



**RAPORT SYNTETYCZNY O STANIE WARSTWY
OZONOWEJ I NATĘŻENIU PROMIENIOWANIA UV-B
ZA 2021 ROK**



Narodowy Fundusz
Ochrony Środowiska
i Gospodarki Wodnej

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

Warszawa, czerwiec 2022

Raport 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.

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

Spis treści

Wstęp	3
Całkowita zawartość ozonu	4
Pionowy rozkład ozonu	11
Promieniowanie UV-B	21
Podsumowanie	27
Literatura	28

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. 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.

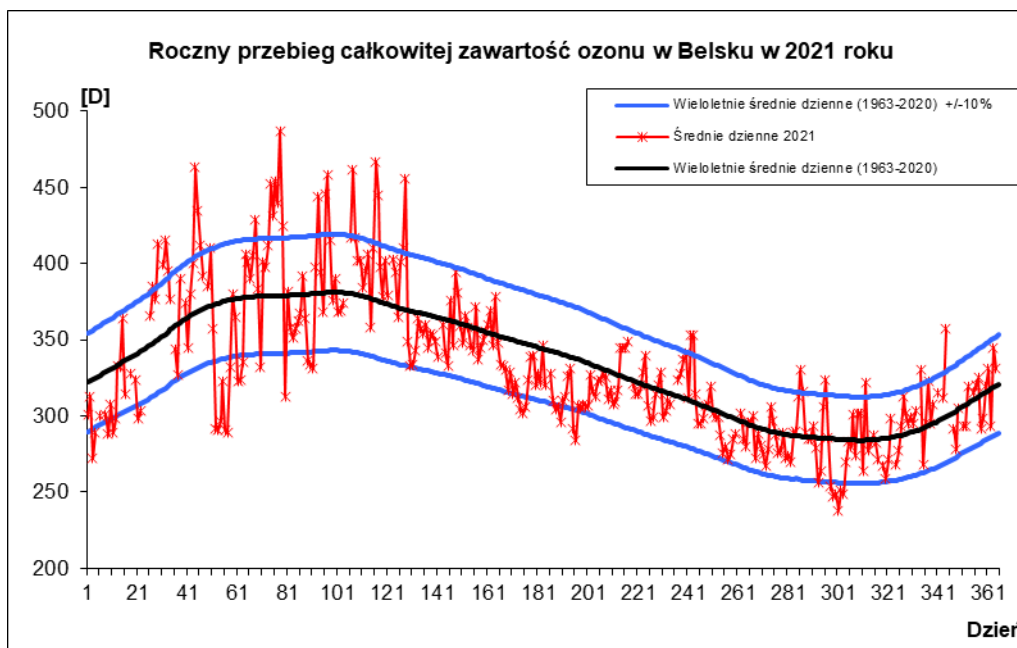
W raporcie przedstawiono analizę stanu warstwy ozonowej i poziomu promieniowania UV-B na podstawie pomiarów wykonanych w Instytucie Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowym Instytucie Badawczym (IMGW-PIB) i Instytucie Geofizyki Polskiej Akademii Nauk (IGF PAN) w 2021 roku.

Całkowita zawartość ozonu

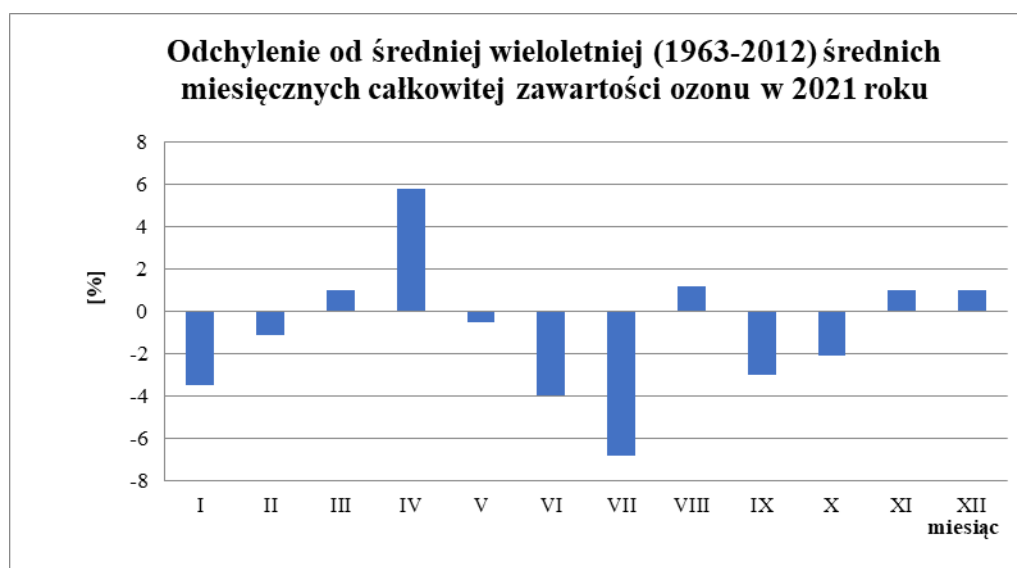
Pomiary całkowitej zawartości ozonu wykonywane są od 1963 roku w Centralnym Obserwatorium Geofizycznym (COG) IGF PAN w Belsku przy pomocy spektrofotometru Dobsona, a od 1992 roku, równolegle, spektrofotometru Brewera.

Przebieg średnich wartości dziennych całkowitej zawartości ozonu w atmosferze, zmierzonych spektrofotometrem Dobsona, w poszczególnych miesiącach 2021 roku przedstawiono na Rys. 1, gdzie linia czerwona – średnie dzienne całkowitej zawartości ozonu w 2021 roku, linia czarna –wieloletnia (1963-2019) 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 2021 roku średnie miesięczne wartości całkowitej zawartości ozonu w Belsku były wyższe od średniej wieloletniej z lat 1963-2020 w marcu, kwietniu, sierpniu, listopadzie i grudniu. Ujemne odchylenia średniej miesięcznej całkowitej zawartości ozonu od średniej wieloletniej zaobserwowano w styczniu 3,6%, lutym 1,1%, maju 0,5%, czerwcu 4,0%, lipcu 6,8%, wrześniu 3,0% i październiku 2,1%. 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 2021r.

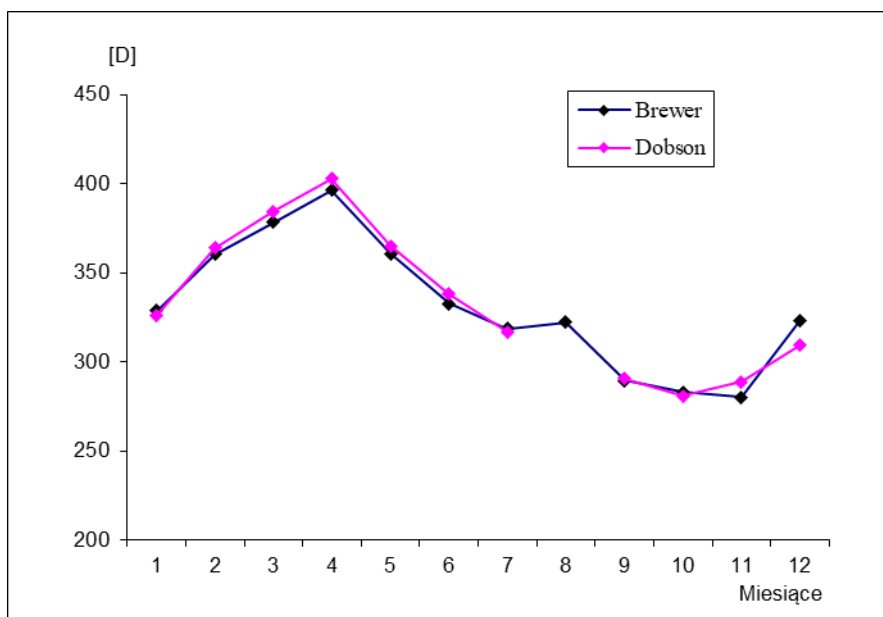


Rys. 2. Odchylenie od średniej wieloletniej (1963-2020) średnich miesięcznych całkowitej zawartości ozonu w 2021 r.

Tab. 1. Średnie miesięczne całkowitej zawartości ozonu [D] w 2021 roku ich odstępstwa od średnich wieloletnich 1963-2020

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Śr. wiel. 1963-2020	338	370	380	381	367	352	337	318	299	287	286	306
Śr. mieś. 2021	326	366	384	403	365	338	314	322	290	281	289	309
Różnica w %	-3,6	-1,1	1,0	5,8	-0,5	-4,0	-6,8	1,2	-3,0	-2,1	1,0	1,0

Przez cały 2021 rok wykonywano również pomiary całkowitej zawartości ozonu przy pomocy spektrofotometru Brewera. Wartości średnie dzienne całkowitej zawartości ozonu uzyskiwano z pomiarów, dla których rozrzut nie przekracza 2,5 D.



