



Główny Inspektorat Ochrony Środowiska

**ANALIZA I INTERPRETACJA DANYCH,
OCENA TRENDÓW I SKALI ZJAWISKA W POLSCE
NA TLE GLOBALNYCH ZMIAN WARSTWY OZONOWEJ
W 2018 ROKU
RAPORT SYNTETYCZNY**



Sfinansowano ze środków
Narodowego Funduszu 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, 2019

**ANALIZA I INTERPRETACJA DANYCH,
OCENA TRENDÓW I SKALI ZJAWISKA W POLSCE
NA TLE GLOBALNYCH ZMIAN WARSTWY OZONOWEJ
W 2018 ROKU
RAPORT SYNTETYCZNY**

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

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

Wstęp

Ozon tworzy się głównie w wyniku działania nadfioletowego promieniowania słonecznego; występuje w atmosferze Ziemi od jej powierzchni do wysokości około 100km. Około 90% ozonu w pionowym słupie powietrza w atmosferze znajduje się w stratosferze, a maksimum zawartości ozonu występuje w dolnej części tej warstwy. Średnio w atmosferze znajduje się 8×10^{18} cząsteczek ozonu w słupie powietrza o podstawie 1 cm^2 , co jest równoważne warstwie tego gazu o grubości 0,3cm po sprowadzeniu go do warunków standardowych ciśnienia i temperatury. Jednostka całkowitej zawartości ozonu nazywana jest atmocentymetrem (atm-cm); całkowita zawartość ozonu wynosi 1 atm-cm, jeśli grubość warstwy ozonu w standardowych warunkach ciśnienia i temperatury wynosi 1cm. Tysięczną część atm-cm nazwano dobsonem (D).

Począwszy od lat osiemdziesiątych XX wieku obserwowane są wyraźne zmiany ilości i rozkładu przestrzennego ozonu w atmosferze. Fakt ten spowodował znaczne zaniepokojenie środowisk naukowych, a co za tym idzie opinii publicznej. Powodem tak wielkiego zainteresowania jest znaczenie ozonu dla życia na Ziemi. Warstwa ozonowa jest naturalnym filtrem słonecznego promieniowania UV (200nm - 400nm). Ozon zatrzymuje w całości zabójcze promieniowanie UV-C (200nm - 280nm) powyżej 30km. Do powierzchni Ziemi dociera kilka procent nie zaabsorbowanego promieniowania UV-B (280nm - 315nm) i większość promieniowania UV-A (315nm - 400 nm). Wiadomo, że promieniowanie nadfioletowe 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) oraz niekorzystny wpływ na uprawy rolne i hodowlę zwierząt. Ponadto rzeczą niemałej wagi jest to, że zmiany rozkładu przestrzennego zawartości ozonu mogą przyczynić się do zmian cyrkulacji atmosferycznej zarówno w skali regionalnej jak i globalnej poprzez modyfikację struktury termicznej atmosfery. Może to mieć istotne znaczenie dla zmian klimatu. Obecnie umocnił się pogląd, iż niszczące ozon antropogeniczne substancje (chemiczne związki chloru i bromu) są główną przyczyną niedoborów całkowitej zawartości ozonu w minionych dziesięcioleciach. W ostatnim czasie przy prawie nie zmieniającej się zawartości tych gazów w atmosferze, głównie zmiany czynników meteorologicznych wpływały na stan warstwy ozonowej w obszarach polarnych i poza nimi (60°S-60°N). Mechanizmy te prawdopodobnie związane są ze zmianami w dynamice atmosfery w ostatnich kilkunastu latach częściowo związanymi ze wzrostem koncentracji gazów cieplarnianych w troposferze. Od połowy lat 90-tych ubiegłego wieku obserwuje się

nawet niewielkie zwiększenie grubości warstwy ozonowej. Jednakże w ostatnich latach (po 2005 r.) pojawiło się zaskakujące zmniejszenie tempa regeneracji warstwy ozonowej w sezonie letnim nad dużymi obszarami (rzędu miliona km² powierzchni) w strefie 40°N-70°N w tym i nad Polską. Tak, więc nie wszystkie czynniki wpływające na zmiany stratosferycznego ozonu zostały do końca poznane i potrzebne są dalsze systematyczne obserwacje i prace teoretyczne wyjaśniające zmienność ozonu w różnych skalach czasowych.

W 1987 r. społeczność międzynarodowa podjęła bezprecedensowy wysiłek i uzgodniła w ramach tzw. Protokołu Montrealskiego szereg działań, których skutkiem miało być zredukowanie emisji do atmosfery substancji niszczących warstwę ozonową. Obecnie istnieje przekonanie, że dzięki Protokołowi Montrealskiemu i jego późniejszym poprawkom wprowadzającym dalsze ograniczenia w produkcji substancji szkodliwych dla ozonu, antropogeniczne niszczenia warstwy ozonowej nie stanowi już problemu i w ciągu kilku dziesięciu lat należy oczekiwać stopniowej regeneracji warstwy ozonowej.

Niewypełnienie zadań wynikających z Protokołu Montrealskiego może opóźnić, a nawet uniemożliwić regenerację warstwy ozonowej. Prognozowanie poziomu zawartości ozonu w przyszłości wymaga wyjaśnienia powiązań między niedoborami ozonu i zmianami klimatu. Zmiany zawartości ozonu oddziałują na klimat, zaś zmiany klimatu powodują zmiany zawartości ozonu atmosferycznego.

W raporcie przedstawiono analizę stanu warstwy ozonowej i poziomu promieniowania UV-B na podstawie pomiarów wykonanych w IGF PAN i IMGW-PIB w 2018 roku. W analizie wykorzystano wyniki z danych satelitarnych oraz wstecznych trajektorii wstecznych cząstek powietrza

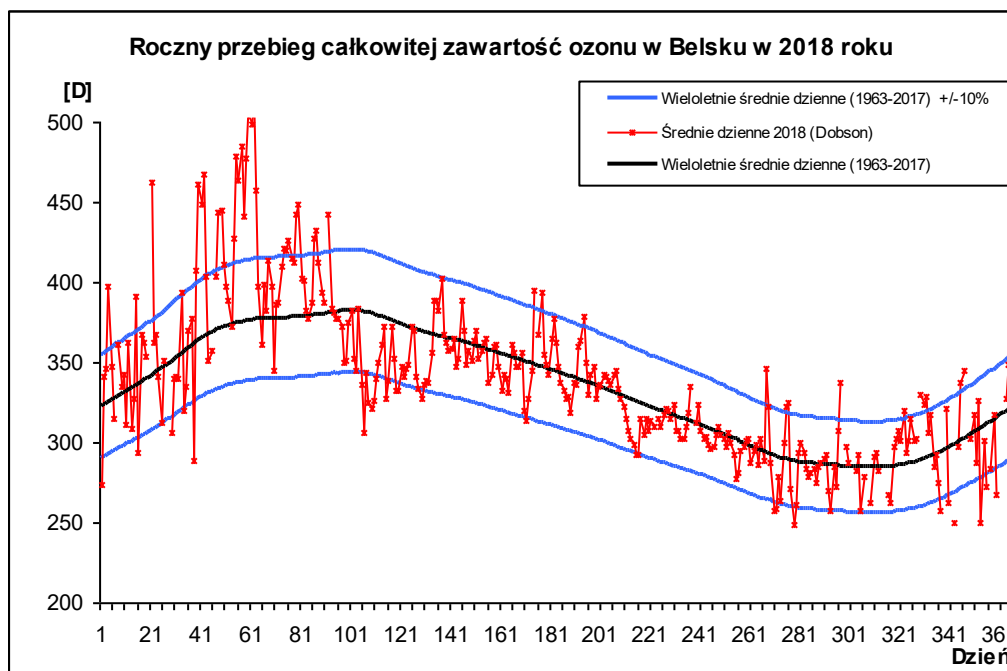
Całkowita zawartość ozonu

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.

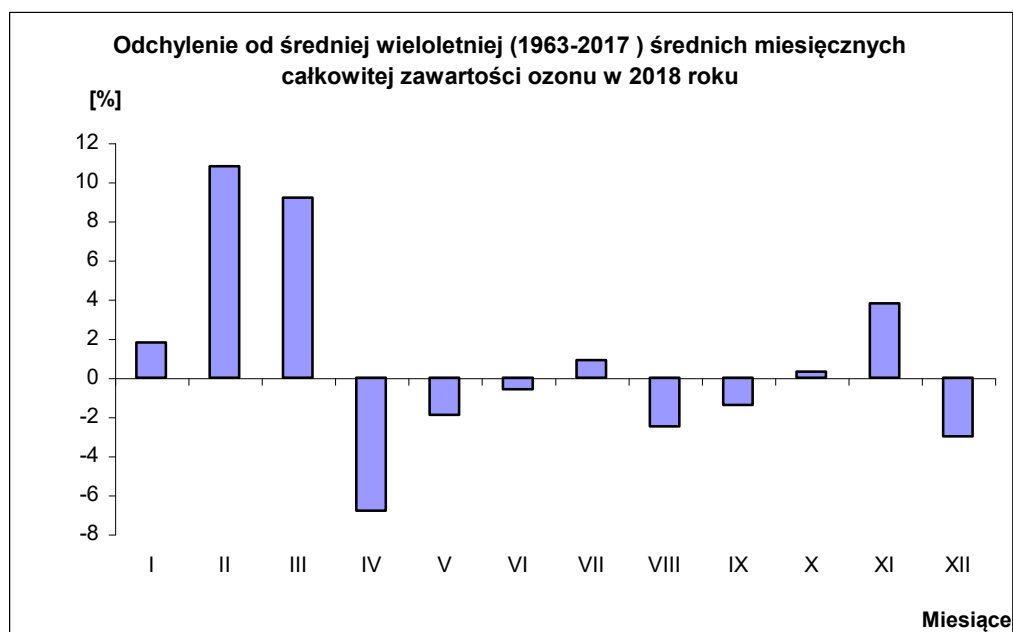
Analiza danych o całkowitej zawartości ozonu uzyskanych przy pomocy spektrofotometru Dobsona pozwala stwierdzić, że w 2018 roku obserwowano wartości średnich miesięcznych całkowitej zawartości ozonu (CZO₃) zbliżone do wieloletnich (1963-2017) średnich miesięcznych.

Jedynie w kwietniu średnia miesięczna wartości CZO₃ (Rys.2) była znacznie poniżej (~6,8%) wieloletniej normy. Wartości odchyłek średnich dziennych od średnich wieloletnich

przekraczały -10%, zwłaszcza w sezonie zimowym (Rys.1). Niskie dzienne wartości. CZO_3 w stosunku do średnich (1963-2017) pojawiały się w kwietniu, wrześniu i grudniu

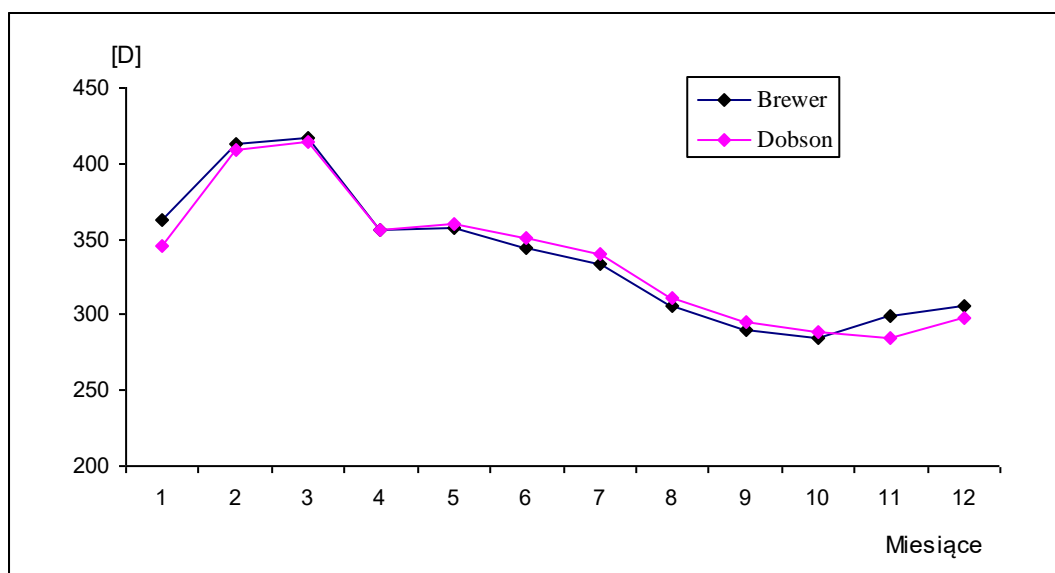


Rys.1. Roczny przebieg średnich dziennych całkowitej zawartości ozonu, Belsk 2018.



