY OZONOWEJ
W 2022 ROKU**



Praca wykonana na zlecenie Głównego Inspektoratu
Ochrony Środowiska (umowa nr
GIOŚ/31//2023/DMS/NFOŚiGW z dnia 20.02.2023 r.)
finansowana ze środków Narodowego Funduszu Ochrony
Środowiska i Gospodarki Wodnej.

Warszawa, 2023

Opracowano w Instytucie Geofizyki Polskiej Akademii Nauk oraz w Instytucie Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowym Instytucie Badawczym,
przez poniżej wymienionych autorów:

Instytut Geofizyki Polskiej Akademii Nauk:

Janusz Jarosławski

Janusz Krzyściński

Aleksander Pietruczuk

Jerzy Podgórski

Bonawentura Rajewska-Więch

Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Państwowy Instytut Badawczy:

Julita Biszczuk-Jakubowska

Aleksander Curyło

Monika Hajto

Bogumił Kois

Bożena Łapeta

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

Spis treści

Wstęp.....	4
1. Całkowita zawartość ozonu.....	5
2. Pionowy rozkład ozonu.....	14
3. Promieniowanie UV-B.....	27
Podsumowanie	34
Bibliografia.....	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.

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.

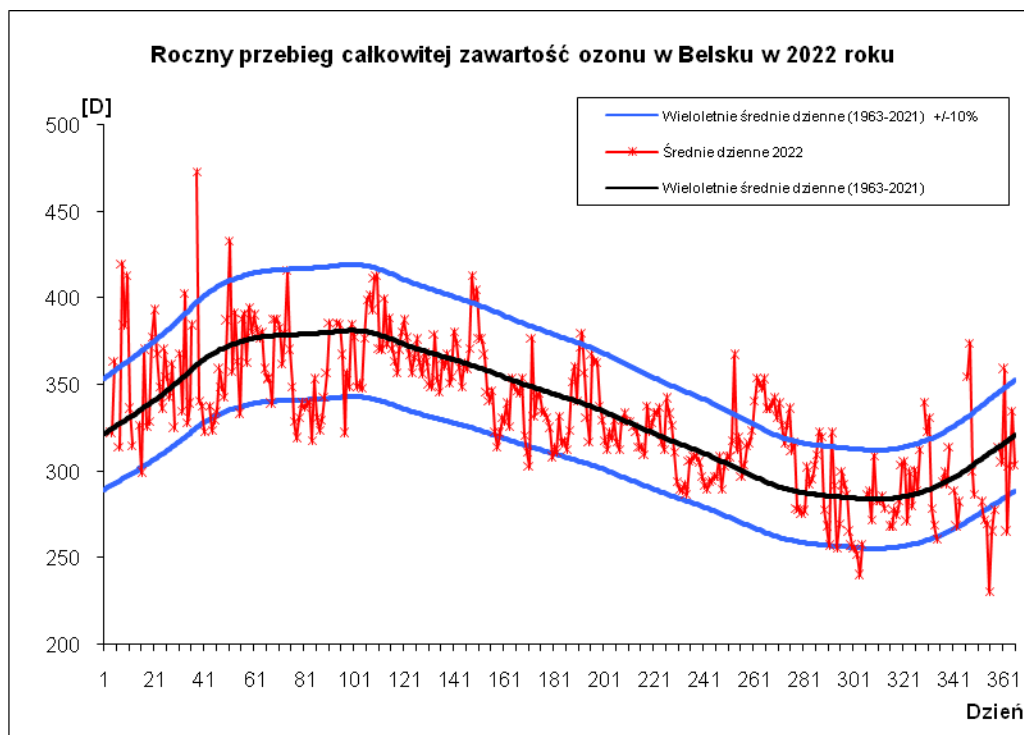
W raporcie przedstawiono analizę stanu warstwy ozonowej i poziomu promieniowania UV-B na podstawie pomiarów wykonanych w IGF PAN i IMGW-PIB w 2022 roku.

1. Całkowita zawartość ozonu

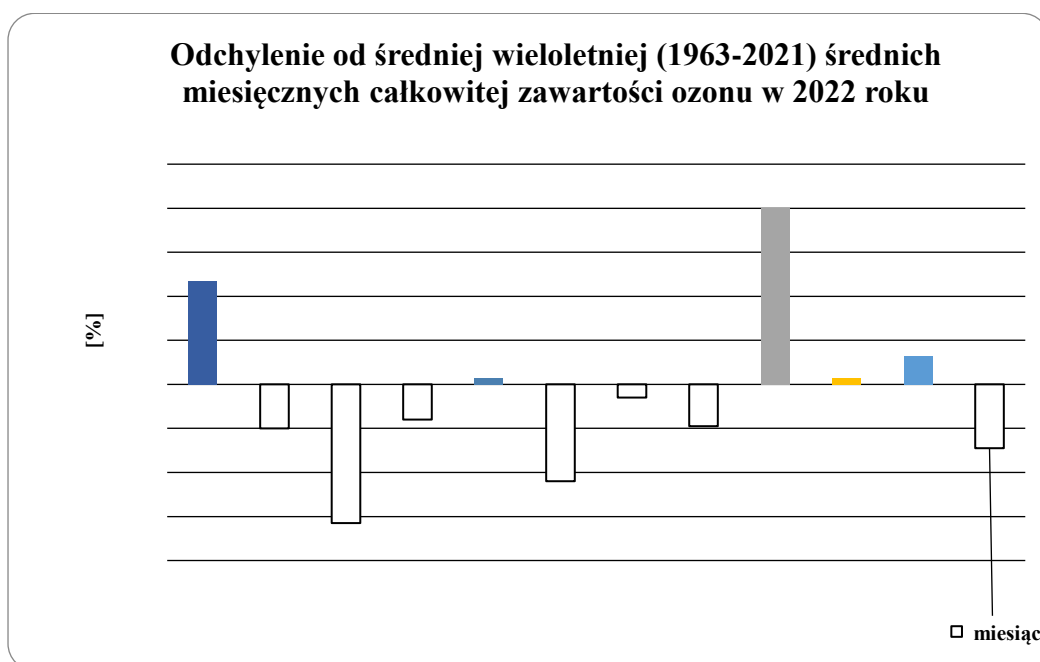
Pomiary całkowitej zawartości ozonu wykonywane są od 1963 roku w Centralnym Obserwatorium Geofizycznym PAN w Belsku przy pomocy spektrofotometru Dobsona, a od 1992 roku, równolegle, spektrofotometru Brewera.

Przebieg średnich wartości dziennych całkowitej zawartości ozonu w atmosferze w poszczególnych miesiącach przedstawia Rys.1, gdzie czerwona linia – średnie dzienne całkowitej zawartości ozonu w 2022 roku, linia czarna – wieloletnia (1963-2021) 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 2022 roku średnie miesięczne wartości całkowitej zawartości ozonu w Belsku były wyższe od średniej wieloletniej z lat 1963-2021 w styczniu, maju, wrześniu, październiku i listopadzie. Ujemne odchylenia średniej miesięcznej całkowitej zawartości ozonu od średniej wieloletniej zaobserwowano w lutym 2,0%, marcu 6,3%, kwietniu 1,6%, czerwcu 4,4%, lipcu 0,6%, sierpniu 1,9% i grudniu 2,9%. Przebieg średnich dziennych całkowitej zawartości ozonu w 2022 roku, zmierzonych spektrofotometrem Dobsona, w odniesieniu do wieloletniej średniej dziennej (1963-2021) $\pm 10\%$ 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 2022 roku.

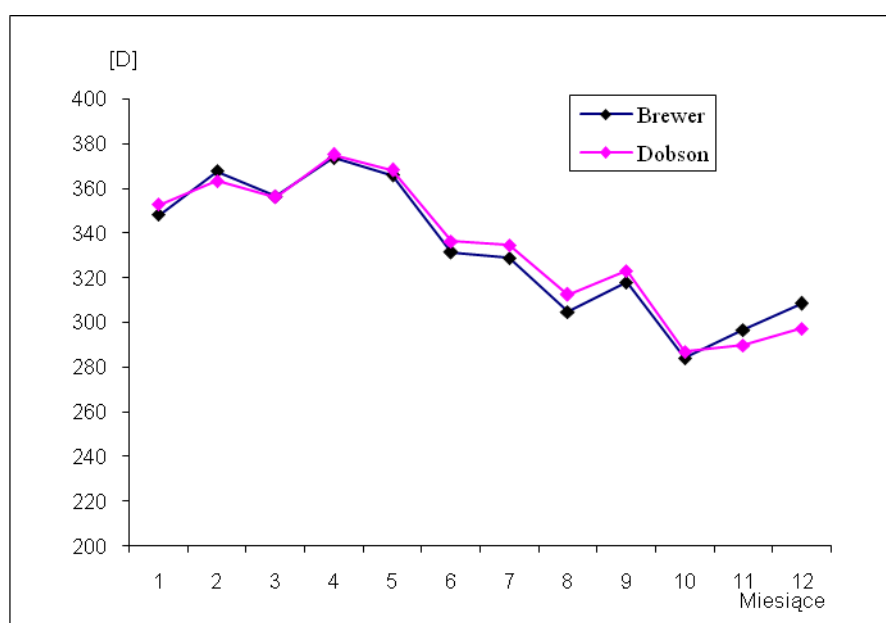


Rys.2. Odchylenie od średniej wieloletniej (1963-2021) średnich miesięcznych całkowitej zawartości ozonu w 2022 roku

Tabela 1. Średnie miesięczne całkowitej zawartości ozonu [D] w 2022 roku ich odstępstwa od średnich wieloletnich 1963-2021.

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Śr. wiel. 1963-2021	337	370	380	381	367	352	337	318	299	286	286	306
Śr. mieś. 2022	353	363	356	375	368	337	335	312	323	287	290	297
Różnica w %	4,7	-2,0	-6,3	-1,6	0,3	-4,4	-0,6	-1,9	8,0	0,3	1,3	-2,9

Przez cały 2022 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, Belsk 2022

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).

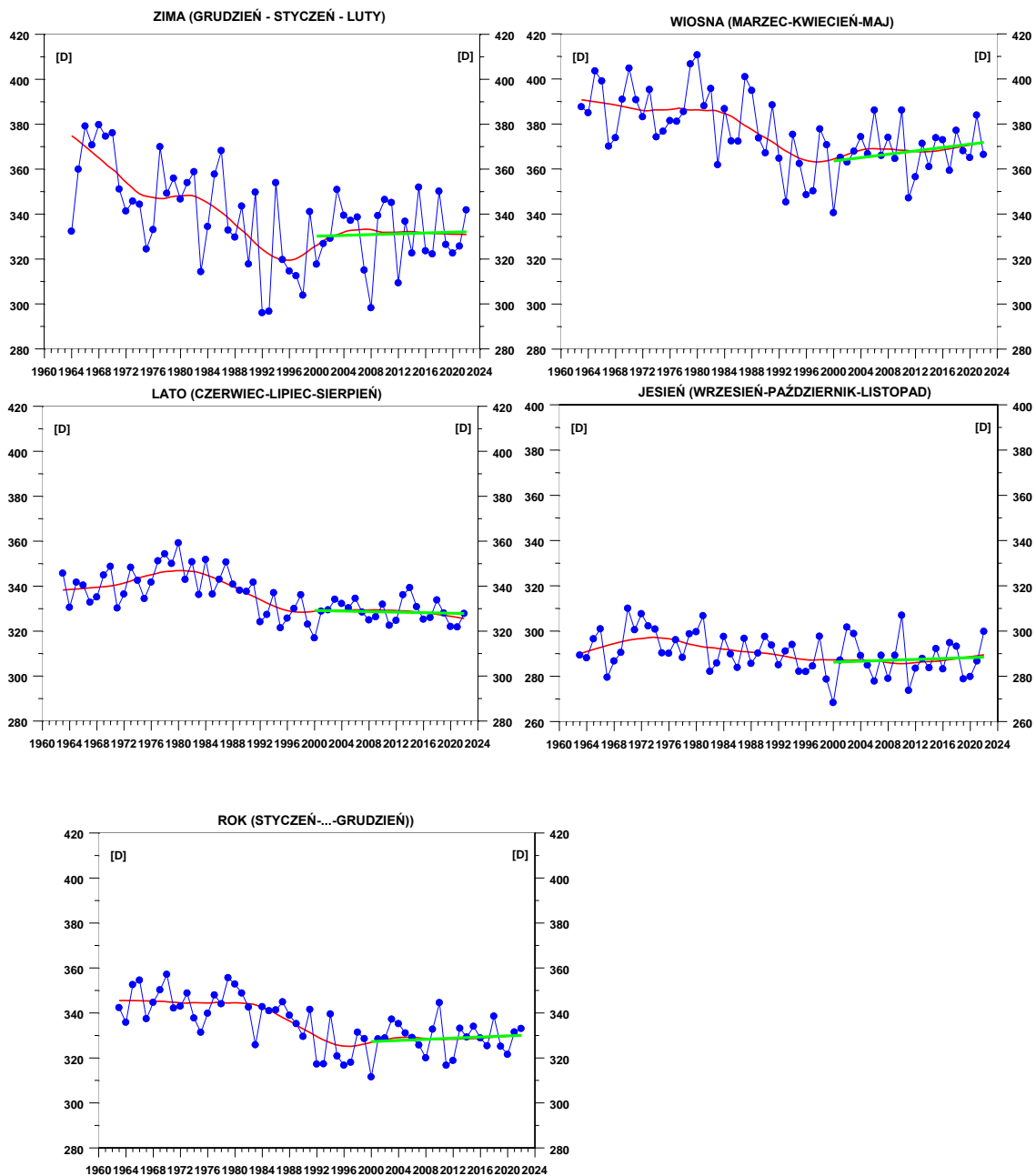
Jakkolwiek podstawowym przyrządem sieci pomiarów całkowitej zawartości ozonu nadal pozostaje spektrofotometr Dobsona, to jednak możliwość kontynuacji pomiarów i analiz porównawczych obu przyrządów jest niezwykle ważna, chociażby ze względu na zapewnienie ciągłości serii pomiarów.

