



Główny Inspektorat Ochrony Środowiska

**ANALIZA I INTERPRETACJA DANYCH,
OCENA TRENDÓW I SKALI ZJAWISKA W POLSCE
NA TLE GLOBALNYCH ZMIAN WARSTWY OZONOWEJ
W 2020 ROKU
RAPORT SYNTETYCZNY**



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

Warszawa, 2021

Przygotowano w Instytucie Geofizyki Polskiej Akademii Nauk na podstawie raportów rocznych IGF PAN i IMGW-PIB za 2020 rok wykonanych przez następujących autorów:

Janusz Jarosławski, Janusz W. Krzyścin, Aleksander Pietruczuk, Jerzy Podgórski, Bonawentura Rajewska-Więch, Piotr Sobolewski, Jakub Wink - Zakład Fizyki Atmosfery IGF PAN,

Julita Biszczuk-Jakubowska, Aleksander Curyło, Bogumił Kois, Bożena Łapeta, Monika Hajto – Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy

*Przy cytowaniu danych należy podawać źródło danych:
Państwowy Monitoring Środowiska, Główny Inspektorat 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 tworzy się w procesie fotochemicznym inicjowanym pochłanianiem intensywnego promieniowania UV przez tlen cząsteczkowy. Po dysocjacji O_2 na atomy, tlen atomowy łączy się szybko z inną cząsteczką O_2 . Warunkiem powstania ozonu jest obecność trzeciej dowolnej cząsteczki, która przejmie nadmiar energii. Główne źródło ozonu znajduje się w strefie międzyzwrotnikowej na wysokościach powyżej 25km. Maksymalne nasycenie atmosfery ozonem występuje latem na wysokości ~35km i wynosi ~10 cząsteczek O_3 na milion cząsteczek powietrza. Ozon tworzy się także w niewielkich ilościach podczas burz, a przy powierzchni Ziemi jest wtórnym zanieczyszczeniem powietrza, produkowanym w obecności tlenków azotu i lotnych węglowodorów, działającym toksycznie na drogi oddechowe podczas epizodów tzw. smogu fotochemicznego.

Ozon ze strefy zwrotnikowej jest przenoszony w stronę biegunów. W rezultacie powstaje warstwa ozonowa, która rozprzestrzenia się nad całym globem. Pochłanianie przez ozon promieniowania UV powoduje wzrost temperatury powietrza i powstanie stratosfery na wysokościach od 6-18km do ~50km. Dolna granica stratosfery (tropopauza) ogranicza zasięg konwekcji, stabilizuje klimat na powierzchni Ziemi. Stratosferyczna warstwa ozonowa, zawierająca średnio ~90% ozonu całkowitego, absorbuje w pełni zabójcze promieniowanie UV-C (100-280nm) i pochłania większość promieniowania UV-B (280-320nm), tak że do powierzchni Ziemi dociera tylko kilka procent biologicznie czynnego promieniowania UV. Cieńsza warstwa ozonowa zwiększa ilość słonecznego UV-B. Wiadomo, że promieniowanie UV-B może być szkodliwe dla wszelkich organizmów żyjących, a wzrost jego natężenia może spowodować szkody w naturalnych ekosystemach, w tym może również wywierać niekorzystny wpływ na zdrowie ludzi (wzrost zachorowań na raka i zaćmę, osłabienie układu odpornościowego).

W roku 1974 sugerowano możliwość zmniejszenia koncentracji ozonu w górnej stratosferze wywołane antropogeniczną emisją freonów. W następnych latach wzrost zawartości tych substancji w atmosferze doprowadził do przyspieszenia procesów niszczenia ozonu, w skali globalnej w końcu lat 1970., szczególnie drastycznie od wczesnych lat 1980., na półkuli południowej w rejonie polarnym na wiosnę – „antarktyczna dziura ozonowa”.

W obawie o dalszy los warstwy ozonowej podpisano Protokół Montrealski (PM) w roku 1987, a po szeregu rewizji w kolejnych latach wytwarzanie freonów i halonów zostało zakazane. Pomiary atmosferyczne potwierdzają skuteczność PM w zmniejszaniu ilości substancji szkodliwych dla warstwy ozonowej.

Konwencja Narodów Zjednoczonych o ochronie warstwy ozonowej z 1985 r. (Dz. U. z 1992 r. Nr 98, poz. 488) i Protokół Montrealski dotyczący ograniczenia emisji substancji niszczących warstwę ozonową z 1987 r. wraz z uzupełnieniami (Dz. U. z 1992 r. Nr 98, poz. 490), których Polska jest sygnatariuszem, nakładają obowiązek monitorowania stanu warstwy ozonowej i natężenia promieniowania nadfioletowego przy powierzchni Ziemi.

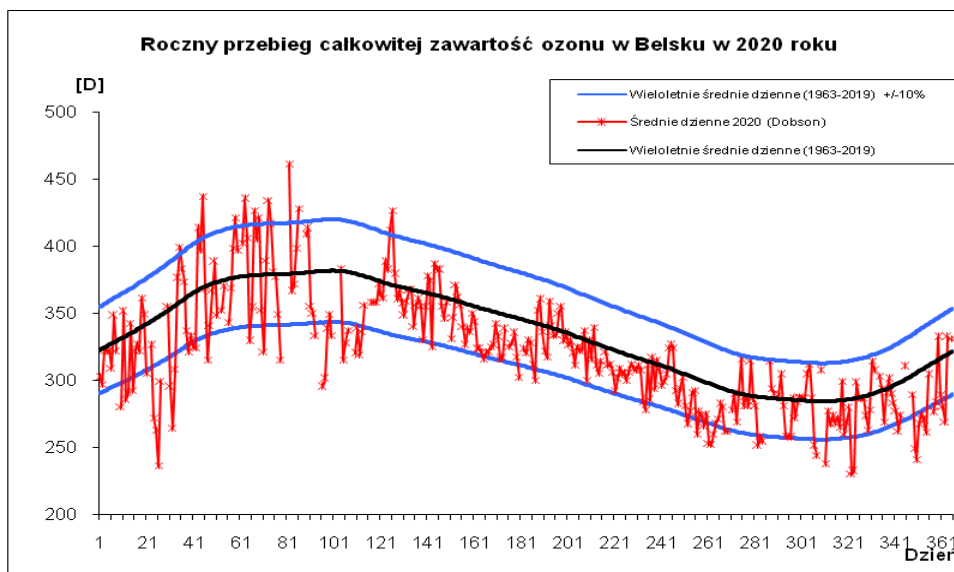
W raporcie przedstawiono analizę stanu warstwy ozonowej i poziomu promieniowania UV-B na podstawie pomiarów wykonanych w IMGW-PIB i IGF PAN w 2020 roku.

Całkowita zawartość ozonu

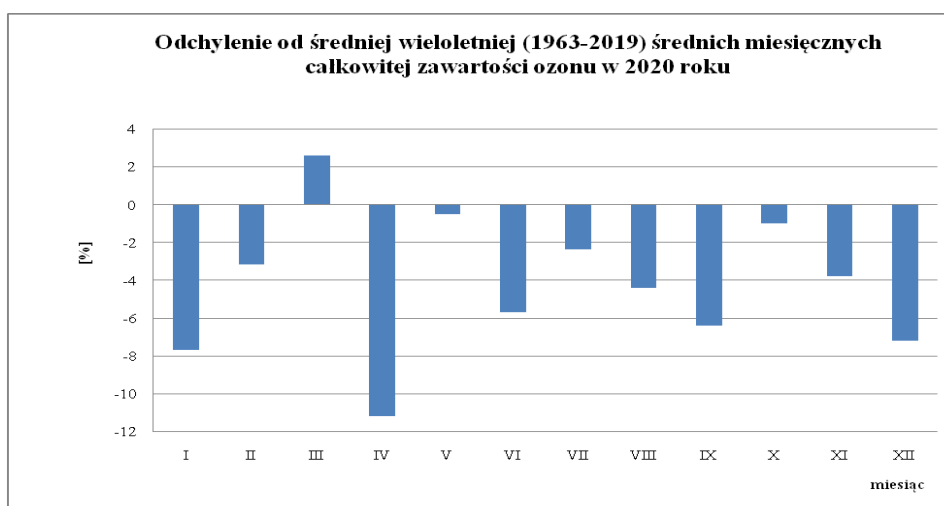
Pomiary całkowitej zawartości ozonu wykonywane są od 1963 roku w Centralnym Obserwatorium Geofizycznym PAN w Belsku przy pomocy spektrofotometru Dobsona, a od 1992 roku, równolegle, spektrofotometru Brewera.

Przebieg średnich wartości dziennych całkowitej zawartości ozonu w atmosferze w poszczególnych miesiącach przedstawia Rys.1, gdzie czerwona linia – średnie dzienne całkowitej zawartości ozonu w 2020 roku, linia czarna – wieloletnia (1963-2019) średnia dzienna całkowitej zawartości ozonu, linia niebieska – odchylenie o $\pm 10\%$ od wieloletniej średniej dziennej.

Analiza danych o całkowitej zawartości ozonu uzyskanych przy pomocy spektrofotometru Dobsona pozwala stwierdzić, że w 2020 roku średnie miesięczne wartości całkowitej zawartości ozonu w Belsku były wyższe od średniej wieloletniej z lat 1963-2019 tylko w marcu 2,6%. Ujemne odchylenia średniej miesięcznej całkowitej zawartości ozonu od średniej wieloletniej zaobserwowano w styczniu 7,7%, lutym 3,2%, kwietniu 11,2%, maju 0,5%, czerwcu 5,7%, lipcu 2,4%, sierpniu 4,4%, wrześniu 6,4%, październiku 1,0%, listopadzie 3,8% i grudniu 7,2%. Odchylenia procentowe średnich miesięcznych całkowitej zawartości ozonu od odpowiednich średnich wieloletnich przedstawia Rys.2 i Tab.1.