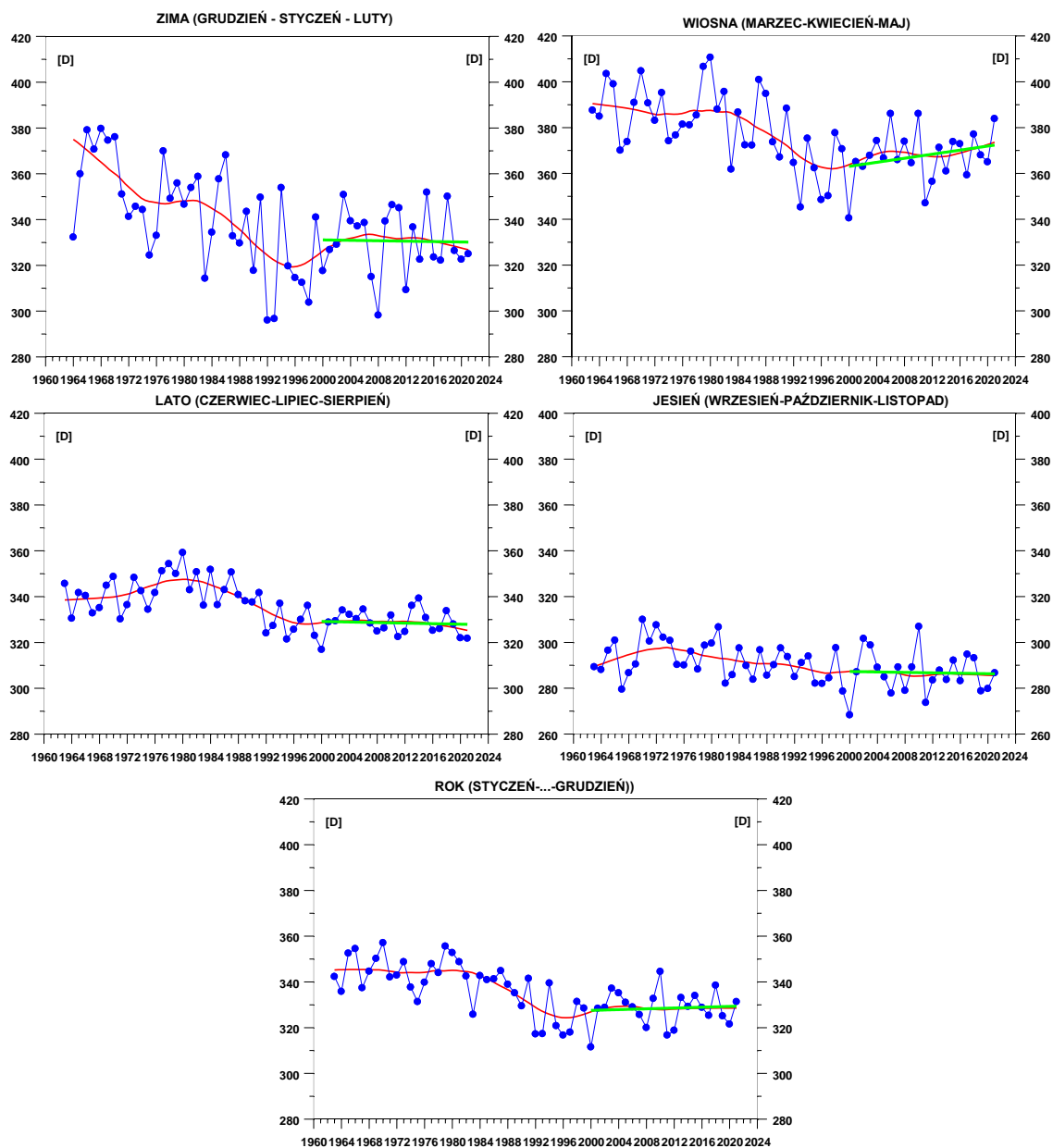
Rys. 3. Przebieg średnich miesięcznych całkowitej zawartości ozonu zmierzonych spektrofotometrem Dobsona i Brewera, Belsk 2021

Zgodność danych o całkowitej zawartości ozonu uzyskanych ze spektrofotometru Brewera z danymi otrzymanymi przy pomocy spektrofotometru Dobsona może być oceniona jako bardzo 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 (Rys.3). 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). Podstawowym przyrządem w światowej 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.

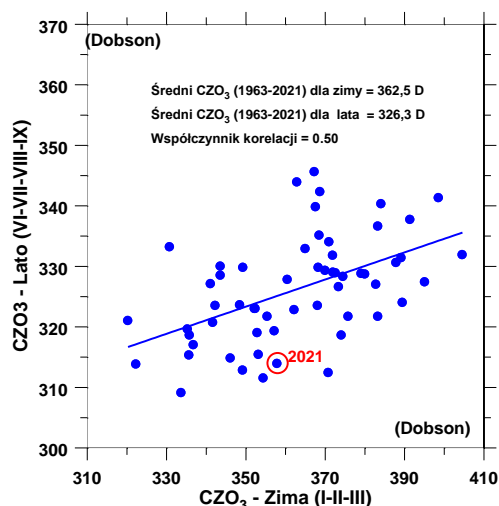
Analizując długookresowe zmiany średnich sezonowych CZO_3 w Belsku (krzywe w kolorze czerwonym na Rys.4 reprezentujące wygładzone metodą lokalnej regresji przebiegi średnich sezonowych) można stwierdzić, że od połowy lat 90-tych XX wieku następuje zmiana kierunku trendu w średnich sezonowych i w średniej 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 została zahamowana i średnie wartości CZO_3 oscylują wokół ustalonego poziomu bez wyraźnego trendu. Liniowe trendy (proste w kolorze zielonym na Rys. 4) w danych sezonowych i rocznych CZO_3 są nieistotne statystycznie w okresie 2000-2021. Natomiast, można zaobserwować stabilizację wartości ozonu na poziomie minimum z połowy lat 90-tych XX wieku w sezonach letnim i jesiennym po 1996 r.

W 2021 r. średnia CZO_3 w okresie czerwiec-wrzesień (313,9 D) była około 3,8% niższa niż wieloletnia norma (326,3 D) dla tego okresu. W tej sytuacji przy braku zachmurzenia poziom promieniowania UV-B przy powierzchni Ziemi powinien być wyższy (o około 4%) niż wieloletnia norma. Wartości CZO_3 w sezonie letnim 2021, wskazują, że wcześniej w sezonie zimowym (styczeń-marzec) poziom CZO_3 był poniżej wieloletniej (1963-2020) normy (Rys. 5). W 2021 r. powyższa zimowa średnia wynosiła 358,6 D, czyli około 1,1% poniżej wieloletniej normy (362,5 D). 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. cyrkulacji Brewera-Dobsona), która w zimie powoduje akumulację ozonu w średnich i wysokich szerokościach geograficznych. Niedobory CZO_3 , które wystąpiły w okresie zimowym nie zostaną w późniejszych miesiącach zlikwidowane, gdyż niskie wartości CZO_3 pojawiają się w skali całej półkuli północnej poza strefą równikową.

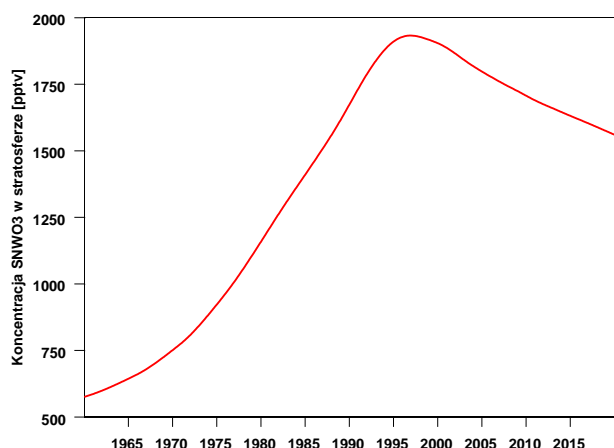


Rys. 4. Średnie sezonowe całkowitej zawartości ozonu uzyskane z pomiarów spektrofotometrem Dobsona w COG IGF PAN, Belsk, w okresie 1963-2021. Krzywa czerwona przedstawia wygładzone dane, a zielona, liniowy trend w okresie 2000-2021



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). Kolorem czerwony oznaczono wartość w 2021 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 takich substancji w stratosferze zaczyna maleć (Rys. 6). W związku z tym oczekiwano zatrzymania, a następnie odwrócenia spadkowej tendencji w zawartości ozonu w atmosferze. Zatrzymanie spadkowej tendencji w ozonie atmosferycznym w połowie lat 90-tych ubiegłego wieku zostało potwierdzone w licznych pracach między innymi także i w ostatnich pracach zespołu z IGF PAN (Krzyścin i Rajewska-Więch, 2009a, 2009b; Rajewska i Krzyścin, 2010; Krzyścin i inni, 2013; Krzyścin, 2015; Krzyścin i Rajewska, 2016, Krzyścin i Baranowski, 2019, Krzyścin i inni, 2020). Jednak, regeneracja warstwy ozonowej nad Belskiem przebiega powoli i w ostatnich 10 latach zauważa się raczej stabilizację poziomu CZO_3 niż jego stopniowy wzrost, który byłby oczekiwany w związku z systematycznie malejącą koncentracją substancji niszczących warstwę ozonową.