W Centralnym Obserwatorium Geofizycznym w Belsku w ciągu całego 2022 r. obserwowano całkowitą zawartość ozonu. Wartości średnich miesięcznych całkowitej zawartości ozonu (CZO_3) niższe od wieloletnich (1963-2021) średnich miesięcznych obserwowano w lutym (2,0%), marcu (6,3%), kwietniu (1,6%), czerwcu (4,4%), lipcu (0,6), sierpniu (1,9%) i grudniu (2,9%) (Rys.2). Dla pozostałych miesięcy średnie miesięczne odchyłki CZO_3 od wieloletnich średnich były dodatnie od 0,3% w październiku do 8,0% we wrześniu. 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 w lutym, marcu, czerwcu i grudniu.

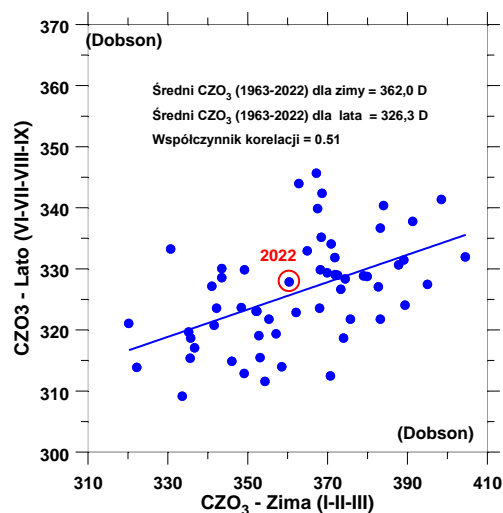
Analizując długookresowe zmiany średnich sezonowych CZO_3 w Belsku (krzywe w kolorze czerwonym na Rys.4 reprezentujące wygładzone metodą lokalnej regresji przebiegi średnich sezonowych) stwierdzamy, że od połowy lat 90-tych XX wiek następuje zmiana kierunku trendu w średnich sezonowych i w średniej rocznej 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 nie istotne statystycznie w okresie 2000-2022. Natomiast stabilizację wartości ozonu na poziomie minimum z połowy lat 90-tych XX wieku obserwujemy w sezonach letnim i jesiennym po 1996 r.

W 2022 r. średnia CZO_3 w okresie czerwiec-wrzesień (326,6 D) była zbliżona do wieloletniej normy (326,0 D) dla tego okresu. W tej sytuacji przy braku zachmurzenia poziom promieniowania UV przy powierzchni Ziemi powinien być praktycznie równy wieloletniej normie z okresu 1963-2021. Wartości CZO_3 w sezonie letnim 2022 wskazują, że wcześniej w sezonie zimowym (styczeń-marzec) poziom CZO_3 był także zbliżony do wieloletniej (Rys.5). W 2022 r. powyższa zimowa średnia wynosiła 357,3 D około 1,4% poniżej wieloletniej normy

(362,3 D). Wystąpienie zimą wartości CZO₃ znacznie poniżej wieloletniej normy jest sygnałem osłabienia wielkoskalowej komórki cyrkulacyjnej w stratosferze prowadzącej do wymiany masy między równikiem a biegunem północnym (tzw. cyrkulacja Brewera-Dobsona), która w zimie powoduje akumulację ozonu w średnich i wysokich szerokościach geograficznych. Niedobory CZO₃, które wystąpiły w okresie zimowym nie zostaną w późniejszych miesiącach zlikwidowane, gdyż niskie wartości CZO₃ pojawiają się w skali całej północnej półkuli poza strefą równikową.

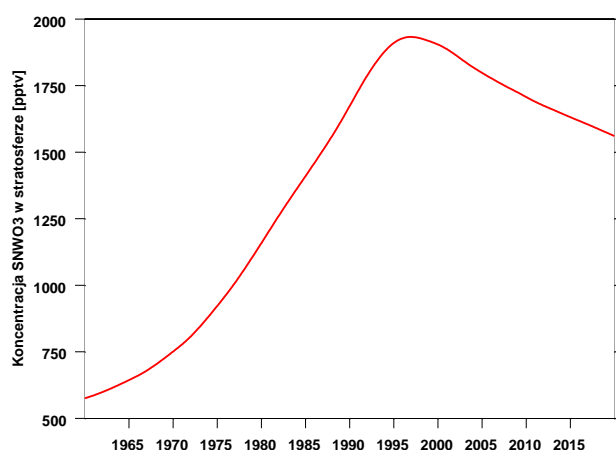


Rys.4. Średnie sezonowe całkowitej zawartości ozonu uzyskane z pomiarów spektrofotometrem Dobsona w COG IGF PAN, Belsk, w okresie 1963-2022. Krzywa czerwona przedstawia wygładzone dane, a zielona liniowy trend w okresie 2000-2022.



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). Czerwony punkt oznacza wartości w 2022 r.

Zmiany w warstwie ozonowej nad Belskiem obserwowane od połowy lat 90 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 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 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

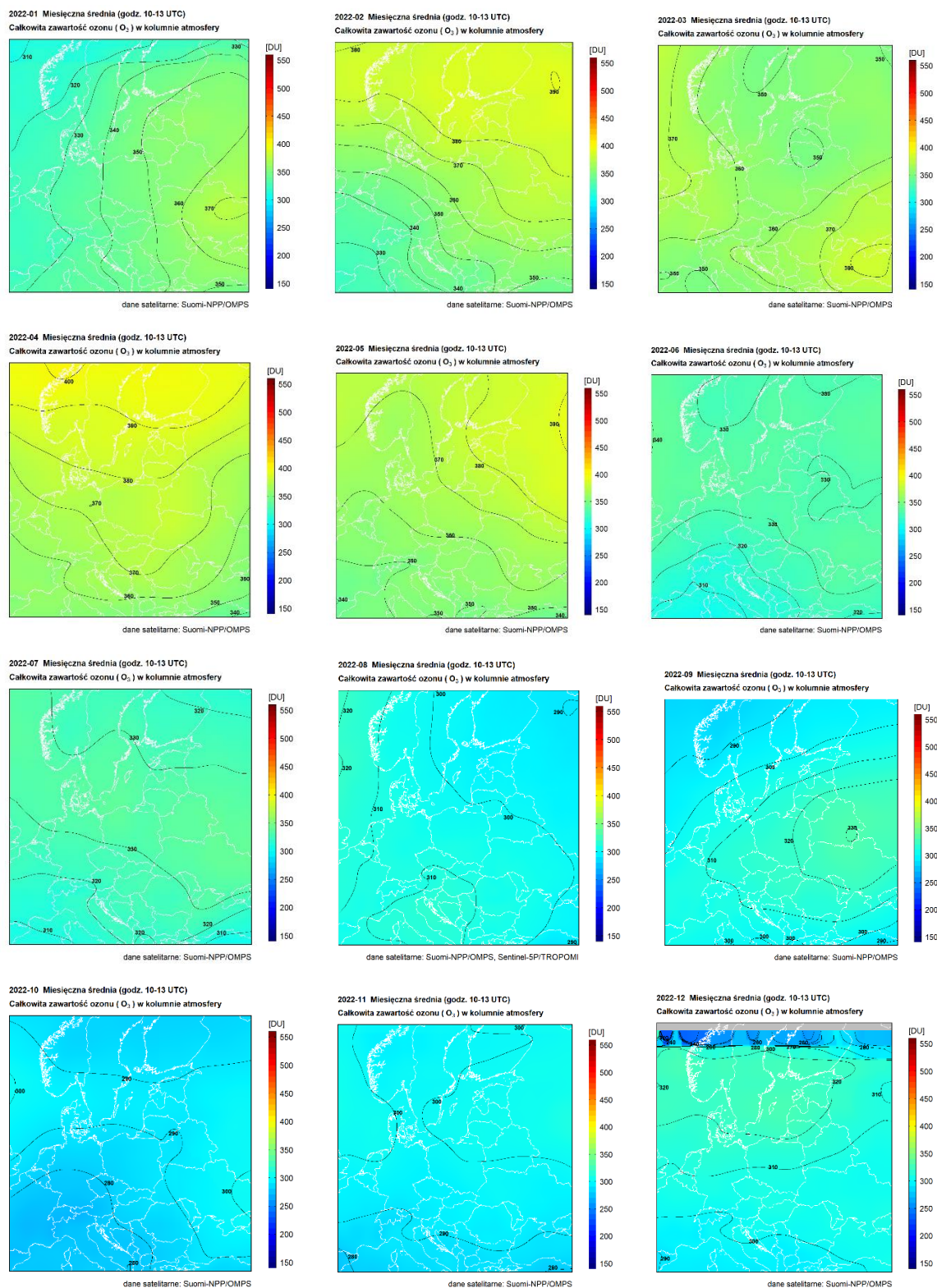
pracach zespołu z IGF PAN (Krzyścin i Rajewska-Więch, 2009a, 2009b; Rajewska i Krzyścin, 2010; Krzyścin i inni, 2013; Krzyścin, 2015; Krzyścin i Rajewska, 2016, Krzyścin i Baranowski, 2019, Krzyścin i inni, 2020). Jednak regeneracja warstwy ozonowej nad Belskiem przebiega powoli i w ostatnich 10 latach 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 2022 roku, podobnie jak w latach ubiegłych, był prowadzony z wykorzystaniem danych satelitarnych z czujnika OzoneMapping 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 następnie przekształcane do regularnej siatki współrzędnych. Wybrano siatkę współrzędnych geograficznych w zakresie 40° - 64° szerokości geograficznej północnej i 10° - 28° długości geograficznej wschodniej z krokiem $0,25^\circ$. Interpolację przestrzenną wykonano metodą odwróconych odległości.

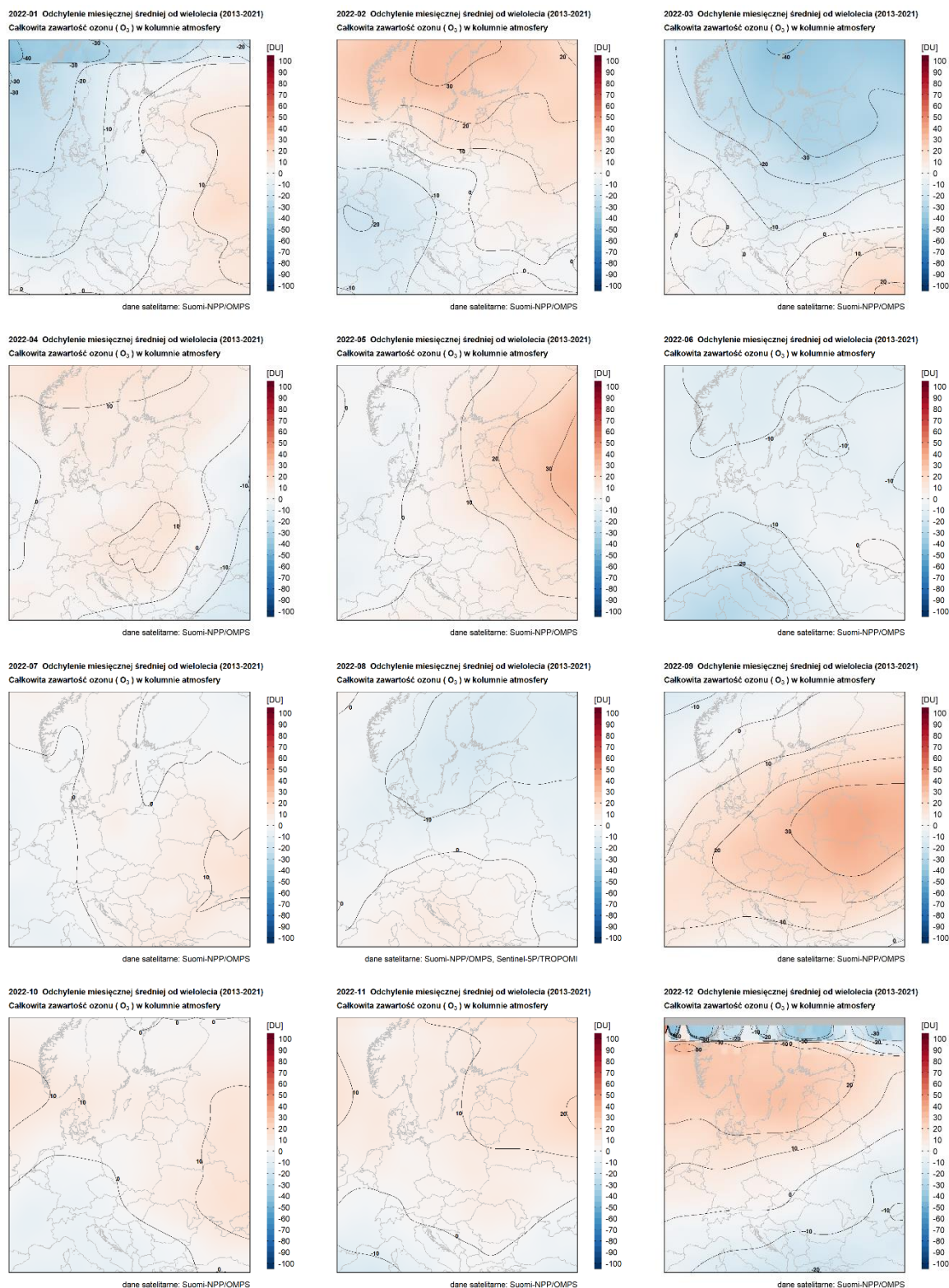
W 2022 roku miała miejsce awaria czujnika na satelicie S-NPP i całkowita zawartość ozonu nie mogła być wyznaczana z danych OMPS w okresie 27.07-10.08.2023. Satelitarny monitoring ozonu był w tym czasie prowadzony z wykorzystaniem danych z czujnika TROPOMI znajdującego się na pokładzie satelity Sentinel-5P. Jest to czujnik dedykowany do monitorowania składu atmosfery, w tym całkowitej zawartości ozonu w kolumnie atmosfery.