Rys.1. Roczny przebieg średnich dziennych całkowitej zawartości ozonu, Belsk 2020 roku.

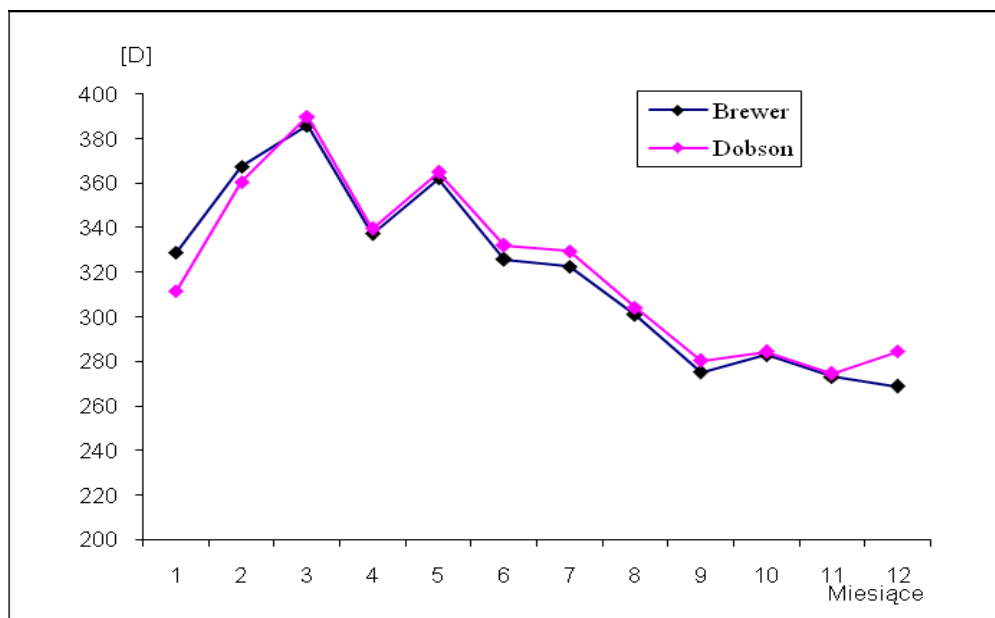


Rys.2. Odchylenie od średniej wieloletniej (1963-2019) średnich miesięcznych całkowitej zawartości ozonu w 2020 roku

Tabela 1. Średnie miesięczne całkowitej zawartości ozonu [D] w 2020 roku ich odstępstwa od średnich wieloletnich 1963-2019.

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Śr. wiel. 1963-2019	338	370	380	381	367	352	337	318	299	287	286	307
Śr. mieś. 2020	312	358	390	339	365	332	329	304	280	284	275	285
Różnica w %	-7,7	-3,2	2,6	-11,2	-0,5	-5,7	-2,4	-4,4	-6,4	-1,0	-3,8	-7,2

Przez cały 2020 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 2020

Zgodność danych o całkowitej zawartości ozonu uzyskanych ze spektrofotometru Brewera z danymi otrzymanymi przy pomocy spektrofotometru Dobsona może być oceniona jako dobra. Różnica średnich miesięcznych całkowitej zawartości ozonu uzyskanych za pomocą spektrofotometru Dobsona i Brewera mieści się w granicach około $\pm 2\%$ w ciągu całego roku. Należy dodać, że wyniki tych pomiarów różnią się między innymi dlatego, że spektrofotometr Brewera dostarcza danych, w których uwzględniony jest błąd wynikający z obecności w atmosferze zaburzającego absorbera, jakim jest dwutlenek siarki (SO_2). Mimo wymienionych różnic pomiarowych, średnie miesięczne całkowitej zawartości ozonu uzyskane przy pomocy obydwu przyrządów różnią się niewiele (Rys.3).

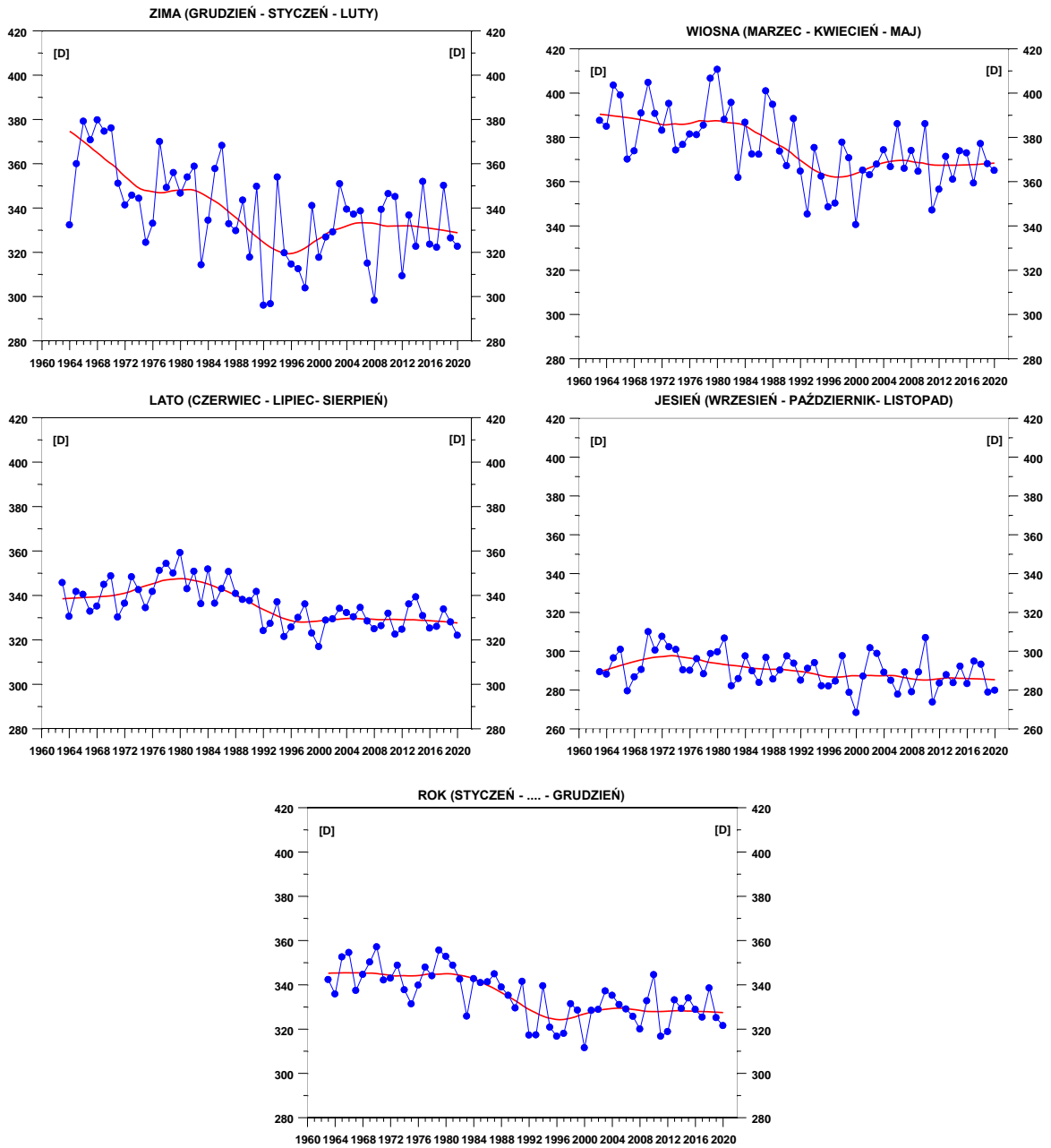
Jakkolwiek podstawowym przyrządem sieci pomiarów całkowitej zawartości ozonu nadal pozostaje spektrofotometr Dobsona, to jednak możliwość kontynuacji pomiarów i analiz porównawczych obu przyrządów jest niezwykle ważna, chociażby ze względu na zapewnienie ciągłości serii pomiarów.

W Centralnym Obserwatorium Geofizycznym w Belsku w ciągu całego 2020 r. obserwowano wartości średnich miesięcznych całkowitej zawartości ozonu (CZO_3) niższe od wieloletnich (1963-2019) średnich miesięcznych. W styczniu, kwietniu i grudniu średnia

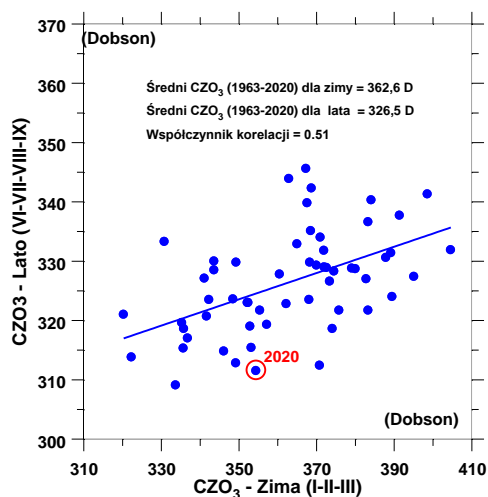
miesięczna wartości CZO_3 (Rys. 2.) była znacznie poniżej (11,2-7,2%) wieloletniej normy. Dla pozostałych miesięcy średnie miesięczne wartości CZO_3 fluktuowały względem średniego poziomu w granicach od -6,4% we wrześniu do 2,6% w marcu. Wartości odchyłek średnich dziennych od średnich wieloletnich przekraczały -10%, zwłaszcza w sezonie zimowym (Rys.1). Niskie dzienne wartości CZO_3 w stosunku do średnich wieloletnich pojawiły się zimą w okresie od stycznia do kwietnia oraz w listopadzie i grudniu.