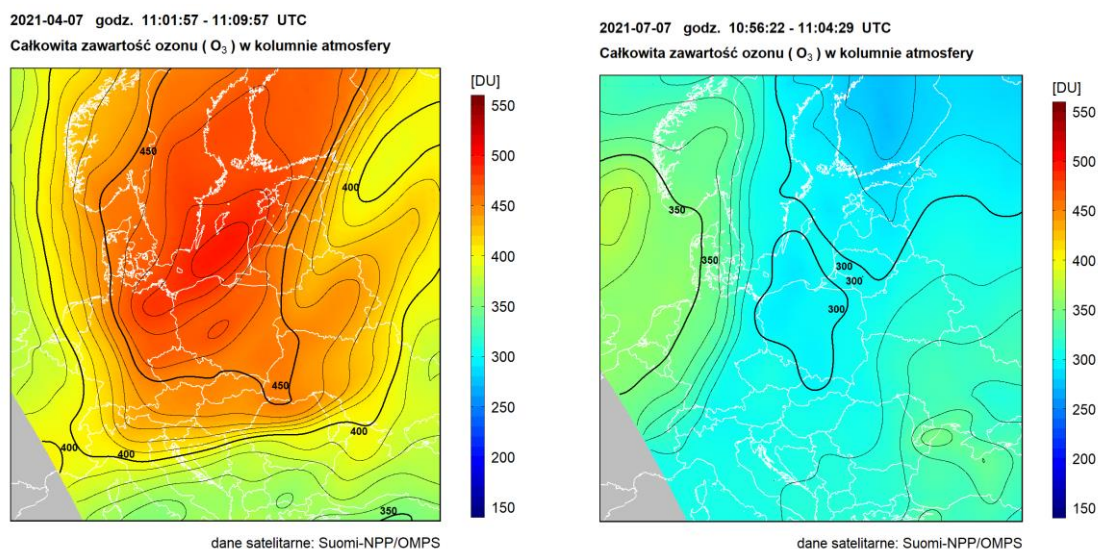


Rys. 6. Zawartość substancji niszczących warstwę ozonową (SNWO₃) w stratosferze (1960-2021) w średnich szerokościach geograficznych według obliczeń modelowych

Satelitarny monitoring całkowitej zawartości ozonu realizowany w Zakładzie Teledetekcji Satelitarnej (ZTS) IMGW-PIB, w 2021 r. był prowadzony z wykorzystaniem danych satelitarnych z czujnika Ozone Mapping and Profiler Suite (OMPS) znajdującego się na pokładzie satelitów meteorologicznych Suomi NPP (S-NPP) oraz NOAA-20. Całkowita zawartość ozonu wyznaczana była za pomocą oprogramowania OMPSNADIR_SPA V.1.0.1 przygotowanego przez NASA, Direct Readout Laboratory, GODDARD SPACE FLIGHT CENTER, (<https://directreadout.sci.gsfc.nasa.gov>) i wdrożonego do pracy operacyjnej w ZTS IMGW-PIB. Pola całkowitej zawartości ozonu wygenerowane z danych OMPS/SNPP 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°. Interpolację przestrzenną wykonano metodą Natural Neighbour.

Wyniki satelitarnego monitoringu ozonu pokazują, że całkowita zawartość ozonu w Polsce w kwietniu 2021 roku była wyraźnie wyższa niż średnia wartość z lat poprzednich, Podwyższone wartości CZO₃ względem okresu wieloletniego zanotowano również w sierpniu, listopadzie i grudniu. Natomiast w styczniu i lipcu 2021 wartości CZO₃ w Polsce były niższe od średniej wieloletniej. Otrzymane wyniki są zgodne z wynikami pomiarów prowadzonych w COG w Belsku.

Na Rys. 7 przedstawiono przykładowe rozkłady całkowitej zawartości ozonu z dnia 7 kwietnia i 7 lipca 2021 roku.



Rys. 7. Całkowita zawartość ozonu (D) w dniach 7 kwietnia i 7 lipca 2022 r., wyznaczona z danych OMPS/SNPP

Pionowy rozkład ozonu

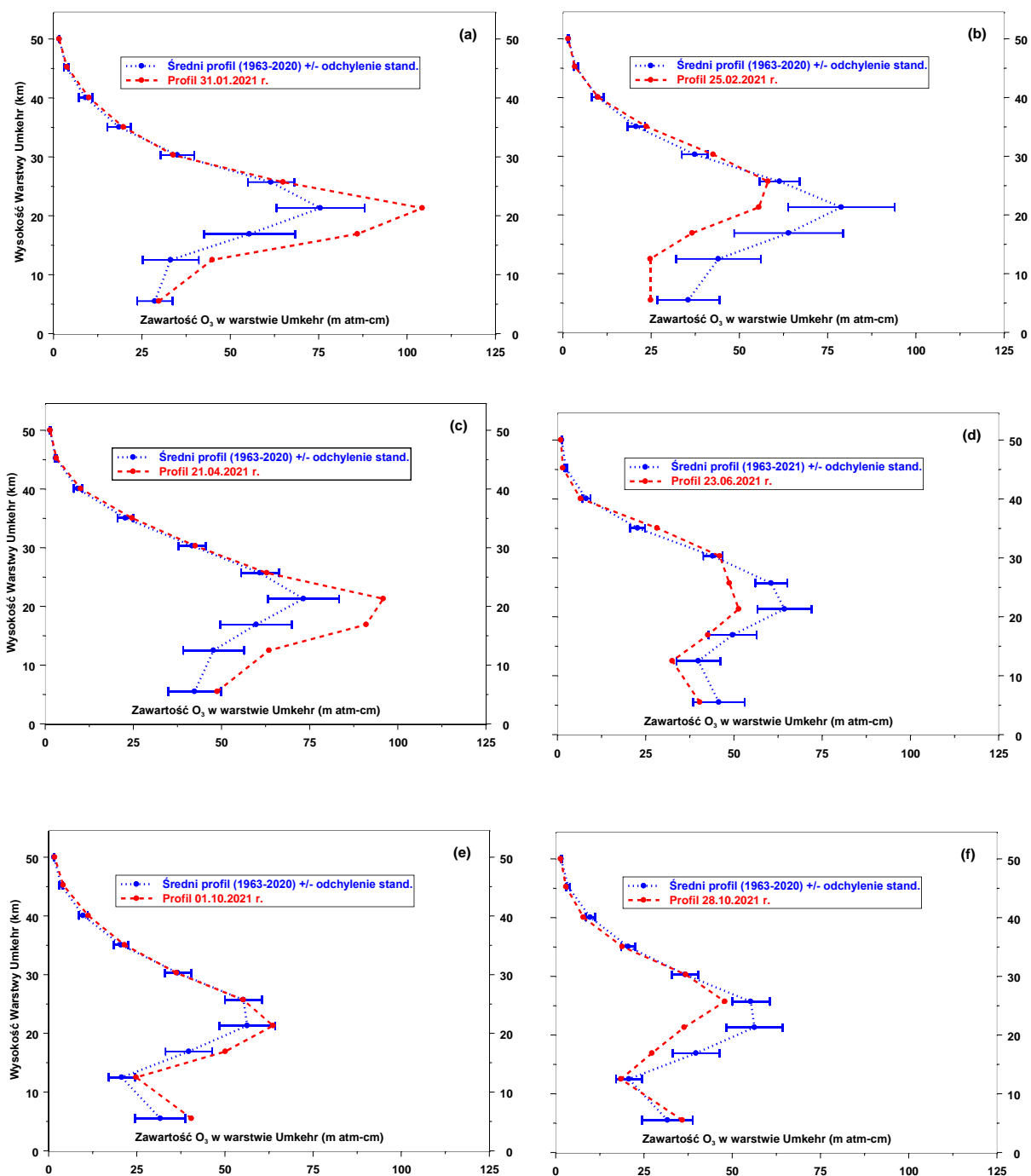
Serie pomiarów wykonywanych w świetle rozproszonym pochodzącym z niezachmurzonego zenitu przy odległościach zenitalnych Słońca 60° – 90° umożliwiają wyznaczenie rozkładu pionowego ozonu tzw. metodą Umkehr. Wyniki pomiarów z tych serii, po wstępnym opracowaniu w Belsku, wysyłane są do Centrum Danych Ozonowych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

W 2021 roku wykonano 206 serii pomiarowych przy pomocy spektrofotometru Brewera pozwalających na wyznaczenie pionowy rozkładów ozonu metodą Umkehr.

Na Rys. 8 przedstawiono interesujące przykłady zmian zawartości ozonu w poszczególnych umkehrskich warstwach atmosfery. Jak widać zmiany te w odniesieniu do średniej wieloletniej 1963-2019 (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. 8 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.

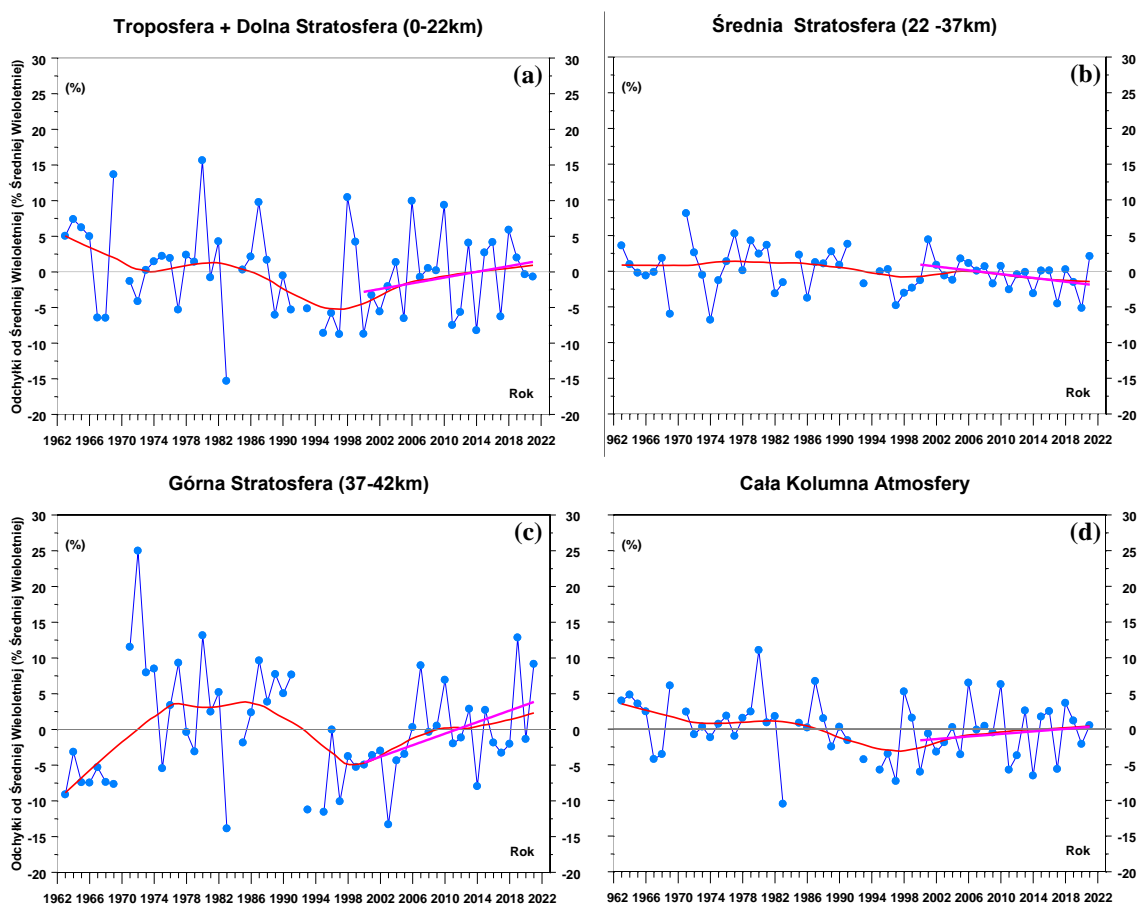
Należy dodać, że zmiany profilu ozonu przy ustalonej całkowitej zawartości ozonu są jednym z czynników wpływających na wielkość natężenia promieniowania UV-B docierającego do powierzchni Ziemi. Dane ozonowe ze stacji dysponującymi długimi, ciągłymi i wiarygodnymi seriami pomiarowymi są szczególnie cenione 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. 8. Pionowy profil O₃ dla wybranych dni w 2021 r. wyznaczony z pomiarów Umkehr spektrofotometrem Brawera 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. Czyli obszarów gdzie zmiany w procesach chemicznej destrukcji ozonu są najłatwiejsze do zaobserwowania, wobec ograniczonego wpływu zmian w dynamice atmosfery i jej składzie chemicznym (np. wzrost CO₂) na koncentrację ozonu na tych wysokościach (Newchurch i inni, 2003).