Z danych o rozkładzie CZO_3 wyznaczono średnie miesięczne rozkłady całkowitej zawartości ozonu (Rysunek 9) oraz odchylenia ich od średnich wieloletnich (Rysunek 10). Średnie wieloletnie CZO_3 zostały obliczone na podstawie danych OMPS dla lat 2013-2021. Ze względu na brak danych OMPS przez 10 dni sierpnia, do wyznaczenia średniego miesięcznego rozkładu ozonu dla tego miesiąca 2022 r. dla dni z brakującymi danymi OMPS wykorzystano dane TROPOMI.



Rys. 7. Średnie miesięczne rozkłady całkowitej zawartości ozonu w kolumnie atmosfery, wyznaczone z satelitarnych danych OMPS w 2022 r. z wyjątkiem sierpnia, w którym rozkład średnich miesięcznych wartości CZO₃ został obliczony z danych TROPOMI.

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 2022 r. od średnich miesięcznych wieloletnich z okresu 2013-2021, z wyjątkiem sierpnia 2022, w którym brak danych OMPS wystąpił 10 razy.

Widoczne są podwyższone wartości CZO₃ względem okresu wieloletniego we wrześniu w środkowym pasie analizowanego obszaru, oraz w maju w części wschodniej. Podwyższone wartości wystąpiły również w północnej Europie w lutym i grudniu. Natomiast marzec 2022 r.

charakteryzował się niższymi wartościami CZO_3 w Polsce i północnej części Europy (Rysunek 10).

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 , $47,8^\circ\text{N}$), Hradec-Kralove ($15,8^\circ\text{E}$, $50,2^\circ\text{N}$) oraz Poprad-Ganovce ($20,3^\circ\text{E}$, 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 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 1,86% do 1,92% przy porównaniu z pomiarami naziemnymi wykonanymi spektrofotometrem Brewera i 2,85% - w przypadku spektrofotometru Dobsona. Na uwagę zasługuje również bardzo wysoka korelacja, która dla wszystkich stacji jest większa lub równa 0,97.

2. Pionowy rozkład ozonu

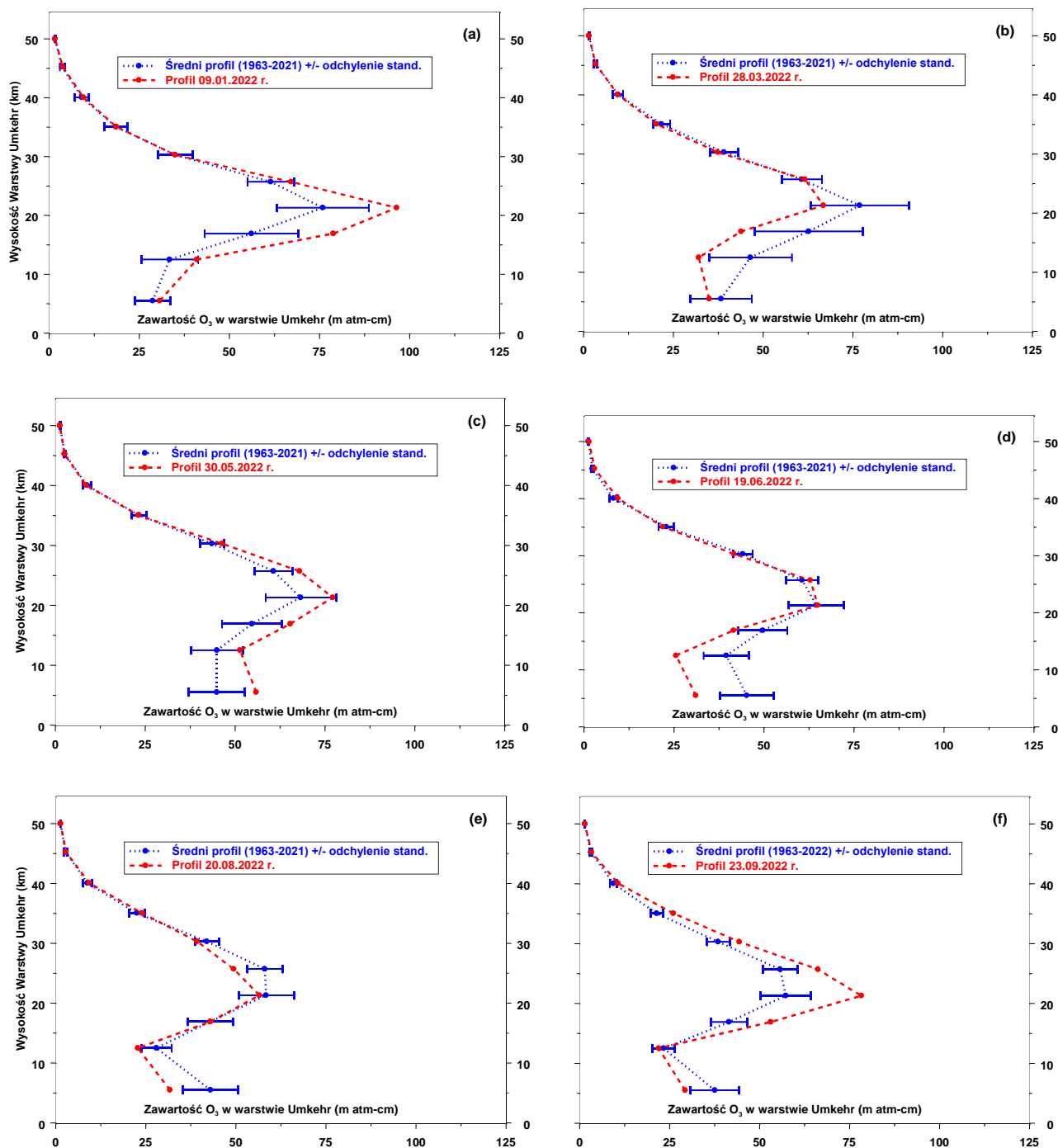
Serie pomiarów wykonywanych w świetle rozproszonym pochodzącym z niezachmurzonego zenitu przy odległościach zenitalnych Słońca $60^\circ - 90^\circ$ umożliwiają wyznaczenie rozkładu pionowego ozonu tzw. metodą Umkehr. Ze względu na wymagania pogodowe (około 3,5 godzin bezchmurnej pogody) liczba serii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

W 2022 roku wykonano 223 serii pomiarowych przy pomocy spektrofotometru Brewera pozwalających wyznaczyć pionowy rozkład ozonu metodą Umkehr

Na Rys.9 przedstawiono interesujące przykłady zmian zawartości ozonu w poszczególnych umkehrskich warstwach atmosfery. Jak widać zmiany te w odniesieniu do średniej wieloletniej 1963-2021 (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.

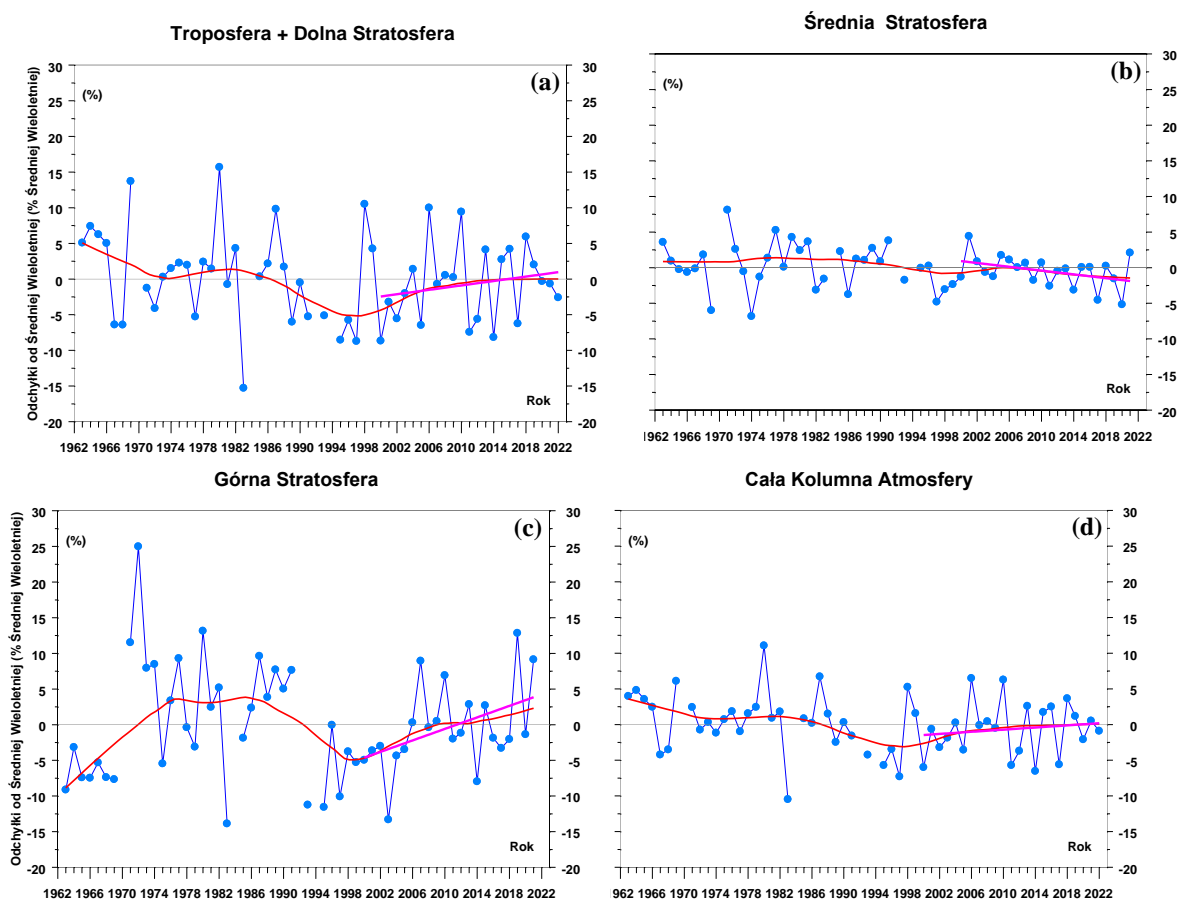
Należy dodać, że zmiany profilu ozonu przy ustalonej całkowitej zawartości ozonu są jednym z czynników wpływających na wielkość natężenia promieniowania UV-B docierającego do powierzchni Ziemi. Dane ozonowe ze stacji dysponującymi długimi, ciągłymi i wiarygodnymi seriami pomiarowymi są szczególnie cenione 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 O₃ dla wybranych dni w 2022 r. wyznaczony z pomiarów Umkehr spektrofotometrem Brewer.

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 (1963-2022) w wybranych warstwach atmosfery z pomiarów Umkehr spektrofotometrem Dobsona (1963-2020) i spektrofotometrem Brewera (w latach 2021-2022) 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 fioletowym trend w okresie 2000-2022.

Na Rys.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 Brewer w 2021-2022 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 2022 r. obserwowano zawartość ozonu w trzech wybranych warstwach atmosfery w pobliżu normy tj. odchyłki od średnich wartości (1963-2022) 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 należało oczekiwać zbliżonych dziennych (przed- i popołudniowych) przebiegów profili pionowych zawartości ozonu w atmosferze.

W celach porównawczych w 2022 r. wykonano 10 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 8 przypadkach. Średnie różnice między profilami wynosiły od kilku procent w warstwach 0-10,3 km, 19,1-23,5 km i 32,5-47,9 km do kilkunastu procent w warstwach 10,3-19,1 km, 23,5-32,5 km i powyżej 47,9km. Współczynnik korelacji między zawartością ozonu w 10 warstwach Umkehr z pomiarów profilu pionowego ozonu spektrofotometrami Brewera i Dobsona wynosił 0.97 na podstawie 80 par danych.

Liniowe trendy zmian ozonu w sezonie wiosennym (marzec-kwiecień-maj) w latach 2020-2022 wskazują na stabilizację zawartości ozonu w troposferze i dolnej stratosferze (Rys.10 a), w środkowej stratosferze (Rys.10 b) i w całej kolumnie atmosfery (Rys.10 d). W górnej stratosferze (Rys.10c) wyznaczono istotnie statystycznie wzrostowy trend, $3,9\% \pm 1,7\%$ (2σ) na 10 lat. Podobną sytuację stwierdzono w sezonie letnim (czerwiec-lipiec-sierpień) i jesiennym (wrzesień-październik, listopad). Trendy wynosiły $1,9\% \pm 1,5\%$ (2σ) na 10 lat latem i $1,3\% \pm 1,1\%$ (2σ) 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 (2017-2022) 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 2000-2022 znaleziono w warstwie 23,5-28,0 km (tj. warstwie Umkehr numer 5) w sezonie letnim, $-2,4 \% \pm 1,8 \% (2\sigma)$, oraz danych całorocznych, $-1,7 \% \pm 1,5 \% (2\sigma)$. 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.