Analizując długookresowe zmiany średnich sezonowych CZO_3 w Belsku (krzywe o 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 wzrostową tendencję w średnich rocznych CZO_3 , a także w zimowych i wiosennych średnich wartościach CZO_3 . Na początku XXI wieku (około 2004 r.) powyższa tendencja zostaje zahamowana i średnie wartości CZO_3 oscylują wokół ustalonego poziomu bez wyraźnego trendu. Natomiast stabilizację wartości ozonu na poziomie minimum z połowy lat 90-tych XX wieku obserwujemy w sezonach letnim i jesiennym po 1996 r.

W 2020 r. średnia CZO_3 w okresie czerwiec-wrzesień (312 D) była około 4,6% niższa niż wieloletnia norma (327 D) dla tego okresu. W tej sytuacji przy braku zachmurzenia poziom promieniowania UV przy powierzchni Ziemi powinien być wyższy (o około 5%) niż wieloletnia norma. Wartości CZO_3 w sezonie letnim 2020, wskazują, że wcześniej w sezonie zimowym (styczeń-marzec) poziom CZO_3 był poniżej wieloletniej (1963-2019) normy (Rys.5.). W 2020 r. powyższa zimowa średnia wynosiła 354 D, około 2,5% poniżej wieloletniej normy (363 D). Wystąpienie zimą wartości CZO_3 znacznie poniżej wieloletniej normy jest sygnałem osłabienia wielkoskalowej komórki cyrkulacyjnej w stratosferze prowadzącej do wymiany masy między równikiem a biegunem północnym (tzw. cyrkulacji Brewera-Dobsona), która w zimie powoduje akumulację ozonu w średnich i wysokich szerokościach geograficznych. Niedobory CZO_3 , które wystąpiły w okresie zimowym nie zostaną w późniejszych miesiącach zlikwidowane, gdyż niskie wartości CZO_3 pojawiają się w skali całej półkuli poza strefą równikową.

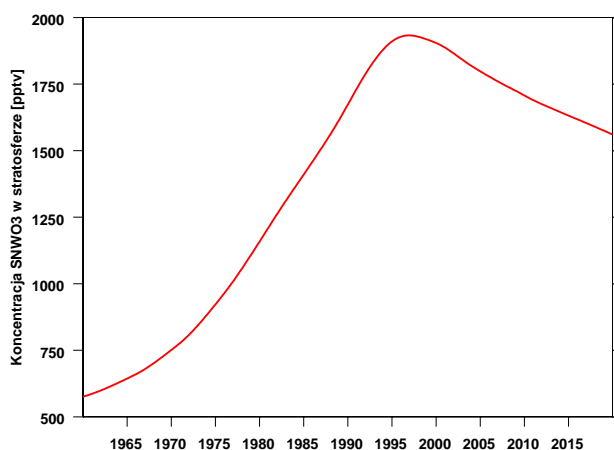


Rys.4. Średnie sezonowe całkowitej zawartości ozonu, uzyskane z pomiarów spektrofotometrem Dobsona w COG IGF PAN, Belsk w okresie 1963-2020.



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 2020 r.

Zmiany w warstwie ozonowej nad Belskiem obserwowane od połowy lat 90 XX wieku potwierdzają skuteczność ustaleń Protokołu Montrealskiego z 1987 r. Protokół Montrealski i jego późniejsze poprawki dot. ochrony warstwy ozonowej wprowadziły szereg ograniczeń w produkcji substancji niszczących warstwę ozonową. Od połowy lat 90-tych ubiegłego wieku koncentracja takich substancji w stratosferze zaczyna maleć (Rys 6.). W związku z tym oczekiwano zatrzymania, a następnie odwrócenia spadkowej tendencji w zawartości ozonu w atmosferze.

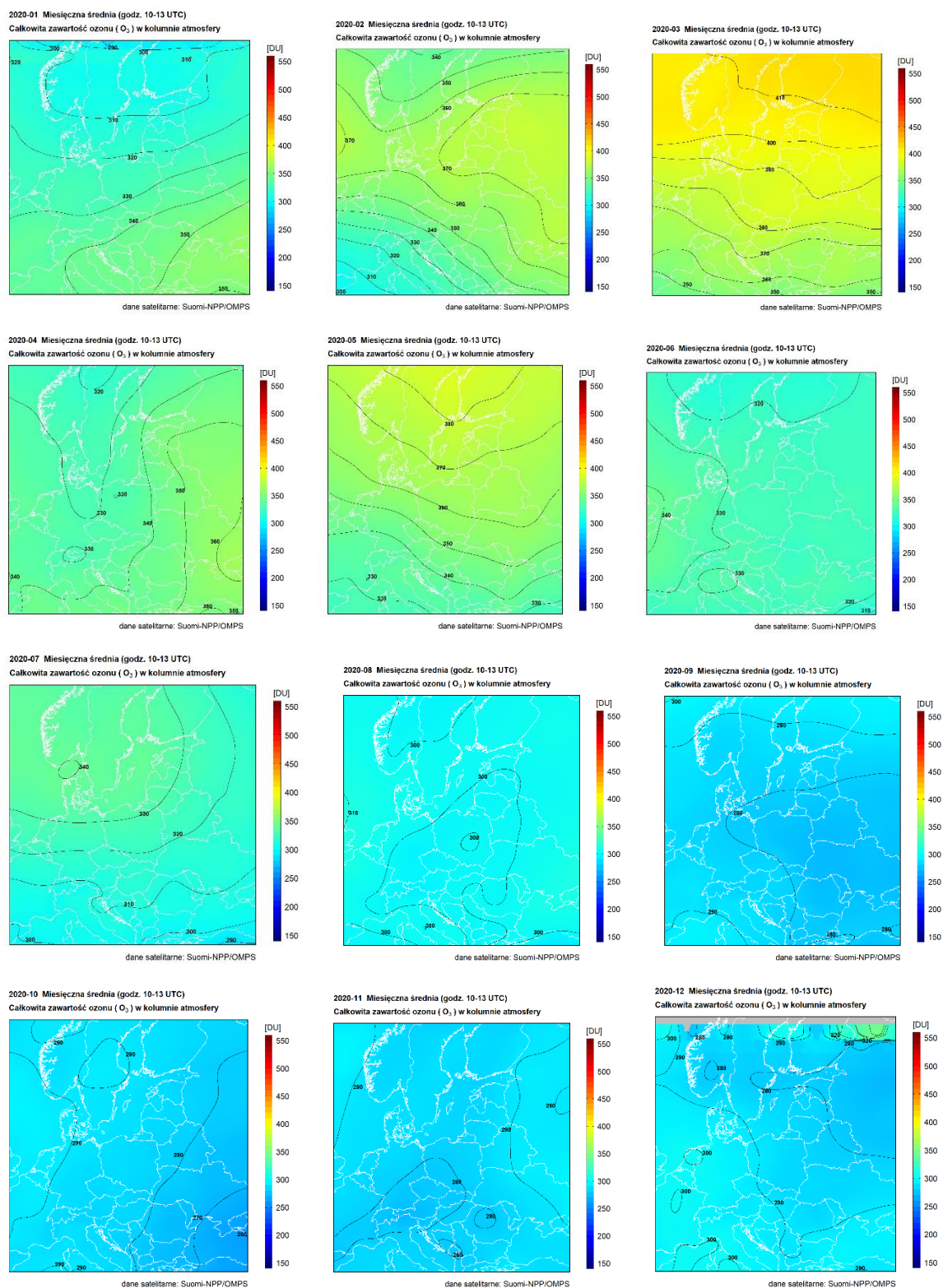


Rys.6. Zawartość substancji niszczących warstwę ozonową (SNWO₃) w stratosferze (1960-2020) w średnich szerokościach geograficznych według obliczeń modelowych (krzywa czerwona)

Zatrzymanie spadkowej tendencji w ozonie atmosferycznym w połowie lat 90-tych ubiegłego wieku zostało potwierdzone w licznych pracach między innymi także i w ostatnich pracach zespołu z IGF PAN (Krzyścin i Rajewska-Więch, 2009a, 2009b; Rajewska i Krzyścin, 2010; Krzyścin i inni, 2013; Krzyścin, 2015; Krzyścin i Rajewska, 2016, Krzyścin i Baranowski, 2019, Krzyścin i inni, 2020). Jednak regeneracja warstwy ozonowej nad Belskiem przebiega powoli i w ostatnich 10 latach raczej widać stabilizację poziomu CZO_3 niż jego stopniowy wzrost, który byłby oczekiwany w związku z systematycznie malejącą koncentracją substancji niszczących warstwę ozonową.

Satelitarny monitoring całkowitej zawartości ozonu 2020 roku był prowadzony w Zakładzie Teledetekcji Satelitarnej (ZTS) IMGW-PIB z wykorzystaniem danych satelitarnych z czujnika OzoneMapping and Profiler Suite (OMPS) znajdującego się na pokładzie satelity meteorologicznego hSuomi NPP (S-NPP). Całkowita zawartość ozonu wyznaczana była za pomocą oprogramowania OMPSNADIR_SPA 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 $0,25^\circ$. Wybór obszaru podyktowany był zasięgiem danych OMPS odbieranych w ZTS.