Rys.2. Odchylenie od średniej wieloletniej (1963-2017) średnich miesięcznych całkowitej zawartości ozonu w 2018 roku

Przez cały 2018 rok również wykonywano 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.

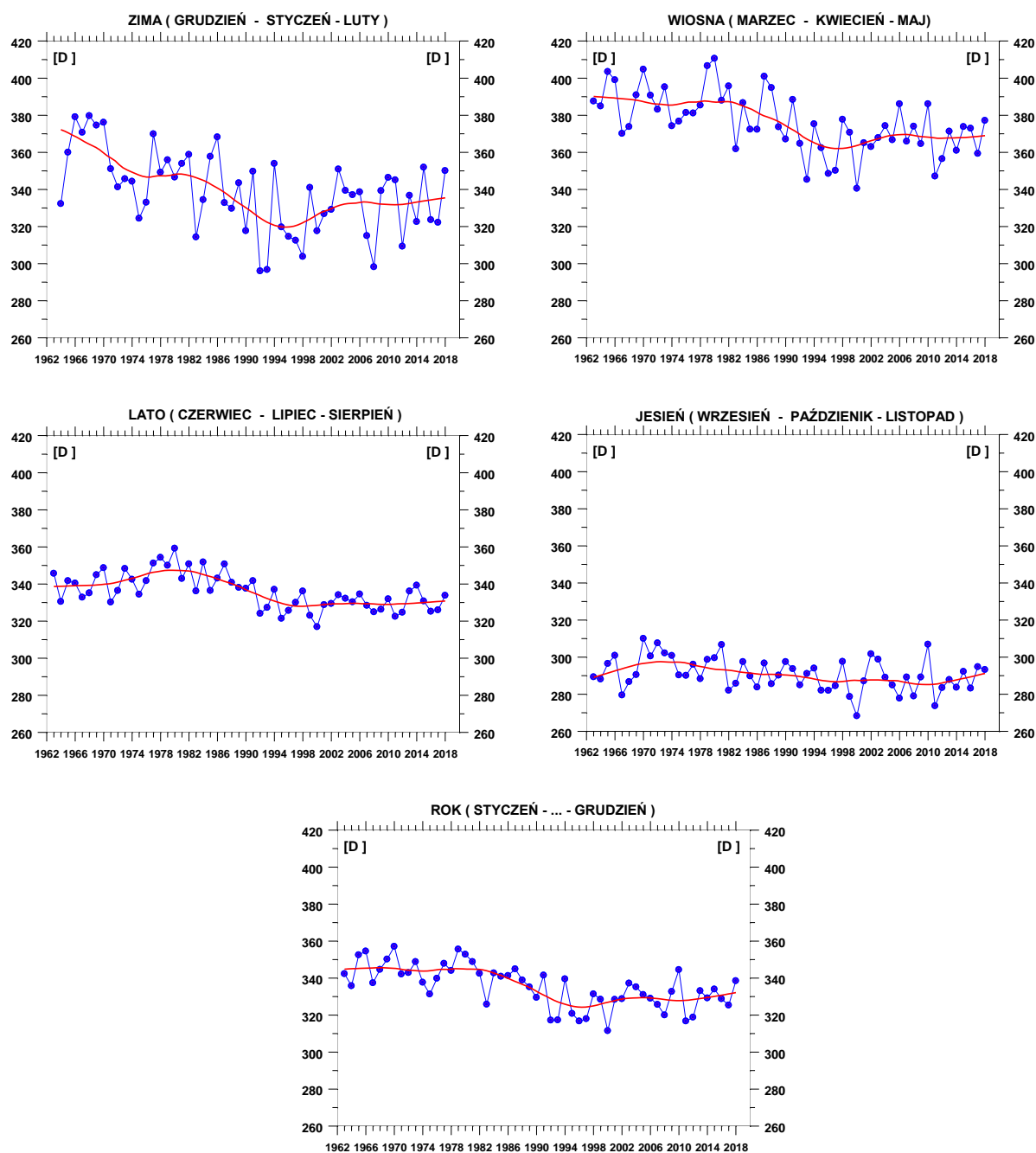


Rys.3. Przebieg średnich miesięcznych całkowitej zawartości ozonu zmierzonych spektrofotometrem Dobsona i Brewera, Belsk 2018

Zgodność danych uzyskanych ze spektrofotometru Brewera i spektrofotometru Dobsona może być oceniona jako dobra. Różnica średnich miesięcznych całkowitej zawartości ozonu 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.

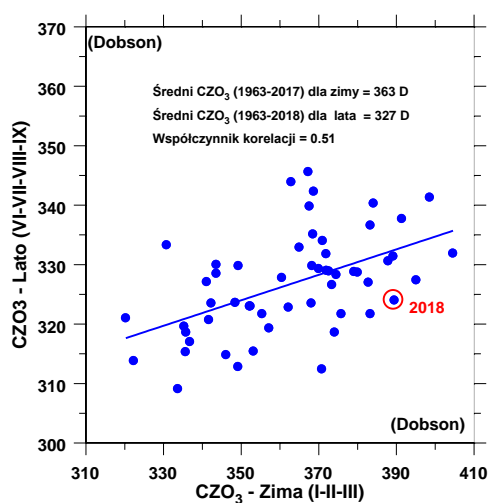
Analizując długookresowe zmiany średnich sezonowych CZO_3 w Belsku (krzywe w kolorze czerwonym na Rys.4 reprezentujące wygładzone metodą lokalnej regresji przebiegi średnich sezonowych) stwierdzamy, że od połowy lat 90-tych XX wieku następuje zmiana kierunku trendu w średnich sezonowych i w średniej rocznej CZO_3 . Wyraźna spadkowa tendencja, która pojawiła się z końcem lat 70-tych została zatrzymana około 1996 r. Od tego momentu obserwujemy niewielką 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. W ostatnich latach wydaje się, że średnie wartości CZO_3 oscylują wokół pewnego ustalonego poziomu bez wyraźnego trendu, a w okresie jesiennym po 2010 r. pojawia się słaba tendencja wzrostowa.



Rys.4. Średnie sezonowe całkowitej zawartości ozonu uzyskane z pomiarów spektrofotometrem Dobsona w COG IGF PAN, Belsk, w okresie 1963-2018

W 2018 r. średnia CZO_3 dla sezonu letniego (335 D) była około 2,5% wyższa niż wieloletnia norma (327 D) dla tego okresu. W tej sytuacji przy braku zachmurzenia poziom promieniowania UV przy powierzchni Ziemi powinien być nieznacznie niższy (około 3%) niż wieloletnia norma. Typowe wartości CZO_3 w sezonie letnim wskazują, że wcześniej w

sezonie zimowym nie obserwowano wartości CZO_3 znacznie poniżej wieloletniej (1963-2017) normy (Rys.5). W 2018r. powyższa zimowa średnia wynosiła 389 D około 7% powyżej wieloletniej normy (363 D). Wystąpienie zimą wartości CZO_3 znacznie powyżej wieloletniej normy jest sygnałem wzmocnienia 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. Nadwyżki CZO_3 , które wystąpiły w okresie zimowym nie zostaną w późniejszych miesiącach zlikwidowane, gdyż wysokie wartości CZO_3 pojawiają się w skali całej półkuli poza strefą równikową.

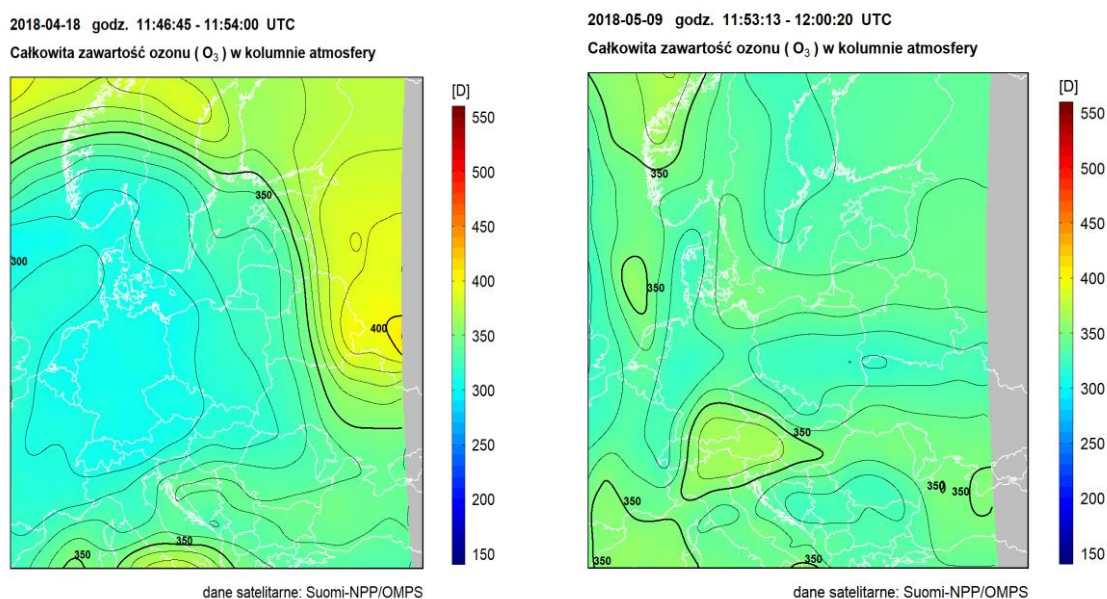


Rys.5. Średnia całkowitej zawartości ozonu w Belsku w sezonie letnim (czerwiec-lipiec-sierpień-wrzesień) w funkcji średniej w poprzedzającym sezonie zimowym (styczeń-luty-marzec). Punkt zaznaczony na czerwono oznacza wartości w 2018 r.

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 dotyczące 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 przez IMGW-PIB, w 2018 roku był prowadzony z wykorzystaniem danych z czujnika Ozone Mapping and Profiler Suite (OMPS) znajdującego się na pokładzie satelity meteorologicznego Suomi NPP (S-NPP). 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 Dziale Teledetekcji Satelitarnej IMGW-PIB. Oprogramowanie to pozwala na wyznaczanie z danych OMPS takich parametrów jak: całkowita zawartość ozonu, profil ozonu dla punktów pod-satelitarnych, promieniowanie UV dla długości fali 331 nm, całkowita zawartość SO₂ (tylko w niezachmurzonych punktach obrazu) oraz UV Aerosol Index. Pakiet generuje pliki wyjściowe w formacie HDF5 oraz obrazy w formacie PNG pozwalające na szybki podgląd wyników. 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. Satelitarny monitoring ozonu wykazał pojawianie się w kwietniu i maju ujemnych anomalii całkowitej zawartości ozonu nad Polską (Rys.6).



Rys.6. Całkowita zawartość ozonu (D) w dniach 18 kwietnia i 9 maja 2018 r., wyznaczona z danych OMPS/SNPP.

