



**Główny Inspektorat Ochrony Środowiska**

**ANALIZA I INTERPRETACJA DANYCH,  
OCENA TRENDÓW I SKALI ZJAWISKA W POLSCE  
NA TLE GLOBALNYCH ZMIAN WARSTWY OZONOWEJ  
W 2019 ROKU  
RAPORT SYNTETYCZNY**



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

Warszawa, 2020

Praca zrealizowana przez: Julita Biszczuk-Jakubowska, Aleksander Curyło,  
Bogumił Kois, Bożena Łapeta - IMGW-PIB  
we współpracy z: Janusz Jarosławski, Janusz Krzyścin, Aleksander Pietruczuk,  
Bonawentura Rajewska-Więch - Zakład Fizyki Atmosfery IGF PAN

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

## 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 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.

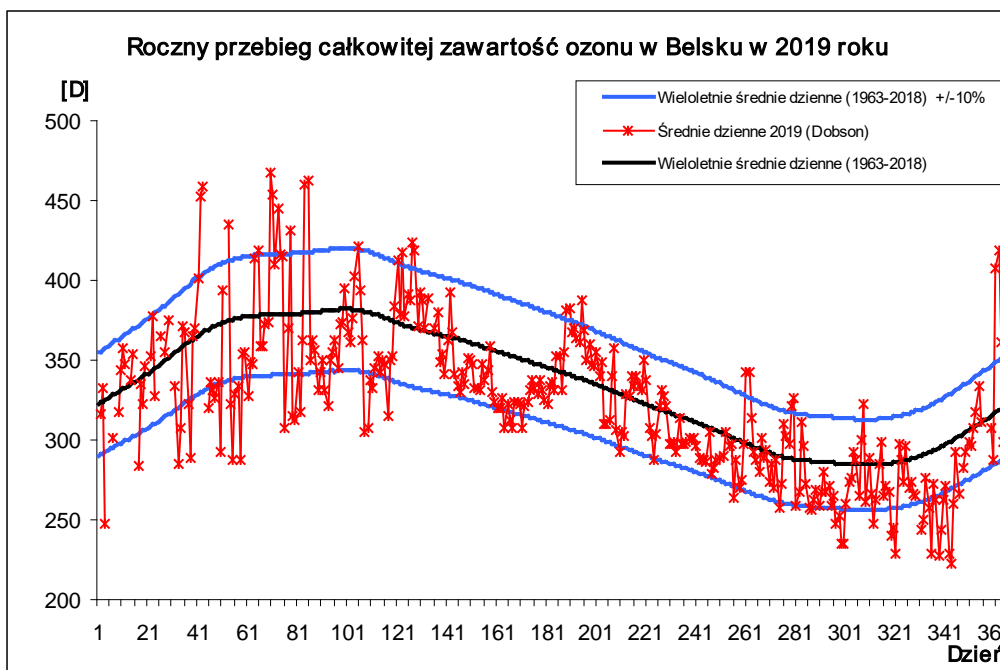
W raporcie przedstawiono analizę stanu warstwy ozonowej i poziomu promieniowania UV-B na podstawie pomiarów wykonanych w IMGW-PIB i IGF PAN w 2019 roku.

### **Całkowita zawartość ozonu**

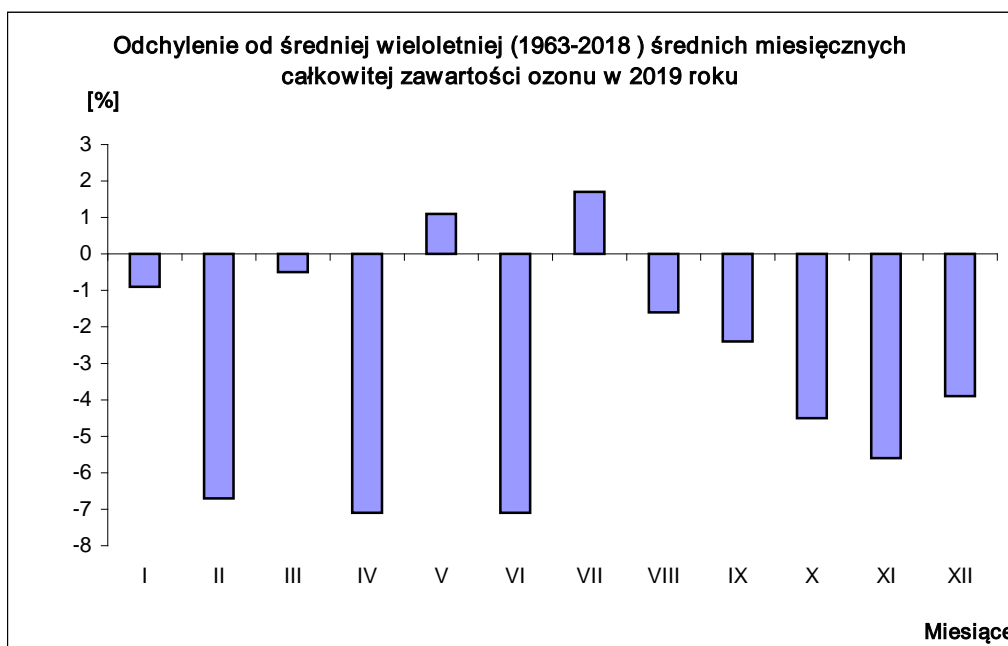
Pomiary całkowitej zawartości ozonu wykonywane są od 1963 roku w Centralnym Obserwatorium Geofizycznym PAN w Belsku przy pomocy spektrofotometru Dobsona, a od 1992 roku, równoległe, spektrofotometru Brewera.

Przebieg średnich wartości dziennych całkowitej zawartości ozonu w atmosferze w poszczególnych miesiącach przedstawia Rys.1, gdzie czerwona linia – średnie dzienne całkowitej zawartości ozonu w 2019 r., linia czarna – wieloletnia (1963-2018) 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 2019 r. średnie miesięczne wartości całkowitej zawartości ozonu w Belsku były wyższe od średniej wieloletniej z lat 1963-2018 tylko w maju 1,1% i lipcu 1,7%. Ujemne odchylenia średniej miesięcznej całkowitej zawartości ozonu od średniej wieloletniej zaobserwowano w styczniu 0,9%, lutym 6,7%, marcu 0,5%, kwietniu 7,1%, czerwcu 7,1%, sierpniu 1,6%, wrześniu 2,4%, październiku 4,5%, listopadzie 5,6% i grudniu 3,9% (Rys.2).

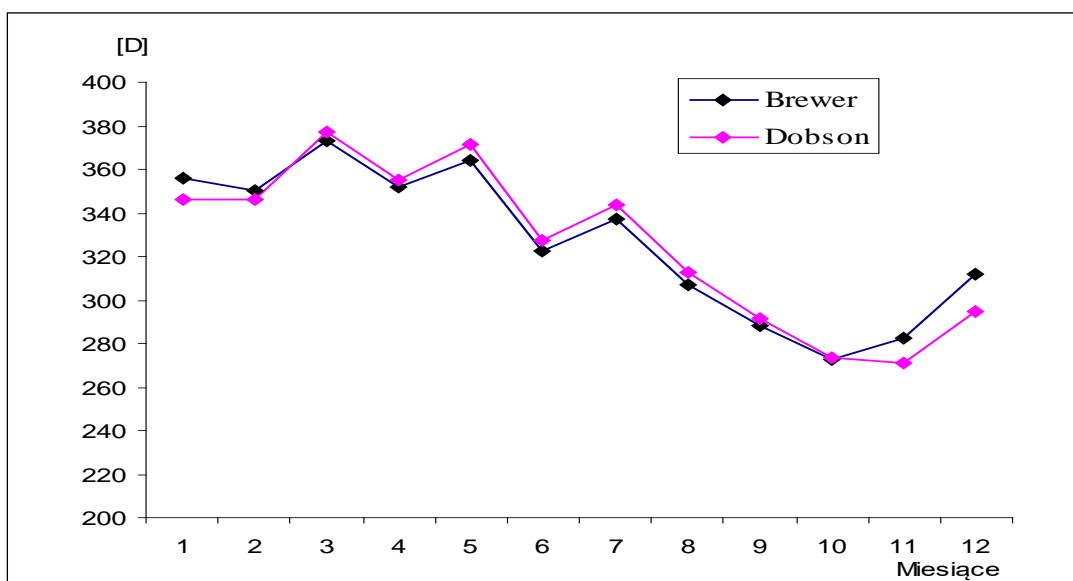


Rys.1. Roczny przebieg średnich dziennych całkowitej zawartości ozonu, Belsk 2019 roku.



Rys.2. Odchylenie od średniej wieloletniej (1963-2018) średnich miesięcznych całkowitej zawartości ozonu w 2019 roku

Przez cały 2019 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.



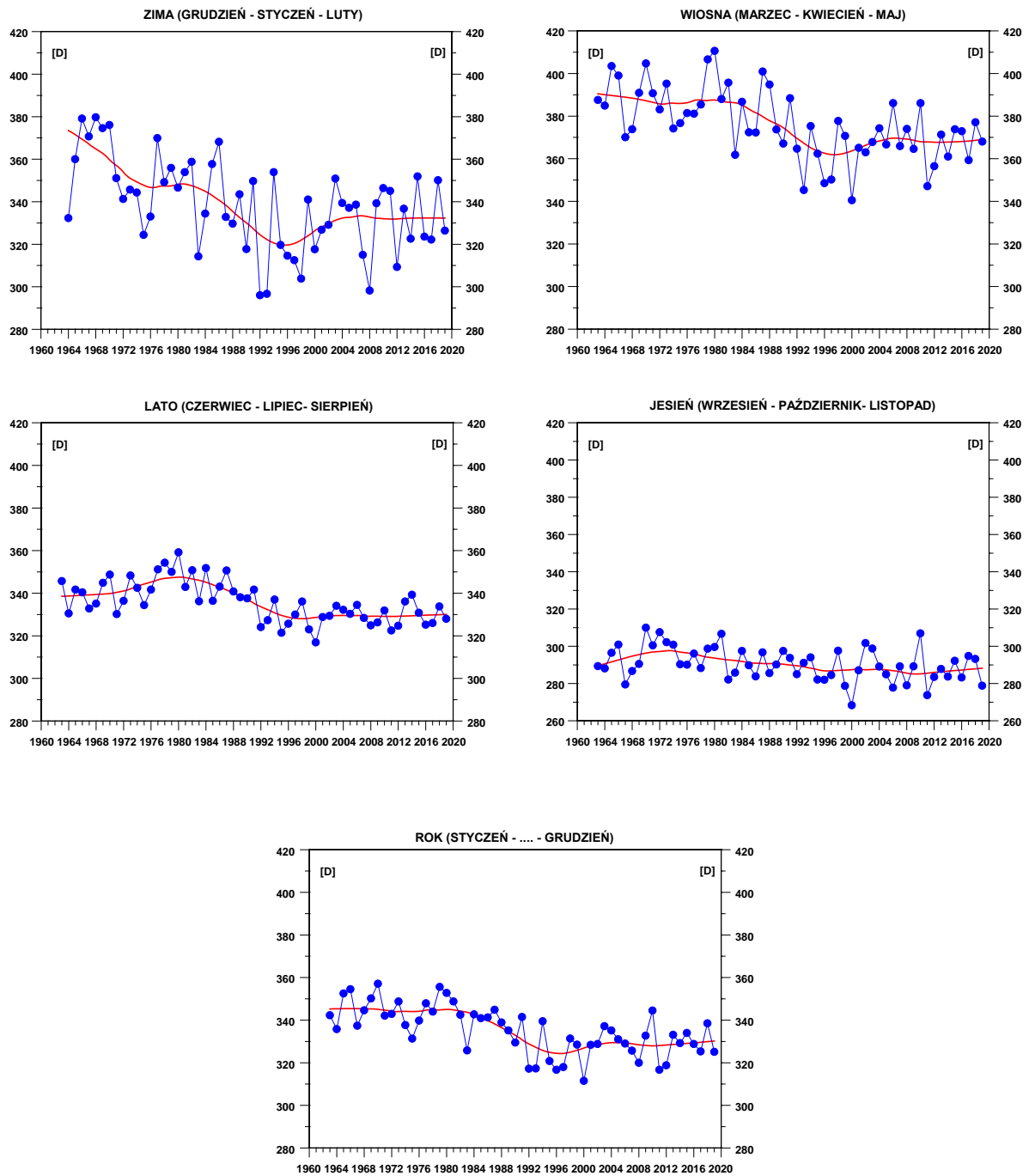
Rys.3. Przebieg średnich miesięcznych całkowitej zawartości ozonu zmierzonych spektrofotometrem Dobsona i Brewera, Belsk 2019

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 ( $\text{SO}_2$ ). 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.