Rys. 9. Odchyłki średnich wiosennych (marzec-kwiecień-maj) od średniej wieloletniej zawartości ozonu w wybranych warstwach atmosfery z pomiarów Umkehr spektrofotometrem Dobsona (1963-2020) i spektrofotometrem Brewera (w 2021 r.) w Belsku. Profil ozonu wyznaczono stosując algorytm *UMK04*. (a) troposfera i dolna stratosfera 0-22km, (b) średnia stratosfera 22-37km, (c) wysoka stratosfera 37-42km, (d) cała kolumna atmosfery. Krzywa w kolorze czerwonym przedstawia wygładzone dane, a w kolorze fioletowym liniowy trend w okresie 2000-2021

Na Rys. 9 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 r. Profile ozonu na Rys. 9 uzyskano stosując procedurę wyznaczania rozkładu pionowego ozonu metodą Umkehr, *UMK04*, która jest zalecana przez Centrum Danych Ozonowych w Toronto (Kanada).

Wstępne porównanie profili pionowych ozonu z obu spektrofotometrów w okresie 2011-2016 pokazało różnice między profilami mieszczące się w granicach dokładności pomiarowej profilu (poster „Comparison of the Ozone Vertical Profiles Based on the Umkehr Observations by Collocated the Dobson and Brewer Spectrophotometers at Belsk, Poland, for the Period 2011-2016” Janusz Jarosławski, Janusz Krzyścin and Bonawentura Rajewska-Więch), 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%. W takich warunkach oczekuje się zbliżonych dziennych (przed - i popołudniowych) przebiegów profili pionowych zawartości ozonu w atmosferze.

Przebiegi wygładzonych zmian zawartości ozonu w sezonach wiosennych (1963-2021) w wybranych warstwach atmosfery wskazują na wzrostową tendencję od połowy lat 90-tych XX wieku zawartości ozonu w całej kolumnie atmosfery (Rys. 9d), w troposferze i dolnej stratosferze (Rys. 9a) i górnej stratosferze (Rys. 9c). Jednak tylko w górnej stratosferze liniowy trend w latach 2000-2021, ~4% na 10 lat, jest istotny statycznie (na poziomie istotności 95%). W średniej stratosferze (Rys. 9b) przez cały okres pomiarowy zawartość ozonu oscyluje wokół ustalonego poziomu bez wyraźnego trendu, ale od około 2000 r. zaczyna się pojawiać spadkowa tendencja (nieistotna statystycznie). Istotnie statystycznie trendy w okresie 2000-2021 znaleziono w warstwie 5 tj. na wysokości około 25km ($-2,55\% \pm 1,97\%$ na 10 lat) i warstwie 8 tj. na wysokości około 40km ($4,00 \pm 3,65\%$ na 10 lat). W sezonie wiosennym 2021 r. stwierdzono wyższą zawartość ozonu w wysokiej stratosferze (~10%) niż wieloletnia (1963-2021) średnia. W pozostałych warstwach i w całej kolumnie atmosfery zanotowano zawartości ozonu w pobliżu normy.

W ostatnich latach obserwowana jest stabilizacja poziomu ozonu. Taka tendencja nie jest jeszcze utrwalona i dodanie kolejnych wyników pomiarów w następnych latach może zmienić kierunek trendu. W sprawozdaniu z 2016 r. dyskutowano, że w warstwie obejmującej dolną stratosferę i troposferę istnieje trwała dodatnia tendencja od 1995 r. Na zmiany ozonu w tej warstwie atmosfery dodatkowo wpływają procesy dynamiczne i dodanie kolejnych lat (2017 i 2018) zatrzymało wzrostowy trend ozonu. Natomiast dodanie następnych lat (2019 i 2020) przywróciło poprzednią wzrostową tendencję obserwowaną wcześniej w wygładzonych danych do 2016 r.

Zmienności ozonu w wysokich warstwach atmosfery jest wynikiem procesów chemicznych, więc statystycznie istotny wzrostowy trend w wysokiej stratosferze

nad Belskiem (Rys. 9c) jest potwierdzeniem skuteczności ograniczeń w produkcji substancji niszczących warstwę ozonową na tych wysokościach w atmosferze, które wprowadził Protokół Montrealski z 1987 r. i jego późniejsze poprawki. W ostatnich kilkunastu latach pojawiła się w Belsku spadkowa tendencja zawartości ozonu w średniej stratosferze (~25km nad powierzchnią Ziemi), która jak się wydaje może być po części wynikiem anomalnie wysokich zawartości ozonu w tej warstwie na początku XXI wieku, a nie jest związana z istniejącymi utrwalonymi zmianami w dynamice lub procesach chemicznych zachodzących w atmosferze.

W 2021 roku na Stacji Pomiarów Aerologicznych w Legionowie wykonywano systematycznie, co najmniej raz w tygodniu sondaż ozonowy, elektrochemiczną sondą ozonową ECC6A produkcji Science Pump Corporation, USA. Sondaż wykonywano w systemie sondażowym DigiCORA MW41/RS41-SG i w systemie nawigacyjnym GPS.

W średnich miesięcznych zawartościach ozonu nad Legionowem w 2021 roku odnotowano istotne odchylenia od uśrednionego przebiegu rocznego (Tab. 2). W styczniu ujemna anomalia obejmowała średnią stratosferę powyżej 30hPa. Obniżone koncentracje ozonu przesuwały w dół, do dolnej stratosfery w lutym i marcu i do troposfery później na wiosnę. Anomalie ozonu przeciwnego znaku wystąpiły w dolnej stratosferze w kwietniu i sierpniu oraz w warstwie granicznej w lipcu. Zimowy wzrost ozonu został poprzedzony dodatnimi anomaliami w warstwie największej koncentracji ozonu.

Do analizy stanu warstwy ozonowej nad Polską wykorzystano dane zhomogenizowanej serii sondażu ozonowych w Legionowie dla okresu 2001-2021. Wyniki obliczenia trendów nad Legionowem w okresie 2001-2021 pokazano na Rys. 10. Trendy wyrażono w procentach na dekadę, wyróżniono trendy istotne statystycznie na poziomie ufności 0,05. Otrzymane wyniki pokazują:

- spadek ozonu w średniej stratosferze w cieplej porze roku,
- wyhamowanie dużych spadków ozonu w dolnej stratosferze,
- duży spadek ozonu w sąsiedztwie tropopauzy na wiosnę,
- spadek ozonu w dolnej troposferze w cieplej porze roku.

Niewielki spadek ozonu w średniej stratosferze w cieplej porze roku można wiązać z podtlenkiem azotu (N_2O), mającym antropogeniczne i naturalne źródła. W przeciwieństwie do CFC, stosowanie i emisja N_2O nie są regulowane Protokołem Montrealskim. Podtlenek azotu jest największą pojedynczą substancją zubożającą warstwę ozonową, która, jeśli jej emisje nie będą kontrolowane pozostanie dominującą substancją zubożającą warstwę ozonową w XXI wieku.

Prawdopodobnie spadkowy trend ozonu w średniej stratosferze w ciepłej porze roku nad Legionowem jest przeszacowany. Na wielu stacjach sondazy ozonowych po 2013 roku obserwowano niższe koncentracje ozonu w średniej stratosferze w stosunku do pomiarów satelitarnych (Stauffer i in., 2017).