W roku 2022 roku na Stacji Pomiarów Aerologicznych IMGW-PIB kontynuowano, rozpoczęte w 1979 roku, regularne sondáže ozonowe. Sondáže odbywały się co tydzień, w środę, o godzinie 12UT.

W styczniu i lutym przeprowadzono 5 sondáže alertowych w ramach kampanii Match, w celu badania fotochemicznych ubytków ozonu w arktycznym wirze polarnym.

Na przełomie VII-VIII 2022 r. na Stacji Pomiarów Aerologicznych w Legionowie wykonywany był remont pomieszczenia do pompowania balonów meteorologicznych, w związku z czym konieczne było wyłączenie tego pomieszczenia z użytkowania na okres ok. 2 tygodni. W tym okresie nie było możliwości wykonywania sondáže ozonowych, w wyniku czego sondaż nie został wykonany w tygodniu 1-7 sierpnia 2022 r.

Do pomiarów ozonu wykorzystywano elektrochemiczną sondę ozonową ECC6AB, która była unoszona w powietrzu za pomocą balonów meteorologicznych, do maksymalnej wysokości 35 km. Sondáže wykonywano w systemie sondażowym DigiCORA MW41/RS41-SG i w systemie nawigacyjnym GPS. W średnich miesięcznych zawartościach ozonu nad Legionowem w roku 2022 odnotowano anomalie (Tabela 1). W styczniu i w maju miał miejsce silny wzrost ozonu w średniej stratosferze, a w kwietniu i maju spadek w troposferze swobodnej.

Tabela 2. Zawartość ozonu w warstwach atmosfery nad Legionowem w 2022 r.

WYSZCZEGÓLNIENIE		Warstwy atmosfery między standardowymi powierzchniami izobarycznymi (hPa)											
		<u>~1000</u> <u>700</u>	<u>700</u> <u>500</u>	<u>500</u> <u>300</u>	<u>300</u> <u>200</u>	<u>200</u> <u>150</u>	<u>150</u> <u>100</u>	<u>100</u> <u>70</u>	<u>70</u> <u>50</u>	<u>50</u> <u>30</u>	<u>30</u> <u>20</u>	<u>20</u> <u>10</u>	<u>10</u> <u>00</u>
Styczeń	a	10,2	8,0	7,8	8,8	13,5	28,5	37,9	47,4	71,6	43,7	48,5	42,4
	b	8,3	7,5	8,5	11,1	15,9	28,7	35,1	40,1	62,7	39,3	40,7	40,4
	c	2,0	1,2	-0,8	-0,8	-0,7	-0,0	0,5	1,9	2,1	1,5	1,9	0,7
Luty	a	9,1	8,0	12,6	16,6	15,6	24,2	37,5	42,5	68,0	40,4	44,1	46,0
	b	9,4	8,0	9,5	14,8	19,5	31,8	37,6	43,3	64,1	40,5	43,6	45,3
	c	-0,2	-0,0	2,1	0,3	-0,8	-0,9	-0,0	-0,2	0,7	-0,0	0,1	0,3
Marzec	a	12,4	9,2	9,7	10,4	14,9	28,2	36,8	39,9	61,7	38,7	48,2	50,0
	b	11,2	8,8	10,7	17,1	22,2	34,2	37,2	42,2	63,1	39,4	45,2	48,8
	c	1,1	0,9	-0,4	-0,9	-1,7	-0,9	-0,1	-0,7	-0,3	-0,2	0,7	0,5
Kwiecień	a	10,7	8,4	10,0	13,9	16,8	27,4	38,0	44,0	62,2	41,0	50,8	51,9
	b	12,8	10,0	12,8	18,5	22,0	31,5	34,6	39,9	60,7	38,6	47,2	50,7
	c	-2,0	-2,0	-1,1	-0,7	-1,1	-0,6	0,6	0,9	0,4	0,8	0,8	0,6
Maj	a	13,5	8,9	10,1	10,8	16,2	22,0	32,8	41,5	62,2	42,2	56,9	49,4
	b	13,7	10,7	12,2	17,0	21,0	28,2	30,0	36,4	56,8	38,4	50,2	50,4
	c	-0,2	-2,0	-1,6	-1,1	-1,5	-1,4	0,8	2,0	2,0	1,9	2,2	-0,6
Czerwiec	a	12,2	9,9	13,5	15,1	14,4	24,2	24,0	32,8	52,5	40,1	54,9	51,2
	b	13,4	10,9	12,8	13,3	16,9	24,5	25,7	31,9	53,6	40,1	53,2	51,0
	c	-0,8	-0,9	0,4	0,4	-0,7	-0,1	-0,5	0,5	-0,5	0,0	0,6	0,1
Lipiec	a	12,5	9,8	12,1	9,3	10,0	18,3	24,9	31,4	54,2	41,4	55,9	50,1
	b	13,0	10,7	13,1	15,1	14,6	20,9	23,5	30,2	52,0	39,3	52,7	49,8
	c	-0,3	-1,1	-0,7	-1,0	-1,6	-1,1	0,7	0,6	0,7	1,1	1,0	0,2
Sierpień	a	13,0	11,2	12,7	7,8	9,1	16,9	21,1	27,9	45,9	36,0	53,9	52,3
	b	12,6	10,3	12,3	10,8	11,6	19,1	24,0	29,2	48,2	37,2	50,3	49,8
	c	0,3	1,1	0,2	-0,8	-1,0	-0,8	-1,1	-0,7	-0,7	-0,4	1,0	1,4
Wrzesień	a	9,2	9,0	11,4	10,8	11,3	22,5	28,1	32,2	48,1	39,5	53,4	51,4
	b	11,3	9,3	10,5	9,0	9,0	17,4	23,9	29,5	47,6	34,9	45,1	48,1
	c	-1,4	-0,3	0,9	0,8	1,0	1,4	1,1	1,2	0,2	1,7	2,5	2,3
Październik	a	9,4	7,8	8,3	7,0	8,6	17,0	24,9	29,7	47,2	36,9	46,4	46,2
	b	9,6	8,3	9,5	8,5	8,7	16,6	23,3	29,2	47,7	34,5	40,9	45,4
	c	-0,2	-1,0	-0,9	-0,6	-0,0	0,1	0,5	0,2	-0,2	0,8	1,2	0,5
Listopad	a	7,8	8,0	8,6	6,2	10,7	21,6	26,5	34,6	51,6	39,4	45,2	44,5
	b	8,4	7,8	8,9	8,6	9,5	19,3	25,8	30,6	50,7	36,6	39,4	40,6
	c	-0,6	0,3	-0,2	-0,7	0,5	0,6	0,2	1,4	0,3	1,1	1,3	1,6
Grudzień	a	8,5	7,2	8,3	9,3	13,4	17,0	21,6	31,6	53,9	38,9	38,7	37,0
	b	8,1	7,6	8,7	8,9	11,1	23,2	29,0	33,7	55,2	38,2	39,0	38,1
	c	0,4	-0,9	-0,4	0,1	0,9	-1,4	-1,6	-0,6	-0,3	0,2	-0,1	-0,3

a – średnie miesięczne (D) w 2022 roku.

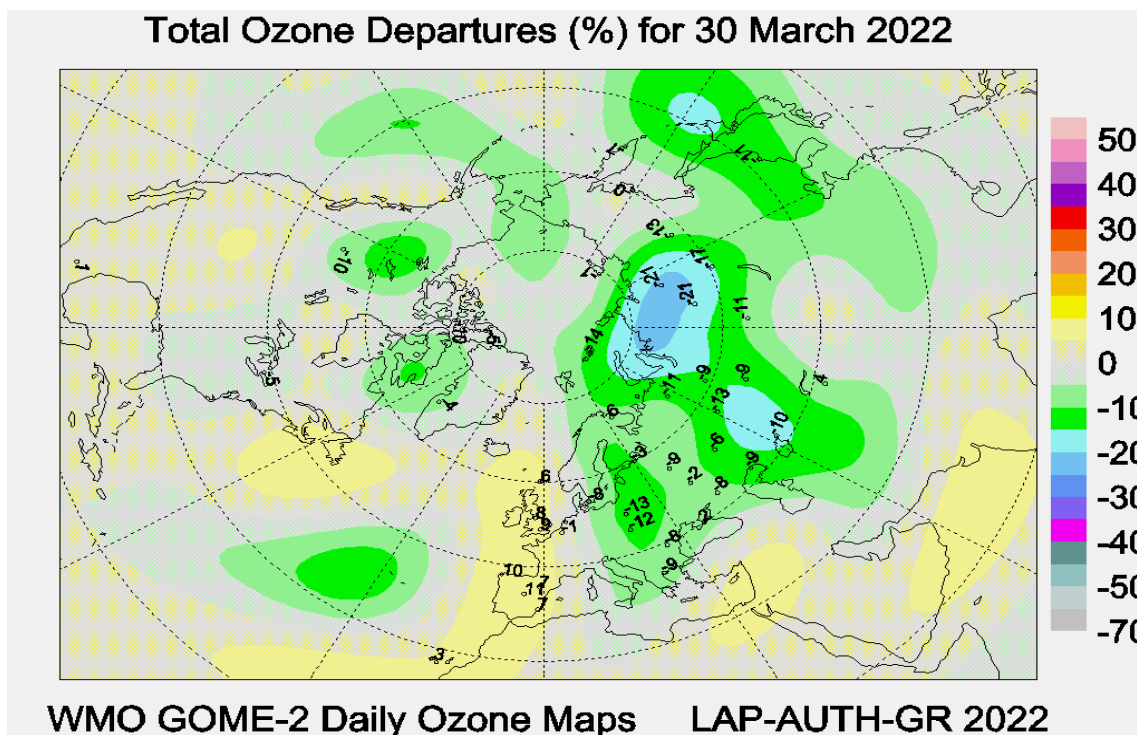
b – średnie miesięczne wieloletnie (D) z lat 1994-2021.

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

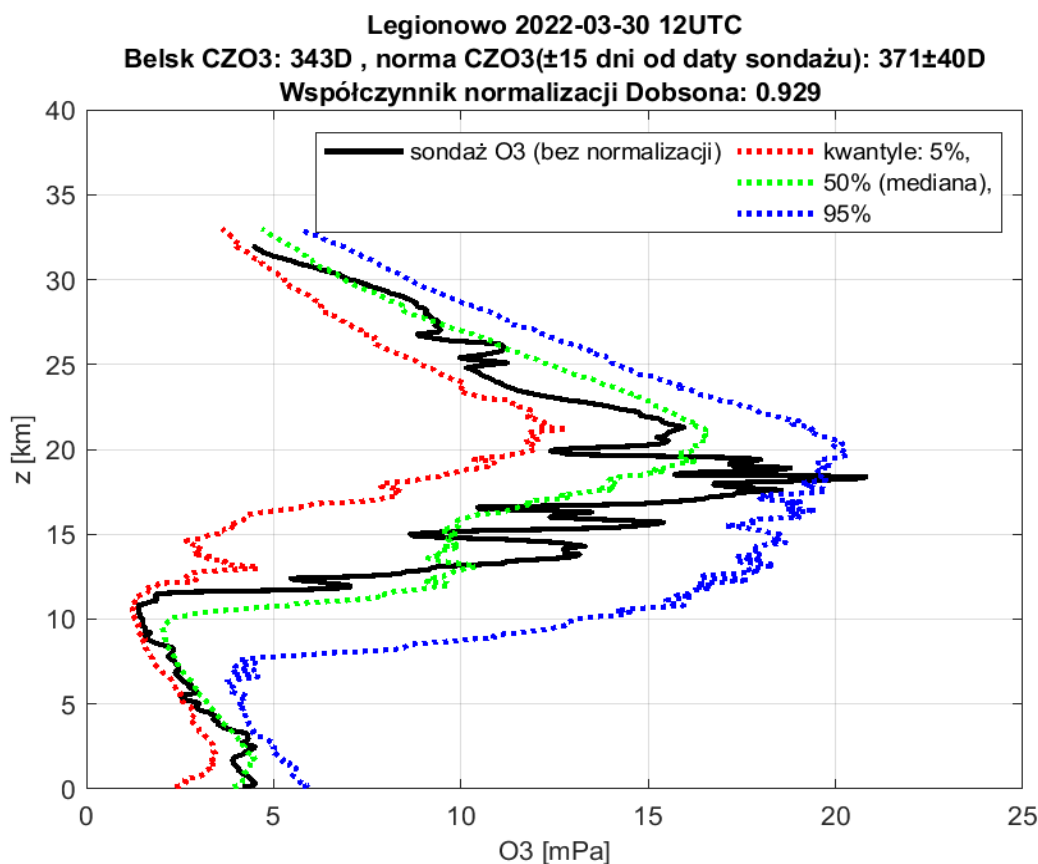
Ilość ozonu niszczonego w stratosferze w sezonie zimowo-wiosennym na półkuli północnej jest bardzo zmienna z roku na rok, zwykle dużo niższa niż na półkuli południowej. Podczas zimy 2021/2022 zaobserwowano niski potencjał niszczenia ozonu w Arktyce.