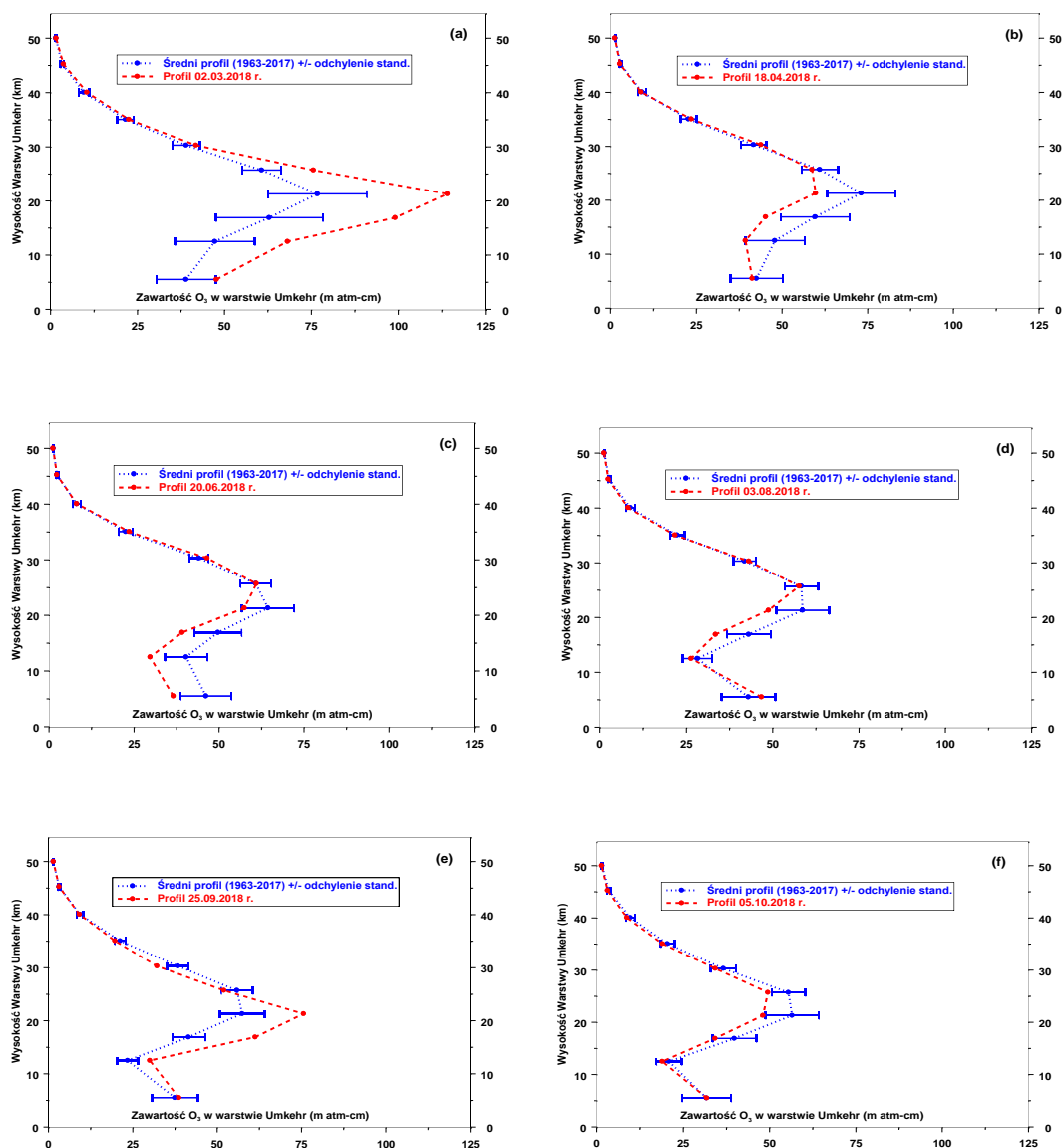
Pionowy rozkład ozonu

Serie pomiarów wykonywanych przy użyciu spektrofotometru Dobsona w świetle rozproszonym pochodzącym z niezachmurzonego zenitu przy odległościach zenitalnych

Słońca $60^{\circ} - 90^{\circ}$ umożliwiają wyznaczenie rozkładu pionowego ozonu tzw. metodą Umkehr (w dziesięciu 5-kilometrowych warstwach atmosfery). Wyniki pomiarów z tych serii, po wstępnym opracowaniu w Belsku, wysyłane są do Centrum Danych Ozonowych w Kanadzie, gdzie wyznaczane są profile ozonu z tego rodzaju obserwacji dla całej sieci światowej pomiarów spektrofotometrycznych. Ze względu na wymagania pogodowe (około 3,5 godziny bezchmurnej pogody) liczba serii pomiarów Umkehr zmienia się znacznie z roku na rok. W 2018 roku wykonano 201 serii pomiarowych przy pomocy spektrofotometru Dobsona pozwalających wyznaczyć pionowy rozkład ozonu metodą Umkehr (w tym 36 pomiarów zwanych „krótki Umkehr”).

Na Rys.7 przedstawiono interesujące przykłady zmian zawartości ozonu w poszczególnych umkehrówskich warstwach atmosfery. Jak widać zmiany te w odniesieniu do średniej wieloletniej 1963-2017 (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.

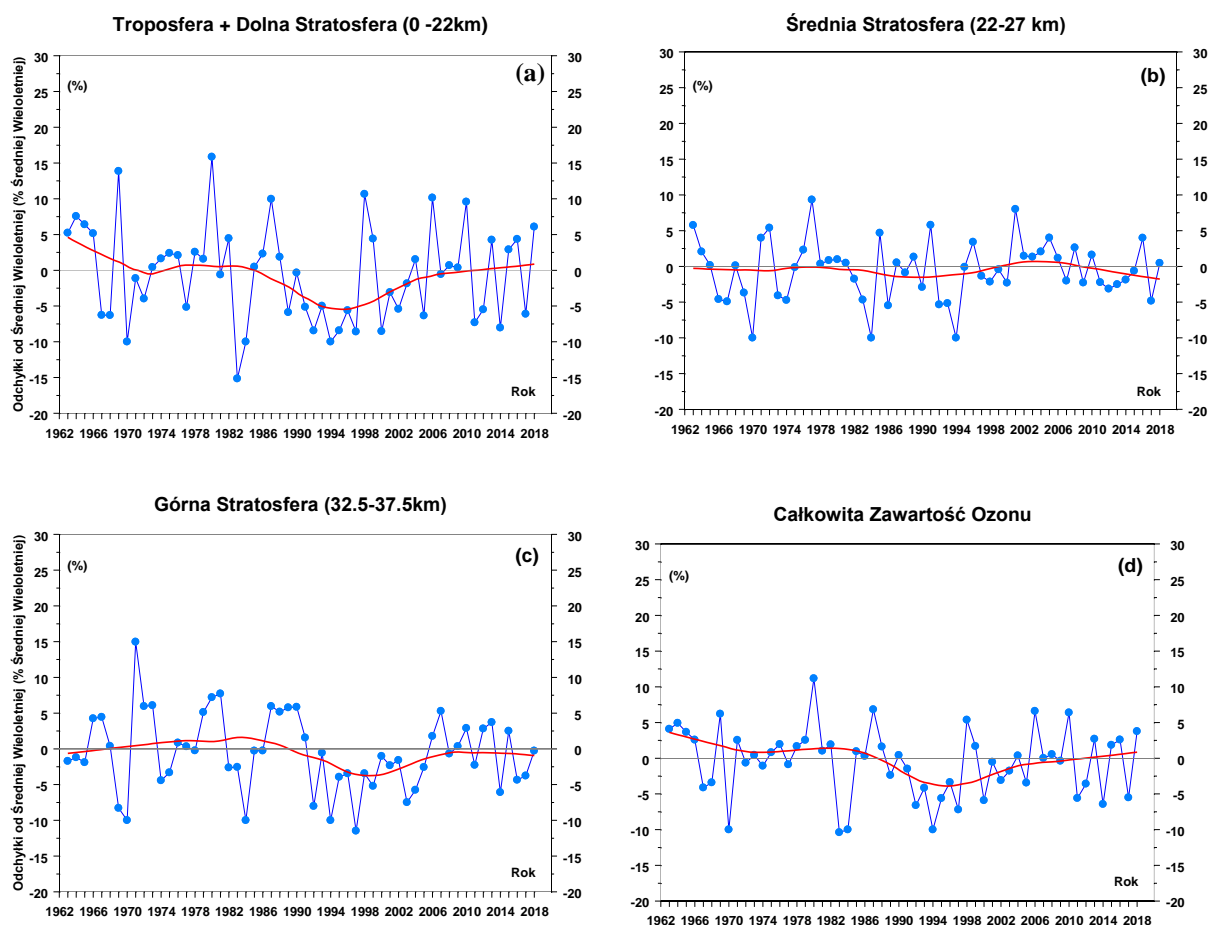
Należy dodać, że zmiany profilu ozonu przy ustalonej całkowitej zawartości ozonu są jednym z czynników wpływających na wielkość natężenia promieniowania UV-B docierającego do powierzchni Ziemi. Dane ozonowe ze stacji, które dysponują długimi, ciągłymi i wiarygodnymi seriami pomiarowymi są szczególnie 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 zwaloryzowaną 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_3 dla wybranych dni w 2018 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 niezaburzonego 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 (wzrost CO_2) na koncentrację ozonu na tych wysokościach.



Rys.8 Odchyłki średnich wiosennych (marzec-kwiecień-maj) od średniej wieloletniej zawartości ozonu w wybranych warstwach atmosfery z pomiarów Umkehr spektrofotometrem Dobsona w Belsku (1963-2018). Profil ozonu wyznaczono stosując algorytm *UMK04*. (a) troposfera i dolna stratosfera 0-22km, (b) średnia stratosfera 22-27km, (c) wysoka stratosfera 32,5-37,5km, (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 wyznaczono 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 (1963-2018) 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). W średniej stratosferze (22-27 km – Rys.8.b) i górnej stratosferze 32,5-37,5 km (Rys.8.c) przez cały okres pomiarowy zawartość ozonu oscyluje wokół ustalonego poziomu bez wyraźnego trendu. W sezonie wiosennym 2018 r. we wszystkich warstwach i w całej kolumnie atmosfery zanotowano zawartości ozonu powyżej 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. 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 2018 roku na Stacji Aerologicznej IMGW-PIB w Legionowie koło Warszawy kontynuowano systematyczne sondáže 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.

W 2018 roku w średnich miesięcznych zawartościach ozonu nad Legionowem zanotowano istotne odchylenia od uśrednionego przebiegu wieloletniego (Tabela 1). Na początku zimy pojawił się duży wzrost ozonu w najniższej części dolnej stratosfery. W marcu odnotowano niewielkie spadki ozonu w warstwie maksimum ozonu. Później na wiosnę pojawiły się ujemne anomalie - w kwietniu i maju niedobory ozonu obejmowały praktycznie całą stratosferę. Podczas kolejnej zimy 2018/19 w listopadzie wystąpiła dodatnia anomalia ozonu w średniej stratosferze.

Tab. 1. Zawartość ozonu w warstwach atmosfery nad Legionowem w 2018 r.