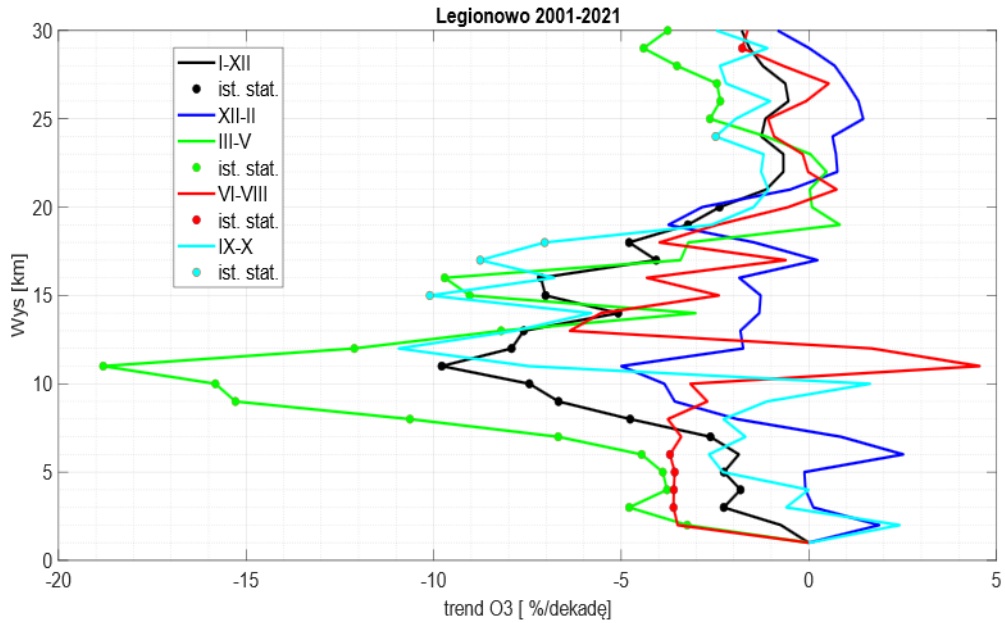
Tabela 2. Zawartość ozonu w warstwach atmosfery nad Legionowem w 2021r.

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	8,2	7,4	8,2	14,1	18,0	30,2	43,7	44,9	58,8	32,5	34,0	40,2
	b	8,3	7,6	8,8	11,8	16,0	29,9	35,7	40,5	62,9	39,6	41,1	40,0
	c	-0,1	-0,2	-0,7	0,7	0,6	0,1	1,5	1,3	-1,0	-3,1	-1,9	0,0
Luty.....	a	9,2	8,3	9,2	13,2	20,1	24,3	29,4	43,0	70,9	44,4	46,1	46,0
	b	9,5	8,0	9,4	14,2	18,9	31,9	37,7	43,4	63,5	40,0	43,2	45,3
	c	-0,2	0,5	-0,2	-0,2	0,3	-1,0	-1,1	-0,1	1,2	1,2	0,7	0,3
Marzec.....	a	11,9	8,9	9,2	12,2	20,1	30,0	34,8	44,5	70,9	43,8	47,5	49,5
	b	11,1	8,8	10,9	17,8	22,6	34,8	37,6	41,9	62,1	38,7	44,4	48,6
	c	0,6	0,2	-0,9	-1,0	-0,7	-0,7	-0,4	0,6	1,6	1,4	0,8	0,4
Kwiecień.....	a	12,6	9,6	11,7	22,2	29,5	43,9	40,7	46,9	68,8	41,0	51,3	51,1
	b	12,9	10,0	12,9	18,6	21,9	30,9	34,2	39,6	60,0	38,1	47,0	50,9
	c	-0,2	-0,5	-0,5	0,6	1,7	2,2	1,2	1,7	2,0	0,8	0,8	0,1
Maj.....	a	12,3	9,3	12,4	21,6	21,5	23,3	28,1	36,1	58,0	35,6	49,1	50,7
	b	13,7	10,7	12,3	16,9	20,8	28,0	29,7	35,8	55,6	37,6	49,1	50,9
	c	-1,0	-1,6	0,1	0,9	0,2	-1,1	-0,5	0,1	0,7	-0,7	0,0	-0,1
Czerwiec.....	a	12,6	9,6	12,6	12,3	20,1	29,3	28,1	32,4	52,0	41,9	50,9	53,6
	b	13,5	10,8	12,7	12,8	16,4	23,9	25,2	31,7	53,5	39,6	52,8	50,1
	c	-0,5	-1,0	-0,0	-0,1	1,0	1,3	0,9	0,3	-0,7	1,0	-0,9	1,3
Lipiec.....	a	16,2	10,8	12,2	8,9	10,9	18,5	22,7	30,3	52,2	40,4	54,5	47,3
	b	12,9	10,5	12,9	14,8	14,7	20,7	23,2	29,8	51,3	38,8	52,0	49,5
	c	2,0	0,3	-0,5	-1,1	-1,6	-1,1	-0,2	0,2	0,3	0,8	0,8	-1,0
Sierpień.....	a	12,0	9,8	11,6	18,8	15,0	23,6	27,9	32,0	49,5	39,8	53,4	47,9
	b	12,8	10,2	12,3	10,3	11,2	18,3	23,3	28,8	48,0	37,1	49,7	49,9
	c	-0,5	-0,4	-0,5	2,8	1,6	1,7	1,6	1,5	0,3	0,8	1,0	-1,3
Wrzesień.....	a	12,9	9,8	10,9	9,1	8,1	15,2	24,3	30,5	49,6	37,1	46,3	49,4
	b	11,3	9,4	10,4	8,9	8,9	17,4	24,0	29,6	47,8	34,5	44,4	48,4
	c	1,2	0,4	0,4	0,1	-0,4	-0,7	0,1	0,4	0,5	0,8	0,5	1,2
Październik.....	a	10,0	7,8	9,9	8,1	7,7	17,6	23,5	32,4	51,6	37,5	42,2	45,1
	b	9,6	8,4	9,7	9,2	8,9	16,9	23,6	29,4	47,5	34,2	40,7	45,7
	c	0,3	-1,0	0,1	-0,3	-0,6	0,2	-0,0	1,3	1,6	1,0	0,4	-0,3
Listopad.....	a	10,1	8,3	11,1	9,4	9,6	15,8	23,8	34,4	56,4	41,3	45,5	44,1
	b	8,4	7,8	8,7	8,3	9,3	19,2	26,0	30,3	50,5	36,4	38,9	40,7
	c	1,8	1,0	2,1	0,4	0,1	-0,8	-0,5	1,6	2,1	1,8	1,5	1,2
Grudzień.....	a	8,9	8,1	8,4	7,5	10,4	23,2	35,2	39,5	64,4	42,6	41,5	39,1
	b	8,0	7,6	8,8	8,9	11,1	23,2	29,0	33,7	55,0	38,1	39,3	38,5
	c	0,9	1,3	-0,3	-0,5	-0,2	-0,0	1,4	1,7	2,5	1,6	0,6	0,3