Rys.11 przedstawia mapę WMO procentowych odchyień zawartości ozonu w kolumnie atmosfery (CZO₃) nad półkulą północną, na podstawie pomiarów satelitarnych GOME-2 i naziemnych, pod koniec marca 2022. Zaobserwowano mały skumulowany efekt niszczenia ozonu w ciągu zimy: wewnątrz wiru nad Syberią miało odchylenie wynoszące -20%, a na skraju wiru polarnego nad Europą Środkową -13%.

W sondażu ozonowym przeprowadzonym w Legionowie w ramach kampanii Match30 marca 2022 roku (Rys.12) wystąpiły duże wahania koncentracji ozonu w stratosferze, typowe dla skraju wiru polarnego.



Rys.11. Mapa WMO procentowych odchyień CZO₃ nad półkulą północną 30 marca 2022 r, na podstawie pomiarów satelitarnych GOME-2 i pomiarów naziemnych.

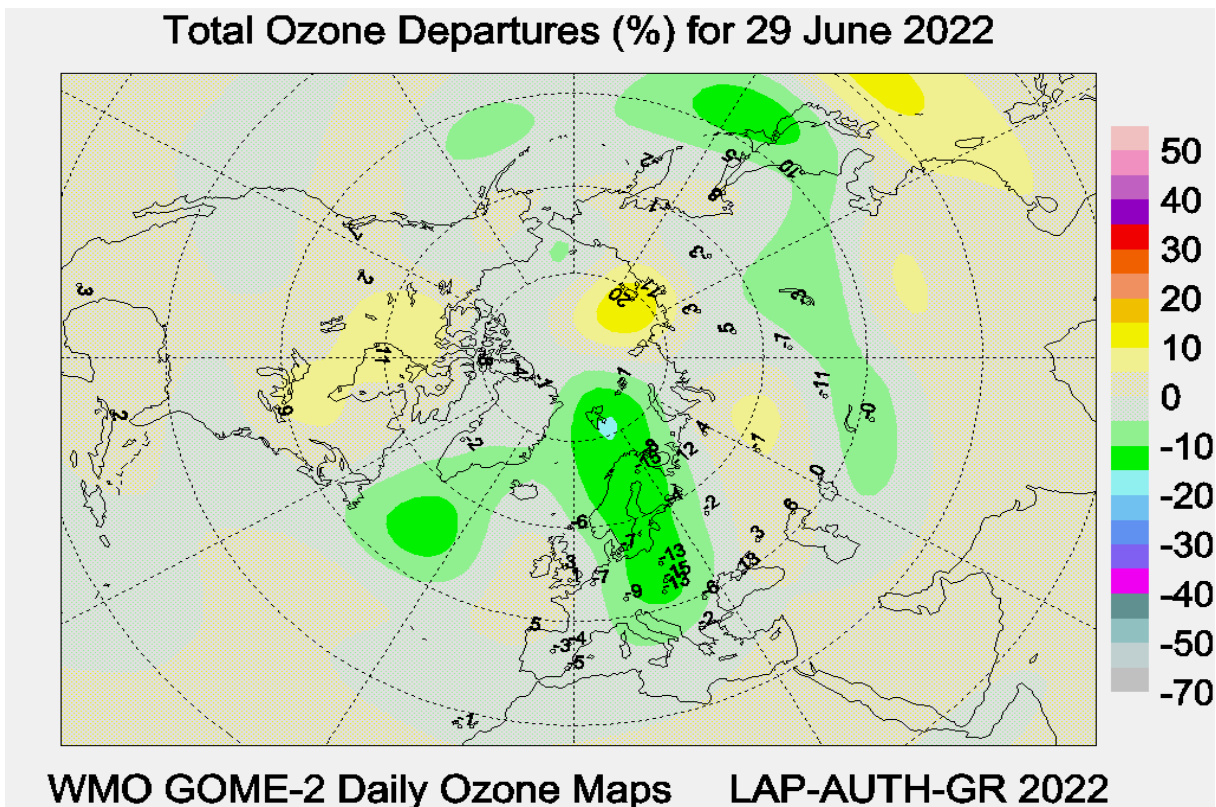


Rys.12. Profil ozonu na brzegu arktycznego wiru polarnego nad Legionowem, wykonany w ramach kampanii Match, 30 marca 2022 12 UTC.

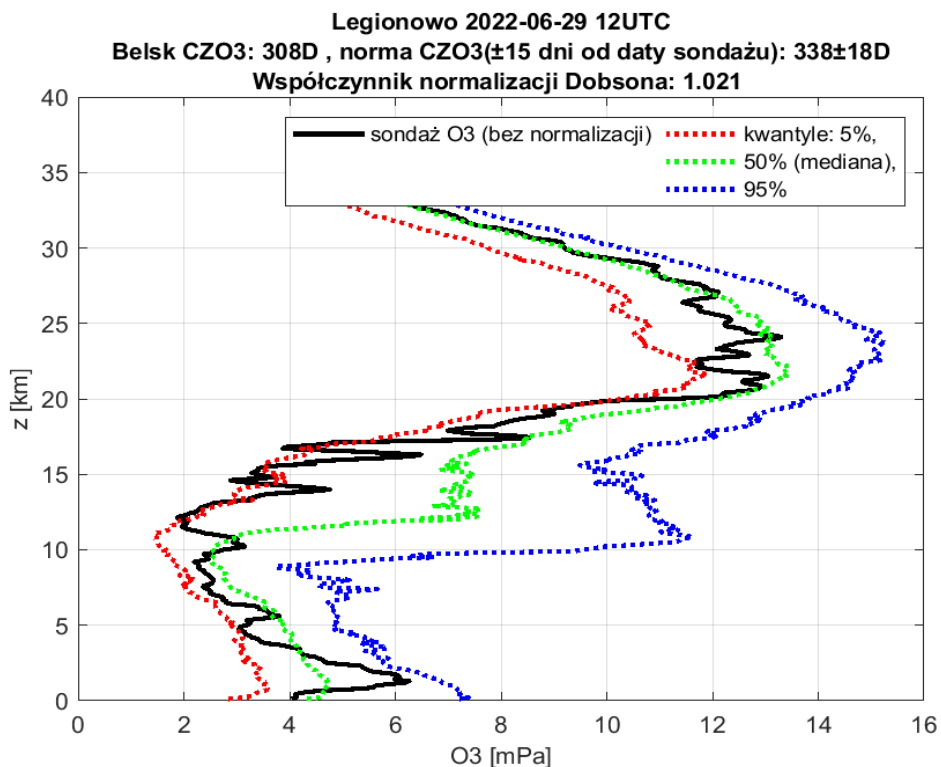
W ostatnich latach, w okresie letnim nad półkulą północną obserwowane są epizody ujemnych anomalii ozonu całkowitego w kolumnie atmosfery. Mapa WMO procentowych odchyień CZO3, z połączonych danych satelitarnych GOME-2 i pomiarów naziemnych, dla 29 czerwca 2022 roku (Rys.13 i Rys.14) pokazuje ujemną anomalię w rejonie Europy Środkowej, z największym niedoborem CZO3 nad Polską wynoszącym około 15% poniżej normy wieloletniej.

W profilu ozonu nad Legionowem przedstawionym na Rysunku 4 również zaobserwowano ujemne anomalie w rejonie UTLS (tropopauza, dolna stratosfera) oraz w warstwie maksymalnej koncentracji ozonu.

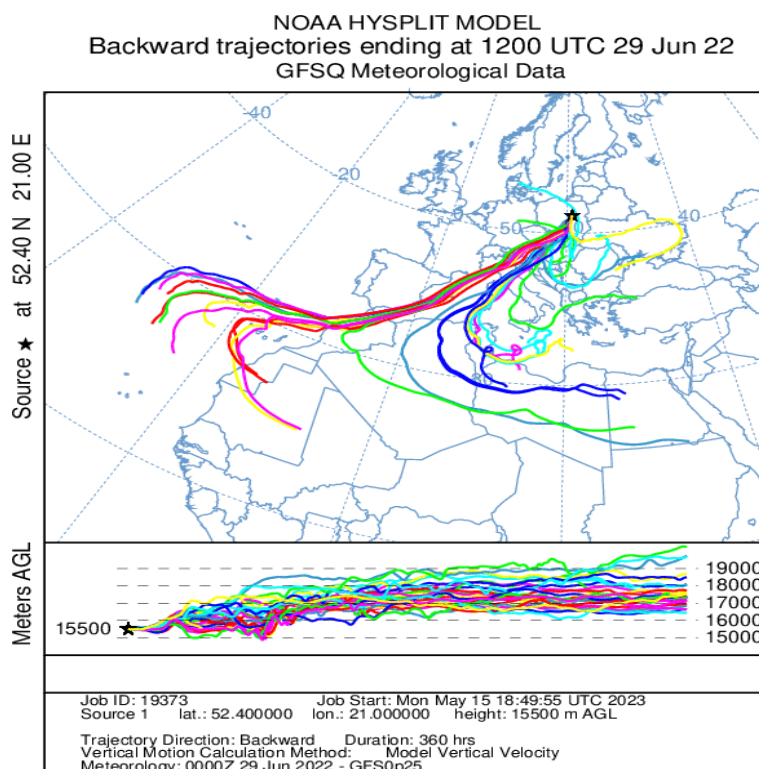
Do analizy tego przypadku użyto modelu NOAA HYSPLIT do określenia źródła masy powietrza. Trajektorie wsteczne zespołu cząstek, które kończą się nad Legionowem 29 czerwca 2022 o godzinie 12UT na wysokości 15,5 km wykazały powolne osiadanie w rozległym antycyklonie, centrowanym w rejonie Wysp Azorskich (Rys.15). Spadek w warstwie maksymalnej koncentracji ozonu pochodził z wyższych szerokości geograficznych, prawdopodobnie z powietrza wcześniej zubożonego w ozon, które znajdowało się w chłodnej części wiru polarnego podczas zimy.



Rys.13. Mapa WMO CZO₃ pomiary satelitarne GOME-2 i naziemne dla 29 czerwca 2022 r.



Rys.14. Profil ozonu nad Legionowem 29 czerwca 2022 r. 12UT, na tle zmienności wieloletniej.



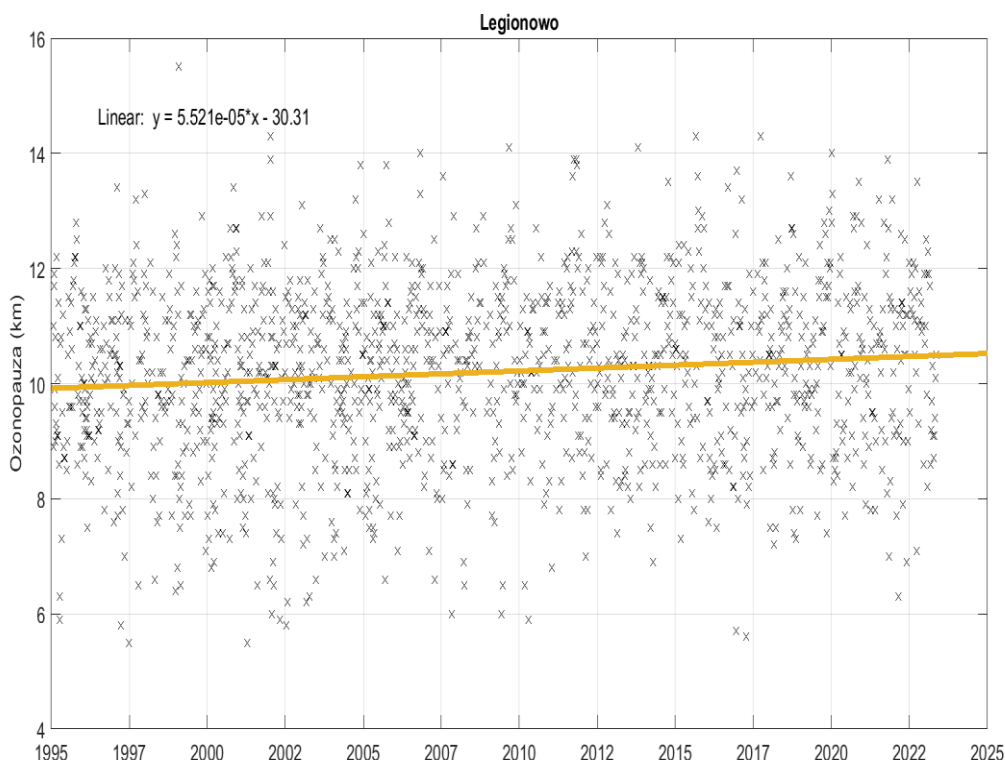
Rys.15. Model NOAA HYSPLIT trajektorii wstecznych 15 dniowych dla zespołu cząstek kończących się nad Legionowem 29 czerwca 2022 r. 12UT na wysokości 15,5km.

W przypadku powtarzających się epizodów letnich ubytków ozonu, które przypominają uwarstwienie mas powietrza jak w przypadkach mini-dziur ozonowych w chłodnej porze roku, istnieje wiele potencjalnych przyczyn. 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.