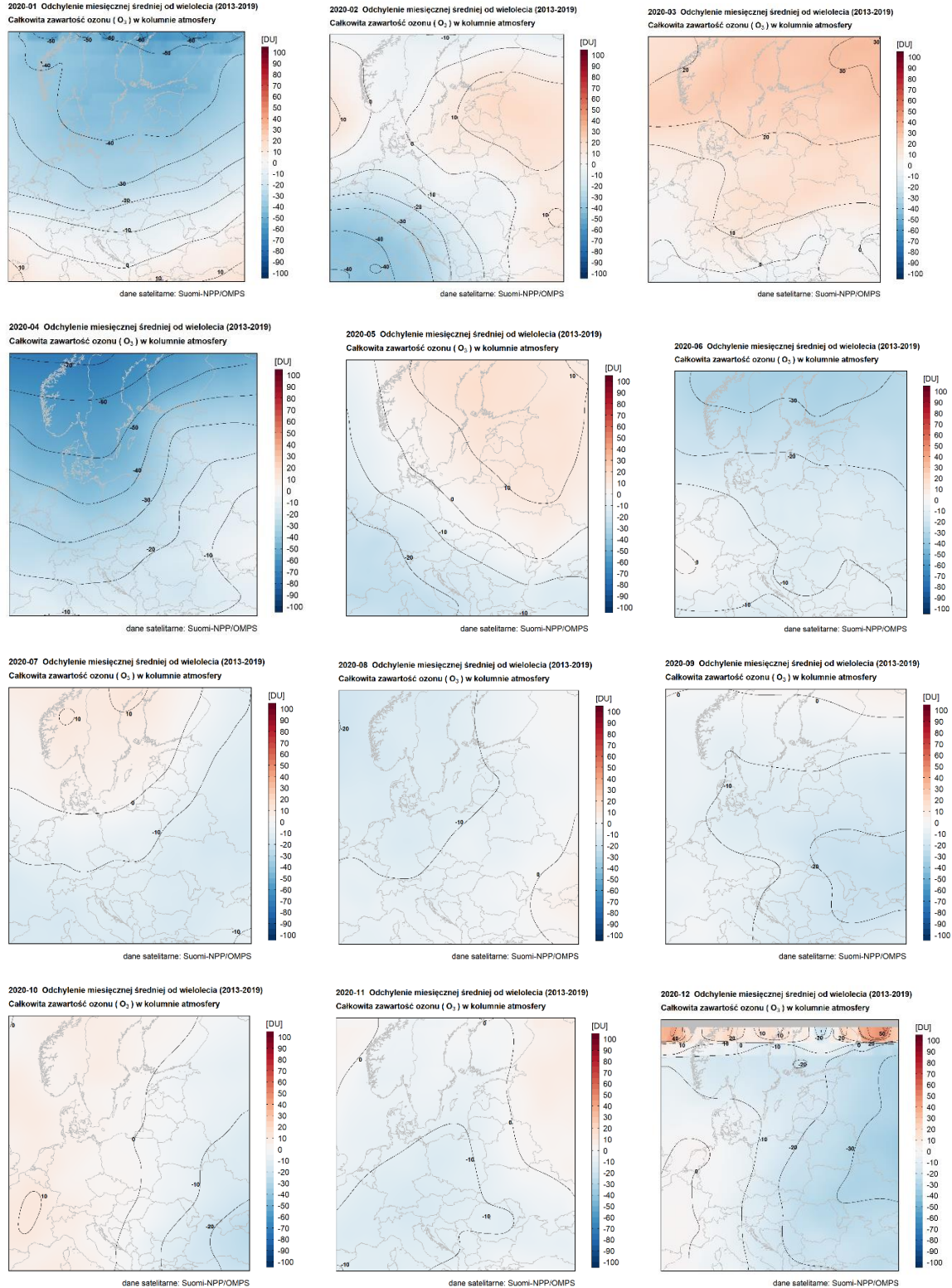
Dokładność wyznaczania całkowitej zawartości ozonu w kolumnie z danych OMPS oceniono poprzez porównanie z danymi naziemnymi. Analiza przeprowadzona dla stacji w Belsku (PL), Hohenpeissenberu (DE), Hradec-Kralowe (CZ) oraz Popradzie (SK) pokazała, że średni błąd kwadratowy obliczony dla tych stacji jest równy odpowiednio: 3,8%, 2,07%, 2,52% i 2,25%. Na podstawie dziennych rozkładów przestrzennych całkowitej zawartości ozonu obliczono średnie miesięczne rozkłady tego parametru nad Europą Środkową (Rys.7).



Rys.7. Średnie miesięczne rozkłady całkowitej zawartości ozonu w kolumnie wyznaczonej z satelitarnych danych OMPS/S-NPP OMPS/NOAA-20 w 2020.

Otrzymana zmienność średnich miesięcznych rozkładów ozonu jest zgodna z cyklem rocznym tego parametru, z wyjątkiem kwietnia, dla którego otrzymano niższe w porównaniu z marcem i majem wartości całkowitej zawartości ozonu. W celu oceny czy rozkład CZO_3

w 2020 wykazuje anomalie, wyznaczono średnie wieloletnie rozkłady tego parametru wyznaczonego z danych satelitarnych. Do obliczeń wykorzystano jedynie pola ozonu wyznaczone z danych satelitarnych z czujnika OMPS, które dostępne są operacyjnie od 2013 roku..



Rys.8. Rozkłady anomalii średniej miesięcznej zawartości ozonu wyznaczonej z danych OMPS w 2020 w stosunku do średniej z okresu 2013-2019

Tym samym średnie wieloletnie rozkłady CZO_3 obliczono dla okresu 2013-2019. Na Rys.8 pokazano rozkłady przestrzenne różnic pomiędzy średnimi miesięcznymi wartościami CZO_3 a średnimi wieloletnimi.

Łatwo zauważyć, że zawartość ozonu w Polsce, w styczniu, kwietniu, czerwcu i wrześniu 2020 była niższa od średniej z poprzednich 6 lat, a wyższa w marcu i maju.

Pionowy rozkład ozonu

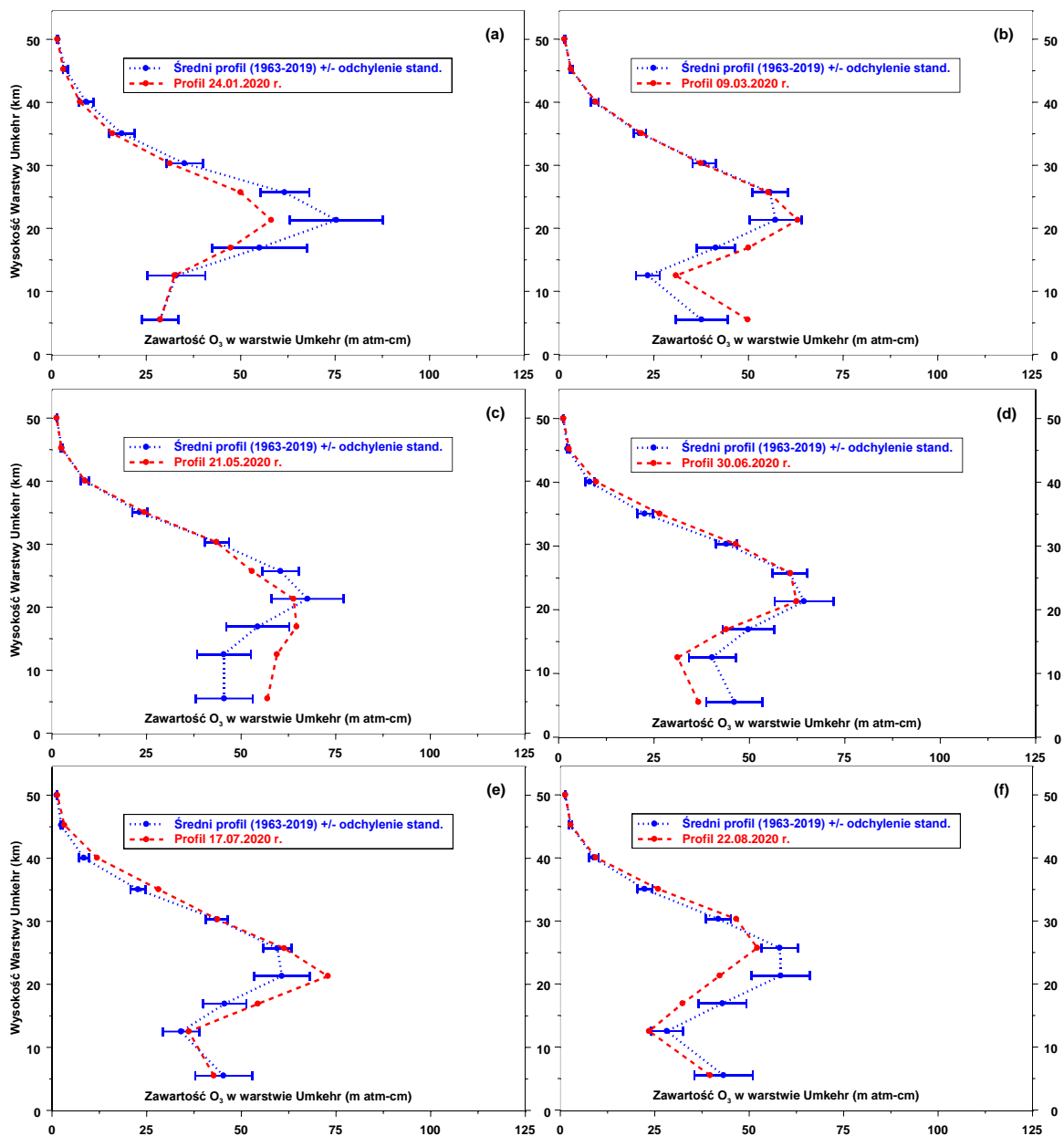
Serie pomiarów wykonywanych w świetle rozproszonym pochodzącym z niezachmurzonego zenitu przy odległościach zenitalnych Słońca $60^\circ - 90^\circ$ umożliwiają wyznaczenie rozkładu pionowego ozonu tzw. metodą Umkehr. Wyniki pomiarów z tych serii, po wstępnym opracowaniu w Belsku, wysyłane są do Centrum 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 2020 roku wykonano 110 serii pomiarowych przy pomocy spektrofotometru Dobsona pozwalających wyznaczyć pionowy rozkład ozonu metodą Umkehr (w tym 29 pomiarów zwanych „krótki Umkehr”).