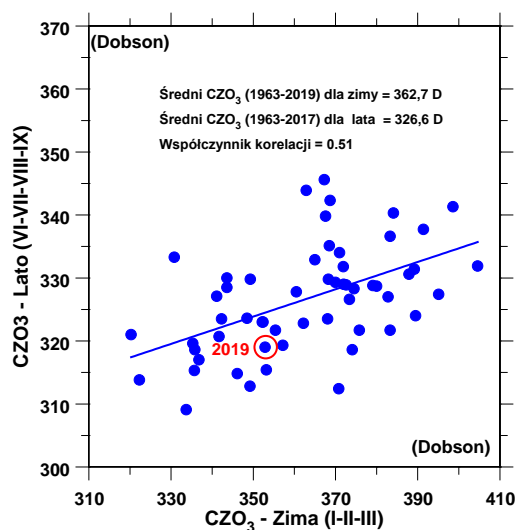
Analizując długookresowe zmiany średnich sezonowych  $\text{CZO}_3$  w Belsku (krzywe o kolorze czerwonym na Rys.4 reprezentujące wygładzone metodą lokalnej regresji przebiegi średnich sezonowych) można stwierdzić, że od połowy lat 90-tych XX wieku następuje zmiana kierunku trendu w średnich sezonowych i w średniej rocznej  $\text{CZO}_3$ . Wyraźna spadkowa tendencja, która pojawiła się z końcem lat 70-tych została zatrzymana około 1996 r. Od tego momentu obserwuje się niewielką (statystycznie nieistotną) wzrostową tendencję w średnich rocznych  $\text{CZO}_3$ , a także w zimowych i wiosennych średnich wartościach  $\text{CZO}_3$ . Na początku XXI wieku powyższa tendencja zostaje zahamowana. W

ostatnich latach wydaje się, że średnie wartości  $\text{CZO}_3$  oscylują wokół pewnego ustalonego poziomu bez wyraźnego trendu, a w okresie jesiennym po 2010 r. pojawia się słaba tendencja wzrostowa. W 2019 r. średnia  $\text{CZO}_3$  dla sezonu letniego (319 D) była około 2,4% niższa niż wieloletnia norma (327 D) dla tego okresu. W tej sytuacji przy braku zachmurzenia poziom promieniowania UV-B przy powierzchni Ziemi był nieznacznie wyższy (około 3%) niż wieloletnia norma. Typowe wartości  $\text{CZO}_3$  w sezonie letnim wskazują, że wcześniej w sezonie zimowym nie obserwowano wartości  $\text{CZO}_3$  znacznie poniżej wieloletniej (1963-2018) normy (Rys.5). W 2019 r. powyższa zimowa średnia wynosiła 353 D około 2,8% poniżej wieloletniej normy (363 D). Wystąpienie zimą wartości  $\text{CZO}_3$  znacznie poniżej wieloletniej normy jest sygnałem osłabienia wielkoskalowej komórki cyrkulacyjnej w stratosferze prowadzącej do wymiany masy powietrza między równikiem a biegunem północnym (tzw. cyrkulacji Brewera-Dobsona), która w zimie powoduje akumulację ozonu w średnich i wysokich szerokościach geograficznych. Niedobory  $\text{CZO}_3$ , które wystąpiły w okresie zimowym nie zostaną w późniejszych miesiącach zlikwidowane, gdyż niskie wartości  $\text{CZO}_3$  pojawiają się w skali całej półkuli poza strefą równikową.



Rys. 4. Średnie sezonowe całkowitej zawartości ozonu uzyskane z pomiarów spektrofotometrem Dobsona w COG IGF PAN, Belsk, w okresie 1963-2019.



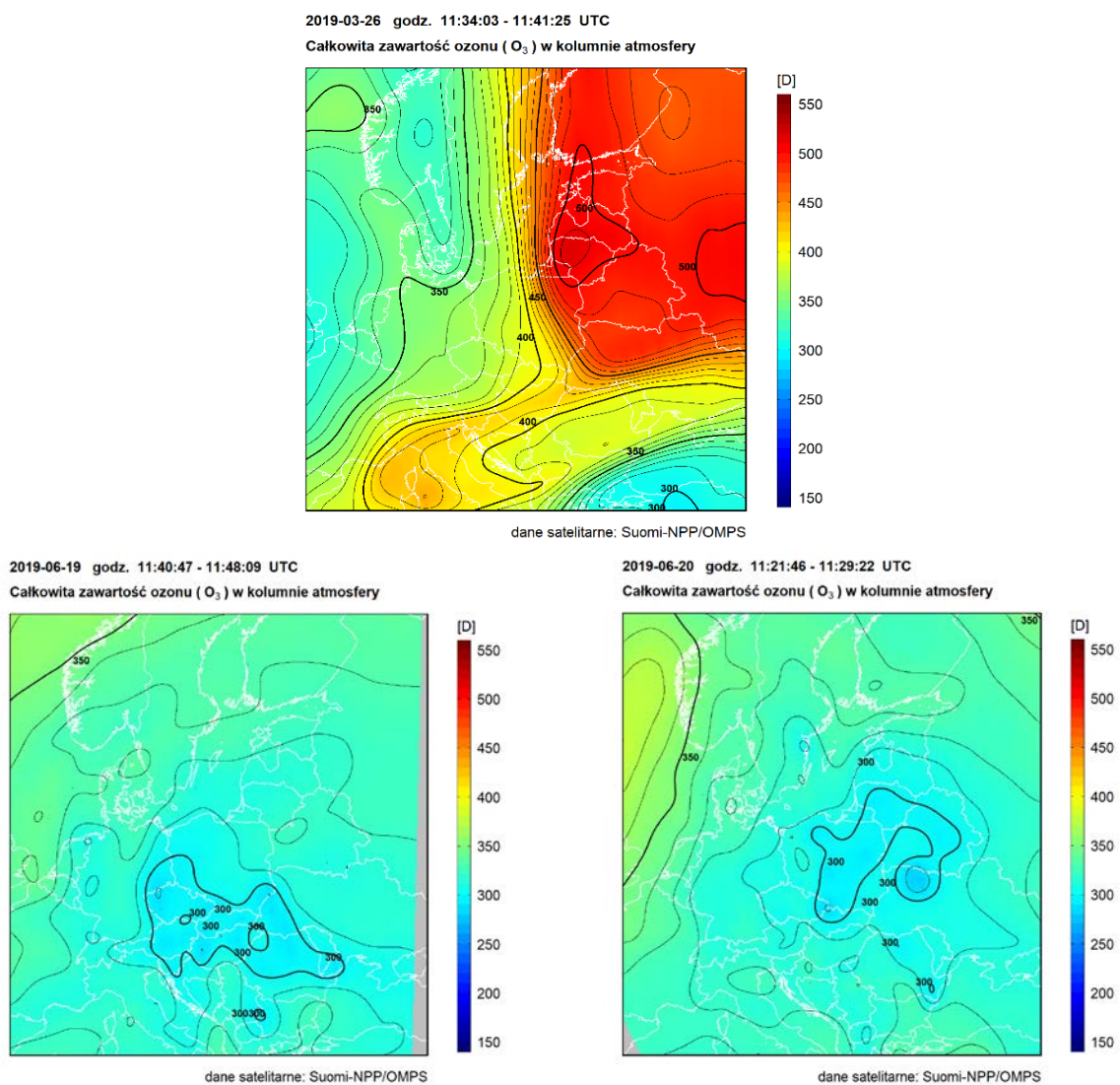


Rys. 5. Średnia całkowitej zawartości ozonu w Belsku w sezonie letnim (czerwiec-lipiec-sierpień-wrzesień) w funkcji średniej w poprzedzającym sezonie zimowym (styczeń-luty-marzec). Czerwony punkt oznacza wartości w 2019 r.

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. W związku z tym oczekiwano zatrzymania, a następnie odwrócenia spadkowej tendencji w zawartości ozonu w atmosferze.

Satelitarny monitoring całkowitej zawartości ozonu realizowany w Dziale Teledetekcji Satelitarnej IMGW-PIB, w 2019 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 Zakładzie Teledetekcji Satelitarnej 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. Na Rys.6 przedstawiono przykładowe

rozkłady całkowitej zawartości ozonu: z dnia 26 marca 2019 pokazujący duże zróżnicowanie pola całkowitej zawartości ozonu nad Europą Środkową związane z cyrkulacją powietrza oraz z dni 19 i 20 czerwca 2019 pokazujące ujemne anomalie całkowitej zawartości ozonu nad Polską.



Rys. 6. Całkowita zawartość ozonu (D) w dniach 26 marca oraz 19 i 20 czerwca 2019 r., wyznaczona z danych OMPS/SNPP.