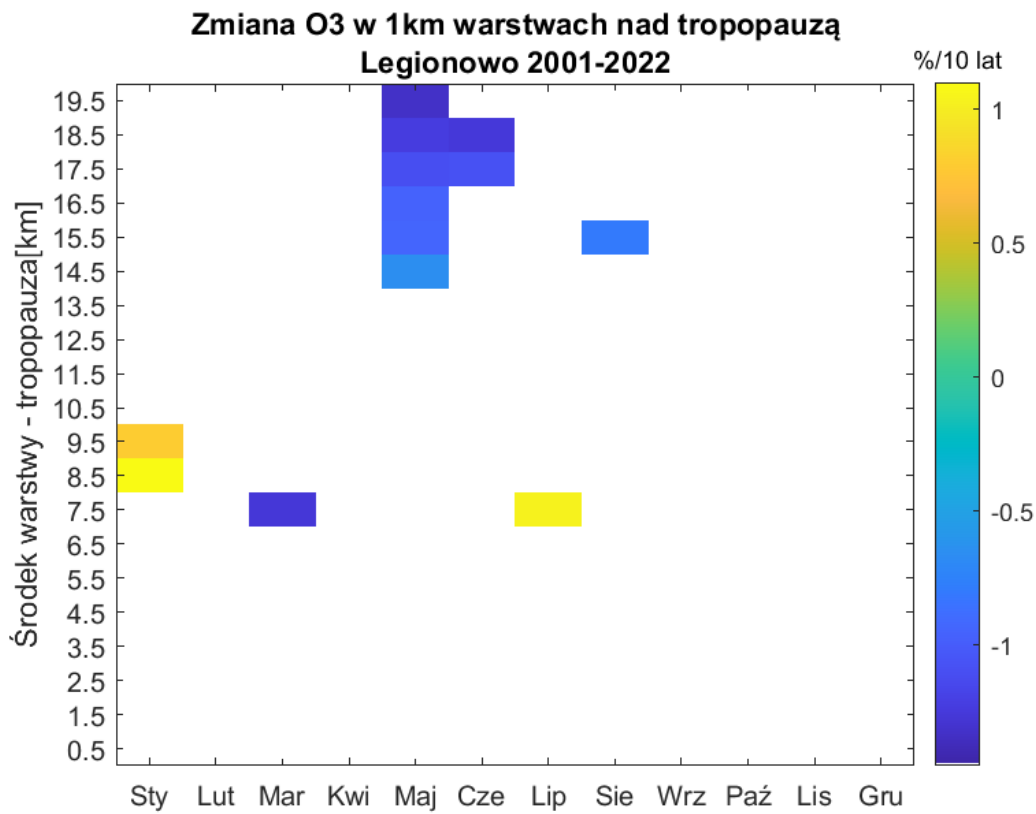
Aby dokładniej zrozumieć trendy dotyczące stężenia ozonu w okresie zmniejszającej się ilości substancji niszczących warstwę ozonową, konieczne jest analizowanie zmian w troposferze i stratosferze. Granicą między tymi dwoma warstwami jest ozonopauza, która oznacza dolną granicę bogatego w ozon powietrza stratosferycznego. Przyjęto, że ozonopauza znajduje się na najwyższym poziomie, gdzie stosunek zmieszania ozonu jest poniżej 100 ppbv i przekracza 110 ppbv w warstwie bezpośrednio nad nią. Badania nad tym obszarem pozwalają na lepsze zrozumienie wpływu zmian tropopauzy na system klimatyczny. W związku z trwającym globalnym ocieplaniem klimatu wysokość tropopauzy nad

Legionowem wyraźnie się zwiększa (Rys.16). Obserwuje się również mniejszy udział tropopauz niskich w ostatnich latach.

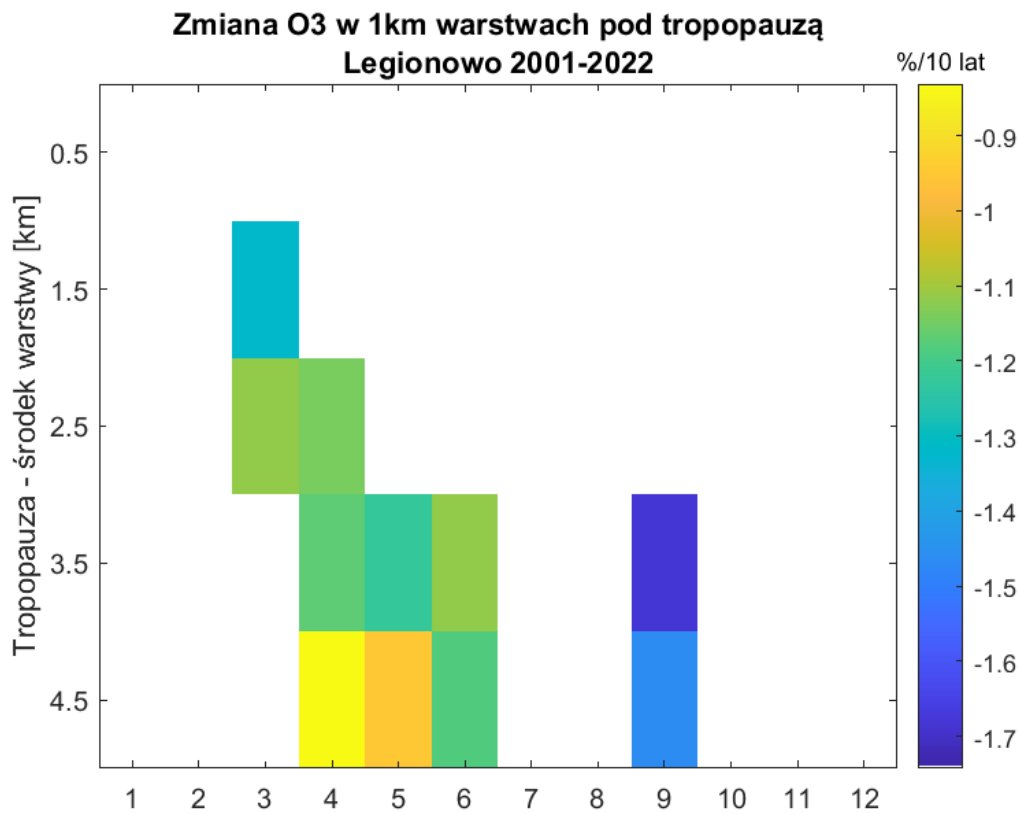


Rys.16. Wysokość tropopauzy chemicznej (ozonopauzy) nad Legionowem latach 1995-2022, na podstawie pomiarów sondą ECC.

W analizie wykorzystano dane homogenicznej serii sondażu ozonowych z Legionowa, które obejmują lata 2001-2022. Do przetwarzania danych zastosowano procedury opisane na stronie <https://github.com/denizpoyraz/o3s-dqa-homogenization>. Wybrano podzbiór sondażu, które spełniały kryterium współczynnika normalizacji Dobsona między 0,9 a 1,1 oraz osiągnęły wysokość 10 hPa. Dla każdego profilu obliczono nienormalizowane zawartości ozonu w 1-kilometrowych warstwach powyżej ozonopauzy (20 warstw) oraz poniżej niej (5 warstw). Następnie obliczono liniowe zmiany w latach dla każdej warstwy i miesiąca w okresie 2001-2022. Interpretowane są tylko te trendy, które są istotne statystycznie na poziomie 95% (Rys. 17-18).



Rys.17. Trendy ozonu (w %/10lat) w stratosferze nad Legionowem.



Rys.18. Trendy ozonu (w %/10lat) w górnej troposferze nad Legionowem.

Wiosną i latem (maj, czerwiec, sierpień) obserwowano zmniejszanie zawartości ozonu w średniej stratosferze. W raportach dla GIOŚ donoszono o przypadkach letnich ujemnych anomalii ozonu nad Legionowem, a źródło tych ubytków zostało zidentyfikowane jako pochodzące z wysokich szerokości geograficznych półkuli północnej w średniej stratosferze.

W końcu zimy (marzec) zaobserwowano zahamowanie silnego spadku stężenia ozonu w dolnej stratosferze w porównaniu do okresu największego zanieczyszczenia atmosfery antropogenicznymi związkami chloru (1979-1993). Podczas rozpadu wiru polarnej stratosfery, powietrze ubogie w ozon z chłodnych jego części miesza się z powietrzem umiarkowanych szerokości geograficznych, co prowadzi do spadkowego trendu ozonu w górnej troposferze. Nie jest jasne, jaki odsetek tych zmian jest generowany przez procesy chemiczne, a jaki przez dynamikę atmosferyczną.

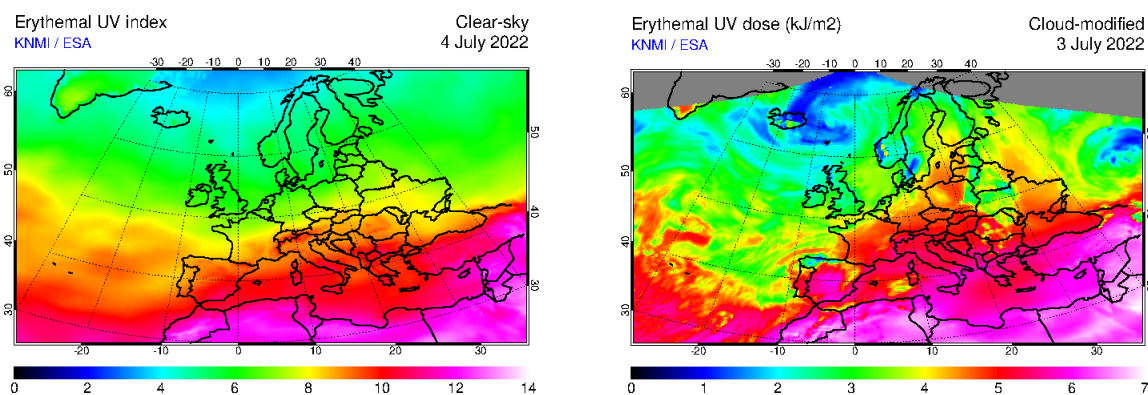
We wrześniu obserwuje się zmniejszanie zawartości ozonu w górnej troposferze. W porównaniu do stratosfery, dynamika ozonu w tej warstwie jest bardziej skomplikowana. Jedną z potencjalnych przyczyn może być wydłużanie się okresu ciepłego, które prowadzi do częstszej adwekcji powietrza zwrotnikowego. Jeśli do górnej troposfery trafia zwrotnikowe powietrze o niskiej zawartości ozonu, może to przyczynić się do obniżenia ogólnej koncentracji ozonu w tej warstwie.

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 2022 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 04.07.2022 najwyższą w roku wartość tj. 7,3 indeksu UV (1 Index =25mW/m²). Powyższą wartość potwierdziły pomiary widm UV z zastosowaniem

spektrofotometru Brewera. Wysoka wartości indeksu w tym dniu była wynikiem niskich wartości CZO_3 (319 D, czyli 6,8% poniżej normy). Tego dnia dzienna dawka rumieniowa (3426 J/m^2) nie była rekordowo wysoka w tym roku.



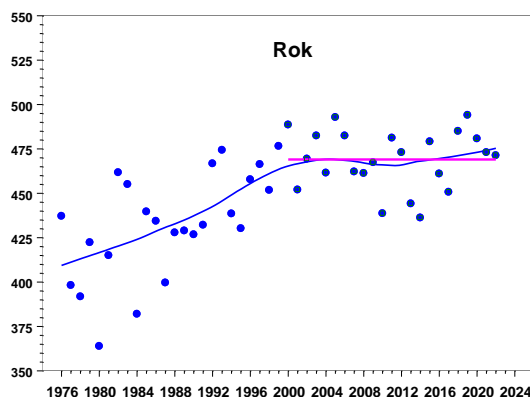
Rys. 19. Indeks UV i dzienna dawka rumieniowa nad Europą z pomiarów spektrofotometrem GOME-2 na platformie satelitarnej MetOp-A w dniach 04.07.2022 (lewa strona) i 03.07.2022 (prawa strona), odpowiednio, kiedy w Belsku zmierzono maksymalną w roku 2022 wartość indeksu UV (7,3) i dziennej dawki erytemalnej (4260 J/m^2).

Najwyższą w 2022 r. dzienną dawkę rumieniową równą 4260 J/m^2 zanotowano 03.07.2022, wtedy indeks UV wynosił 7,2. Satelitarne pomiary (Rys.19) pokazały zbliżone wartości indeksu i dziennej dawki.