Na Rys.9 przedstawiono interesujące przykłady zmian zawartości ozonu w poszczególnych umkehrskich warstwach atmosfery. Jak widać zmiany te w odniesieniu do średniej wieloletniej 1963-2019 (linia niebieska) są najbardziej spektakularne w dolnej stratosferze i w troposferze. Niestety, w metodzie Umkehr zawartości ozonu wyznaczone w najniższych warstwach są najmniej wiarygodne. Na Rys.9 można zauważyć znacznie większą zmienność średnich zawartości ozonu w dolnej stratosferze w okresie zimowo-wiosennym w porównaniu do lata. Ponadto profile ozonu w poszczególnych dniach mogą znacznie odbiegać od średnich wieloletnich, zarówno co do wartości w poszczególnych warstwach jak i wysokości wystąpienia maksimum ozonu.

Należy dodać, że zmiany profilu ozonu przy ustalonej całkowitej zawartości ozonu są jednym z czynników wpływających na wielkość natężenia promieniowania UV-B docierającego do powierzchni Ziemi. Dane ozonowe ze stacji dysponującymi długimi, ciągłymi i wiarygodnymi seriami pomiarowymi są szczególnie cenione w analizach statystycznych, mających na celu poznanie zmian zawartości ozonu na różnych wysokościach w atmosferze. W Europie są tylko trzy stacje wykonujące

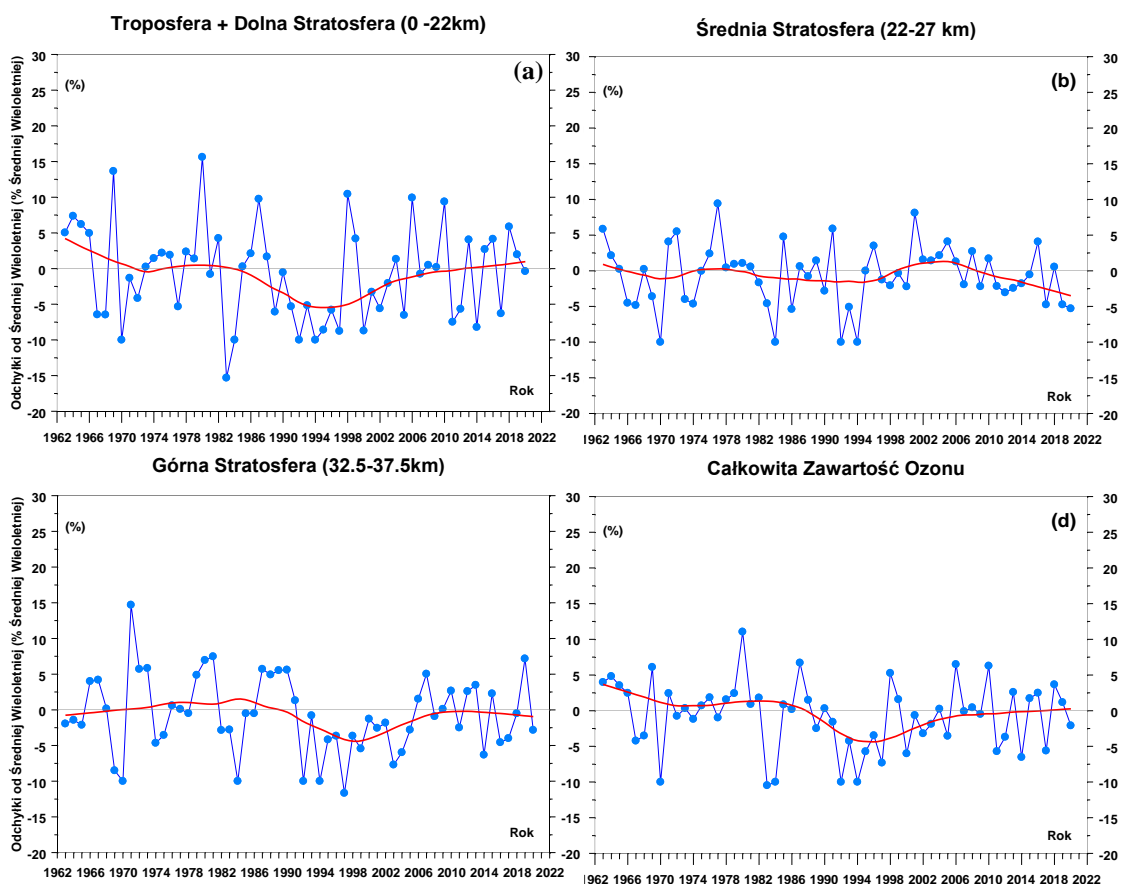
spektrofotometryczne pomiary rozkładu pionowego ozonu metodą Umkehr, w których tego typu pomiary wykonywane są ponad dwadzieścia lat. Należy do nich Belsk z ponad 50-letnią zrewaloryzowaną serią pomiarową. Wyniki pomiarów rozkładu pionowego ozonu metodą Umkehr w Belsku są szeroko stosowane w najpoważniejszych analizach statystycznych i metodycznych.



Rys.9. Pionowy profil O_3 dla wybranych dni w 2020 r. wyznaczony z pomiarów Umkehr spektrofotometrem Dobsona z zastosowaniem algorytmu obliczeniowego *UMK04*.

Obecnie w literaturze światowej toczy się dyskusja nad tempem powrotu warstwy ozonowej do stanu nie zaburzonego działalnością człowieka. W seriach czasowych

całkowitej zawartości ozonu w atmosferze i na wybranych poziomach w stratosferze poszukiwana jest zmiana kierunku trendu z ujemnego na dodatni, którą należałoby oczekiwać wraz z obserwowanym spadkiem zawartości w troposferze i stratosferze substancji niszczących warstwę ozonową. Badanie zmienności trendu w profilu pionowym ozonu jest szczególnie interesujące bowiem uważa się, że naprawa warstwy ozonowej rozpocznie się od obszarów w wysokiej stratosferze, gdzie zmiany w procesach chemicznej destrukcji ozonu są najłatwiejsze do zaobserwowania, wobec ograniczonego wpływu zmian w dynamice atmosfery i jej składzie chemicznym (np. wzrost CO_2) na koncentrację ozonu na tych wysokościach (Newchurch i inni, 2003).



Rys.10. Odchyłki średnich wiosennych (marzec-kwiecień-maj) od średniej wieloletniej zawartości ozonu w wybranych warstwach atmosfery z pomiarów Umkehr spektrofotometrem Dobsona w Belsku (1963-2020). 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.10. przedstawiono przebiegi średnich sezonowych (marzec-kwiecień-maj) zawartości ozonu w wybranych warstwach atmosfery (troposfera + dolna stratosfera, środkowa stratosfera, górna stratosfera, cała kolumna atmosfery) z pomiarów Umkehr spektrofotometrem Dobsona w Belsku. Profile ozonu na Rys.10 uzyskano stosując 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 poprzedniego algorytmu, *UMK92*, jest praktycznie taka sama jak ta uzyskana z zastosowaniem „nowego” algorytmu. Stanowi to potwierdzenie wyznaczonego kierunku zmian zawartości ozonu w tych warstwach.

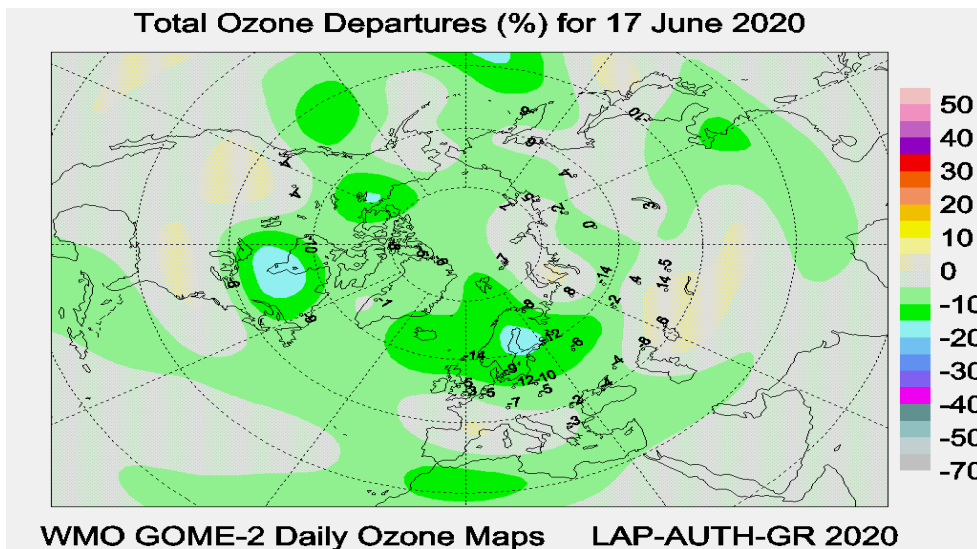
Przebiegi wygładzonych zmian zawartości ozonu w sezonach wiosennych (1963-2020) w wybranych warstwach atmosfery wskazują na wzrostową tendencję od połowy lat 90-tych XX wieku w zawartości ozonu w całej kolumnie atmosfery (Rys.10d), w warstwach 0-22km (troposfera i dolna stratosfera, Rys.10a) i 32,5-37,5 km (górną stratosferę, Rys.10c). Tendencja ta utrzymywała się do około 2005 r. Potem obserwowano stabilizację poziomu ozonu. W średniej stratosferze (22-27 km – Rys.10b) przez cały okres pomiarowy zawartość ozonu oscyluje wokół ustalonego poziomu bez wyraźnego trendu, ale od około 2005 pojawia się spadkowa tendencja. W sezonie wiosennym 2020 r. w średniej i wysokiej stratosferze i w całej kolumnie atmosfery zanotowano zawartości ozonu poniżej wieloletniej normy. Natomiast w dolnej stratosferze zaobserwowano zawartość ozonu w pobliżu normy.