### Pionowy rozkład ozonu

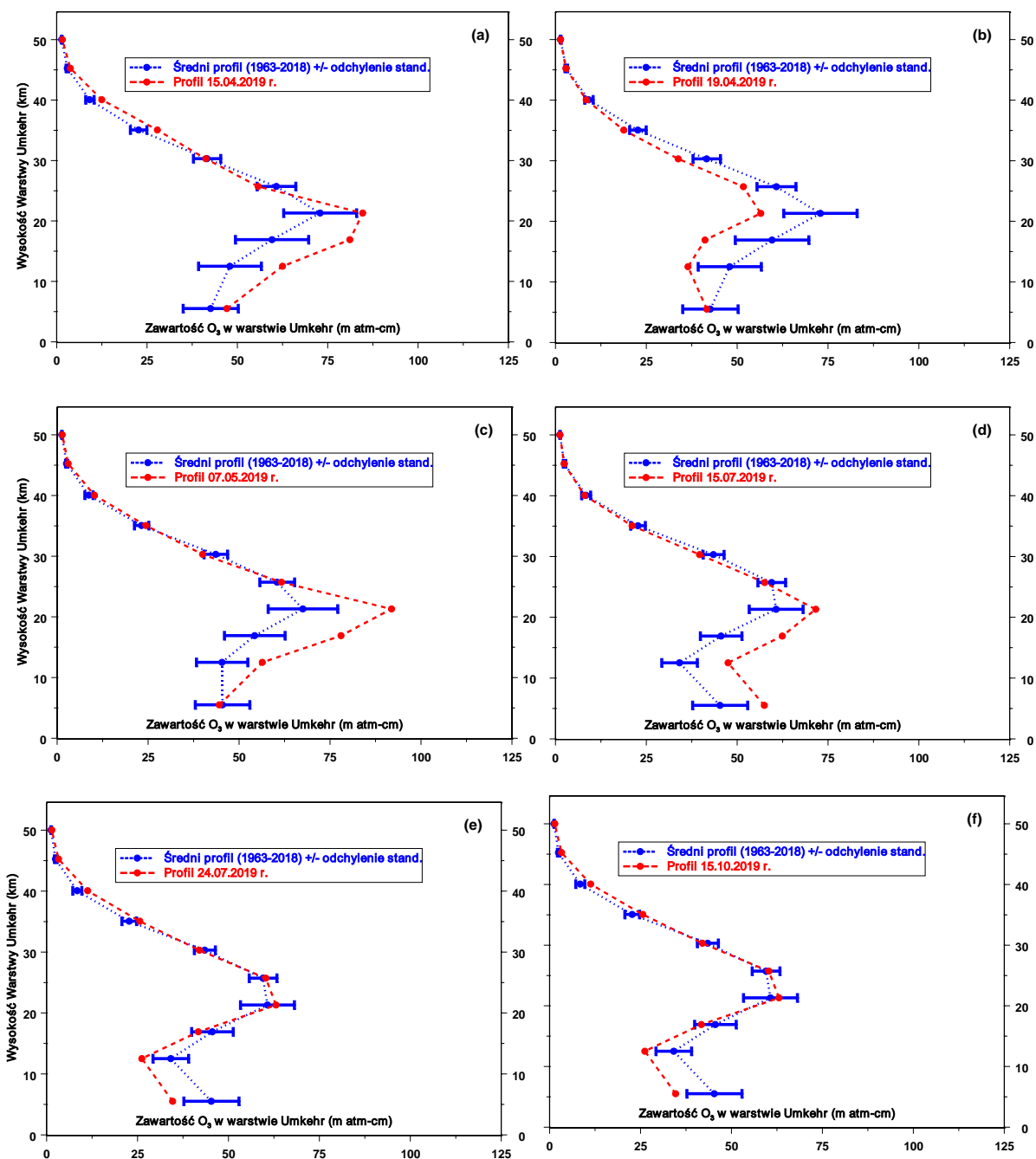
Serie pomiarów wykonywanych w świetle rozproszonym pochodzącym z niezachmurzonego zenitu przy odległościach zenitalnych Słońca  $60^{\circ}$  –  $90^{\circ}$  umożliwiają wyznaczenie rozkładu pionowego ozonu tzw. metodą Umkehr. Wyniki pomiarów z tych serii,

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 2019 roku wykonano 147 serii pomiarowych przy pomocy spektrofotometru Dobsona pozwalających wyznaczyć pionowy rozkład ozonu metodą Umkehr (w tym 32 pomiarów zwanych „krótki Umkehr”).

Na Rys.7 przedstawiono interesujące przykłady zmian zawartości ozonu w poszczególnych umkehrskich warstwach atmosfery. Jak widać zmiany te w odniesieniu do średniej wieloletniej 1963-2018 (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.7 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.

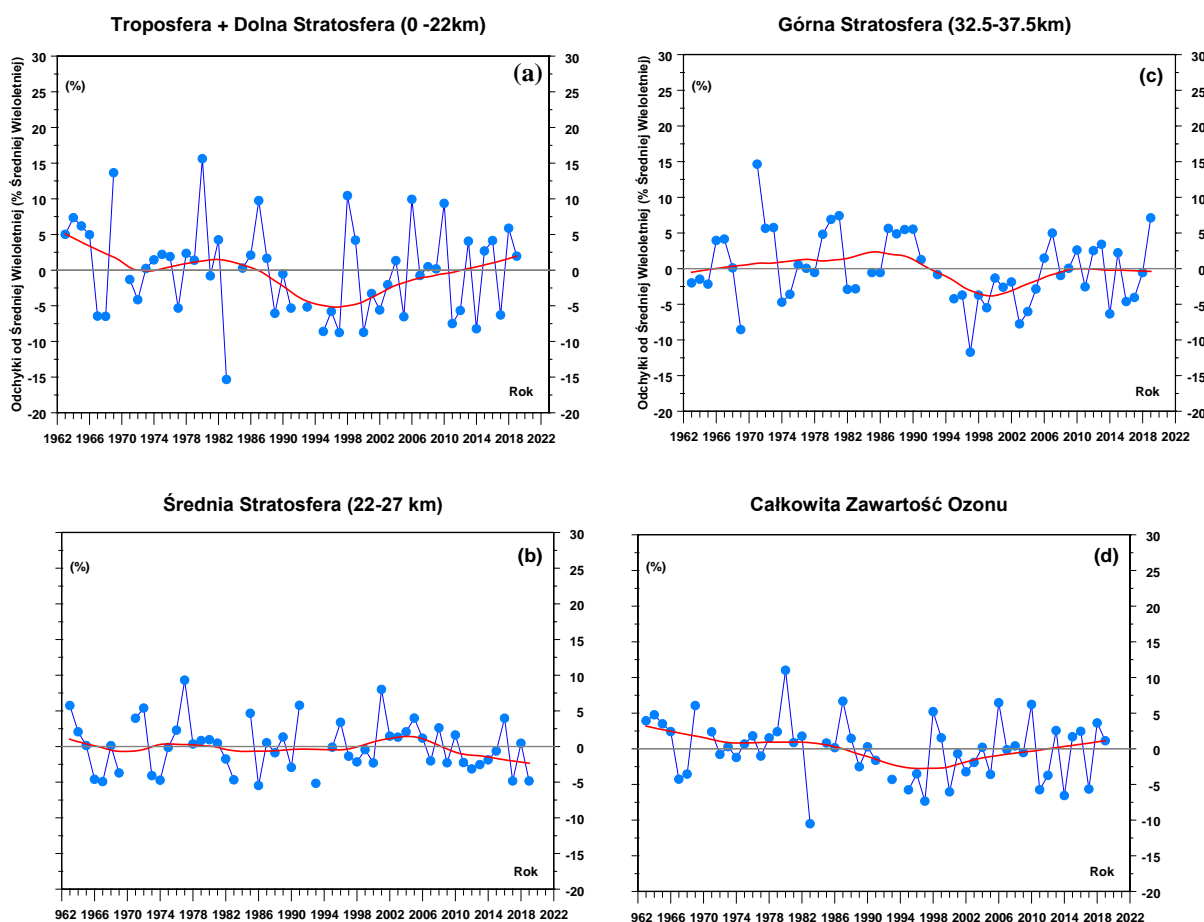
Należy dodać, że zmiany profilu ozonu przy ustalonej całkowitej zawartości ozonu są jednym z czynników wpływających na wielkość natężenia promieniowania UV-B docierającego do powierzchni Ziemi. Dane ozonowe ze stacji dysponującymi długimi, ciągłymi i wiarygodnymi seriami pomiarowymi są szczególnie cenne 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. 7. Pionowy profil O<sub>3</sub> dla wybranych dni w 2019 r. wyznaczony z pomiarów Umkehr spektrofotometrem Dobsona z zastosowaniem algorytmu obliczeniowego *UMK04*.

Obecnie w literaturze światowej toczy się dyskusja nad tempem powrotu warstwy ozonowej do stanu nie zaburzonego działalnością człowieka. W seriach czasowych całkowitej zawartości ozonu w atmosferze i na wybranych poziomach w stratosferze poszukiwana jest zmiana kierunku trendu z ujemnego na dodatni, którą należałoby oczekiwać wraz z

obserwowanym spadkiem zawartości w troposferze i stratosferze substancji niszczących warstwę ozonową. Badanie zmienności trendu w profilu pionowym ozonu jest szczególnie interesujące bowiem uważa się, że naprawa warstwy ozonowej rozpocznie się od obszarów w wysokiej stratosferze, gdzie zmiany w procesach chemicznej destrukcji ozonu są najłatwiejsze do zaobserwowania, wobec ograniczonego wpływu zmian w dynamice atmosfery i jej składzie chemicznym (np. wzrost  $\text{CO}_2$ ) na koncentrację ozonu na tych wysokościach (Newchurch i inni, 2003).



Rys. 8. Odchyłki średnich wiosennych (marzec-kwiecień-maj) od średniej wieloletniej zawartości ozonu w wybranych warstwach atmosfery z pomiarów Umkehr spektrofotometrem Dobsona w Belsku (1963-2019). Profil ozonu wyznaczono stosując algorytm *UMK04*. (a) troposfera i dolna stratosfera 0-22km, (b) średnia stratosfera 22-27km, (c) wysoka stratosfera 32,5-37,5 km, (d) cała kolumna atmosfery

Na Rys.8. 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

spektrofotometrem Dobsona w Belsku. Profile ozonu na Rys.8 uzyskano stosując nową udoskonaloną procedurę wyznaczania rozkładu pionowego ozonu metodą Umkehr, *UMK04*, która jest zalecana przez Centrum Danych Ozonowych w Toronto (Kanada). Długookresowa zmienność ozonu w wybranych warstwach atmosfery wyznaczona przy użyciu „starego” algorytmu, *UMK92*, jest praktycznie taka sama jak ta uzyskana z zastosowaniem „nowego” algorytmu. Stanowi to potwierdzenie wyznaczonego kierunku zmian zawartości ozonu w tych warstwach.

Przebiegi wygładzonych zmian zawartości ozonu w sezonach wiosennych (1963-2019) w wybranych warstwach atmosfery wskazują na wzrostową tendencję od połowy lat 90-tych XX w zawartości ozonu w całej kolumnie atmosfery (Rys.8.d), w warstwach 0-22km (troposfera i dolna stratosfera, Rys.8.a) i 32,5-37,5km (górną stratosferę, Rys 8.c). W średniej stratosferze (22-27km – Rys.8.b) przez cały okres pomiarowy zawartość ozonu oscyluje wokół ustalonego poziomu bez wyraźnego trendu, ale od około 2005 pojawia się spadkowa tendencja. W sezonie wiosennym 2019 r. w dolnej i wysokiej stratosferze i w całej kolumnie atmosfery zanotowano zawartości ozonu powyżej normy. Natomiast w średniej stratosferze zaobserwowano zawartość ozonu poniżej normy. W ostatnich latach obserwowana jest stabilizacja poziomu ozonu. Taka tendencja nie jest jeszcze utrwalona i dodanie kolejnych wyników pomiarów w następnych latach może wygenerować trend. W sprawozdaniu z 2016 r. dyskutowano, że w warstwie obejmującej dolną stratosferę i troposferę istnieje 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 następnego roku (2019) przywróciło poprzedni wzrostowy trend widoczny wcześniej w wygładzonych danych do 2016 r. Ponieważ o zmienności ozonu w wysokich warstwach atmosfery decydują przede wszystkim procesy chemiczne, więc wzrostowy trend w tych warstwach byłby potwierdzeniem skuteczności ograniczeń w produkcji substancji niszczących warstwę ozonową, które wprowadził Protokół Montrealski z 1987 r. i jego późniejsze poprawki. Jednak w ostatnich latach nie widać kontynuacji dodatniego trendu w wysokich warstwach atmosfery, a raczej stabilizację od około 2005 r. (patrz Rys.8.c), co może sugerować pojawienie się w tej warstwie atmosfery substancji chemicznych niszczących warstwę ozonową, które nie są kontrolowane przez Protokół Montrealski i późniejsze poprawki.

W 2019 roku na Stacji Pomiarów Aerologicznych IMGW-PIB w Legionowie kontynuowano systematyczne sondaże ozonowe rozpoczęte w 1979 roku. Rutynowo w każdą środę w terminie 12UT uzyskiwany jest profil ozonu z użyciem elektrochemicznej sondy

ozonowej, unoszonej w powietrzu przez balon meteorologiczny do maksymalnej wysokości 35km. Do analiz wykorzystywane są sondáže ozonowe ze współczynnikiem korekcji Dobsona CF w zakresie 0,9-1,15.