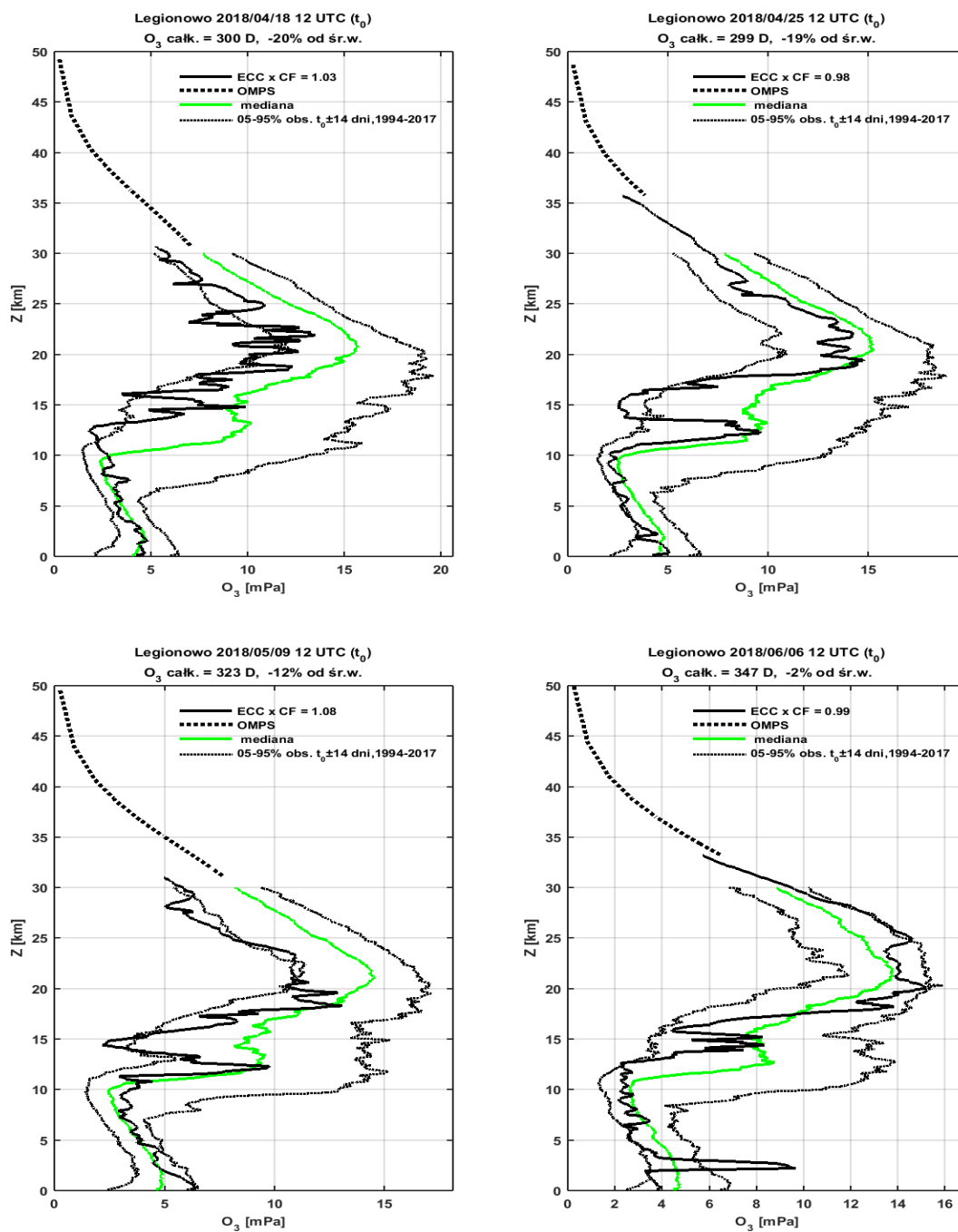
| WYSZCZEGÓLNIENIE | | Warstwy atmosfery między standardowymi powierzchniami izobarycznymi (hPa) i wysokości dolnej podstawy warstwy (km) | | | | | | | | | | | |
|------------------|---|--|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | $\frac{1000}{700}$ | $\frac{700}{500}$ | $\frac{500}{300}$ | $\frac{300}{200}$ | $\frac{200}{150}$ | $\frac{150}{100}$ | $\frac{100}{70}$ | $\frac{70}{50}$ | $\frac{50}{30}$ | $\frac{30}{20}$ | $\frac{20}{10}$ | $\frac{10}{00}$ |
| | | 0 | 3 | 5,5 | 9 | 11 | 13,5 | 15,5 | 18 | 21 | 24 | 28 | 31 |
| Styczeń..... | a | 8,0 | 7,0 | 8,5 | 13,6 | 22,8 | 35,5 | 36,1 | 38,3 | 61,2 | 38,6 | 40,8 | 46,5 |
| | b | 8,1 | 7,6 | 8,9 | 11,5 | 15,5 | 28,8 | 34,4 | 39,7 | 61,8 | 39,2 | 41,0 | 40,9 |
| | c | -0,1 | -1,3 | -0,4 | 0,5 | 2,0 | 1,0 | 0,3 | -0,3 | -0,1 | -0,2 | -0,1 | 1,1 |
| Luty..... | a | 9,6 | 8,5 | 9,4 | 15,4 | 18,0 | 39,0 | 40,8 | 44,7 | 72,1 | 41,3 | 43,2 | 49,2 |
| | b | 9,2 | 7,9 | 9,6 | 14,5 | 19,3 | 31,7 | 37,0 | 42,4 | 62,6 | 39,7 | 43,3 | 45,7 |
| | c | 0,5 | 0,9 | -0,2 | 0,2 | -0,3 | 0,9 | 0,5 | 0,4 | 1,7 | 0,5 | -0,0 | 1,0 |
| Marzec..... | a | 9,0 | 8,4 | 12,9 | 25,7 | 27,8 | 35,7 | 31,6 | 38,3 | 60,7 | 39,1 | 46,0 | 49,6 |
| | b | 10,9 | 8,8 | 11,0 | 17,6 | 22,0 | 34,0 | 36,8 | 41,0 | 60,8 | 37,9 | 43,4 | 47,7 |
| | c | -1,8 | -0,8 | 1,1 | 1,5 | 1,6 | 0,3 | -0,9 | -0,9 | -0,0 | 0,4 | 1,0 | 0,7 |
| Kwiecień..... | a | 12,9 | 9,2 | 11,2 | 13,6 | 16,9 | 23,5 | 23,2 | 33,4 | 54,1 | 34,2 | 38,8 | 50,0 |
| | b | 12,4 | 9,9 | 13,1 | 19,1 | 21,9 | 31,3 | 34,4 | 39,0 | 58,9 | 37,7 | 46,7 | 52,7 |
| | c | 0,4 | -1,2 | -0,9 | -0,9 | -1,3 | -1,4 | -2,3 | -1,5 | -1,3 | -1,3 | -2,2 | -0,7 |
| Maj..... | a | 14,9 | 11,0 | 12,4 | 11,0 | 20,3 | 25,8 | 28,3 | 32,4 | 50,4 | 33,5 | 43,2 | 51,6 |
| | b | 13,3 | 10,6 | 12,3 | 16,6 | 20,2 | 27,3 | 29,2 | 35,1 | 54,5 | 37,2 | 49,0 | 55,4 |
| | c | 1,5 | 0,6 | 0,0 | -1,1 | 0,0 | -0,4 | -0,3 | -1,6 | -2,0 | -2,4 | -2,5 | -0,9 |
| Czerwiec..... | a | 13,0 | 9,8 | 11,5 | 8,1 | 11,3 | 21,5 | 24,4 | 32,6 | 53,0 | 40,0 | 53,7 | 56,3 |
| | b | 13,0 | 10,6 | 12,6 | 13,0 | 16,7 | 23,6 | 25,2 | 31,0 | 52,0 | 38,5 | 51,5 | 55,7 |
| | c | -0,0 | -0,8 | -0,7 | -1,2 | -1,5 | -0,5 | -0,3 | 0,8 | 0,5 | 0,6 | 1,2 | 0,2 |
| Lipiec..... | a | 12,4 | 11,1 | 14,3 | 11,9 | 14,4 | 22,1 | 22,3 | 30,0 | 50,7 | 36,7 | 51,0 | 50,5 |
| | b | 12,8 | 10,5 | 12,9 | 14,8 | 14,8 | 20,9 | 23,0 | 29,3 | 50,5 | 38,3 | 51,3 | 54,6 |
| | c | -0,3 | 0,9 | 0,9 | -0,5 | -0,1 | 0,6 | -0,5 | 0,5 | 0,1 | -1,3 | -0,2 | -1,1 |
| Sierpień..... | a | 12,5 | 9,9 | 12,7 | 8,6 | 7,3 | 15,7 | 22,3 | 28,1 | 47,3 | 39,2 | 51,0 | 53,1 |
| | b | 12,4 | 10,2 | 12,4 | 11,0 | 11,5 | 18,7 | 23,5 | 28,8 | 47,5 | 36,6 | 49,4 | 54,1 |
| | c | 0,1 | -0,3 | 0,1 | -0,8 | -1,9 | -0,9 | -0,4 | -0,4 | -0,1 | 1,0 | 0,5 | -0,4 |
| Wrzesień..... | a | 12,3 | 9,4 | 10,2 | 8,2 | 7,1 | 14,4 | 20,9 | 29,9 | 48,6 | 37,3 | 44,2 | 49,0 |
| | b | 11,2 | 9,4 | 10,6 | 9,0 | 9,0 | 17,8 | 24,3 | 29,5 | 47,6 | 34,4 | 45,0 | 49,6 |
| | c | 0,8 | 0,1 | -0,4 | -0,3 | -0,8 | -1,0 | -0,9 | 0,2 | 0,4 | 1,0 | -0,3 | -0,2 |
| Październik..... | a | 10,1 | 7,9 | 11,1 | 12,8 | 10,1 | 18,4 | 24,4 | 29,2 | 46,9 | 37,6 | 47,4 | 48,5 |
| | b | 9,5 | 8,4 | 9,8 | 9,2 | 9,0 | 16,8 | 23,7 | 29,4 | 47,7 | 34,2 | 40,6 | 44,8 |
| | c | 0,6 | -0,8 | 0,9 | 1,0 | 0,6 | 0,5 | 0,2 | -0,1 | -0,4 | 1,3 | 1,6 | 1,2 |
| Listopad..... | a | 9,6 | 8,5 | 10,2 | 11,8 | 11,6 | 24,4 | 29,7 | 31,5 | 54,0 | 40,4 | 47,5 | 44,4 |
| | b | 8,2 | 7,8 | 9,0 | 8,8 | 9,8 | 19,9 | 26,4 | 30,6 | 50,7 | 36,4 | 39,2 | 40,2 |
| | c | 1,6 | 1,3 | 1,1 | 1,0 | 0,7 | 1,1 | 0,9 | 0,4 | 1,5 | 1,8 | 2,1 | 1,2 |
| Grudzień..... | a | 8,6 | 7,4 | 8,7 | 10,1 | 11,9 | 30,2 | 31,1 | 32,0 | 51,9 | 38,8 | 39,1 | 42,1 |
| | b | 7,9 | 7,7 | 9,1 | 9,3 | 11,3 | 22,9 | 28,8 | 33,8 | 54,9 | 38,2 | 39,5 | 37,5 |
| | c | 0,8 | -0,9 | -0,3 | 0,3 | 0,2 | 1,7 | 0,5 | -0,5 | -0,8 | 0,2 | -0,1 | 1,1 |

a – średnie miesięczne (D) w 2018 roku.

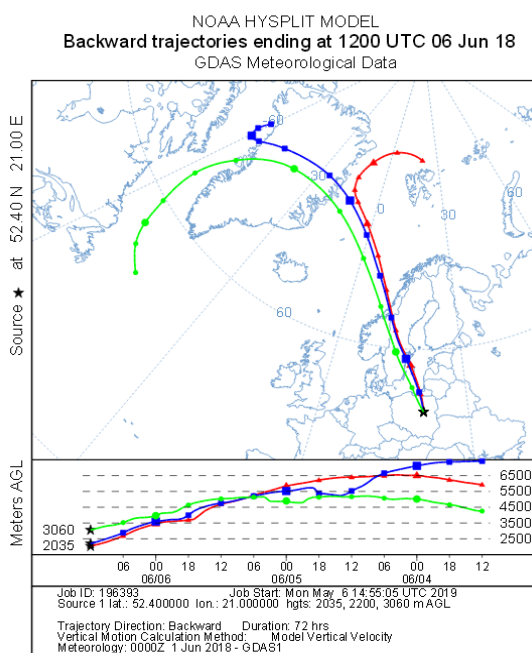
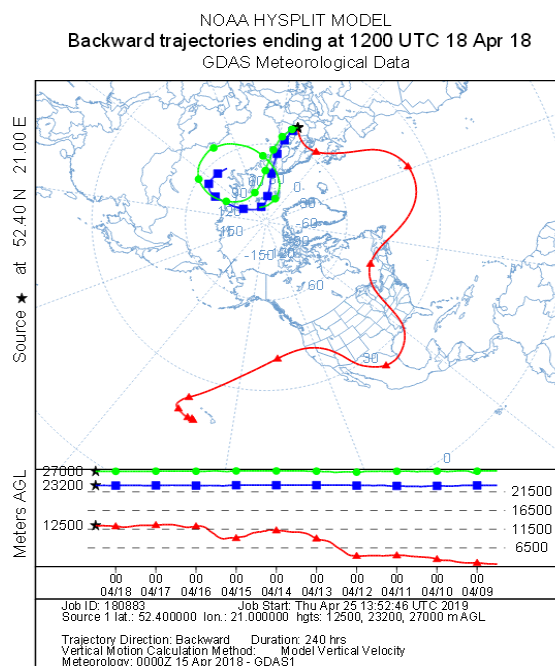
b – średnie miesięczne wieloletnie (D) z lat 1994-2017.

c – standaryzowane odchylenie: $(a-b)/\sigma$, gdzie σ jest odchyleniem standardowym średnich miesięcznych z lat 1994-2017.