W ostatnich latach obserwowana jest stabilizacja poziomu ozonu. Taka tendencja nie jest jeszcze utrwalona i dodanie kolejnych wyników pomiarów w następnych latach może zmienić kierunek trendu. W sprawozdaniu z 2016 r. dyskutowano, że w warstwie obejmującej dolną stratosferę i troposferę istnieje trwała dodatnia tendencja od 1995 r. Na zmiany ozonu w tej warstwie atmosfery dodatkowo wpływają procesy dynamiczne i dodanie kolejnych lat (2017 i 2018) zatrzymało wzrostowy trend ozonu. Natomiast dodanie 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.10c), co może sugerować pojawienie się w tej warstwie atmosfery substancji chemicznych niszczących warstwę ozonową, które nie są kontrolowane przez Protokół Montrealski i późniejsze poprawki.

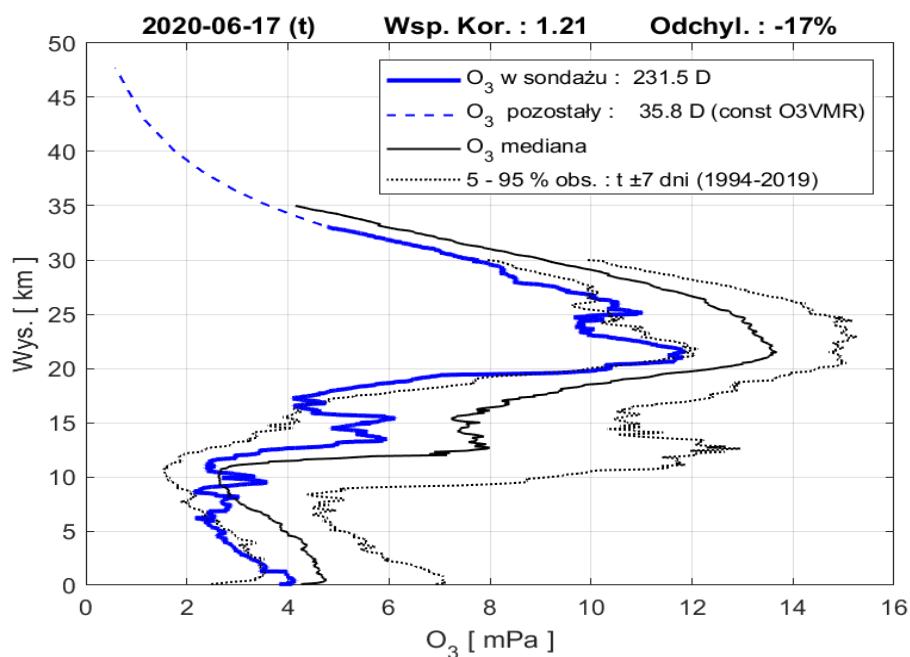
W 2020 roku na Stacji Pomiarów Aerologicznych IMGW-PIB w Legionowie kontynuowano systematyczne sondáže ozonowe rozpoczęte w 1979 roku. Rutynowo w każdą środę w terminie 12UT uzyskiwany jest profil ozonu z użyciem elektrochemicznej sondy ozonowej, unoszonej w powietrzu przez balon meteorologiczny do maksymalnej wysokości 35km.

W średnich miesięcznych zawartościach ozonu nad Legionowem w 2020 roku odnotowano anomalie w całym profilu. W styczniu pojawił się bardzo silny wzrost koncentracji ozonu w dolnej troposferze. Anomalny wzrost ozonu zaobserwowano w marcu w średniej stratosferze, a w warstwie maksymalnej koncentracji ozonu w maju i lipcu. W rejonie UTLS (dolna stratosfera i górna troposfera) w kwietniu, wrześniu i w listopadzie obserwowano anomalie przeciwnego znaku. W dolnej troposferze ujemna anomalia ozonu wystąpiła w czerwcu. W całej troposferze koncentracje ozonu poniżej średniej wieloletniej pojawiały się na różnych wysokościach w większości miesięcy. Całkowita zawartość ozonu w sondażach ozonowych w Legionowie w 2020 roku pozostawała w granicach naturalnej zmienności.

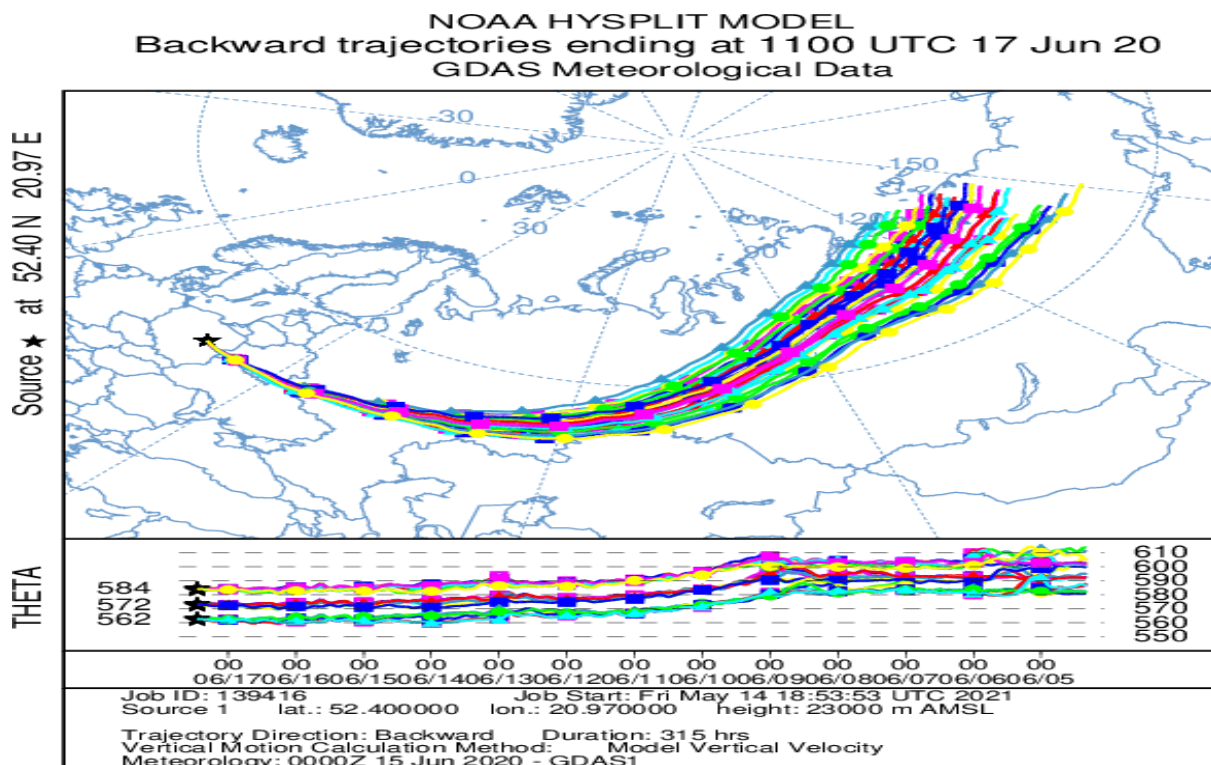
W marcu i kwietniu 2020 roku nad Arktyką po raz pierwszy w historii obserwacji pojawiły się wyraźne oznaki dziury ozonowej (sporadyczne spadki CZO₃ poniżej 220 DU w różnych częściach wiru w okresie 3 tygodni) (Kuttippurath i in., 2021). Stabilne położenie wiru polarnego w Arktyce w sezonie zimowo-wiosennym 2019/2020 sprawiło, że zubożone w ozon masy powietrza stratosferycznego znalazły się w umiarkowanych szerokościach półkuli północnej dużo później niż zwykle. Ilustruje to mapa całkowitej zawartości ozonu z danych satelitarnych i naziemnych z 17 czerwca 2020 (Rys.11). Największy spadek całkowitej zawartości ozonu (>10% poniżej normy wieloletniej) nad półkulą północną wystąpił w rejonie Skandynawii i Europy Północno-Wschodniej. Sonda ozonowa wypuszczona w Legionowie wykazała anomalie praktycznie w całej stratosferze, z największym niedoborem ozonu w warstwie maksymalnej koncentracji (Rys.12). Wsteczne trajektorie HYSPLIT zespołu cząstek powietrza, kończących się w na wysokości 23 km n.p.m. nad Legionowem pokazują źródło masy dla ubytku ozonu w arktycznej stratosferze - cząstki powietrza będące pozostałościami chłodnego wiru osiadały nieadiabaticznie w cieplejszej masie powietrza otaczającego (Rys.13). Z kolei trajektorie kończące się nad Legionowem na wysokości 6 km n.p.m. (Rys.14) pokazują cykloniczne zakrzywienie, co sugeruje przenikanie do troposfery zubożonych w ozon mas powietrza z pozostałości wiru polarnego. Kilka cząstek docierających w rejon ujemnej anomalii pokazuje unoszenie powietrza z dolnej troposfery, prawdopodobny spadek koncentracji ozonu w troposferze swobodnej z powodu blokady COVID-19 (Steinbrecht i wsp., 2021). Zmniejszenie zawartości ozonu w atmosferze w połączeniu z małą ilością aerozoli w czystym powietrzu polarnym może tłumaczyć wysokie promieniowanie UV-B zmierzone na stacji IMGW-PIB w Łebie w dniu 14 czerwca 2020.