W średnich miesięcznych zawartościach ozonu nad Legionowem w 2019 roku odnotowano istotne odchylenia od uśrednionego przebiegu wieloletniego. W warstwie maksymalnej koncentracji ozonu (18-24km, 70/30hPa) spadki ozonu wystąpiły w czerwcu, a nie jak zwykle na wiosnę. Na niższych wysokościach w stratosferze (9-15km, 300/100hPa) ujemne anomalie pojawiły się w lutym, czerwcu i październiku. Mimo tego średnia roczna zawartość ozonu w stratosferze w 2019 roku pozostawała w granicach naturalnej wieloletniej zmienności ozonu.

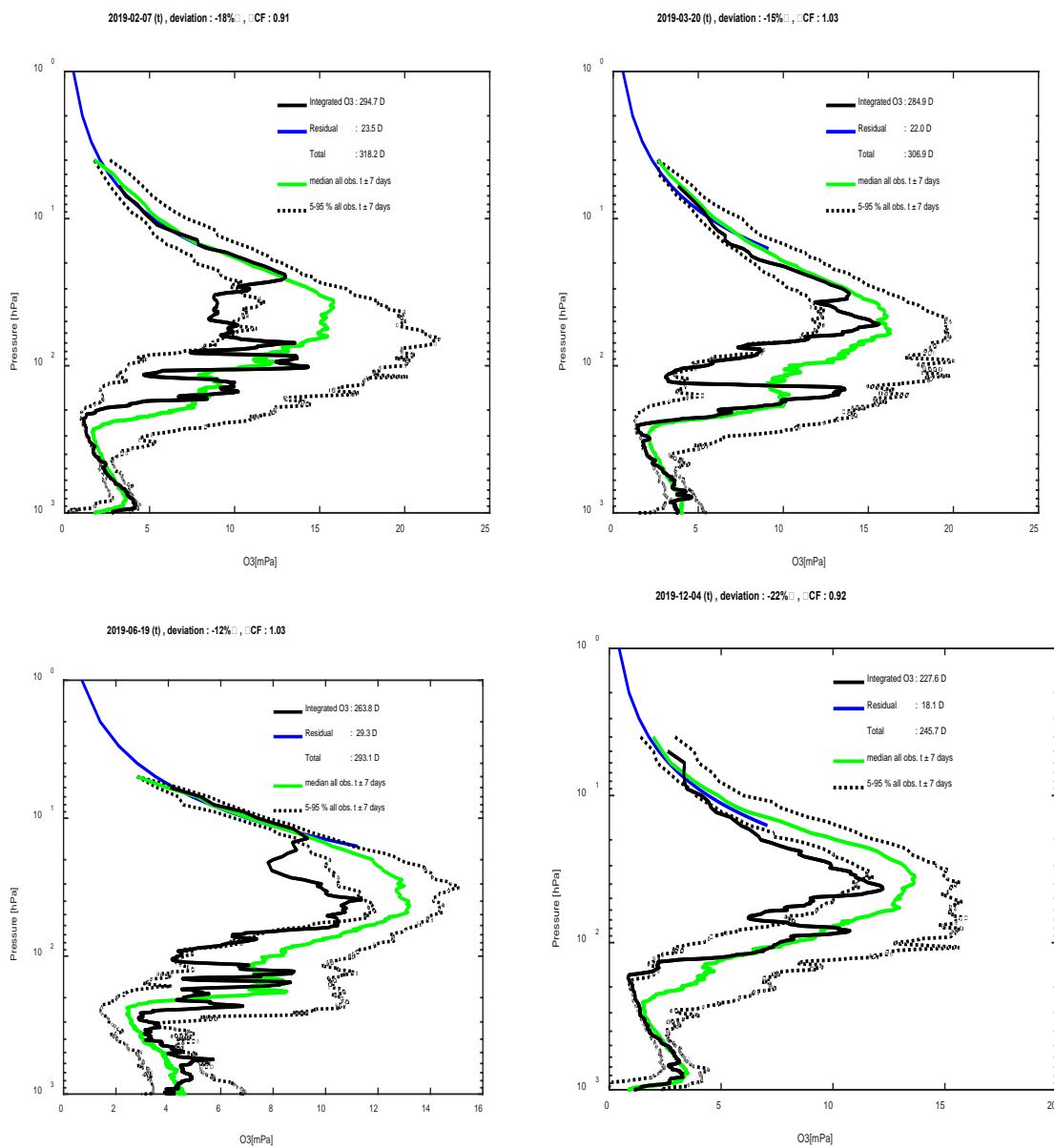
W 2019 roku epizody dużych spadków ozonu w stratosferze nad Legionowem wystąpiły we wszystkich sezonach (Rys. 9). Zasięg przestrzenny anomalii ozonu nad Polską i Europą w wybranych dniach obrazują procentowe odchylenia całkowitej zawartości ozonu nad półkulą północną, obliczone na podstawie danych satelitarnych GOME-2 i obserwacji naziemnych (Rys. 10). Do analizy źródła pochodzenia niedoborów ozonu nad Polską i Europą wykorzystano model HYSPLIT. Obliczono wsteczne trajektorie cząstek powietrza, kończące się w rejonie anomalii (Rys. 11).

7 lutego obniżona koncentracja ozonu w warstwie maksimum (Rys. 9) była wynikiem transportu powietrza unoszonego ze zwrotnikowej części Oceanu Spokojnego (Rys. 11). Wzrost temperatury potencjalnej na trajektoriach oznacza, że miało miejsce nie-izentropowe mieszanie powietrza o naturalnie niskiej koncentracji ozonu subtropikalnego z powietrzem o wyższym stężeniu ozonu w wyższych szerokościach geograficznych.

20 marca obserwowano niedobory ozonu w średniej stratosferze, na skraju wiru polarnego przemieszczonego znaną Arktyki. Podczas zimy 2018/19 na półkuli północnej, poza krótkim okresem w grudniu, minimalne temperatury w stratosferze na powierzchni 50hPa utrzymywały cały czas powyżej progu formowania PSC (Rys. 12). To wykluczyło w zasadzie możliwość niszczenia ozonu w dolnej stratosferze z udziałem związków chloru. Co zatem mogło być powodem spadku ozonu w stratosferze nad Legionowem? (Rys. 9). Odpowiedź dają badania Sagi i in. (2017). Na podstawie wieloletnich (2002-2013) obserwacji Odin/SMR wykazano, że ozon jest niszczonej w średniej stratosferze, w fotochemicznym cyklu z tlenkami azotu. Głównym źródłem  $\text{NO}_x$  w stratosferze jest produkcja NO przez reakcję  $\text{N}_2\text{O}$  ze wzbudzonym atomem tlenu  $\text{O}(^1\text{D})$ , która pojawia się w niskich i umiarkowanych szerokościach geograficznych na wysokości około 30km (Brasseur i Solomon, 2005).

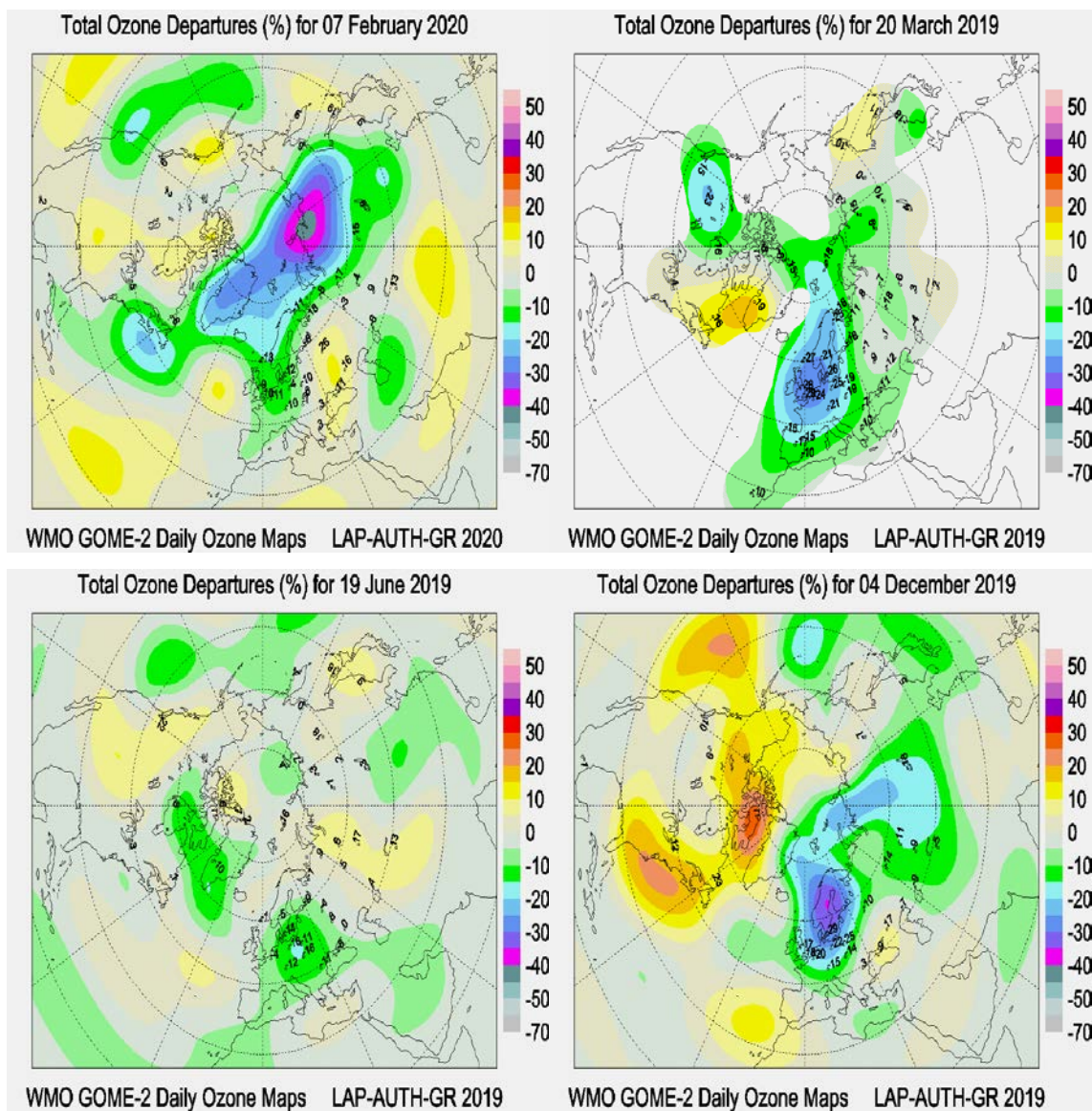
Niszczenie ozonu powodowane przez  $\text{NO}_x$  może się rozpoczynać jeszcze w czasie zimy i/lub na wiosnę, kiedy słabnie wir polarny.

19 czerwca obserwowano obniżone koncentracje ozonu w średniej stratosferze (Rys. 9). Źródłem masy dla tego ubytku był rejon kanadyjskiej Arktyki (Rys. 11). Na niższych wysokościach w warstwie UTLS transport naturalnie niskich koncentracji ozonu w powietrzu uniesionym z dolnej atmosfery ze zwrotnikowej części Oceanu Atlantyckiego. Sumowanie ubytków ozonu na różnych wysokościach w stratosferze może stanowić zagrożenie wysokim poziomem promieniowania UV-B, tym bardziej jeśli występuje u progu lata.



Rys. 9. Sondáže w Legionowie z ubytkami ozonu w stratosferze w 2019 roku.