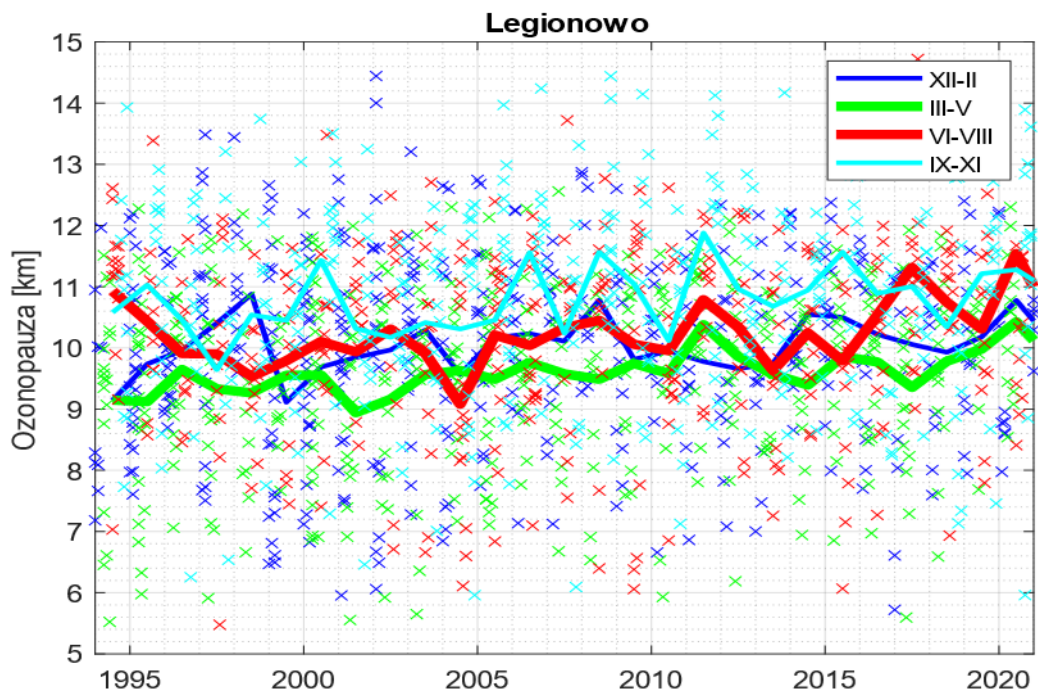
a – średnie miesięczne (D) w 2021 roku

b – średnie miesięczne wieloletnie (D) z lat 1994-2020

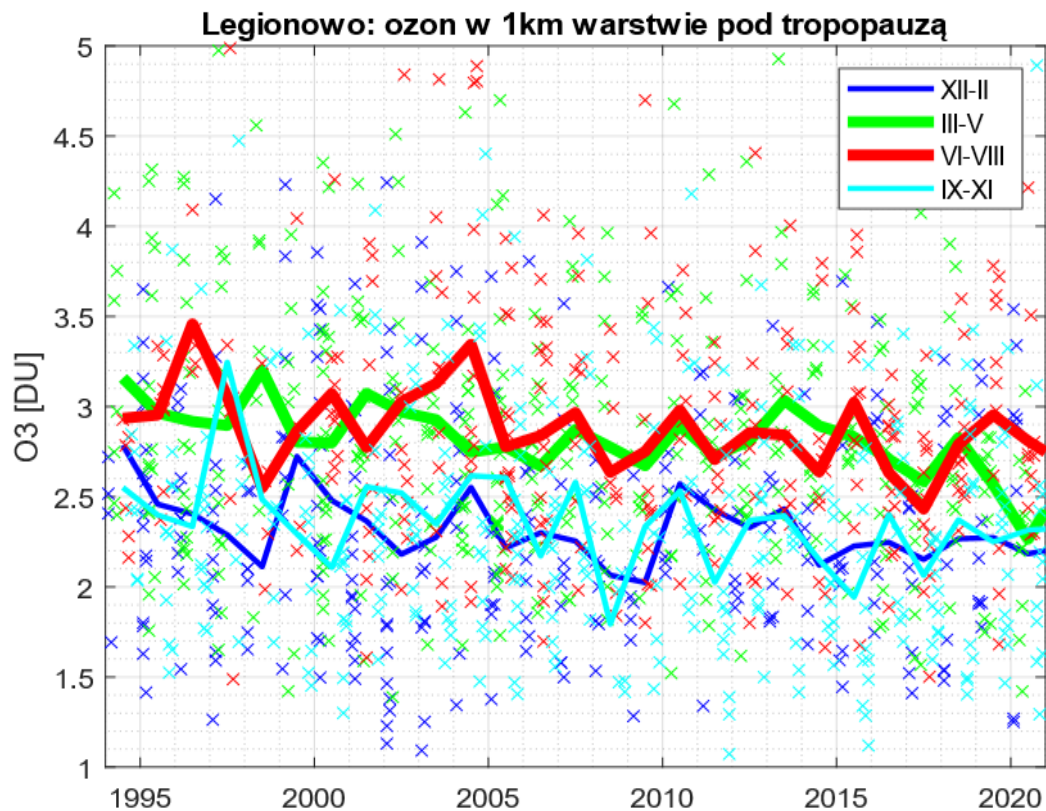
c – standaryzowane odchylenie: $(a-b)/\sigma$, gdzie σ jest odchyleniem standardowym średnich miesięcznych z lat 1994-2020



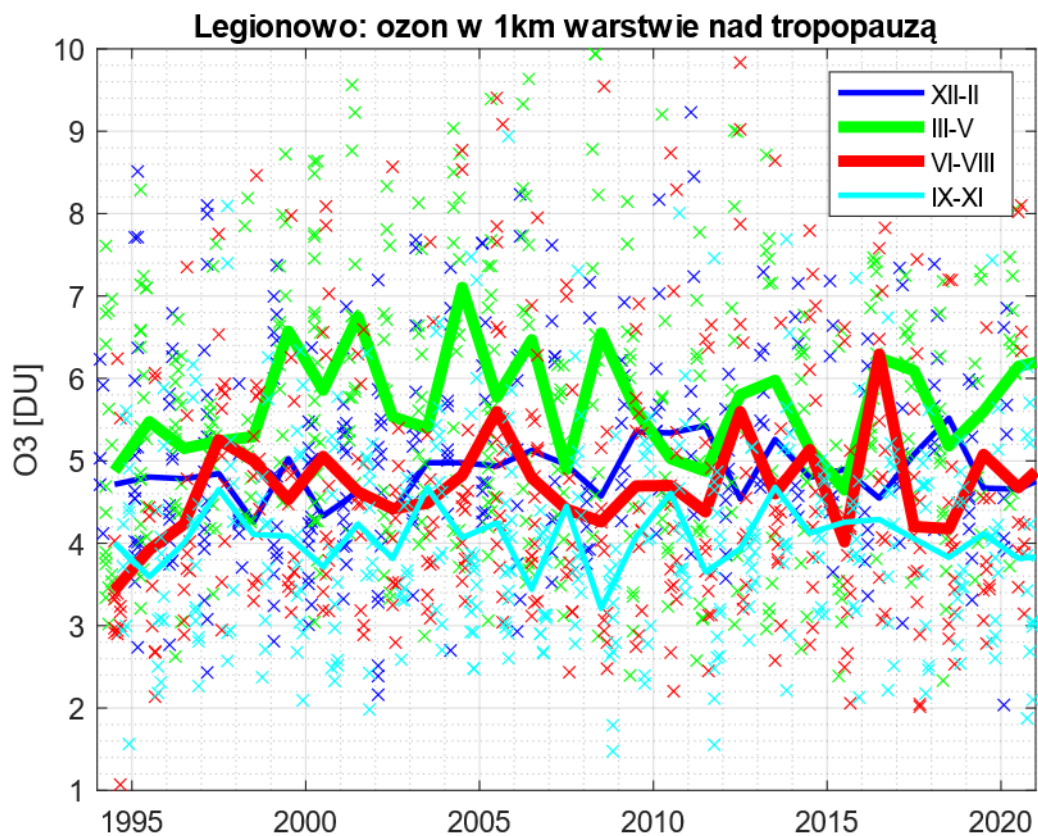
Rys. 10. Całoroczny i sezonowe trendy ozonu nad Legionowem w latach 2001-2021. Zaznaczono trendy istotne statystycznie na poziomie ufności 0,05



Rys. 11. Położenie tropopauzy chemicznej (ozonopauzy) w sezonach, na podstawie serii sondży ozonowych w Legionowe



Rys. 12. Zawartości ozonu nad Legionowem w 1km warstwie pod tropopauzą w sezonach



Rys. 13. Zawartości ozonu nad Legionowem w 1km warstwie nad tropopauzą w sezonach

Po dużych spadkach ozonu w dolnej stratosferze nad Legionowem w okresie szczytowego nasycenia atmosfery substancjami niszczącymi warstwę ozonową, spodziewana jest zmiana kierunku trendu, dzięki działaniom Protokołu Montrealskiego i jego uzupełnień. Aktualne wyniki obliczenia trendu dla okresu 2001-2021 pokazują (nieistotny) wzrost ozonu w dolnej stratosferze w sezonie zimowym oraz wyhamowanie wiosennych spadków ozonu. Modele chemii i dynamiki atmosfery nie dają wyników trendów zgodnych z obliczonymi na podstawie obserwacji.

Dla zrozumienia stanu warstwy ozonowej ważne jest zrozumienie trendów ozonu w otoczeniu tropopauzy. Wzrost ozonu w troposferze swobodnej przyczyniałby się do ocieplania klimatu a spadek ozonu w najniższej części dolnej stratosfery oznaczałby, że coś jest nie tak w atmosferze, pomimo sukcesów Protokołu Montrealskiego.

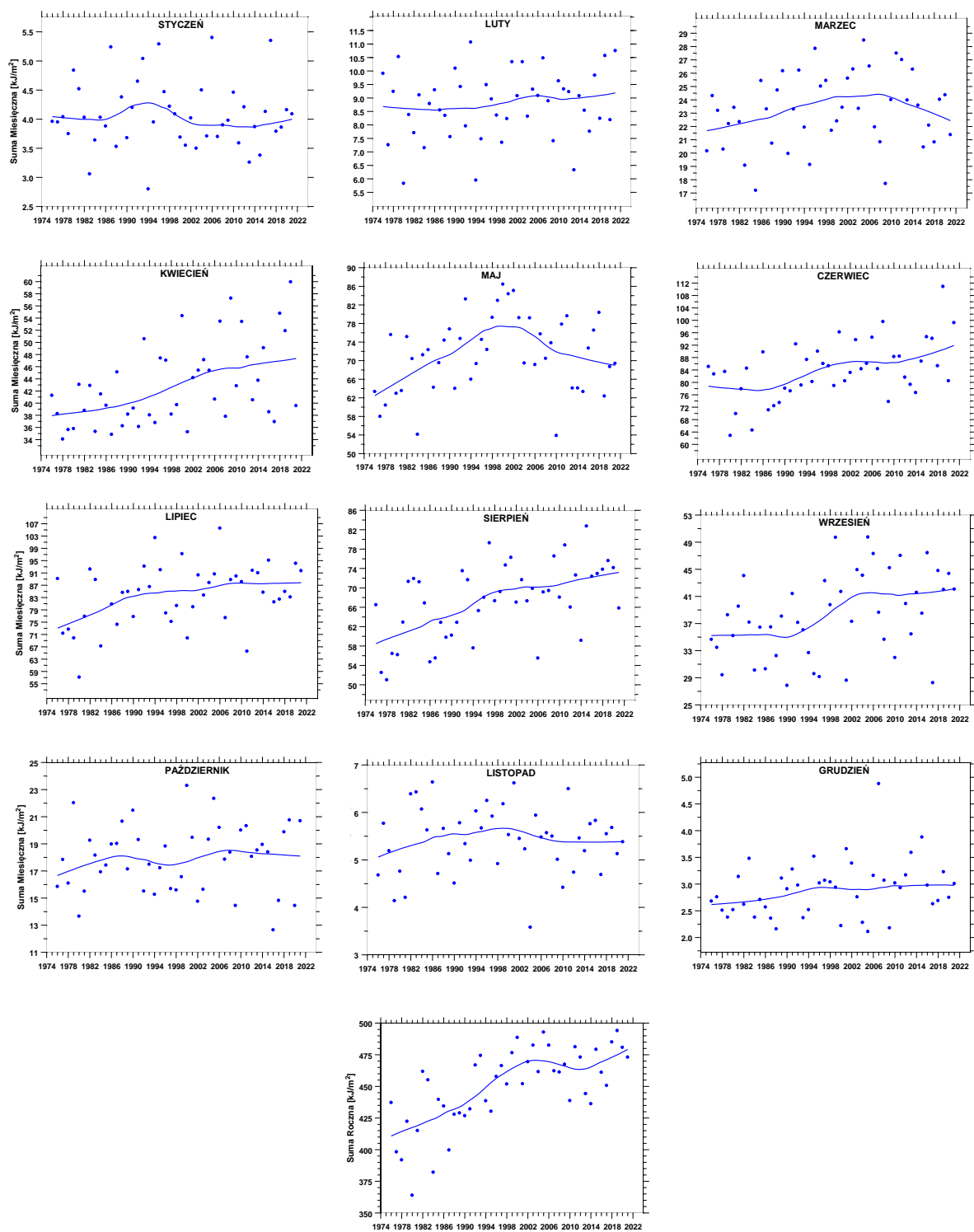
Uzyskane wyniki pokazują, że wzrostowi wysokości tropopauzy w latach 2001-2021 (Rys. 11) towarzyszył spadek zawartości ozonu w 1km warstwie pod tropopauzą w cieplej porze roku (Rys. 12). Spadek ozonu w dolnej troposferze w cieplej porze roku nad Legionowem można łączyć z redukcją emisji antropogenicznych prekursorów ozonu. Wiosną i latem 2020 roku na wielu stacjach w strefie umiarkowanych szerokości geograficznych półkuli północnej zauważono niespotykaną wcześniej ujemną anomalię ozonu. Badania międzynarodowego zespołu naukowców wykazały, że główną przyczyną tych anomalii było zmniejszenie ilości zanieczyszczeń w związku z blokadą COVID-19 (Steinbrecht i in., 2021).