W związku z pojawieniem się niskich wartości ozonu nad Polska w kwietniu 2022 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 11. Maksymalna dawka rumieniowa w tym okresie wynosiła 2255 J/m^2 (24.04), co w przybliżeniu stanowi 11 krotność minimalnej dawki wywołującej rumień skóry (tzw. MED) u osoby z fototypem 2. Największa wartość indeksu UV w tym miesiącu wynosiła 5,1 (27.04). 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 ($\sim 20^\circ \text{C}$) 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 20). 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 2022 r. suma roczna wyniosła $471,3 \text{ kJ/m}^2$

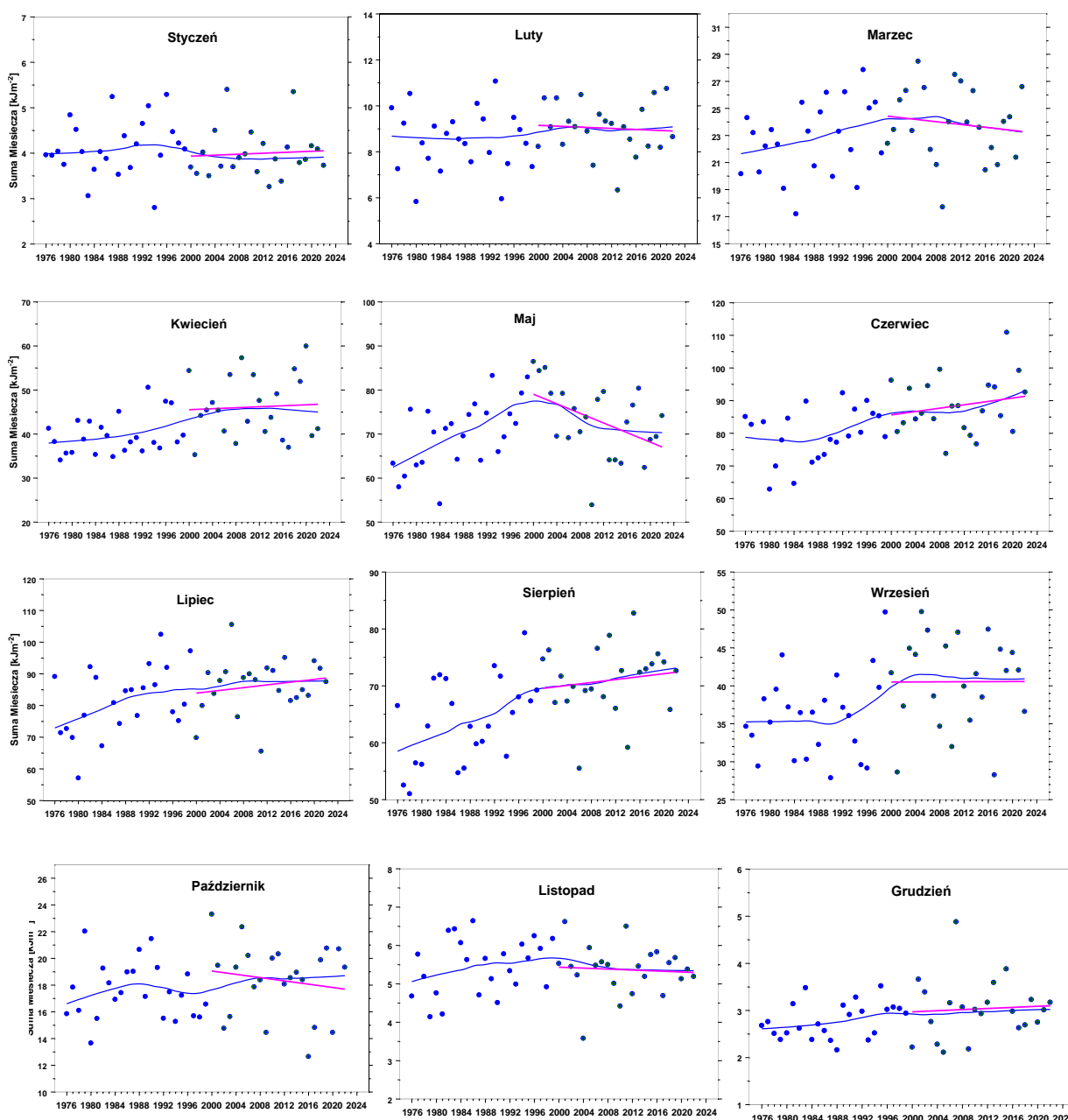
i była typowa dla wartości w XXI w. W ostatnich latach (od ~2010 r.) pojawiła się lekka tendencja wzrostowa, która w okresie 2010-2022 r. była jeszcze nie istotna statystycznie (Rys.20).



Rys.20. Roczna suma dziennych dawek promieniowania rumieniowego w Belsku w latach 1976-2022 (punkty). Ciągła krzywa w kolorze niebieskim przedstawia wygładzone dane. Prosta w kolorze fioletowym ilustruje trend w okresie 2000-2022.

Rys. 21. 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 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

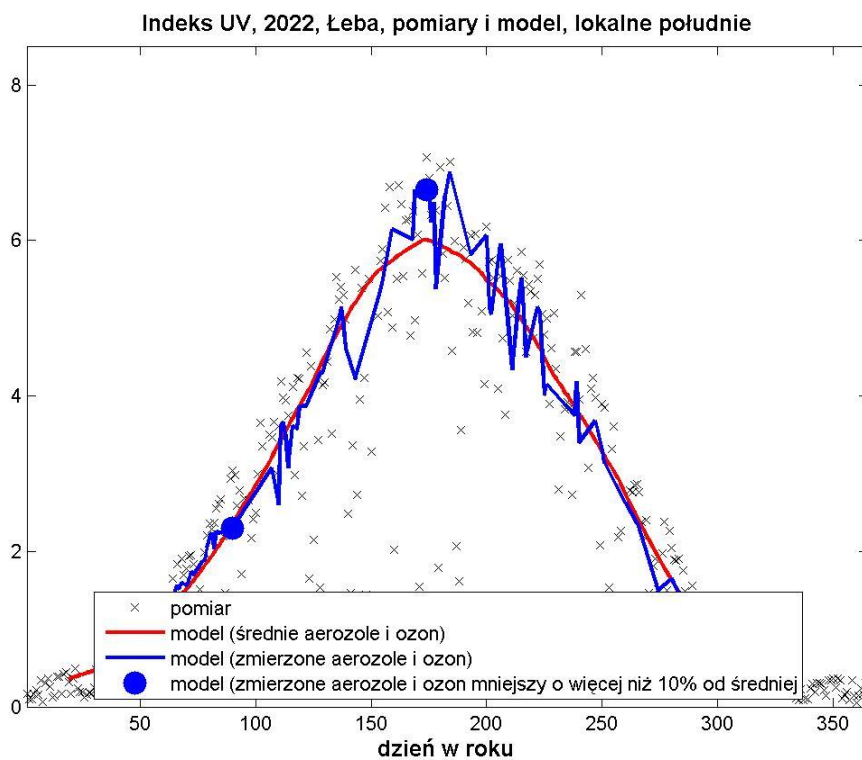
w okresie wakacyjnym czas pobytu na wolnym powietrzu jest zwykle dłuższy niż w innych miesiącach.

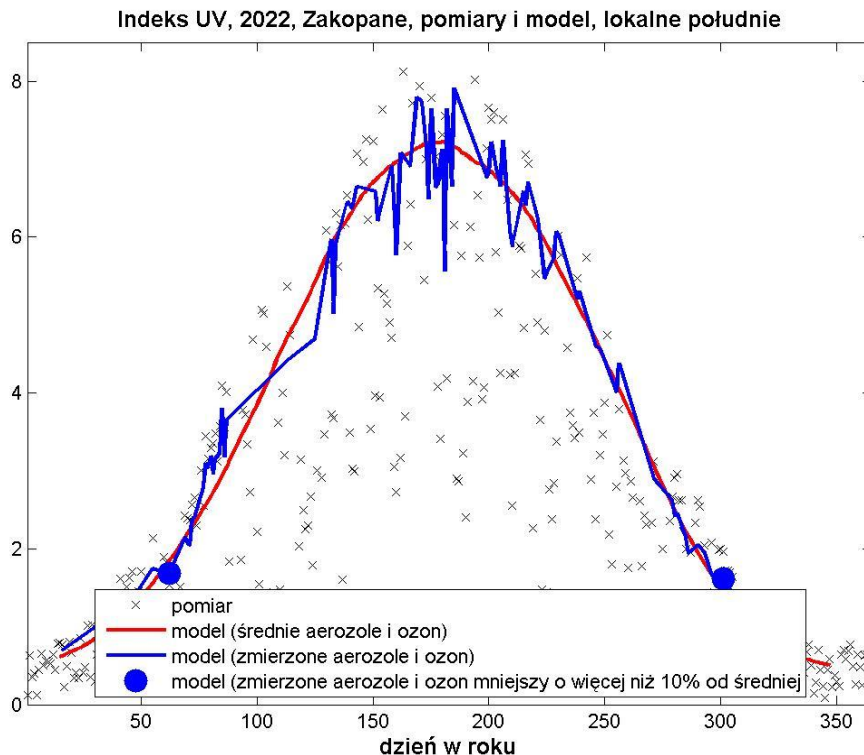


Rys.21. Sumy miesięczne (od stycznia do grudnia) dziennych dawek promieniowania rumieniowego w Belsku w latach 1976-2022 (punkty). Ciągła krzywa w kolorze niebieskim przedstawia wygładzone dane. Prosta w kolorze czerwonym ilustruje trend w okresie 2000-2022 wyznaczony standardową regresją liniową z zastosowaniem metody najmniejszych kwadratów.

Stacje pomiarowe IMGW-PIB promieniowania 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 2022 roku zwracają uwagę pomiary w okresie lata, w Łebie i Zakopanem. Podwyższone promieniowanie, w szczególności dla Zakopanego można przypisać mniejszą od typowej ilości aerozoli. Zwiększenie promieniowanie w czerwcu w Łebie i Legionowie związane było z mniejszą ilością ozonu całkowitego (niebieskie kropki) oraz aerozoli, Rys. 22.



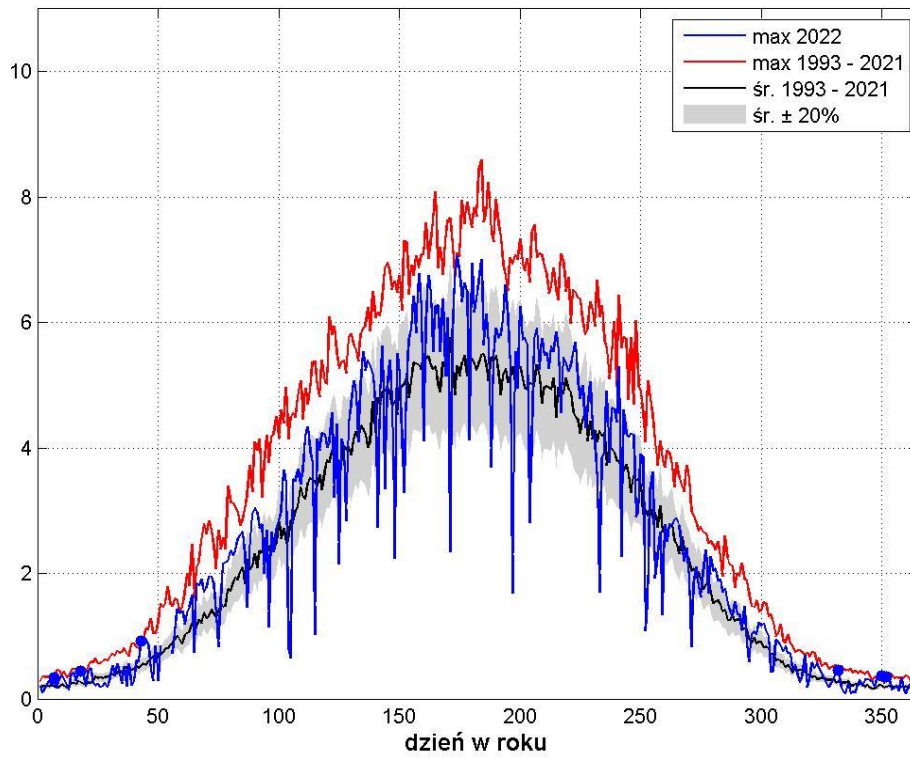


Rys.22. Przebiegi roczne Indeksu UV z 2022 roku obliczonego z wykorzystaniem modelu transferu promieniowania słonecznego FastRT dla stacji w Łebie i Zakopanem z wykorzystaniem pomiarów satelitarnych ozonu całkowitego i aerozoli (czerwona linia - średnie z okresu 2005-2022).

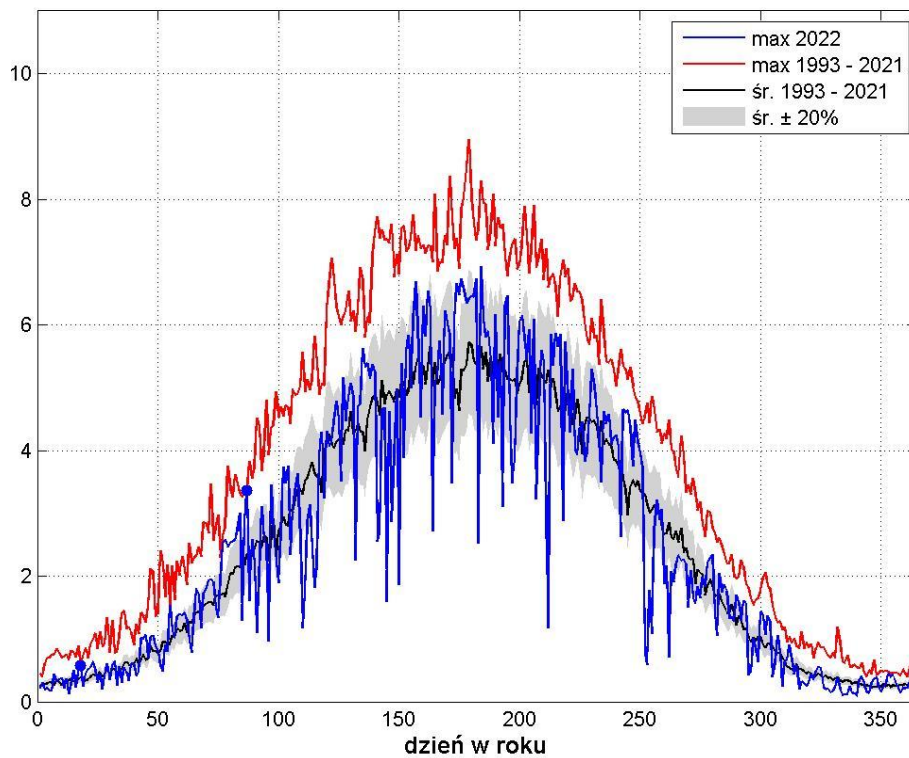
W roku 2022 podwyższone wartości indeksu UV obserwowano głównie na stacji w Zakopanem, w okresie letnim. W pojedynczych dniach Indeks UV osiągnął ekstremalne wartości w serii. Wyróżniają się też pomiary Indeksu UV z marca dla Legionowa i Zakopanego, gdzie w kilku dniach obserwowano ekstremalne promieniowanie. W pozostałych miesiącach zmierzono zbliżone do typowych wartości Indeksu UV. Największe wartości Indeksu UV na stacjach IMGW-PIB w 2022 roku zmierzono odpowiednio: 18 czerwca w Zakopanem (UVI 8,7), w Łebie 23 czerwca (UVI 7,1), a w Legionowie 3 lipca (UVI 6,9).