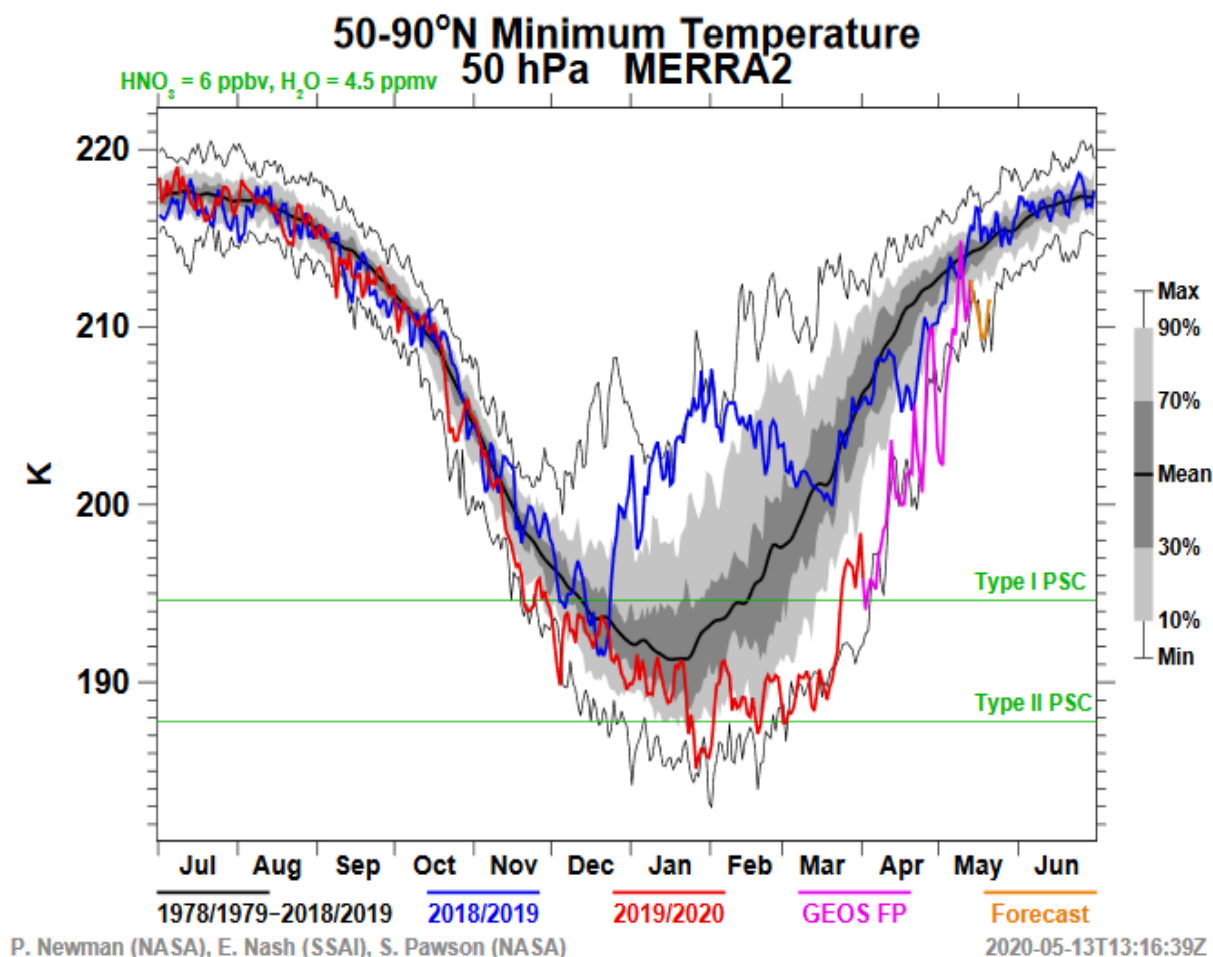




Rys. 10. Procentowe odchylenia całkowitej zawartości ozonu nad półkulą północną, od odpowiednich średnich miesięcznych wieloletnich nad półkulą północną, na podstawie danych satelitarnych GOME-2 i obserwacji naziemnych

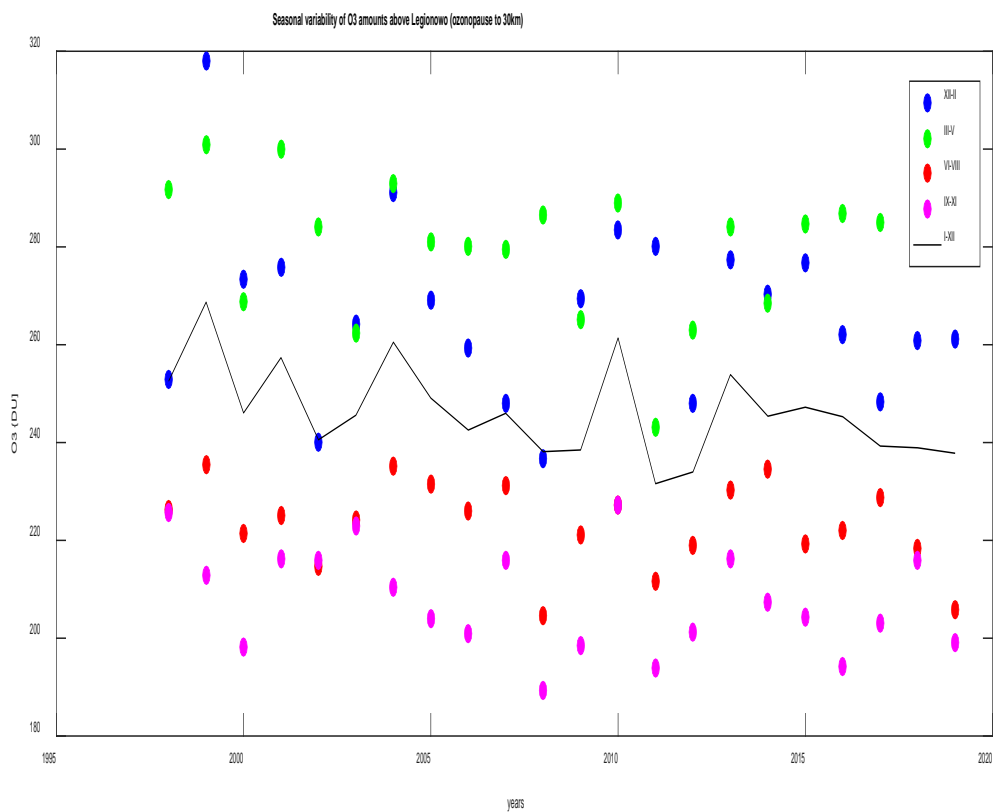


Podczas ostatniej zimy (2019/2020) w stratosferze na półkuli północnej panowały wyjątkowe warunki meteorologiczne. Ekstremalnie niskie temperatury (Rys. 12) stwarzały dogodne warunki do katalitycznego rozpadu ozonu we wnętrzu wiru polarnego. 4 grudnia 2019 r. chłodne powietrze nad Legionowem na wysokości 25km przemieszczało się na trajektorii wstecznej w oświetlonych rejonach (Rys. 11). Nad Skandynawią anomalia  $\text{CZO}_3$  była znacznie większa niż nad Polską (Rys. 10). Ponad 30% ubytek  $\text{CZO}_3$  w centrum anomalii połączony był z ekstremalnie niską temperaturą (184K) na wysokości 25km (Rys 11). Poniżej granicznej wartości 185K mogą się formować lodowe polarne chmury stratosferyczne PSC (Rys 12). Duża ilość chloru gromadząca się na powierzchniach lodowych kryształów PSC prowadzi do szybkiej destrukcji ozonu. Podczas zimy 2019/2020 w stratosferze na półkuli północnej powstały warunki meteorologiczne podobne do tych, które co roku prowadzą do powstawania wiosennej dziury ozonowej nad Antarktydą.



Rys. 12. Najniższe temperatury w stratosferze nad półkulą północną na północ od 50 równoleżnika na powierzchni 50hPa; kolor niebieski w sezonie zimowym 2018/2019, czerwony – 2019/2020.

## Tendencje zmian zawartości ozonu w stratosferze nad Legionowem



Rys. 13. Sezonowa zmienność zawartości ozonu stratosferze do wysokości 30km w okresie spadku ilości substancji niszczącej warstwę ozonową

Niekontrolowana przez kilkadziesiąt lat antropogeniczna emisja związków CFC (freony) i halonów doprowadziła do powstawania wiosennej dziury ozonowej nad Antarktydą, każdego roku od wczesnych lat 80 XX w., i mniejszych ubytków ozonu w niższych szerokościach geograficznych. W wyniku działań Protokołu montrealskiego z 1987 roku i jego uzupełnień w kolejnych latach efektywne nasycenie atmosfery substancjami niszczącymi związkami chloru w umiarkowanych szerokościach geograficznych stopniowo spada od ostatnich lat XX w. Po latach dużych spadków ozonu w Polsce i na świecie oczekiwana jest zmiana kierunku trendu  $CO_3$ . Zawartość ozonu w stratosferze można obliczyć wykorzystując pojęcie tropopauzy chemicznej (ozonopauzy). Ozonopauza stanowi dolną granicę bogatego w ozon powietrza stratosferycznego, ze stosunkiem mieszania ozon/powietrze powyżej 100ppbv. W pracy do obliczenia poziom ozonopauzy wykorzystano definicję Bethan i in. (1996). Do zbadania tendencji zmian zawartości ozonu w stratosferze nad Legionowem obliczono scałkowaną zawartość ozonu w sondażach od poziomu ozonopauzy do wysokości 30km. Ograniczenie do tej wysokości jest uzasadnione, ponieważ

wyżej błąd pomiaru ozonu w sondażu rośnie powyżej 10 procent. Zmienność sezonowych zawartości ozonu w stratosferze nad Legionowem przedstawiono na Rys. 13. Wyznaczony metodą liniowej regresji trend zawartości ozonu w stratosferze, w okresie spadku ilości substancji niszczących warstwę ozonową (1998-2019), jest nieistotny statystycznie. W ostatnich latach obserwuje się stabilizację poziomu zawartości ozonu w stratosferze nad Polską.