Obecnie poziom zanieczyszczenia atmosfery substancjami niszczącymi warstwę ozonową pozostaje nadal wysoki. W związku z tym w danych ozonu stratosferycznego widoczne są oscylacje. Silny wzrost zawartości ozonu w sezonie wiosennym w 1km warstwie bezpośrednio nad tropopauzą trwający do roku 2004 można łączyć ze zmniejszającą się koncentracją w stratosferze substancji niszczących warstwę ozonową w wyniku funkcjonowania Protokołu Montrealskiego ale w latach 2004-2015 pojawiła się tendencja spadkowa (Rys. 13). Za wcześnie zatem, aby mówić o znaczącej naprawie warstwy ozonowej nad Polską.

Promieniowanie UV-B

W Belsku monitoring promieniowania UV-B o skuteczności rumieniowej prowadzony jest od 1976 r. z zastosowaniem różnych modeli szerokopasmowych biometrów: Robertson-Berger (1976-1994), Solar Light (1992-2014), Kipp @ Zonen (2006-2019). Seria czasowa w ubiegłych latach, także i w 2021 r., została poddana procedurze homogenizacyjnej, która

polegała na zastosowaniu poprawek wynikających z porównania wyników pomiarów szerokopasmowymi miernikami dla dni bezchmurnych z wynikami modelu transferu promieniowania (metoda stosowana w latach 1976-1994) i z jednoczesnymi pomiarami natężenia promieniowania UV-B o skuteczności rumieniowej z zastosowanie spektrofotometru Brewera nr. 64 (od 1995 r. do chwili obecnej). Jakość pomiarów ozonu i promieniowania UV-B belskiego Brewera jest zapewniona przez corocznie porównania (od lata 1995 r.) ze światowym standardem – spektrofotometrem Brewera nr. 17. Przebieg sum rocznych dziennych dawek rumieniowych wskazuje na wzrost napromienienia UV-B w Belsku w latach 1976-2000 i późniejszą stabilizację (brak trendu). W XXI wieku dawki roczne oscylują wokół poziomu 470 kJ/m^2 . W 2021 r. suma roczna wynosiła 473 kJ/m^2 . W ostatnich latach (od 2015 r.) obserwuje się lekką tendencje wzrostową, która w 2021 r. jest jeszcze nieistotna statystycznie. Rys. 14 przedstawia serie czasowe sum miesięcznych dziennych dawek rumieniowych składających się na sumę roczną. W niektórych miesiącach długookresowe zmiany w takich dawkach różnią się od przebiegu sum rocznych np. w maju dawka zmniejsza się po 2000 r., ciągły wzrost przez cały okres obserwacji obserwowany jest w kwietniu i sierpniu.

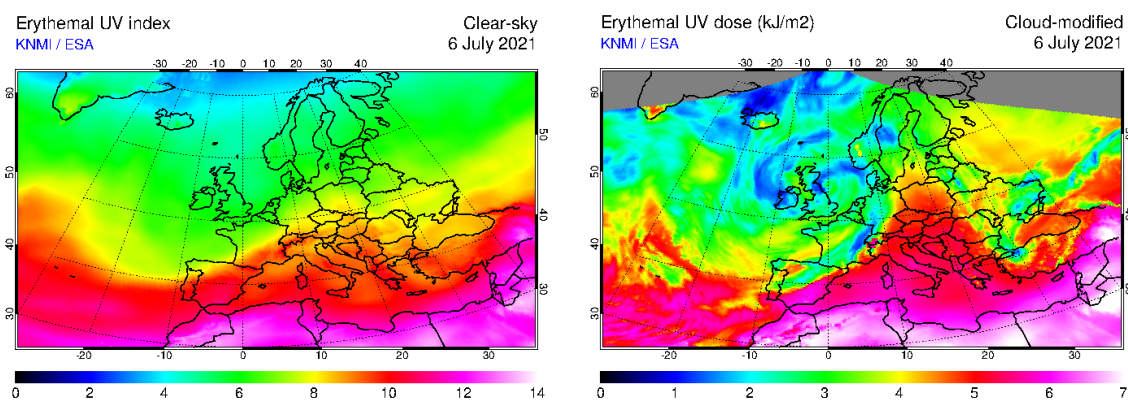


Rys. 14. Miesięczne i roczna suma dziennych dawek promieniowania rumieniowego w Belsku w latach 1976-2021 (punkty). Ciągła krzywa przedstawia wygładzone dane

Należy zauważyć wzrost sum miesięcznych promieniowania rumieniowego w okresie letnim w całym okresie pomiarowym, co może prowadzić do wzrostu zagrożenia nadmiernym

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

Pomiary natężenia napromienienia o skuteczności rumieniowej z użyciem biometru Kipp & Zonen pokazały w dniu 25 czerwca najwyższą w 2021 roku tj. 7,3 wartość Indeksu UV (UVI). Powyższą wartość potwierdziły pomiary widm UV z zastosowaniem spektrofotometru Brewera. Wysoka wartości UVI w tym dniu była wynikiem niskich wartości CZO_3 (306 D - 11,8% poniżej normy). 25 czerwca nie był dniem bezchmurnych i dzienna dawka rumieniowa (2479 J/m^2) nie była rekordowo wysoka w tym dniu.



Rys. 15. Indeks UV i dzienna dawka rumieniowa nad Europą wyznaczona z pomiarów spektrofotometrem GOME-2 w dniu 06.07.2021 na platformie satelitarnej MetOp-A

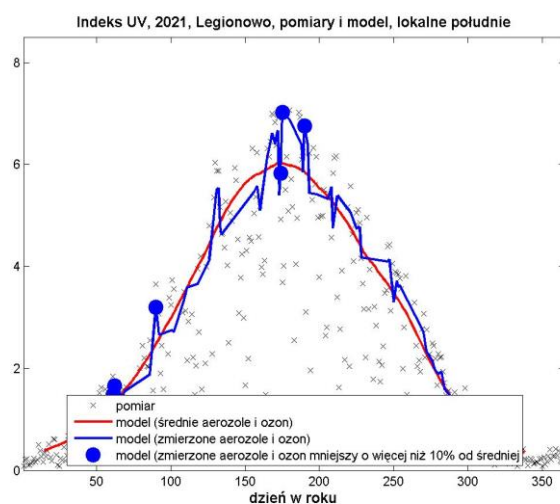
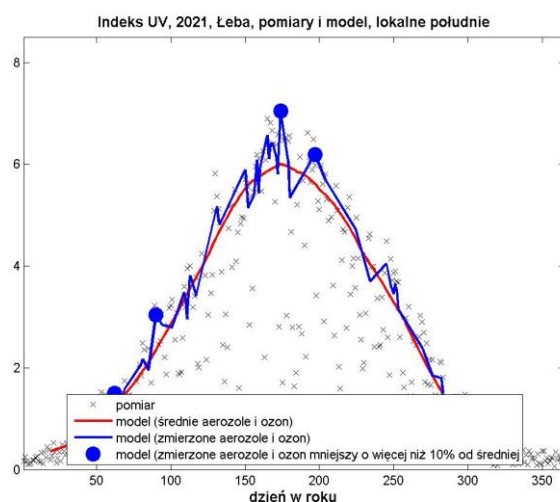
Najwyższą w 2021 r. dzienną dawkę rumieniową równą 4304 J/m^2 zanotowano w Belsku w dniu 6 lipca. Tego dnia Indeks UV wynosił 7,2. Satelitarne pomiary (Rys. 15) pokazały zbliżone wartości UVI i dziennej dawki dla Belska.

W związku z pojawieniem się niskich wartości ozonu nad Polska w drugiej połowie kwietnia 2021 wielokrotnie rejestrowano w Belsku wartości Indeksu UV powyżej 4 tj. około 15% powyżej normy wieloletniej dla tego miesiąca. Maksymalna dawka rumieniowa w tym okresie wynosiła 2280 J/m^2 (28 kwietnia), co w przybliżeniu stanowi 11-krotność minimalnej dawki wywołującej rumień skóry (tzw. MED) u osoby z 2 fototypem skóry. Wysokie wartości UVI o tej porze roku są szczególnie niebezpieczne dla zdrowia, gdyż organizm nie jest jeszcze zaadaptowany do długotrwałych ekspozycji na promieniowanie UV, a umiarkowane temperatury ($\sim 20\text{C}$) zachęcają do nadmiernego opalania bez zastosowania kremów z filtrem ochronnym. Czerwińska i Krzyścin (2020) stwierdzili, że nadmierne napromienienie w kwietniu może być przyczyną wzrastającej gwałtownie zapadalności na czerniaka w Europie.

Pomiary rumieniowo czynnego promieniowania UV-B w sieci monitoringu IMGW-PIB wykonywane są od połowy 1993 r. z wykorzystaniem przyrządów UV Biometer Model 501 (SL501) firmy Solar Light, zainstalowanych na stacjach w Łebie, Legionowie i Zakopanem.