Wiosną 2018 roku w profilach ozonu nad Legionowem zaobserwowano epizody spadków ozonu w stratosferze i epizod wzrostu w dolnej troposferze (Rys.9).

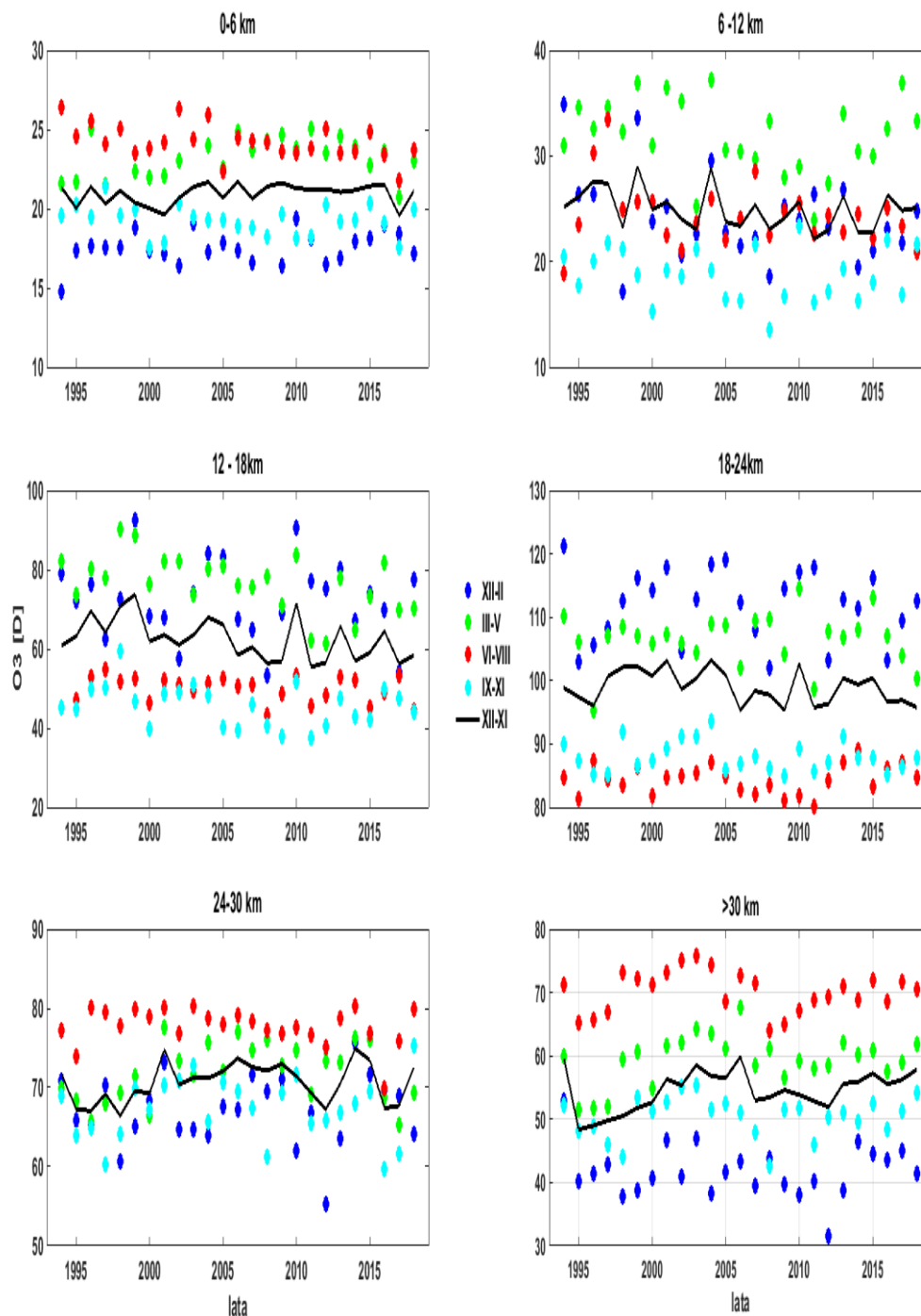


Rys.9 Sondáže ozonowe w Legionowie z anomaliami ozonu w dniach 18 i 25 kwietnia, 9 maja oraz 6 czerwca 2018 roku, na tle serii w latach 1994-2017.



Rys.10 Wsteczne trajektorie HYSPLIT pokazujące źródło masy dla wybranych anomalii w profilach ozonu nad Legionowem.

Analiza wstecznych trajektorii cząstek powietrza przechodzących nad Legionowem 18 kwietnia 2018 pokazuje zubożone w ozon masy powietrza w średniej stratosferze przetransportowane z rejonu Arktyki. Na niższych wysokościach w dolnej stratosferze i górnej troposferze niskie koncentracje ozonu przywędrowały w powietrzu uniesionym z dolnej atmosfery ze zwrotnikowej części Oceanu Spokojnego. Ekstremalne stężenie ozonu w dolnej troposferze dnia 6 czerwca 2018 roku było wynikiem głębokiej intruzji ozonu stratosferycznego z nad Grenlandii.



Rys.11 Zawartości ozonu O_3 [D] nad Legionowem w sezonach w okresie 1994-2018.

Badanie zmian w profilu ozonu nad Legionowem w okresie 1998-2018 (Rys.11) pokazuje zmniejszanie zawartości ozonu w dolnej stratosferze (12-18km) we wszystkich sezonach, z największym spadkiem ozonu na wiosnę. Otrzymany wynik jest zgodny z doniesieniami, że od 1998 roku zawartość ozonu w dolnej stratosferze zmniejsza się w pasie umiarkowanych

szerokości geograficznych na obydwu półkulach. Ponieważ w dolnej stratosferze nad Polską i Europą znajduje się znaczna część warstwy ozonowej, ubytki w tej warstwie zwłaszcza latem stwarzają zagrożenie wysokim poziomem promieniowania UV-B.

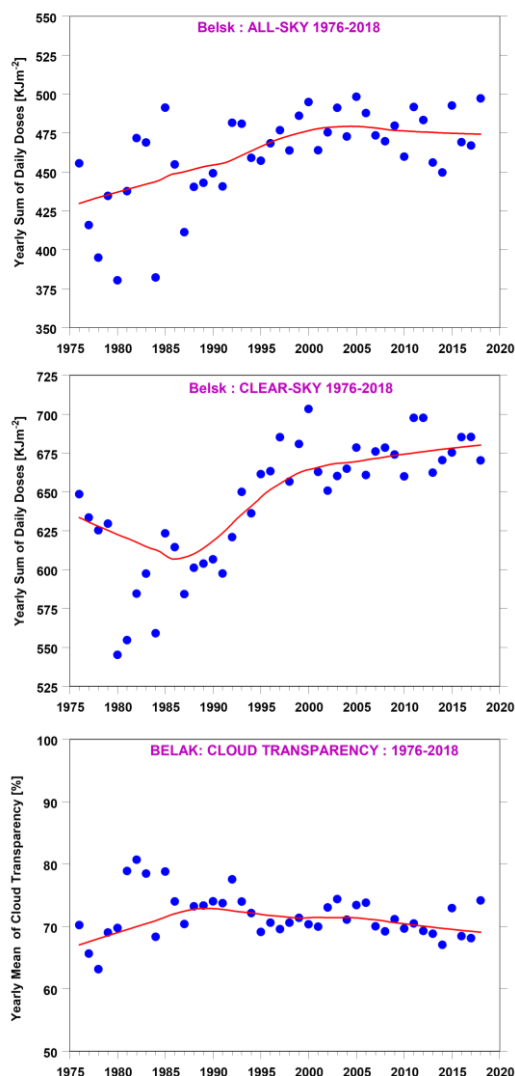
Promieniowanie UV-B

W Centralnym Obserwatorium Geofizycznym 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 (2006-2017). Seria czasowa w ubiegłych latach, także i w 2018 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 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 465kJ/m^2 (patrz czerwona linia na rys.12-góra). W 2018 r suma roczna wyniosła 490kJ/m^2 i była jedną z najwyższych w historii pomiarów w Belsku.

Analizując czynniki wpływające na trendy w napromienieniu UV-B wyznaczono hipotetyczne sumy roczne dziennych dawek rumieniowych przy braku zachmurzenia. Zastosowano model transferu promieniowania słonecznego w atmosferze wykorzystując jako parametry wejściowe do modelu średnie dzienne CZO_3 zmierzone spektrofotometrem Dobsona i grubość optyczną aerozolu wyznaczoną z globalnego modelu cyrkulacji atmosfery (reanaliza MERRA-2). Wygładzony przebieg sum rocznych wskazuje na stopniowy wzrost sum rocznych od 1985 r. (patrz czerwona linia na rys. 12 – środkowy rysunek). Taki przebieg był wynikiem zmniejszających się wartości CZO_3 w latach 1980-1995 i większej przejrzystości atmosfery od lat 80-tych ubiegłego wieku (mniejsze wartości zapylenia atmosfery w wyniku kryzysu ekonomicznego lat 80-90 XX wieku i zmian w gospodarce po roku 1990).

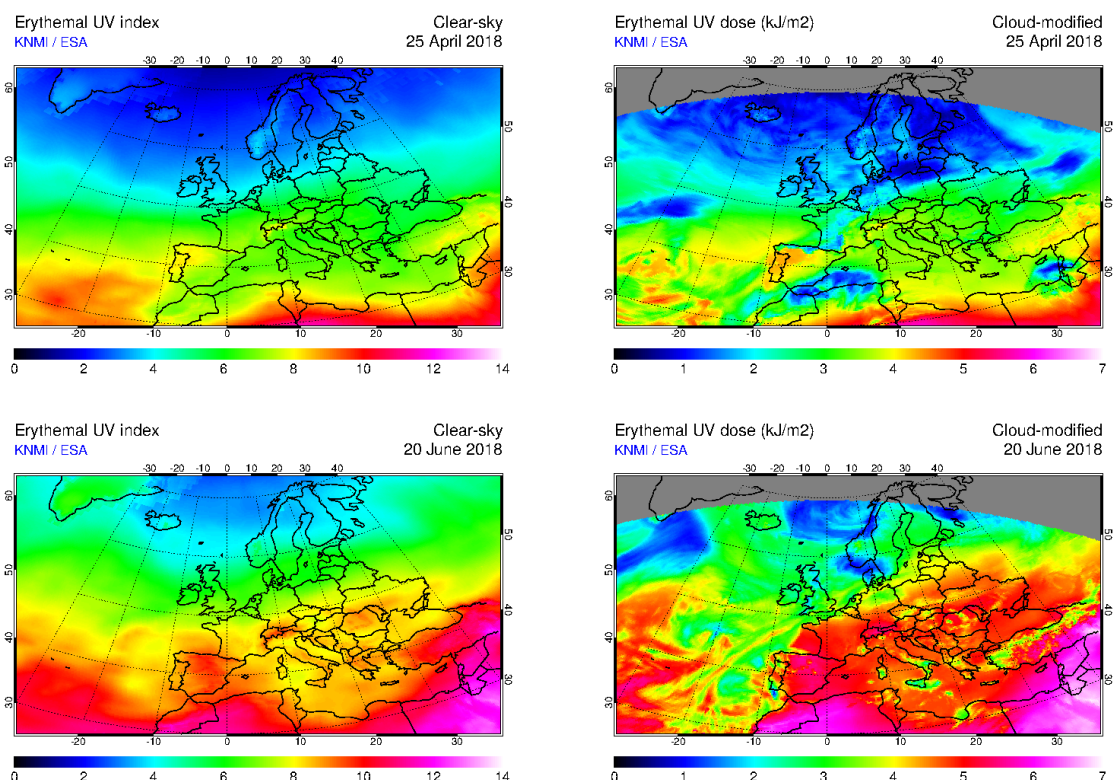
Wpływ długookresowych zmian w zachmurzeniu na przebieg sum rocznych dziennych dawek rumieniowych określono stosując współczynnik przepuszczalności chmurowej, czyli stosunek zmierzonych dawek do modelowych dla hipotetycznych

bezchmurnych warunków (patrz czerwona linia na rys. 12 – dolny rysunek). W latach 1976-1990 współczynnik przepuszczalności chmurowej wzrastał, czyli chmury w mniejszym stopniu osłabiały promieniowanie UV-B docierające do powierzchni gruntu. Od 1990 r. obserwuje się stopniowe zmniejszenie przepuszczalności promieniowania rumieniowego przez chmury, co by wskazywało na wzrost stopnia zachmurzenia albo grubości optycznej chmur w tym okresie. Poziom UV-B w Belsku ustabilizował się w XXI wieku w wyniku łącznego nałożenia się długookresowych zmian w ozonie atmosferycznym, aerozolu i zachmurzeniu. Wydaje się, że o kierunku trendu promieniowania UV-B w Belsku w najbliższym okresie będą decydować zmiany w zachmurzeniu indukowane zmianami klimatu.