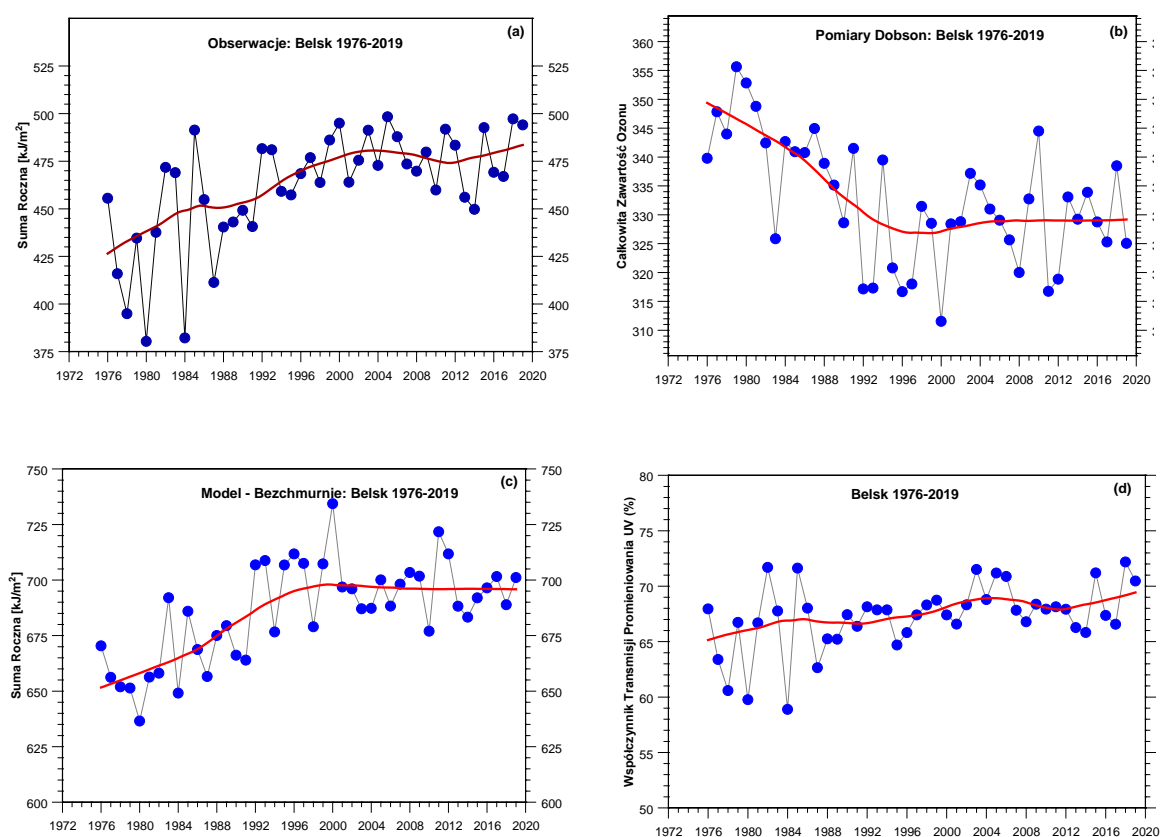
### **Promieniowanie UV-B**

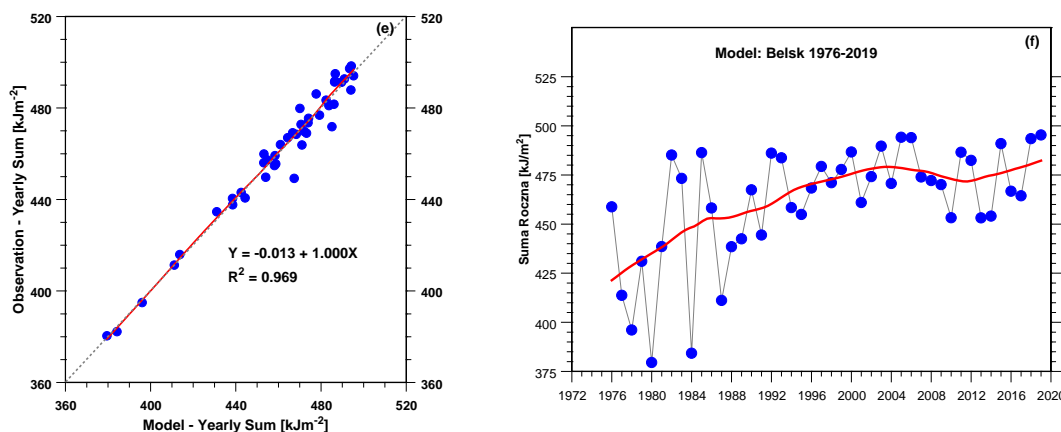
W Belsku monitoring promieniowania UV-B o skuteczności rumieniowej prowadzony jest od 1976 r. z zastosowaniem różnych modeli szerokopasmowych biometrów: Robertson-Berger (1976-1994), Solar Light (1992-2014), Kipp @ Zonen (2006-2019). Seria czasowa w ubiegłych latach, także i w 2019 r., została poddana 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 zastosowaniem 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 promieniowania UV-B w Belsku w latach 1976-2000 i późniejszą stabilizację (brak trendu). W XXI wieku dawki roczne oscylują wokół poziomu  $470 \text{ kJ/m}^2$  (patrz czerwona linia na Rys.14.a). W 2019 r suma roczna wyniosła  $494 \text{ kJ/m}^2$  i była jedną z najwyższych w historii pomiarów UV-B w Belsku.

Wpływ zmian ozonu na długookresowe zmiany w napromienieniu UV-B wyznaczono z hipotetycznych sum rocznych dziennych dawek rumieniowych przy braku zachmurzenia i ustalonej grubości optycznej aerozolu (GOA) dla długości fali 340nm. Sumy roczne uzyskano z symulowanych 5-minutowych natężeń erytemalnych z modelu transferu promieniowania słonecznego w atmosferze wykorzystującego jako parametry wejściowe średnie dzienne  $\text{CZO}_3$  (zmierzone spektrofotometrem Dobsona, (Rys.14.b) i  $\text{GOA}=0,34$  (dla 340nm), co opowiadało wieloletniej (2010-2019) średniej rocznej wyznaczonej z pomiarów spektrofotometrem CIMEL działającym w Belsku w ramach sieci AERONET. Wygładzony przebieg sum rocznych dla warunków bezchmurnych wskazuje na stopniowy wzrost

promieniowania do 1996 r., a następnie brak trendu (patrz czerwona linia na Rys. 14.c). Taki przebieg jest zwierciadlanym odbiciem trendu CZO<sub>3</sub>.

Wpływ długookresowych łącznych zmian w zachmurzeniu i GOA na sumy roczne dziennych dawek rumieniowych określono z przebiegu współczynnika Transmisji Promieniowania UV łącznie przez chmury i aerozol,  $TPUV_{Ch \& Ae}$ , który definiujemy jako stosunek zmierzonych dawek do modelowanych dla hipotetycznych bezchmurnych warunków i ustalonej GOA (0,34 dla fali 340nm) na poziomie średniej wieloletniej 2010-2019 (Rys.14.d). Współczynnik transmisji promieniowania UV stopniowo wzrasta od ~65% na początku serii do ~69% na końcu serii pomiarowej. Chmury i aerozol w okresie 1976-2019 w coraz mniejszym stopniu osłabiały promieniowanie UV docierające do powierzchni Ziemi.





Rys.14. Obserwowane i modelowane sumy roczne dziennych dawek promieniowania rumieniowego w Belsku w latach 1976-2019 i roczna zmiana czynników wpływających na UV: (a) zmierzone sumy roczne, (b) całkowita zawartość ozonu, (c) modelowana suma roczna dla dni bezchmurnych przy stałej wartości grubości optycznej aerozolu, (d) współczynnik transmisji promieniowania UV na powierzchni Ziemi w wyniku łącznego osłabienia promieniowania przez chmury i aerozol, (e) obserwowane sumy roczne jako funkcja modelowanych stosując regresję liniową sum rocznych od  $TO_3$  (Rys.14.b) i  $TPUV_{Ch \& Ae}$  (Rys.14.d), (f) modelowana suma roczna dla dowolnego stanu zachmurzenia.

Udział zmian  $TO_3$  w trendzie UV można oszacować korzystając z równania regresji obserwowanych sum rocznych od  $TO_3$  i  $TPUV_{Ch \& Ae}$ :

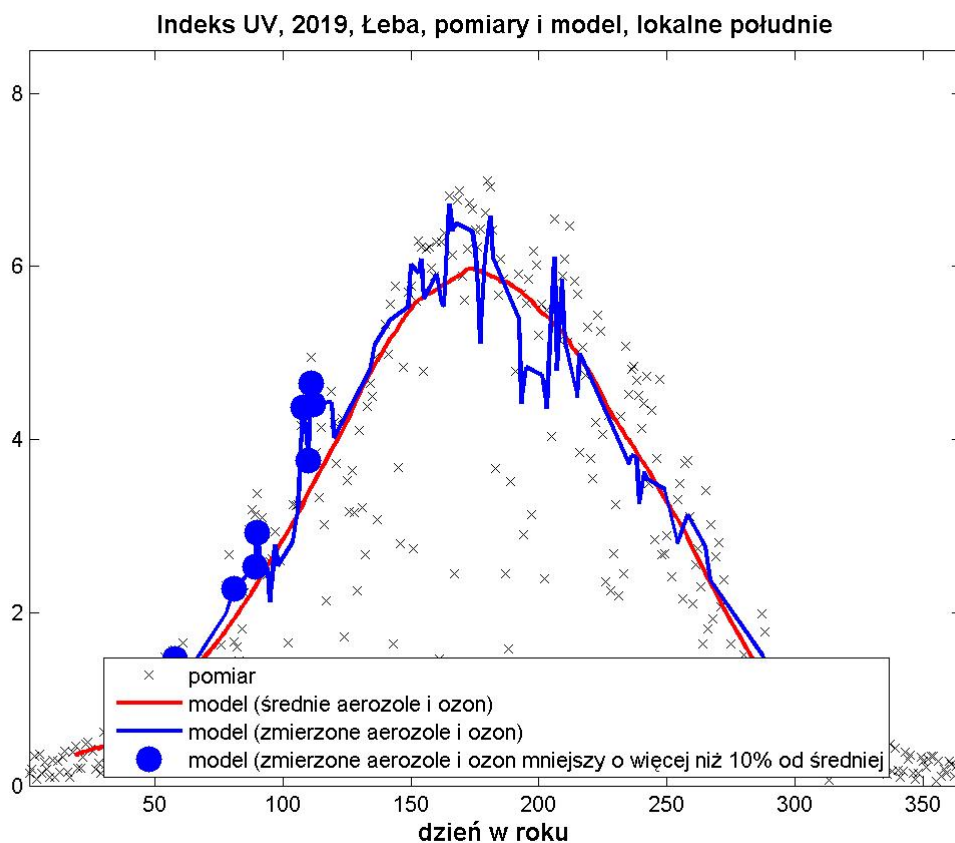
$$UV_{Reg} [kJm^{-2}] = 312,827 + 7,855 TPUV_{Ch \& Ae} [\%] - 1,1414 TO_3[D],$$

która wyjaśnia aż 96,9% zmienności wariancji w sumach rocznych (Rys.14.e). Porównując przebiegi sum rocznych obserwowane (Rys.14.a) z modelowanymi na podstawie powyższej regresji (Rys.14.f) można stwierdzić przydatność modelu w obliczeniu wpływu poszczególnych czynników (ozon, chmury & aerozol) na zmiany sum rocznych wynoszące ~12% w latach 1976-2019. Obserwowane w latach 1976-2019 zmniejszenie  $CZO_3$  o 20 D i wzrost  $TPUV_{Ch \& Ae}$  o 4 punkty procentowe prowadziło do wzrostu sum rocznych odpowiednio o 22,8  $kJm^{-2}$  i 31,4  $kJm^{-2}$ . W sumie ta zmiana wyniosła 54,2  $kJm^{-2}$ , co jest zgodne z obserwowaną zmianą, ~52  $kJm^{-2}$ , wyznaczoną na podstawie wygładzonego przebiegu rocznych sum na Rys.14.a (47,7  $kJm^{-2}$  w 2019 r. i 42,5  $kJm^{-2}$  w 1976 r.). Udział zmian  $CZO_3$  we wzroście sum rocznych w okresie 1976-2019 wyniósł więc ~43%. Zmniejszenie  $CZO_3$  prowadziło do wzrostu sum rocznych o 5,3% w stosunku do poziomu z 1976 r. Poziom UV-B w Belsku ustabilizował się w XXI wieku w wyniku łącznego nałożenia się długookresowych zmian ozonu atmosferycznego, aerozolu i zachmurzenia. Wydaje się, że o kierunku trendu promieniowania UV-B w Belsku w najbliższym okresie będą decydować zmiany w zachmurzeniu i aerozolu indukowane zmianami klimatu.