Stacje monitoringu UV-B w IMGW-PIB ułożone są południkowo. Gdyby nie zróżnicowanie ilości chmur, ozonu i aerozoli, ilość promieniowania UV-B docierającego do powierzchni Ziemi powinna być największa dla stacji Zakopane a najmniejsza dla Łeby.

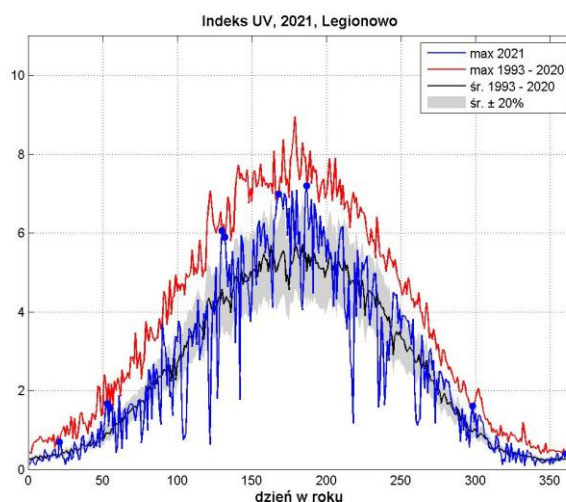
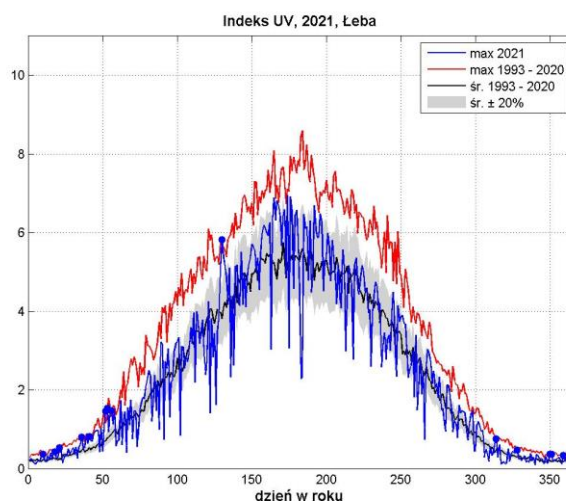
W 2021 roku na stacjach w Łebie i Legionowie obserwowano podwyższone wartości promieniowania UV-B w czerwcu oraz w pojedynczych dniach maja i lipca. Zwiększenie promieniowanie w czerwcu i lipcu związane było z mniejszą ilością ozonu całkowitego oraz aerozoli. Natomiast duże promieniowanie w maju spowodowane było mniejszą ilością aerozoli (Rys. 16).

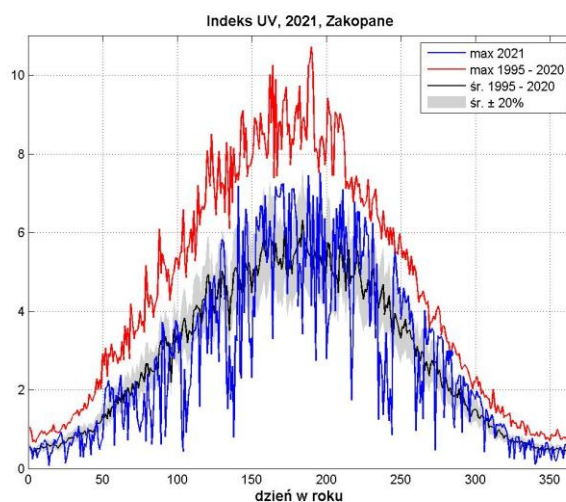


Rys. 16. Przebiegi roczne Indeksu UV z 2021 roku obliczonego z wykorzystaniem modelu transferu promieniowania słonecznego FastRT dla stacji w Łebie, Legionowie i Zakopanem z wykorzystaniem pomiarów satelitarnych ozonu całkowitego i aerozoli 2005-2021

Dla 2021 roku maksymalną dawkę miesięczną, $106,8 \text{ kJ/m}^2$ zmierzono w czerwcu dla Łeby i była to jedna z największych wartości w serii pomiarów z Łeby. Maksymalną dawkę dzienną, 4448 J/m^2 zaobserwowano 14 czerwca w Łebie oraz 4460 J/m^2 19 lipca w Zakopanem. Dla Legionowa maksymalna dawka, 4418 J/m^2 wystąpiła w dniu 29 czerwca.

Największe wartości Indeksu UV na stacjach IMGW-PIB, w 2021 roku zmierzono odpowiednio: 15 lipca w Zakopanem (UVI 7,5), 6 lipca w Legionowie (UVI 7,2) oraz 23 czerwca w Łebie (UVI 6,9). Ekstremalne wartości Indeksu UV zmierzono także w styczniu i lutym, w Łebie i Legionowie (Rys. 17).





Rys. 17. Przebiegi roczne Indeksu UV z 2021 roku dla stacji w Łebie, Legionowie i Zakopanem na tle średniego oraz maksymalnego Indeksu UV od początku pomiarów do 2021 roku dla każdej stacji. Niebieskie punkty oznaczają ekstremalne wartości w serii dla danego dnia roku zmierzone w 2021 roku

Podsumowanie

Analiza danych o całkowitej zawartości ozonu uzyskanych przy pomocy spektrofotometru Dobsona pozwala stwierdzić, że w 2021 roku średnie miesięczne wartości całkowitej zawartości ozonu w Belsku były wyższe od średniej wieloletniej z lat 1963-2020 w marcu, kwietniu, sierpniu, listopadzie i grudniu. Ujemne odchylenia średniej miesięcznej całkowitej zawartości ozonu od średniej wieloletniej zaobserwowano w styczniu 3,6%, lutym 1,1%, maju 0,5%, czerwcu 4,0%, lipcu 6,8%, wrześniu 3,0% i październiku 2,1%.

Wyniki satelitarnego monitoringu ozonu pokazują, że całkowita zawartość ozonu w Polsce w kwietniu 2021 roku była wyraźnie wyższa niż średnia wartość z lat poprzednich. Podwyższone wartości CZO_3 względem okresu wieloletniego zanotowano również w sierpniu, listopadzie i grudniu. Natomiast w styczniu i lipcu 2021 wartości CZO_3 w Polsce były niższe od średniej wieloletniej. Otrzymane wyniki są zgodne z wynikami pomiarów prowadzonych w COG w Belsku.

W 2021 roku wykonano 206 serii pomiarowych przy pomocy spektrofotometru Brewera pozwalających na wyznaczenie pionowy rozkładów ozonu metodą Umkehr. W sezonie wiosennym 2021 r. stwierdzono wyższą zawartość ozonu w wysokiej stratosferze (~10%) niż wieloletnia (1963-2021) średnia. W pozostałych warstwach i w całej kolumnie atmosfery zanotowano zawartości ozonu w pobliżu normy.

Przebiegi wygładzonych zmian zawartości ozonu w sezonach wiosennych (1963-2021) w wybranych warstwach atmosfery wskazują na wzrostową tendencję od połowy lat 90-tych

XX wieku zawartości ozonu w całej kolumnie atmosfery, w troposferze i dolnej stratosferze oraz górnej stratosferze. Jednak tylko w górnej stratosferze liniowy trend w latach 2000-2021, ~4% na 10 lat, jest istotny statycznie. W ostatnich latach obserwowana jest stabilizacja poziomu ozonu. Taka tendencja nie jest jeszcze utrwalona i dodanie kolejnych wyników pomiarów w następnych latach może zmienić kierunek trendu.

W średnich miesięcznych zawartościach ozonu nad Legionowem w 2021 roku odnotowano istotne odchylenia od uśrednionego przebiegu rocznego. W styczniu ujemna anomalia obejmowała średnią stratosferę powyżej 30hPa. Obniżone koncentracje ozonu przesunęły w dół, do dolnej stratosfery w lutym i marcu i do troposfery później na wiosnę. Anomalie ozonu przeciwnego znaku wystąpiły w dolnej stratosferze w kwietniu i sierpniu oraz w warstwie granicznej w lipcu. Zimowy wzrost ozonu został poprzedzony dodatnimi anomaliami w warstwie największej koncentracji ozonu.

Analiza zhomogenizowanej serii danych sondażu ozonowych w Legionowie dla okresu 2001-2021 pokazała:

- spadek ozonu w średniej stratosferze w ciepłej porze roku,
- wyhamowanie dużych spadków ozonu w dolnej stratosferze,
- duży spadek ozonu w sąsiedztwie tropopauzy na wiosnę,
- spadek ozonu w dolnej troposferze w ciepłej porze roku.

Wyniki pomiarów promieniowania UV-B w 2021 roku pokazały podwyższone wartości promieniowania UV-B w czerwcu oraz w pojedynczych dniach kwietnia, maja i lipca. Maksymalne dawki dzienne na danych stacjach zaobserwowano odpowiednio w dniach: 14 czerwca w Łebie (4448 J/m²), 29 czerwca w Legionowie (4418 J/m²), 6 lipca w Belsku (4304 J/m²) i 19 lipca w Zakopanem (4460 J/m²).

Największe wartości Indeksu UV na stacjach IMGW-PIB i stacji COG IGF PAN w 2021 roku zmierzono odpowiednio: 23 czerwca w Łebie (UVI 6,9), 25 czerwca w Belsku (UVI 7,3), 6 lipca w Legionowie (UVI 7,2) i 15 lipca w Zakopanem (UVI 7,5).

Literatura

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>.

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
- 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
- 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 Van Malderen, Roeland and Johnson, Bryan J. J. and et al. A Post-2013 Drop-off in Total Ozone at a Third of Global Ozone Sonde 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., Kubistin, D., Plass-Dülmer, C., Davies, J., Tarasick, D. W., Gathen, P., et al. COVID-19 crisis reduces free tropospheric ozone across the Northern Hemisphere. *Geophysical Research Letters*, **48**, e2021GL091987. <https://doi.org/10.1029/2021GL091987> , 2021