Rys.12. Sumy roczne dziennych dawek promieniowania rumieniowego w Belsku w latach 1976-2018: zmierzone wartości (górny rysunek), modelowane wartości dla bezchmurnego nieba (środkowy rysunek). Współczynnik przepuszczalności chmurowej (dolny rysunek).

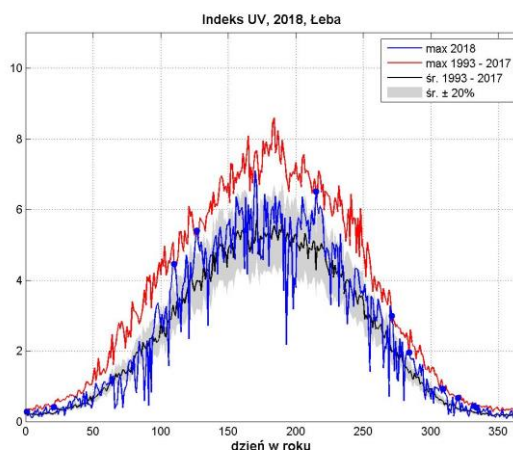
Pomiary natężenia napromienienia o skuteczności rumieniowej z użyciem biometru Kipp & Zonen pokazały w dniu 20.06.2018 najwyższą w roku wartość tj. 7,6 Indeksu UV (1 Index =25mW/m²). Powyższą wartość potwierdziły pomiary widm UV z zastosowaniem spektrofotometru Brewera. Wysoka wartości Indeksu w tym dniu była wynikiem niskich wartości CZO₃ (~10% poniżej normy). W tym dniu zanotowano najwyższą w roku dzienną dawkę rumieniową 4098 J/m². Wczesną wiosną (25.04.2018) zarejestrowano w Belsku wysoki Indeks UV 5,4 tj. około 20% powyżej normy w związku z pojawieniem się niskich wartości ozonu nad Polską. Dzienna dawka rumieniowa w tym dniu wynosiła ~2500 J/m², co w przybliżeniu było 10-krotnością minimalnej dawki wywołującej rumień skóry (tzw. MED) u osoby z fototypem 2. 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 (~20C) zachęcają do nadmiernego opalania bez zastosowania kremów z filtrem ochronnym. Satelitarne pomiary (Rys.13) pokazały zbliżone wartości Indeksu UV i dziennej dawki promieniowania rumieniowego ze zmierzonymi na stacji Belsk



Rys. 13. Indeks UV i dzienna dawka rumieniowa nad Europą wyznaczona z pomiarów spektrofotometrem GOME-2 w dniu 25.04.2018 (góra) i 20.06.2018 (dół) na platformie satelitarnej MetOp-A.

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

Dla 2018 roku maksymalne dawki miesięczne zmierzono w czerwcu dla Łeby oraz w lipcu dla Legionowa i Zakopanego. Maksymalna dawka miesięczna dla Łeby była jednocześnie największą w 2018 roku dawką miesięczną i wyniosła 465 MED. Największa dawka dobowa, 21,8 MED (4578 J/m^2) wystąpiła 21 czerwca w Zakopanem. Z punktu widzenia monitoringu UV najbardziej istotne są okresy gdy promieniowanie UV osiąga bardzo duże wartości. Dla 2018 roku były takie dwa okresy. Na wiosnę dla wszystkich stacji oraz w sierpniu dla Łeby i Zakopanego. W tych okresach zmierzono wartości ekstremalne dla wieloletnich serii pomiarowych. Na Rysunku 14 przedstawiono przebieg roczny Indeksu UV, czyli maksymalnej półgodzinnej wartości promieniowania rumieniowego UV-B w ciągu dnia, dla 2018 roku na tle średniego oraz maksymalnego Indeksu UV z okresu od 1993 do 2017 roku dla Łeby.

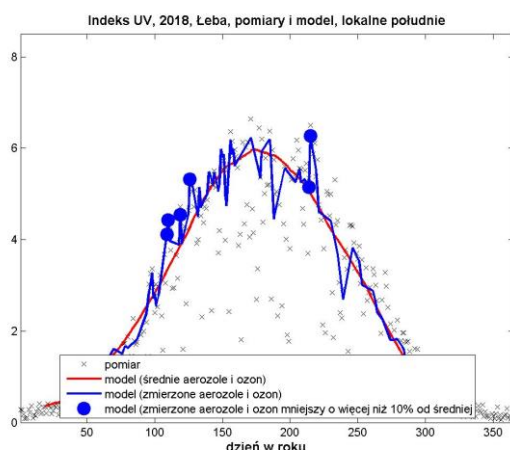


Rys. 14: Przebiegi roczne Indeksu UV z 2018 roku dla stacji w Łebie na tle średniego oraz maksymalnego Indeksu UV od początku pomiarów do 2017 roku.

Podobnie dla Zakopanego i Legionowa promieniowanie w tych okresach osiągało ekstremalne w seriach wartości.

Żeby zrozumieć przyczynę ekstremalnego promieniowania, korzystając z pomiarów satelitarnych, ozonu całkowitego i aerozoli z 2018 roku obliczono, używając model transferu promieniowania słonecznego FastRT wartości Indeksu UV dla bezchmurnego nieba dla lokalnego południa. Podobne obliczenie wykonano dla danych uśrednionych ozonu całkowitego i aerozoli 30-dniową średnią biegnącą z okresu 2005-2017. Na Rys.15 umieszczono pomiary Indeksu UV z 2018 roku oraz zaznaczono wartości Indeksu UV gdy ozon całkowity był mniejszy o więcej niż 10% od średniej. Zestawienie wartości dla 2018

roku ze średnią wieloletnią pozwala wyróżnić dni o nietypowo dużych wartościach promieniowania. Natomiast modelowanie FastRT pozwala ocenić czy zwiększone promieniowanie da się wytłumaczyć mniejszą ilością ozonu i aerozoli. Domyślnie zakłada się, że duże wartości promieniowania odpowiadają pomiarom przy bezchmurnym niebie. Dodatkowo niebieskimi kropkami wyróżniono dni, w których ilość ozonu była mniejsza od średniej wieloletniej co najmniej o 10%. Dzięki temu można zlokalizować dni, w których duży wzrost promieniowania można wytłumaczyć dużymi spadkami ozonu. Pozostałe dni z dużymi wielkościami promieniowania można tłumaczyć spadkami ilości aerozoli. W 2018 dla okresu wiosennego kwiecień-maj dla wszystkich stacji oraz sierpień dla Łeby podwyższone promieniowanie można powiązać ze spadkami ozonu większymi niż 10% w stosunku do średniej wieloletniej. Natomiast w sierpniu większe wartości Indeksu UV wiązały się częściowo z mniejszą ilością aerozoli (Legionowo i Zakopane) oraz mniejszą ilością ozonu całkowitego (Łeba).



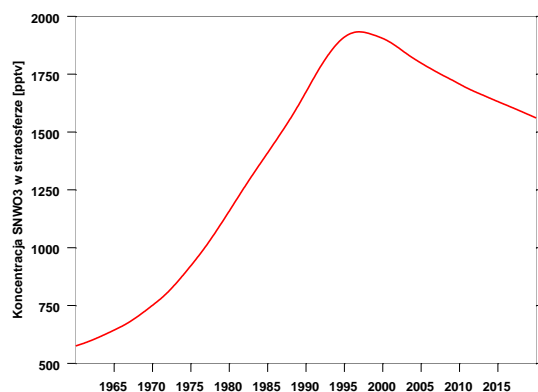
Rys. 15: Przebiegi roczne Indeksu UV z 2018 roku obliczonego z wykorzystaniem modelu transferu promieniowania słonecznego FastRT dla stacji w Łebie z wykorzystaniem pomiarów satelitarnych ozonu całkowitego i aerozoli OMI 2005-2018.

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 rzeczywistości, ze względu na procesy konwekcyjne, rozwój chmur obraz jest często inny. W 2018 roku, w okresie letnim, od maja do lipca, rozkład południkowy był najczęściej odwrotny, gdzie najmniej promieniowania było w Zakopanem.

Globalne zmiany całkowitej zawartości ozonu

Analiza pomiarów satelitarnych ozonu w większej skali przestrzennej pozwala stwierdzić, w jakim stopniu zmiany ozonu nad Belskiem mają lokalny charakter. Dla oceny różnic w długookresowej zmienności ozonu nad Belskiem i nad innymi obszarami na półkuli północnej, wykorzystano homogenizowane dane satelitarne zamieszczone w globalnej bazie Multi Sensor Re-analysis version 2 (MSR-2), Van der A, R et al. (2015). Baza prowadzona jest przez holenderski Królewski Instytut Meteorologiczny (KNMI) i zawiera globalne dane CZO₃ od stycznia 1979 do grudnia 2018 r. z rozdzielczością 0,5° (szerokość geograficzna) x 0,5 (długość geograficzna).