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 2019 roku na stacjach IMGW-PIB obserwowano podwyższone wartości promieniowania UV-B w okresie wczesnej wiosny i lata. Zwiększenie promieniowania na wiosnę można przypisać mniejszej niż średnia wartość ozonu całkowitego, natomiast za letnie ekstrema odpowiada przede wszystkim mniejsza ilość aerozoli.



Rys. 15. Przebiegi roczne Indeksu UV z 2019 roku obliczonego z wykorzystaniem modelu transferu promieniowania słonecznego FastRT dla stacji w Łebie, z wykorzystaniem pomiarów satelitarnych ozonu całkowitego i aerozoli 2005-2018.

Dla 2019 roku maksymalną dawkę miesięczną, 551 MED ( $115,71 \text{ kJ/m}^2$ ) zmierzono w czerwcu dla Legionowa a maksymalną dawkę dobową, 22,7 MED ( $4,77 \text{ kJ/m}^2$ ) dla czerwca w



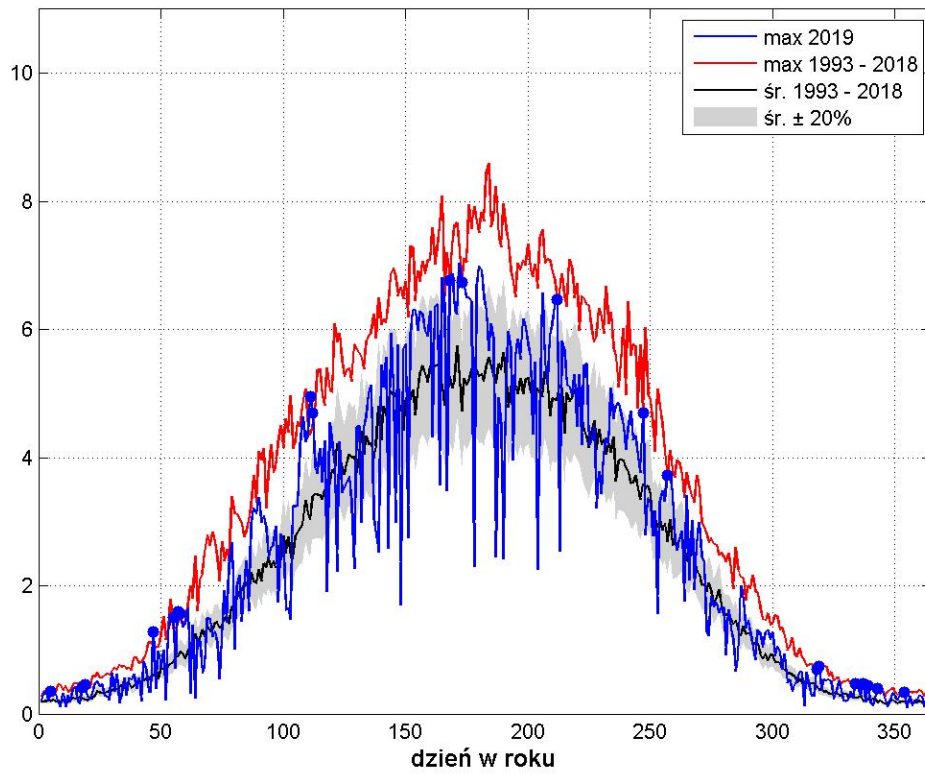
Zakopanem. W czerwcu wystąpiły także maksima miesięczne i maksima dobowe dla Łeby i Zakopanego.

Promieniowanie UV docierające do powierzchni Ziemi potrafi spaść prawie do zera przy bardzo gęstych chmurach a tuż po ich przejściu gwałtownie wzrosnąć. Dawka dzienna, czyli suma dobową promieniowania takiego dnia nie będzie wysoka mimo to, tego dnia można doznać oparzeń słonecznych. Dla uwzględnienia tego zagrożenia wprowadzono definicję Indeksu UV, czyli maksymalnej półgodzinnej wartości promieniowania rumieniowego UV-B w ciągu dnia. Użyte w definicji promieniowanie rumieniowe odpowiada czułości ludzkiej skóry. Gdy Indeks UV wynosi 6, co jest dość typową wartością w ciągu lata w Polsce wystarczy około 40 minut opalania się człowieka ze średnio-wrażliwą skórą, aby wystąpił rumień.

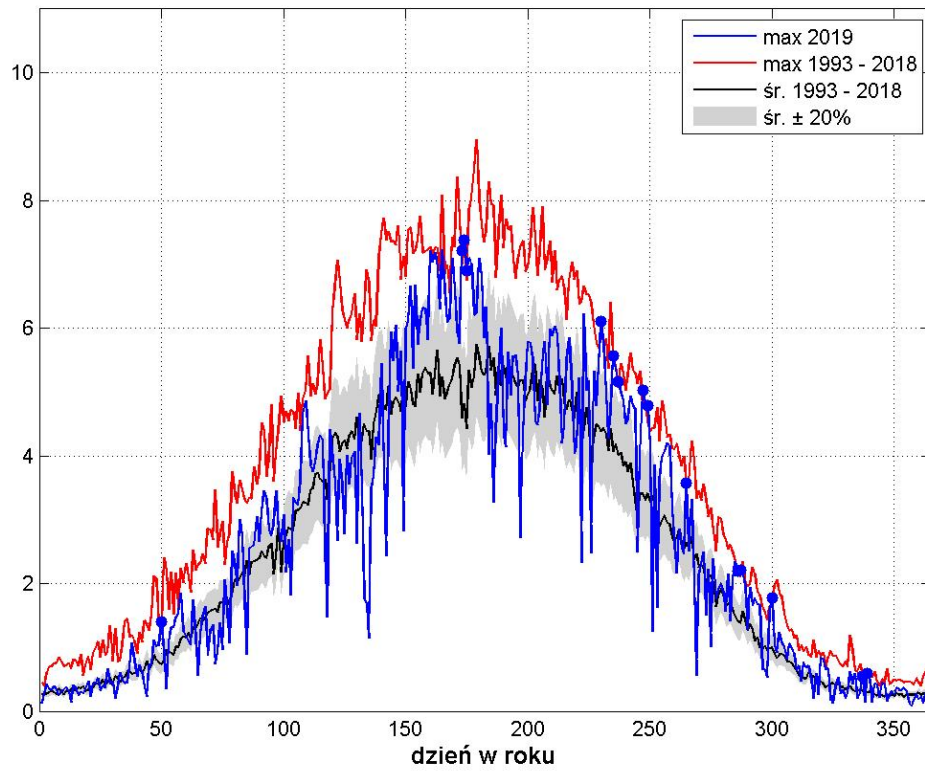
Na Rys.16 przedstawiono przebieg roczny Indeksu UV z 2019 roku na tle średniego oraz maksymalnego Indeksu UV z okresu od 1993 (Zakopane od 1995) do 2018 roku dla każdej ze stacji.

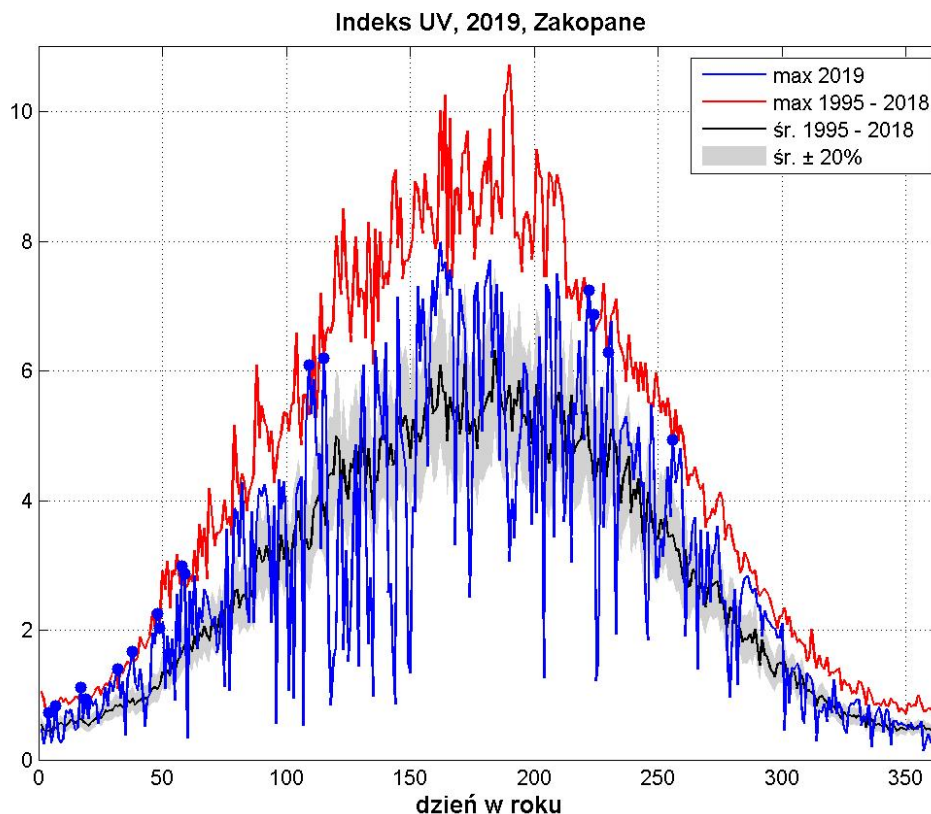
W roku 2019 na wszystkich stacjach obserwowano epizodycznie wartości Indeksu UV zbliżające się do ekstremów wieloletnich w seriach pomiarowych, a nawet je przekraczające. Grupy ekstremalnych wartości Indeksu UV występowały w Łebie w lutym, kwietniu i czerwcu, w Legionowie w czerwcu i sierpniu oraz w Zakopanem w styczniu, lutym, kwietniu i sierpniu.

Indeks UV, 2019, Łeba



Indeks UV, 2019, Legionowo





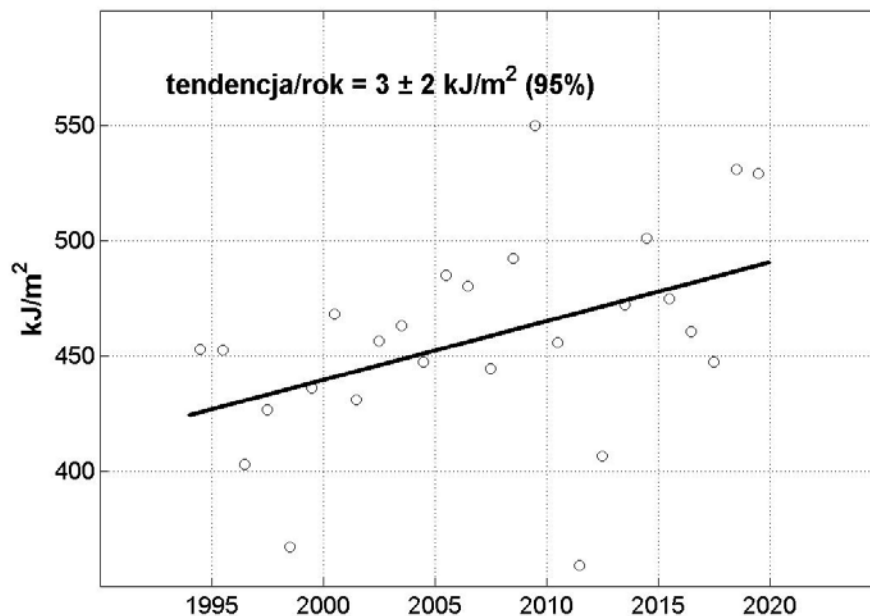
Rys. 16. Przebiegi roczne Indeksu UV z 2019 roku dla stacji w Łebie, Legionowie i Zakopanem na tle średniego oraz maksymalnego Indeksu UV od początku pomiarów do 2019 roku dla każdej stacji. Niebieskie punkty oznaczają ekstremalne wartości w serii dla danego dnia roku zmierzone w 2019 roku.