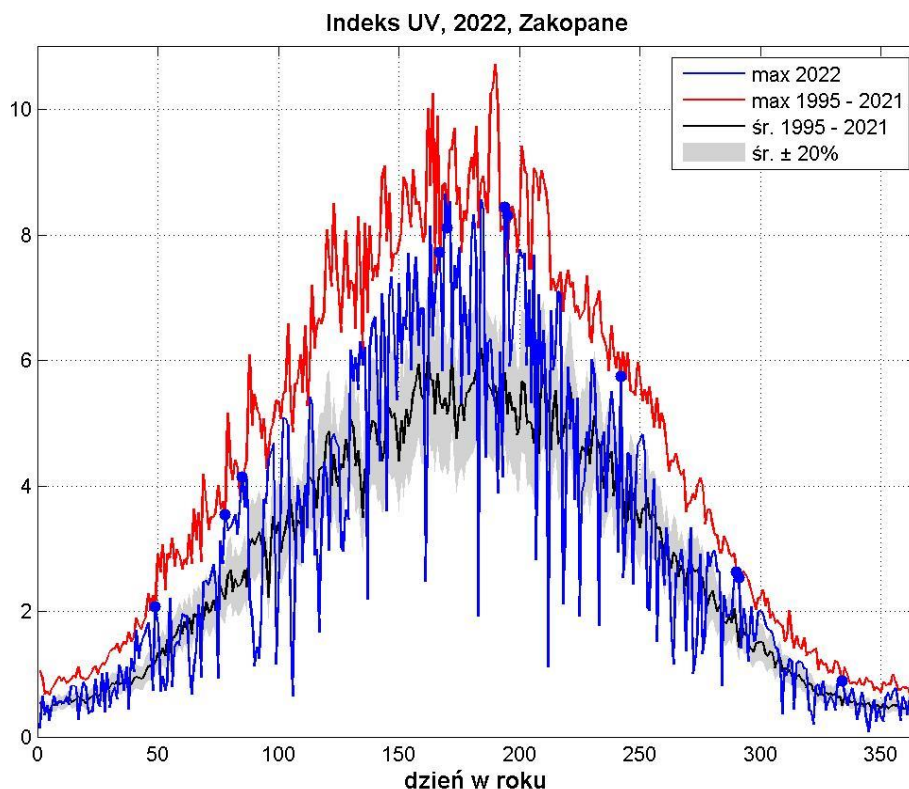
Dla 2022 roku maksymalną dawkę miesięczną, 493,9 MED zmierzono w czerwcu dla Zakopanego. Maksymalną dawkę dobową, 24,7 MED zaobserwowano dla 18 czerwca w Zakopanem. Maksymalne dawki 21,7, dla Łeby oraz 20,3, dla Legionowa wystąpiły 3 lipca.

Indeks UV, 2022, Łeba



Indeks UV, 2022, Legionowo





Rys.22. Przebiegi roczne Indeksu UV z 2022 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 2022 roku.

Podsumowanie

Wypełnianie postanowień Protokołu Montrealskiego z 1987 r. i jego późniejszych poprawek dot. ochrony warstwy ozonowej było jedną z przyczyn zatrzymania się spadkowej tendencji w ozonie atmosferycznym obserwowanej poza strefą równikową do połowy lat 90-tych XX wieku (WMO, 2014). Steinbrecht i inni (2017) stwierdzili na podstawie pomiarów satelitarnych rozkładu pionowego ozonu istotnie statystyczny dodatni trend 1-2% na 10 lat w okresie 2000-2016 wysoko w stratosferze powyżej 5 hPa. W dolnych warstwach atmosfery (100-10 hPa) trendy były nie istotne statystycznie. Zaskakująco w pobliżu 100 hPa trendy stawały się lekko ujemne. Ostatnie prace (Frith i inni, 2014, Chipperfield i inni, 2017, Ball i inni, 2018) wskazują, że oczekiwany wzrostowy trend w całkowitej zawartości ozonu jednak nie pojawiał się w średniorocznych seriach czasowych CO_3 po 2000 r. Jedynie w wybranych miesiącach (wrzesień i październik nad Antarktydą) obserwuje się statystycznie istotny dodatni trend w CO_3 (Solomon i inni, 2016, Pazmino i inni, 2017).

Ball i inni (2018) analizując trendy w profilu pionowym rozkładu ozonu w 10 stopniowych pasach szerokościowych obejmujących obszar między biegunami (60S-60N) potwierdzili

istnienie regeneracji warstwy ozonowej wysoko w stratosferze (10-1 hPa) i brak trendu w średniej stratosferze (32-10 hPa) w latach 1998-2016. Jednak stwierdzili zaskakująco trwałą spadkową tendencję ozonu w niskiej stratosferze (32-100 hPa), która istnieje do chwili obecnej od początku analizowanych serii czasowych (od 1985 r.). Utrzymywanie się całkowitej zawartości ozonu na stałym poziomie od końca lat 90-tych ubiegłego wieku jest wynikiem wzrostowego trendu w troposferze, który kompensuje ubytki ozonu w dolnej stratosferze. Wzrosty w wysokiej stratosferze, gdzie koncentracja ozonu jest z natury mała, mają niewielki wpływ na zmiany ozonu w całej kolumnie atmosfery. W tym momencie natura zmian ozonu w dolnej stratosferze nie jest całkowicie poznana. Autorzy wnioskujeją na podstawie wyników Hossaini i inni (2017), że negatywne trendy w ostatnich dekadach mogą być wynikiem niszczenia ozonu stratosferycznego przez krótko żyjące substancje, które nie są kontrolowane przez ustalenia Protokołu Montrealskiego i jego późniejsze poprawki. Należy podkreślić, że wyniki Ball i inni (2018) sugerują, że obecne przewidywania czasu regeneracji warstwy ozonowej (około 2050 w średnich szerokościach geograficznych, WMO, 2014), które są oparte na prognozach z wykorzystaniem modeli fizyczno-chemicznych i scenariuszy zmian klimatu, nie są wiarygodne i na ten moment wydaje się, że regeneracja warstwy ozonowej będzie przesunięta w czasie, o ile w ogóle nastąpi.

Podstawowym założeniem spodziewanej regeneracji warstwy ozonowej jest stopniowe eliminowanie substancji niszczących warstwę ozonową. Jednak takie substancje w sposób niekontrolowany mogą przenikać do atmosfery ze składowisk zużytego sprzętu (lodówki, klimatyzatory, gaśnice), zawierającego substancje, których stosowanie zostało wcześniej zakazane np. freonu CFC11 (Lickley et al., 2020). Takie nieoczekiwane sytuacje mogą odsunąć termin regeneracji warstwy ozonowej.

Liczne opracowania wskazują na znaczący wpływ zmian w cyrkulacji atmosfery na obserwowane długookresowe tendencje zmian w warstwie ozonowej. Zmiany w warstwie ozonowej są wypadkowym efektem zmniejszenia zanieczyszczenia atmosfery substancjami niszczącymi warstwę ozonową i specyficznej cyrkulacji w atmosferze prowadzącej do długookresowych oscylacji CZO₃. 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.

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 uwalnianym 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 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
- Chipperfield, M.P., Bekki, S., Dhomse, S., Harris, N.R.P., Hassler, B., Hossaini, R., Steinbrecht, W., Thiéblemont, R., and Weber, M.: Detecting recovery of the stratospheric ozone layer, *Nature*, 549, 211-218, doi:10.1038/nature23581, 2017.
- 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*, 2019 (in press), <https://doi.org/10.1002/joc.6391>.
- Dhomse S.S., Feng W., Montzka S.A., Hossaini R., Keeble J., Pyle J.A., Daniel J.S., Chipperfield M.P., Delay in recovery of the Antarctic ozone hole from unexpected CFC-11 emission, *Nature Communications*, 10, 5781, DOI: 10.1038/s41467-019-13717-x, 2019.
- Frith, S.M., Kramarova, N.A., Stolarski, R.S., McPeters, R.D., Bhartia, P.K., and Labow, G.J.: Recent changes in total column ozone based on the SBUV Version 8.6 Merged Ozone Data Set, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119, 9735-9751, doi:10.1002/2014JD021889, 2014.
- Hossaini, R., Chipperfield, M.P., Montzka, S.A., Leeson, A.A., Dhomse, S., and Pyle, J.A.: The increasing threat to stratospheric ozone from dichloromethane, *Nature Communication*, 8, doi: 10.1038/ncomms15962, 2017.
- Koenig T.K., Baidar S., Campuzano-Jost P., Cuevas C.A., Dix B., Fernandez R.P., Guo H., Hall S.R., Kinnison D., Nault B.A., Ullmann K., Jimenez J.L., Saiz-Lopez A., Volkamer R.: 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., 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
- 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
- Kuttippurath Jayanarayanan Feng Wuhu, Müller Rolf, Kumar Pankaj, Raj Sarath, PillaiGopalakrishnaGopikrishnan, Raina RoyArctic on the verge of an ozone hole? *Atmospheric Chemistry and Physics Discussion* started: 24 February 2021 <https://doi.org/10.5194/acp-2020-1313>
- Newchurch, M.J., Yang E.S., Cunnold D.M., Reinsel G.C., Zawodny J.C., and Russel III J.M., Evidence for slowdown in stratospheric ozone loss: First stage of ozone recovery, *Journal of Geophysical Research*, vol.108, 4507, 2003.
- Pazmino, A., Godin-Beekmann, S., Hauchecorne, A., Claud, C., Khaykin, S., Goutail, F., Wolfram, E., Salvador, J., and Quel, E.: Symptoms of total ozone recovery inside the Antarctic vortex during Austral spring, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/acp-2017-1157>, in review, 2017.
- Rajewska-Więch B., and Krzyścin J., Changes in total column ozone at Belsk in perspective of ozone changes over Europe 1963-2008 (in Polish), *Przegląd Geofizyczny*, Z. 1-2, s. 49-59, 2010.
- Solomon, S., Ivy, D.J., Kinnison, J., Mills, M.J., Neely, R.R., and Schmidt, A.: Emergence of healing in the Antarctic ozone layer, *Science*, 353, 269-274, doi: 10.1126/science.aae0061, 2016.
- Stauffer, Ryan Michael and Thompson, Anne M. and Kollonige, Debra E and Witte, Jacquelyn Cecile and Tarasick, David W. and Davies, Jonathan and Voemel, Holger and Morris, Gary A. and VanMalderen, Roeland and Johnson, Bryan J. J. and et al. A Post-2013 Drop-off in Total Ozone at a Third of Global Ozonesonde Stations: ECC Instrument **Artifacts?** *Journal Earth and Space Science Open Archive*, 2019 DOI={ 10.1002/essoar.10501543.3 },url={ <https://doi.org/10.1002/essoar.10501543.3> }
- Steinbrecht, W., Froidevaux, L., Fuller, R., Wang, R., Anderson, J., Roth, C., Bourassa, A., Degenstein, D., Damadeo, R., Zawodny, J., Frith, S., McPeters, R., Bhartia, P., Wild, J., Long, C., Davis, S., Rosenlof, K., Sofieva, V., Walker, K., Rahpoe, N., Rozanov, A., Weber, M., Laeng, A., von Clarmann, T., Stiller, G., Kramarova, N., Godin-Beekmann, S., Leblanc, T., Querel, R., Swart, D., Boyd, I., Hocke, K., Kämpfer, N., Maillard Barras, E., Moreira, L., Nedoluha, G., Vigouroux, C., Blumenstock, T., Schneider, M., García, O., Jones, N., Mahieu, E., Smale, D., Kotkamp, M., Robinson, J., Petropavlovskikh, I., Harris, N., Hassler, B., Hubert, D., and Tummon, F.: An update on ozone profile trends for the period 2000 to 2016, *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 10675-10690, <https://doi.org/10.5194/acp-17-10675-2017>, 2017.

- Steinbrecht, W., Kubistin, D., Plass-Dülmer, C., Davies, J., Tarasick, D. W., Gathen, P., et al. (2021). COVID-19 crisis reduces free tropospheric ozone across the Northern Hemisphere. *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL091987. <https://doi.org/10.1029/2020GL091987>
- Van der A, R., Allaart, M. and Eskes, H., Multi-Sensor Reanalysis (MSR) of total ozone, version 2. Dataset. Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI), 2015. 015. [doi:10.21944/temis-ozone-msr2](https://doi.org/10.21944/temis-ozone-msr2)
- WMO: Scientific Assessment of ozone Depletion: 2014, Global Ozone Research and Monitoring Project Report, World Meteorological Organization, Report No. 55, p.416, Geneva, Switzerland, 2014.