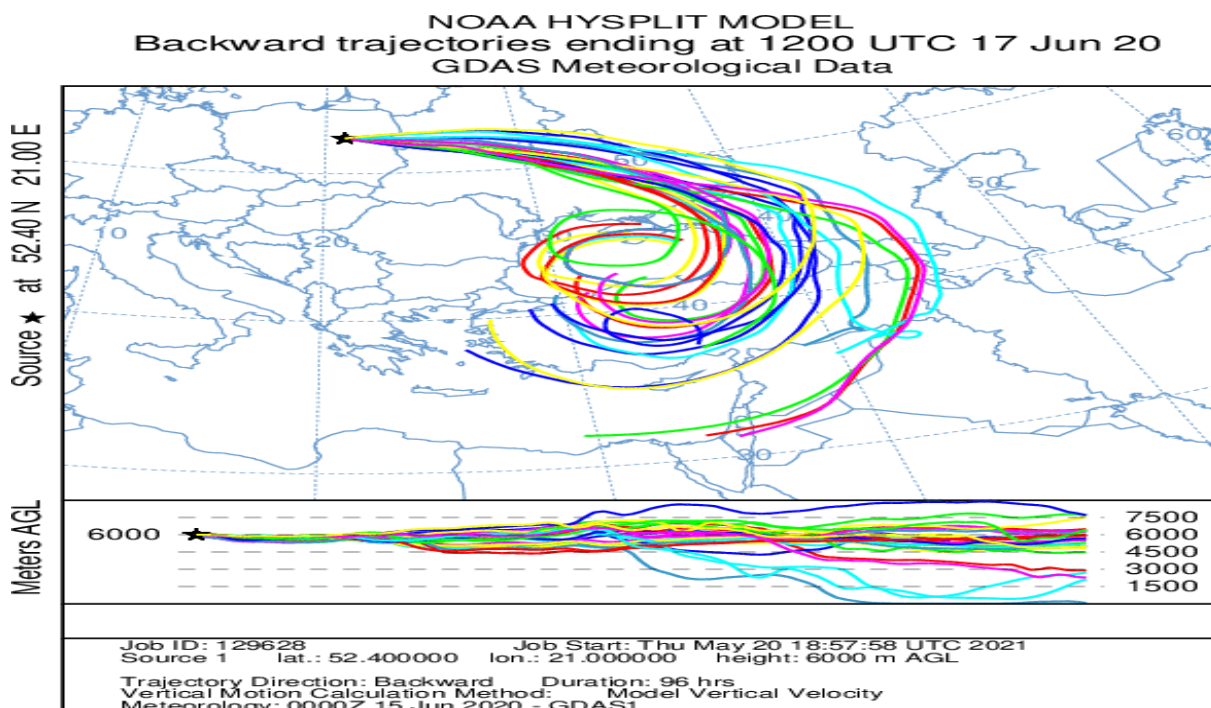
Rys.11. Procentowe odchylenia całkowitej zawartości ozonu nad półkulą północną 17 czerwca 2020 r., od odpowiednich średnich miesięcznych wieloletnich nad półkulą północną, na podstawie danych satelitarnych GOME-2 i obserwacji naziemnych.



Rys.12. Sondaż z ubytkami ozonu nad Legionowem 17 czerwca 2020 roku.



Rys.13. Trajektorie wsteczne HYSPLIT cząstek powietrza kończące się w rejonie anomalii w warstwie maksymalnej koncentracji ozonu nad Legionowem 17 czerwca 2020 r.



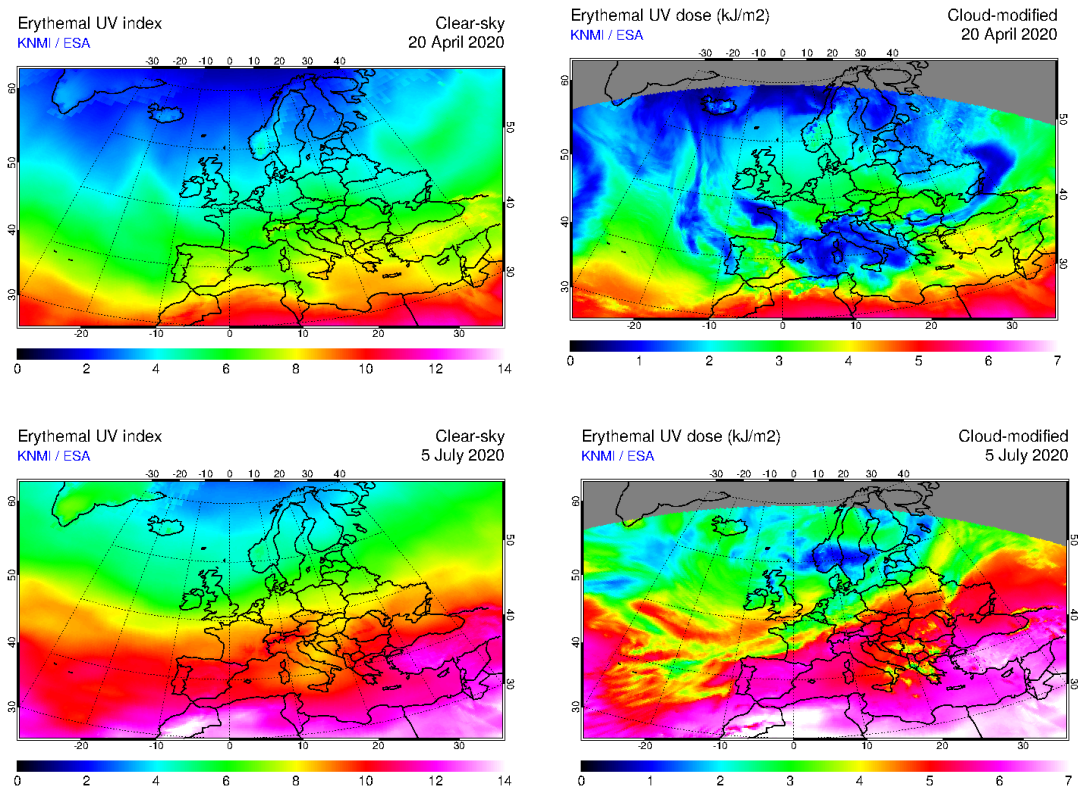
Rys.14. Trajektorie wsteczne HYSPLIT cząstek powietrza kończące się w rejonie anomalii w górnej troposferze nad Legionowem 17 czerwca 2020 r.

Promieniowanie UV-B

W Belsku monitoring promieniowania UV o skuteczności rumieniowej prowadzony jest od 1976 r. z zastosowaniem różnych modeli szerokopasmowych biometrów: Robertson-Berger (1976-1994), Solar Light (1992-2014), Kipp @ Zonen (2006-2019). Seria czasowa w ubiegłych latach, także i w 2020 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 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 w Belsku w latach 1976-2000 i późniejszą stabilizację (brak trendu). W XXI wieku dawki roczne oscylują wokół poziomu 470 kJ/m^2 . W 2020 r. suma roczna wyniosła 481 kJ/m^2 i była jedną z wyższych wartości w historii pomiarów UV w Belsku.