Regularne kalibracje czujników Solar Light SL501 używanych na stacjach IMGW-PIB zaczęły się około 2005 roku. Wcześniej używano jedynie pomiarów porównawczych z czujnikiem traktowanym jako referencyjny, wzorcowanym podczas porównań międzynarodowych. W przypadku danych z początku serii pomiarowej w latach 90-tych zakładano że nowo-kupione czujniki miały parametry deklarowane przez producenta. Dlatego do analizowania tendencji promieniowania na stacjach niezbędne jest wykonanie tzw. homogenizacji, gdzie skorygowane zostaną dane z początku pomiarów. Dane dla każdego z czujników zostały porównane dla warunków bezchmurnego nieba z promieniowaniem obliczonym z użyciem modelu transferu promieniowania słonecznego Libradtran (Mayer and Kylling 2005), Jako sytuacje bezchmurne przyjęto takie, gdy występowało pełne usłonecznienie uzyskane z równoległe prowadzonych na stacjach pomiarów aktynometrycznych. Do obliczeń użyto dane o ozonie całkowitym i aerozoluach z NASA Goddard Earth Sciences Data and Information Services Centre (GES DISC). Parametry aerozoli zostały przeliczone do zakresu UV-B, 305nm. Na Rys.17a przedstawiono serię

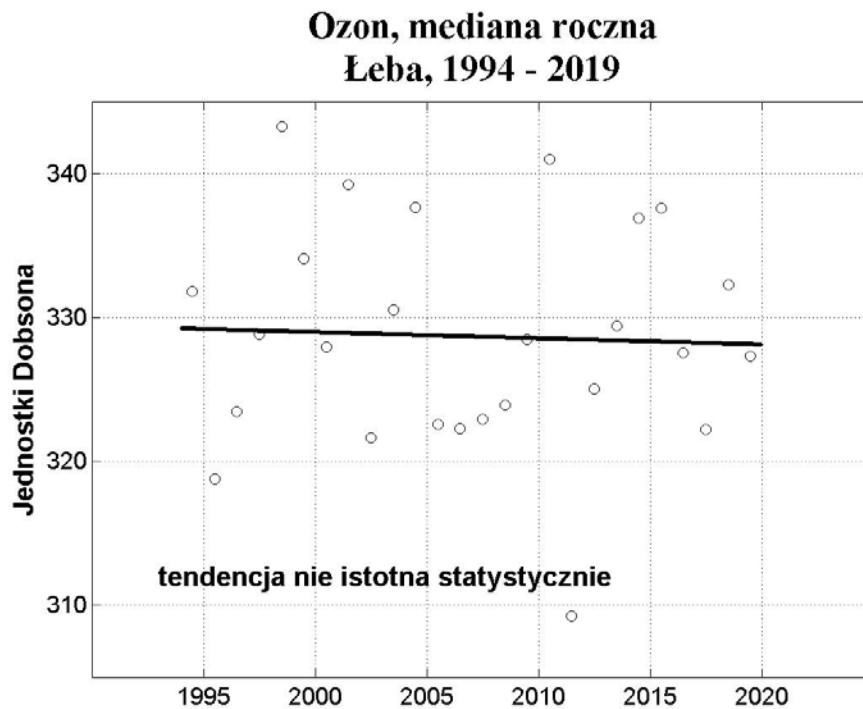
danych po przeliczeniu dla stacji w Łebie. Okazało się, że występuje istotna statystycznie tendencja dodatnia wzrostu dawek rocznych promieniowania erytemalnego UV-B (poziom ufności 95%). Dawki roczne promieniowania zestawiono z medianami rocznymi ozonu całkowitego, Rys.17b i głębokością optyczną aerozoli, Rys.17c. Okazało się, że w analizowanym okresie ozon całkowity nie wykazuje żadnej istotnej statystycznie tendencji w przeciwieństwie do ilości aerozoli, których ilość zmniejszyła się w czasie, co może tłumaczyć wzrost promieniowania UV-B. Dodatkowo, w 2019 roku zmierzono jedną z najwyższych w serii pomiarów w Łebie dawkę roczną: 529 kJ/m<sup>2</sup>.

a)

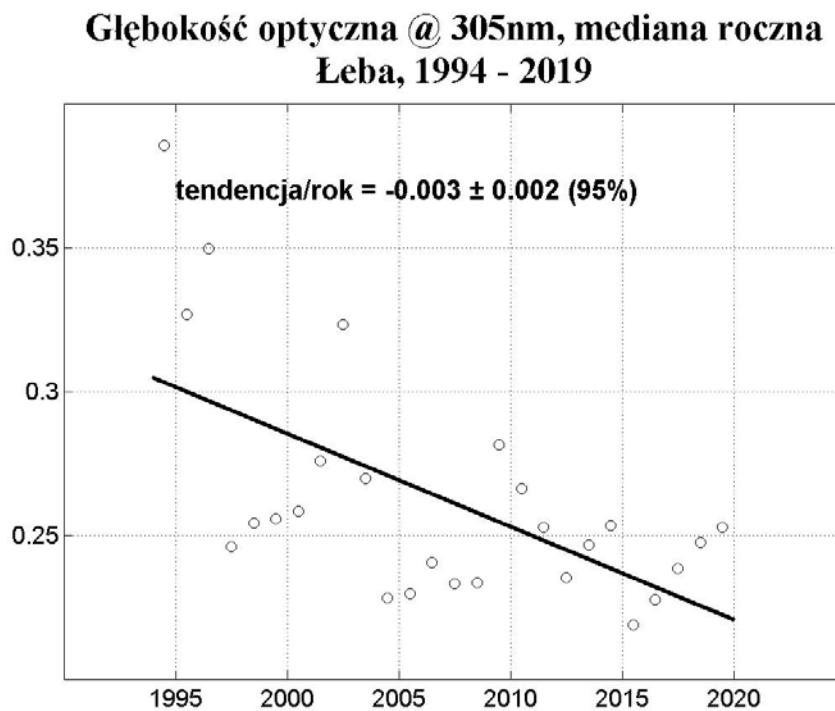
### UV-B erytemalne, suma roczna Łeba, 1994 - 2019



b)



c)



Rys. 16. Seria promieniowania erytemalnego UV-B , mediany ozonu całkowitego i aerozoli dla stacji IMGW-PIB w Łebie z lat 1994 - 2019.

Analiza serii danych erytemalnego promieniowania UV-B ze stacji w Łebie pokazała tendencję wzrostową  $+3 \pm 2$  kJ/m<sup>2</sup> (poziom ufności 95%).

## Podsumowanie

Analiza danych całkowitej zawartości ozonu uzyskanych przy pomocy spektrofotometru Dobsona pokazuje, że w 2019 roku średnie miesięczne wartości całkowitej zawartości ozonu w Belsku były wyższe od średniej wieloletniej z lat 1963-2018 jedynie w maju 1,1% i lipcu 1,7%. W pozostałych miesiącach zaobserwowano ujemne odchylenia średniej miesięcznej całkowitej zawartości ozonu od średniej wieloletniej, od 0,5% w marcu do 7,1% w kwietniu i czerwcu

Występujące ujemne anomalie całkowitej zawartości ozonu nad Polską w 2019 roku zostały wykazane przez satelitarny monitoring ozonu.

W sezonie wiosennym 2019 r. w dolnej i wysokiej stratosferze i w całej kolumnie atmosfery zanotowano zawartości ozonu powyżej normy. Natomiast w średniej stratosferze zaobserwowano zawartość ozonu poniżej normy. W ostatnich latach obserwowana jest stabilizacja poziomu ozonu. Taka tendencja nie jest jeszcze utrwalona i dodanie kolejnych wyników pomiarów w następnych latach może wygenerować trend. W sprawozdaniu z 2016 r. dyskutowano, że w warstwie obejmującej dolną stratosferę i troposferę istnieje 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 następnego roku (2019) przywróciło poprzedni wzrostowy trend widoczny wcześniej w wygładzonych danych do 2016 r. Ponieważ o zmienności ozonu w wysokich warstwach atmosfery decydują przede wszystkim procesy chemiczne, więc wzrostowy trend w tych warstwach byłby potwierdzeniem skuteczności ograniczeń w produkcji substancji niszczących warstwę ozonową, które wprowadził Protokół Montrealski z 1987 r. i jego późniejsze poprawki. Jednak w ostatnich latach nie widać kontynuacji dodatniego trendu w wysokich warstwach atmosfery, a raczej stabilizację od około 2005 r., co może sugerować pojawienie się w tej warstwie atmosfery substancji chemicznych niszczących warstwę ozonową, które nie są kontrolowane przez Protokół Montrealski i późniejsze poprawki.

W średnich miesięcznych zawartościach ozonu nad Legionowem w 2019 roku odnotowano istotne odchylenia od uśrednionego przebiegu wieloletniego. W warstwie maksymalnej koncentracji ozonu (18-24km, 70/30hPa) spadki ozonu wystąpiły w czerwcu, a nie jak zwykle na wiosnę. Na niższych wysokościach w stratosferze (9-15km, 300/100hPa) ujemne anomalie pojawiły się w lutym, czerwcu i w październiku. Mimo tego średnia roczna

zawartość ozonu w stratosferze w 2019 roku pozostawała w granicach naturalnej wieloletniej zmienności ozonu.

W 2019 roku epizody dużych spadków ozonu w stratosferze nad Legionowem wystąpiły we wszystkich sezonach.

W roku 2019 na wszystkich stacjach obserwowano epizodycznie wartości Indeksu UV zbliżające się do ekstremów wieloletnich w seriach pomiarowych, a nawet je przekraczające. Warto podkreślić, że niepokojącym zjawiskiem są epizody letnich ubytków ozonu, np. takie jak w dniach 19-20 czerwca 2019, mające wpływ na bardzo wysokie wartości promieniowania UV-B w tym czasie.

W 2019 roku suma roczna promieniowania UV-B w Belsku wyniosła 494 kJ/m<sup>2</sup> i była jedną z najwyższych w historii pomiarów. Na stacjach IMGW-PIB również zmierzono w roku 2019 jedną z najwyższych w serii pomiarów dawkę roczną, w Łebie wyniosła ona 529 kJ/m<sup>2</sup>.

## Literatura

1. Bethan, S., Vaughan, G., and Reid, S. J.: A comparison of ozone and thermal tropopause heights and the impact of tropopause definition on quantifying the ozone content of the troposphere, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 122, 929-944, 10.1002/qj.49712253207, 1996.
2. Brasseur, G. P. and Solomon, S.: *Aeronomy of the Middle Atmosphere, Chemistry and Physics of the Stratosphere and Mesosphere*, Vol. 32 of *Atmospheric and Oceanographic Sciences Library*, Springer, Dordrecht, the Netherlands, 2005.
3. GES DISC. <http://disc.gsfc.nasa.gov>
4. Mayer B, Kylling A (2005). The libRadtran software package for radiative transfer calculations - description and examples of use *Atmos. Chem. Phys.* 5 1855-1877.
5. 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
6. Sagi K, Pérot K, Murtagh D, and Orsolini Y: Two mechanisms of stratospheric ozone loss in the Northern Hemisphere, studied using data assimilation of Odin/SMR atmospheric observations *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 1791–1803, 2017 [www.atmos-chem-phys.net/17/1791/2017/](http://www.atmos-chem-phys.net/17/1791/2017/) doi:10.5194/acp-17-1791-2017.