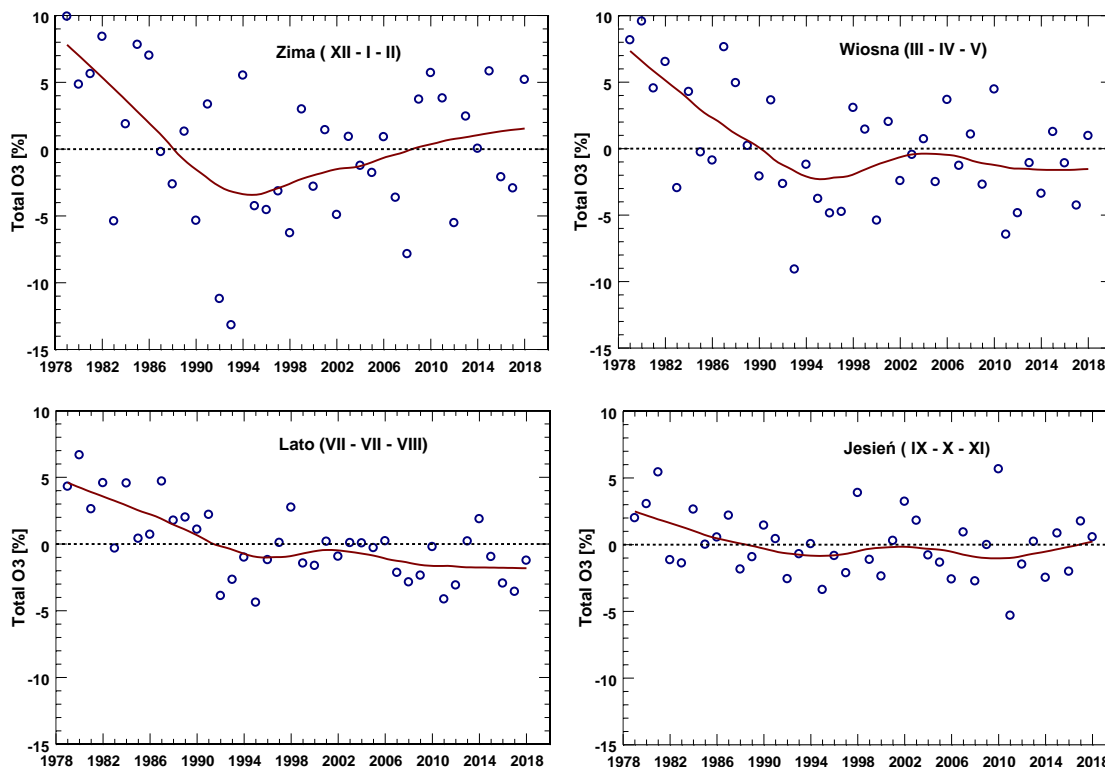
Zwykle długookresowe zmiany ozonu wiąże się ze zmianami koncentracji w stratosferze substancji niszczących warstwę ozonową (SNWO₃). Koncentracja SNWO₃ w stratosferze w średnich szerokościach geograficznych zaczyna maleć w drugiej połowie lat 90-tych XX wieku (Rys.16) w wyniku ograniczeń w produkcji SNWO₃ wprowadzonych przez Protokół Montrealski (PM) z 1987 r. i jego późniejsze poprawki. W tej sytuacji w końcówce lat 90-tych XX wieku w danych ozonowych powinien pojawić się dodatni trend, którego identyfikacja może być utrudniona ze względu na występowanie naturalnych oscylacji w poziomie ozonu indukowanych przez globalne i lokalne procesy transportu w atmosferze.



Rys.16. Zawartość substancji niszczących warstwę ozonową (SNWO₃) w stratosferze (1960-2020) w średnich szerokościach geograficznych według obliczeń modelowych (krzywa czerwona)

Do podjęcia dyskusji nad stopniem naprawy warstwy ozonowej w Belsku i w Polsce na tle zmienność ozonu w większej skali przestrzennej, wyznaczono liniowe trendy w średnich sezonowych (1979-2018) CZO₃ z pomiarów spektrofotometrem Dobsona N°84 w Belsku i danych MSR-2 dla następujących obszarów: okolice Belska (20-21°E, 51-52°N),

Polska (14-24°E, 49-54.5°N), Środkowa Europa (12-24°E, 45-55°N), Europa (10°W-45°E, 35-60°N), pas średnich (30-60°N) i wysokich (60-90°N) szerokości geograficznych na półkuli północnej, tropiki (0-30°N). Na Rys.17 przykładowo przedstawiono odchyłki średnich sezonowych CZO₃ nad terytorium Polski (osobno w okresie zimy, wiosny, lata i jesieni) od wieloletniej (1979-2018) średniej jako procent tej średniej. Średnią wyznaczono z wartości CZO₃ z węzłów siatki obejmujących obszar Polski i część krajów sąsiednich.



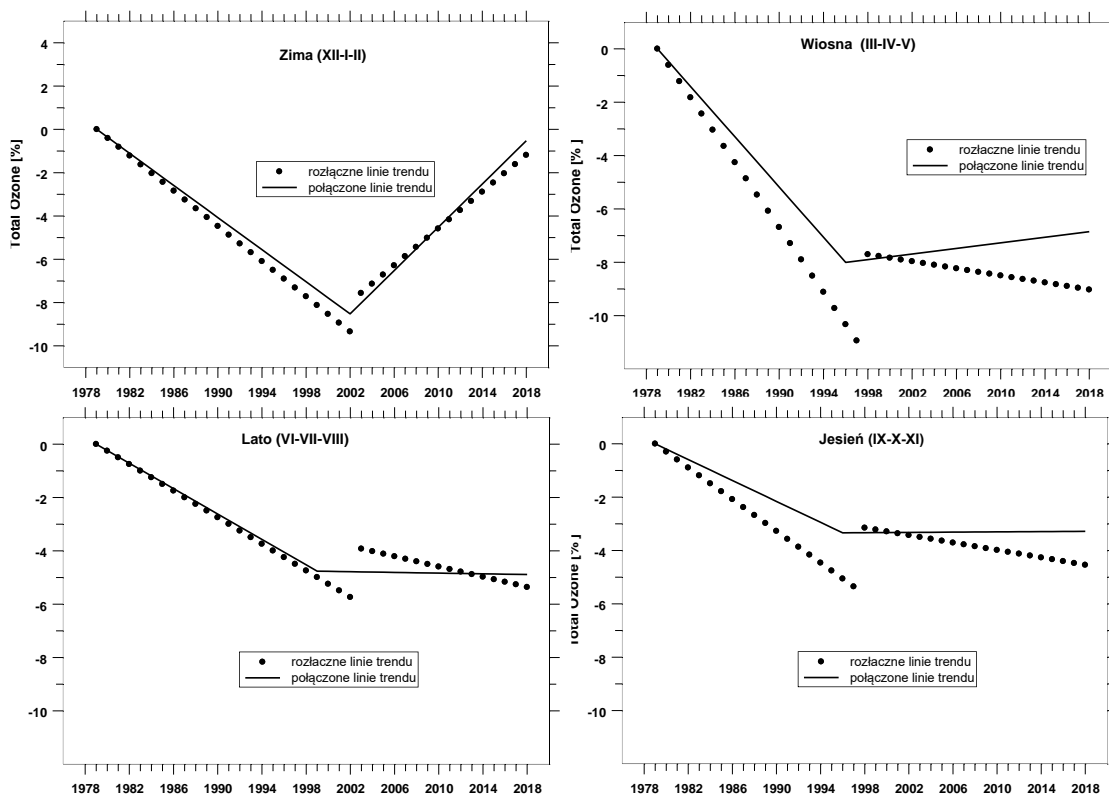
Rys. 17. Względne odchyłki sezonowych średnich CZO₃ (kółka) nad Polską w okresie 1979-2018 na podstawie danych satelitarnych MSR-2. Czerwona krzywa reprezentuje dane wygładzone metodą LOWES.

Spodziewana naprawa warstwy ozonowej po spadkowej tendencji trwającej do połowy lat 90-tych XX wieku wydaje się być widoczna w Polsce zimą i na jesieni (Rys.17). Sezonowy przebieg zmienności długookresowej CZO₃ może po części być wynikiem zmian w transgranicznym transporcie ozonu do Polski, które są indukowane zmianami w dynamice atmosfery. W modelach zmian długookresowych CZO₃ dąży się do uzyskania tzw. składowej antropogenicznej trendu z odfiltrowanymi krótkookresowymi (w skali od miesięcy do kilkunastu lat) zaburzeniami związanymi z procesami dynamicznymi w atmosferze. W tym celu stosuje się modele regresji wieloskładnikowej parametryzując zmienność ozonu generowaną przez znane procesy dynamiczne np. oscylacje południowe, oscylacje

północnoatlantyckie, cyrkulacja Brewera-Dobsona itp. Wyznaczono antropogeniczną składową trendu stosując regresję wieloliniową z parametryzacją efektów związanych z podstawowymi czynnikami wpływającymi na zmienność ozonu: 11-letnia aktywność słońca, NAO, QBO, ENSO, cyrkulacja Brewera-Dobsona, aerozol stratosferyczny. Założono, że antropogeniczna składowa trendu jest funkcją liniową złożoną z dwóch odcinków: jeden od 1979 (początek danych) do momentu zmiany kierunku trendu (po roku 1995, co sugeruje przebieg SNWO₃ w średnich szerokościach geograficznych, Rys.18????), drugi odcinek reprezentuje obecną fazę zmian CZO₃. Termin zmiany kierunku trendu nie jest z góry zadany i może wystąpić w okresie 1996-2001, czyli do momentu zmiany kształtu SNWO₃ w wysokich szerokościach geograficznych. Termin zmiany kierunku trendu został wyznaczony z najlepszego dopasowania modelowanego przebiegu do obserwowanego stosując metodę najmniejszych kwadratów.

Odcinki tworzące trend w okresie 1979-2018 mogą być połączone lub rozłączne. Zwykle w modelowaniu zmian CZO₃ stosowano pierwsze podejście (tzw. piecewise trend lines). Ostatnio zaczęto stosować podejście drugie (tzw. independent trend lines), które zakłada niezależność trendów przed i po terminie odwrócenia kierunku trendu. Wymóg ciągłości linii trendu pociąga za sobą dopasowanie trendu w drugim okresie do trendu istniejącego na początku danych i powoduje wzmocnienie dodatniego trendu w drugim okresie, jeśli w pierwszym okresie występuje spadkowa tendencja.

W modelu statystycznym krótkookresowe zmiany CZO₃ związane z procesami zachodzącymi w dynamice atmosfery, które potencjalnie mogą wpływać na redystrybucję ozonu w skali globalnej, parametryzowano stosując następujące zmienne wyjaśniające: 11-letnią aktywność słoneczną (gęstość energii dla fali 10,7cm), indeks quasi dwuletnich oscylacji prędkości wiatru w równikowej stratosferze (tzw. QBO), indeks Południowych Oscylacji (tzw. indeks El Nino/La Nina), indeks Arktycznych oscylacji, grubość optyczną aerozolu w stratosferze dla fali 550nm, intensywność cyrkulacji Brewera-Dobsona parametryzowaną przez strumień ciepła w kierunku bieguna północnego. W szacowaniu niepewności trendu uwzględniono zmniejszenie liczby stopni swobody modelu regresyjnego ze względu na istniejące autokorelacje rzędu 1 w serii czasowej wartości resztkowych modelu. Niepewność oszacowań statystycznych wyznaczono stosując metodę bootstrap, czyli wyznaczono medianę i 95% przedział ufności szacowanych wielkości z zespołu wielkości pochodzących z wielokrotnego (10,000 razy) zastosowania modelu regresji dla hipotetycznych serii czasowych CZO₃, w których losowo zmieniano wyraz modelu odpowiedzialny za przypadkowy szum.



Rys.18. Przebieg trendów do rozłącznych i połączonych segmentów liniowych (% na 10 lat) w sezonowych CZO₃ nad Polską w okresie 1979-2018 na podstawie danych satelitarnych MSR-2.

Przykładowo na Rys.18 przedstawiono sezonowe trendy CZO₃ w Polsce, które wyznaczono stosując model z połączonymi i rozłącznymi fragmentami trendu. Trendy reprezentują zmiany liniowe w średnich sezonowych CZO₃ po wyeliminowaniu naturalnych fluktuacji związanych z procesami dynamicznymi w atmosferze, które wpływają na zmiany koncentracji ozonu w dolnej stratosferze i troposferze. Przebiegi trendów dla sezonu wiosennego wskazują, że kierunki zmian CZO₃ wyznaczone dwoma metodami mogą być odmienne. Wartości trendów, także w innych obszarach, przedstawiono w Tabeli 2.

Tabela 2. Trendy w średnich sezonowych CZO₃ w wybranych obszarach na półkuli północnej dla modelu z połączonymi i rozłączonymi liniowymi segmentami. Wyniki istotne statystycznie zaznaczono pogrubioną czcionką. W nawiasach przedstawiono przedziały 5 i 95 percentyla dla szacowanego trendu.

| Region | Trend (%/10 yr) | | | |
|-------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|
| | 1979-1996/2001 | | 1997/2002- 2018 | |
| | Joint Segments | Free Segments | Joint Segments | Free Segments |
| | <i>Winter (DJM)</i> | | | |
| Belsk-Dobson | -4.7 (-7.6, -2.3) | -2.2 (-6.4, 1.5) | 2.7 (0.6, 5.3) | 4.1 (0.2, 6.9) |
| Belsk-Satellite | -4.1 (-6.2, -2.6) | -3.9 (-7.0, -1.4) | 4.5 (2.4, 6.7) | 4.3 (1.4, 7.1) |
| Poland | -4.1 (-6.2, -2.6) | -3.9 (-6.9, -1.4) | 4.6 (2.4, 6.7) | 4.3 (1.5, 7.0) |
| Central Europe | -4.1 (-6.2, -2.6) | -4.2 (-6.8, -1.8) | 4.3 (2.4, 6.4) | 3.7 (1.2, 6.3) |
| Europe | -3.6 (-5.4, -2.4) | -3.7 (-5.8, -1.9) | 3.2 (1.8, 4.8) | 2.7 (0.8, 4.7) |
| NH Mid-latitudes | -3.1 (-4.2, -2.0) | -2.6 (-3.9, -1.5) | 1.8 (1.1, 2.8) | 1.6 (0.4, 3.0) |
| NH High-latitudes | No Available | No Available | No Available | No Available |
| NH Tropics | -0.8 (-1.4, -0.3) | -1.3 (-2.1, -0.4) | 0.8 (0.4, 1.3) | 0.3 (-0.2, 1.0) |
| | <i>Spring (MAM)</i> | | | |
| Belsk-Dobson | -5.9 (-7.6, -4.2) | -5.7 (-7.5, -4.3) | 1.4 (0.3, 2.9) | 0.0 (-1.6, 1.9) |
| Belsk-Satellite | -4.2 (-5.8, -2.7) | -5.9 (-8.0, -3.6) | 0.6 (-0.4, 2.0) | -1.0 (-2.5, 0.4) |
| Poland | -4.4 (-5.9, -2.9) | -6.1 (-8.0, -3.8) | 0.8 (-0.2, 2.1) | -0.8 (-2.2, 0.6) |
| Central Europe | -4.2 (-5.7, -2.8) | -5.8 (-7.6, -3.7) | 0.8 (-0.1, 2.0) | -0.7 (-2.0, 0.6) |
| Europe | -3.6 (-4.8, -2.3) | -5.2 (-6.6, -3.5) | 1.2 (0.4, 2.3) | -0.2 (-1.3, 0.8) |
| NH Mid-latitudes | -3.0 (-4.0, -2.0) | -3.9 (-5.1, -2.4) | 1.2 (0.6, 2.1) | 0.5 (-0.3, 1.3) |
| NH High-latitudes | -4.8 (-7.0, -2.8) | -6.1 (-8.8, -3.2) | 3.6 (2.2, 5.6) | 2.2 (0.3, 4.5) |
| NH Tropics | -0.3 (-0.8, 0.1) | -0.6 (-1.3, 0.1) | 0.7 (0.3, 1.1) | 0.3 (-0.1, 1.0) |
| | <i>Summer (JJA)</i> | | | |
| Belsk-Dobson | -3.9 (-5.1, -3.0) | -4.2 (-5.3, -3.1) | 0.8 (-0.1, 2.0) | -0.3 (-1.6, 1.1) |
| Belsk-Satellite | -2.6 (-3.6, -1.8) | -2.7 (-3.9, -1.4) | -0.3 (-1.0, 0.6) | -1.1 (-2.5, 0.6) |
| Poland | -2.4 (-3.4, -1.7) | -2.6 (-3.8, -1.3) | -0.1 (-0.8, 0.9) | -0.9 (-2.2, 0.8) |
| Central Europe | -2.4 (-3.4, -1.6) | -2.5 (-3.6, -1.3) | -0.0 (-0.8, 0.9) | -1.0 (-2.3, 0.6) |
| Europe | -1.7 (-2.5, -1.0) | -1.9 (-3.0, -0.9) | 0.5 (-0.1, 1.2) | -0.3 (-1.2, 0.9) |
| NH Mid-latitudes | -1.5 (-2.3, -0.8) | -1.6 (-2.5, -0.7) | 0.1 (-0.7, 1.4) | -0.1 (-1.0, 1.0) |
| NH High-latitudes | -1.4 (-2.3, -0.6) | -2.5 (-3.9, -0.9) | 0.4 (-0.4, 1.2) | -0.7 (-1.7, 0.6) |
| NH Tropics | -0.3 (-0.9, 0.2) | -0.3 (-1.1, 0.6) | 1.1 (0.7, 1.7) | 0.9 (0.1, 1.9) |
| | <i>Autumn (SON)</i> | | | |
| Belsk-Dobson | -2.7 (-4.2, -1.4) | -3.7 (-5.5, -1.9) | 0.8 (-0.5, 2.2) | -0.8 (-2.6, 1.1) |
| Belsk-Satellite | -1.7 (-3.0, -0.6) | -2.7 (-4.6, -0.9) | 0.1 (-1.0, 1.2) | -1.1 (-2.3, 0.5) |
| Poland | -1.8 (-3.0, -0.7) | -2.9 (-4.7, -1.1) | 0.2 (-0.8, 1.3) | -0.9 (-2.1, 0.5) |
| Central Europe | -1.4 (-2.5, -0.4) | -2.5 (-4.1, -0.8) | 0.0 (-0.9, 1.0) | -1.0 (-2.1, 0.3) |
| Europe | -1.5 (-2.3, -0.8) | -2.3 (-3.3, -1.2) | 0.2 (-0.3, 0.9) | -0.5 (-1.2, 0.2) |
| NH Mid-latitudes | -1.6 (-2.2, -1.0) | -2.3 (-3.0, -1.5) | 0.4 (0.0, 0.9) | -0.1 (-0.6, 0.3) |
| NH High-latitudes | -1.1 (-2.3, -0.0) | -2.8 (-4.5, -1.0) | -0.6 (-1.8, 0.4) | -2.0 (-3.0, -0.9) |
| NH Tropics | -0.4 (-0.9, 0.1) | 0.2 (-0.5, 0.9) | 0.8 (0.3, 2.1) | 1.2 (0.5, 1.9) |

Od końca lat 90-tych XX wieku zawartość w stratosferze substancji niszczących warstwę ozonową zaczyna się stopniowo zmniejszać i w konsekwencji w XXI wieku we wszystkich analizowanych obszarach i sezonach nie obserwuje się spadkowej tendencji w CZO₃, którą zanotowana we wcześniejszym okresie. Najmniejsze ubytki ozonu ~ 1% na 10 lat w pierwszym okresie zanotowano w tropikach (0°N-30°N) i w sezonach jesiennych. Natomiast największe ubytki ozonu ~5% na 10 lat miały miejsce w strefie poza-równikowej w sezonach wiosennych. Trendy wyznaczone dla Belsku okazały się reprezentatywne dla Polski i Centralnej Europy i są około 0,5-1% większe (co do wartości bezwzględnej) od odpowiadających sezonowych trendów w Europie i średnich szerokościach geograficznych.

Naprawę warstwy ozonowej na półkuli północnej wyraźnie widać w sezonie zimowym. W ostatnim okresie istotnie statystycznie wzrostowe trendy wyznaczone z zastosowaniem obu modeli znaleziono w sezonie zimowym we wszystkich analizowanych obszarach. Największe wzrosty ~5% na 10 lat zanotowano w Polsce i Centralnej Europie, a znacznie mniejsze w średnich szerokościach geograficznych (~3%) i w tropikach (~1%). Wzrostowe trendy (~1% na 10 lat) wyznaczono w obszarach tropikalnych także w pozostałych sezonach. Model z połączonymi odcinkami trendu wskazuje w sezonie wiosennym na dodatnie trendy (~1% na 10 lat) w danych ze spektrofotometru Dobsona, także w Europie i w średnich szerokościach geograficznych. Natomiast w wysokich szerokościach geograficznych (>60°N) wiosenny trend jest najwyższy (~3% na 10 lat). Model z rozłącznymi odcinkami trendu wskazuje na istotny dodatni trend w tym sezonie tylko w wysokich szerokościach geograficznych.

Obecnie poziom zanieczyszczenia atmosfery substancjami niszczącymi warstwę ozonową jest nadal wysoki (Rys. 16) i nie wydaje się prawdopodobne, że stosunkowo niewielkie zmniejszenie tej koncentracji w XXI wieku doprowadziło do zauważalnej naprawy warstwy ozonowej we wszystkich porach roku. Istnieją, więc prawdopodobnie inne mechanizmy powodujące osłabienie lub wzmocnienie tempa naprawy warstwy ozonowej. Poza sezonem zimowym naprawa warstwy ozonowej ma lokalny charakter i jest widoczna w strefie równikowej i nad niektórymi obszarami poza równikiem (np. w Arktyce na wiosnę). Mechanizmem różnicującym tempo naprawy warstwy ozonowej w różnych rejonach mogą być np. lokalne zmiany w dynamice atmosfery powiązane ze zmianami klimatu, prowadzące np. do wzrostu napływu powietrza ubogiego w ozon ze stratosfery równikowej do wybranych obszarów poza równikowych. Warto zauważyć, pojawienie się w ostatnich latach dodatniego trendu (~1% na 10 lat) w strefie równikowej we wszystkich sezonach, który nie był poprzedzony okresem ujemnego trendu w latach 80-tych i 90-tych. Istnieją sugestie, że wzrost ozonu w strefie równikowej jest wynikiem wzrostu koncentracji ozonu w troposferze, co może mieć poważne konsekwencje dla globalnych zmian klimatu, gdyż ozon w troposferze

jest gazem cieplarnianym. Nie można też wykluczyć ewentualności, że w analizowanej serii czasowej poziom ozonu w ostatnich kilku latach jest zawyżony (lub zaniżony) w wyniku nieodpowiedniej kalibracji spektrofotometrów działających na platformach satelitarnych.

Podsumowanie

W ostatnich kilkunastu latach warstwa ozonowa na obu półkulach odbudowuje się po okresie (do połowy lat 90-tych XX wieku), kiedy była niszczona przez substancje antropogeniczne zawierające związki chloru i bromu (freony, halony). Wydaje się, że 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 w okresie zmniejszania się (po 1996 r.) koncentracji substancji niszczących warstwę ozonową w stratosferze (WMO, 2014). Zaskakująco w dolnej stratosferze (12-18km) trendy stawały się ujemne. Oczekiwany wzrostowy trend w całkowitej zawartości ozonu w średnich szerokościach geograficznych jednak pojawiał się w zimowych seriach czasowych CZO_3 po 2000 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. Spadkowy trend w dolnej stratosferze jest tym bardziej zaskakujący, że nie został on potwierdzony przez zaawansowane modele fizyko-chemiczne atmosfery (SOCOL, WACCM), które odtworzyły jedynie regenerację warstwy ozonowej wysoko w stratosferze. W tym momencie natura zmian ozonu w dolnej stratosferze nie jest poznana. Autorzy wnioskujeją, że może to być efekt niszczenia ozonu w tej części atmosfery przez krótko żyjące substancje niekontrolowane przez ustalenia Protokołu Montrealskiego i jego późniejsze poprawki. Należy podkreślić, 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.

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 CZO_3 . Wzrostowe, bez ustalonego kierunku, lub nawet spadkowe tendencje w CZO_3 związane z naturalnymi oscylacjami w procesach dynamicznych zachodzących w dolnej stratosferze mogą, więc występować na przemian utrudniając ocenę antropogenicznej składowej trendu i tym samym nie pozwalając ocenić w jakim stopniu warstwa ozonowa zmieniła się w wyniku ograniczenia produkcji substancji niszczących ozon według zaleceń Montrealskiego Protokołu 1987 o ochronie warstwy ozonowej.

W 1987 r. społeczność międzynarodowa podjęła bezprecedensowy wysiłek i uzgodniła w ramach tzw. Protokołu Montrealskiego szereg działań, których skutkiem miało być zredukowanie emisji freonów do atmosfery i innych substancji niszczących warstwę ozonową. Obecnie istnieje przekonanie, że dzięki Protokołowi Montrealskiemu i jego późniejszym poprawkom, wprowadzającym dalsze ograniczenia w produkcji substancji szkodliwych dla ozonu, antropogeniczne niszczenia warstwy ozonowej w skali obserwowanej w latach 80 i 90-tych ubiegłego wieku nie jest możliwe w najbliższych dziesięcioleciach, ale obecny stan wiedzy nie pozwala przewidywać termin regeneracji warstwy ozonowej. 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.