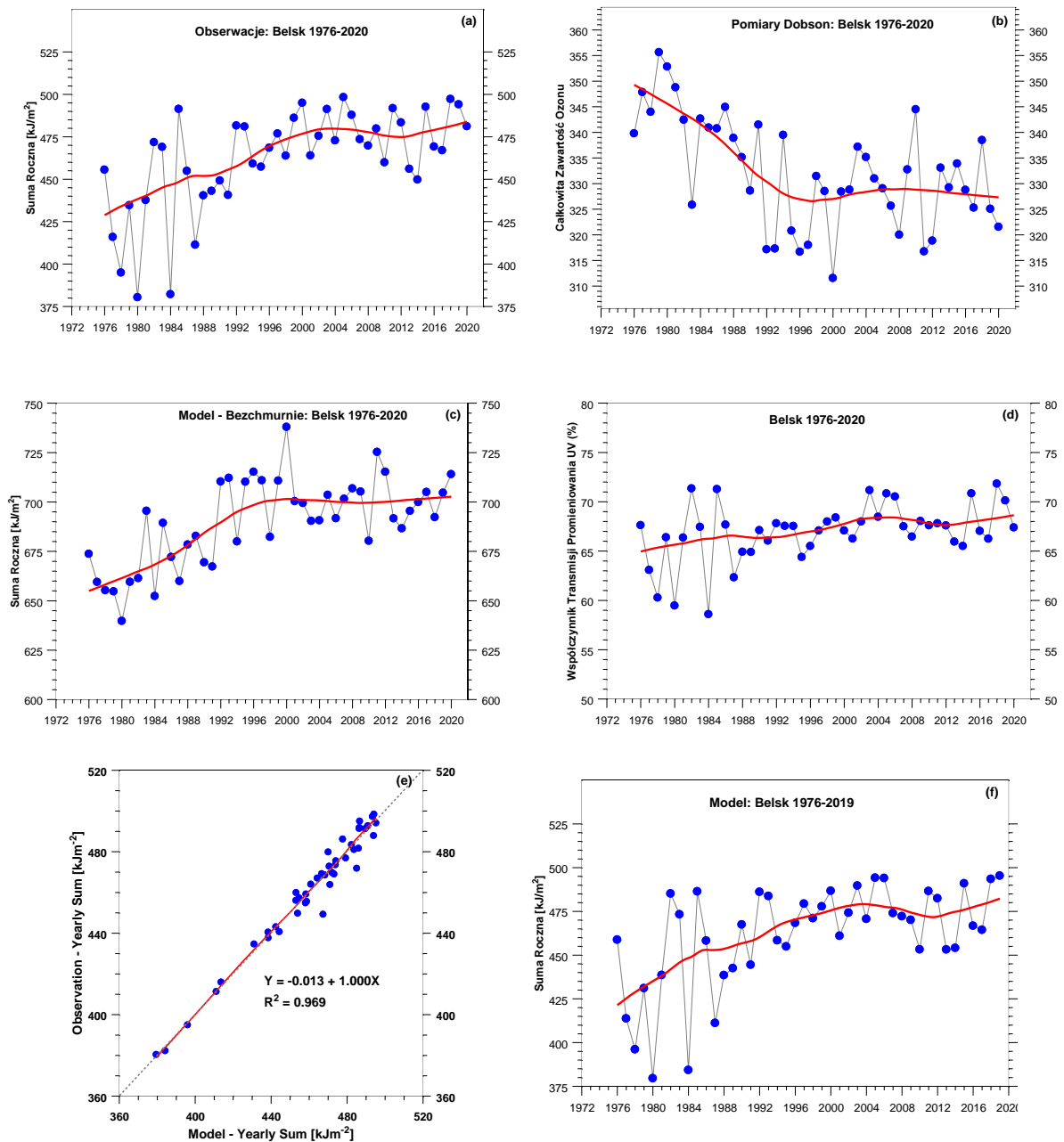
Pomiary natężenia napromienienia o skuteczności rumieniowej z użyciem biometru Kipp & Zonen pokazały w dniu 06.07.2020 najwyższą w roku wartość tj. 7,9 Indeksu UV ($1 \text{ Index} = 25 \text{ mW/m}^2$). Powyższą wartość potwierdziły pomiary widm UV z zastosowaniem spektrofotometru Brewera. Wysoka wartości Indeksu w tym dniu była wynikiem niskich wartości CZO_3 (300 D, czyli 12,2% poniżej normy). 06.07.2020 nie był dniem bezchmurnym i dzienna dawka rumieniowa (3293 J/m^2) nie była rekordowo wysoka. Najwyższą w 2020 r. dzienną dawkę rumieniową równą 4331 J/m^2 zanotowano dzień wcześniej tj. 05.07.2020, wtedy Indeks UV wynosił 7,7. W związku z pojawieniem się niskich wartości ozonu nad Polską w drugiej połowie kwietnia 2020 wielokrotnie rejestrowano w Belsku wysokie wartości indeksu UV $\sim 5,0$ tj. około 20% powyżej normy. Maksymalna dawka rumieniowa w tym okresie wynosiła 2693 J/m^2 (20.04), co w przybliżeniu stanowi 13 krotność minimalnej dawki wywołującej rumień skóry (tzw. MED) u osoby z fototypem 2. Satelitarne pomiary (Rys.15) pokazały zbliżone wartości Indeksu i dziennej dawki. Wysokie wartości indeksu UV o tej porze roku są szczególnie niebezpieczne dla zdrowia, gdyż organizm nie jest jeszcze zaadaptowany do długotrwałych ekspozycji na promieniowanie UV, a umiarkowane temperatury ($\sim 20\text{C}$) zachęcają do nadmiernego opalania bez zastosowania kremów z filtrem ochronnych. Czerwińska i Krzyściń (2020) stwierdzili, że nadmierne

napromienienie w kwietniu może być przyczyną wzrastającej gwałtownie zapadalności na czerniaka w Europie.



Rys.5. Indeks UV i dzienna dawka rumieniowa nad Europą wyznaczona z pomiarów spektrofotometrem GOME-2 w dniu 20.04.2020 (góra) i 05.07.2020 (dół) na platformie satelitarnej MetOp-A

Wpływ zmian ozonu na długookresowe zmiany w napromienieniu UV wyznaczono z hipotetycznych sum rocznych dziennych dawek rumieniowych przy braku zachmurzenia i ustalonej grubości optycznej aerozolu (GOA) dla długości fali 340 nm. Sumy roczne uzyskano z symulowanych 5-minutowych natężeń rumieniotwórczych z modelu transferu promieniowania słonecznego w atmosferze wykorzystującego jako parametry wejściowe średnie dzienne CZO_3 (zmierzone spektrofotometrem Dobsona, Rys.16b) i $\text{GOA}=0,34$ (dla 340 nm), co opowiadało wieloletniej (2010-2020) średniej rocznej GOA 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. 16c). Taki przebieg jest zwierciadlanym odbiciem trendu CZO_3 .



Rys.16. Obserwowane i modelowane sumy roczne dziennych dawek promieniowania rumieniowego w Belsku w latach 1976-2020 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.16b) i $\text{TPUV}_{\text{Ch \& Ae}}$ (Rys.16d), (f) modelowana suma roczna dla dowolnego stanu zachmurzenia.

Wpływ łącznych długookresowych 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 340 nm) na poziomie średniej wieloletniej 2010-2020 (Rys.16d). Współczynnik transmisji promieniowania UV stopniowo wzrasta od ~65% na początku serii do ~69% na końcu serii pomiarowej. Chmury i aerozol w okresie 1976-2000 w coraz mniejszym stopniu osłabiały promieniowanie UV docierające do powierzchni Ziemi. Po 2000 r. obserwuje się stabilizację współczynnika transmisji.

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

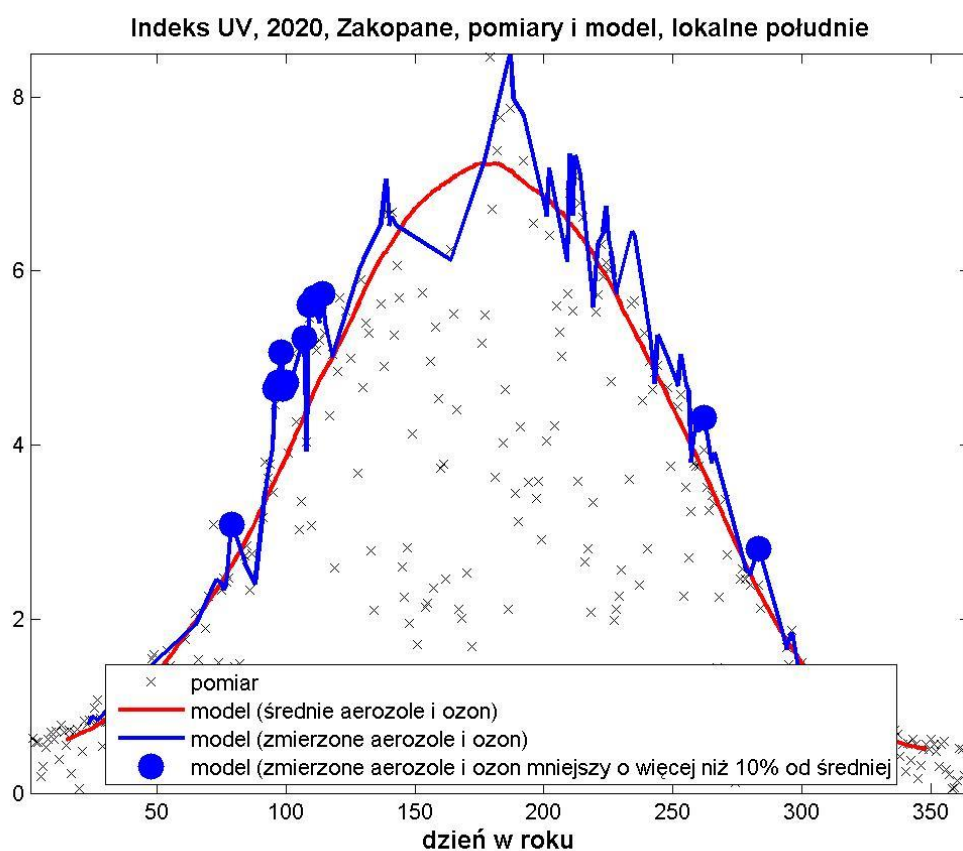
$$UV_{Reg} [kJm^{-2}] = 315,02 + 7,891 TPUV_{Ch \& Ae} [\%] - 1,1472 TO_3[D],$$

która wyjaśnia aż 96,9% zmienności wariancji w sumach rocznych (Rys.16e). Porównując przebiegi sum rocznych obserwowane (Rys.16a) z modelowanymi na podstawie powyższej regresji (Rys.16f) można stwierdzić przydatność modelu w obliczeniu wpływu poszczególnych czynników (ozon, chmury & aerozol) na zmiany sum rocznych wynoszące ~13,6% w latach 1976-2020. Obserwowane w latach 1976-2020 zmniejszenie CZO_3 o 23 D i wzrost $TPUV_{Ch \& Ae}$ o 4 punkty procentowe prowadziło do wzrostu sum rocznych odpowiednio o 26,4 kJ/m^{-2} i 31,6 kJ/m^{-2} . W sumie ta zmiana wyniosła 58 kJ/m^{-2} , co jest zgodne z obserwowaną zmianą, ~58 kJ/m^{-2} , wyznaczoną na podstawie wygładzonego przebiegu rocznych sum na Rys.16a (485 kJ/m^{-2} w 2020 r. i 427 kJ/m^{-2} w 1976 r.). Udział zmian CZO_3 we wzroście sum rocznych w okresie 1976-2020 wyniósł więc ~46%. Zmniejszenie CZO_3 o 23D w okresie 1976-2020 prowadziło do wzrostu sum rocznych dziennych dawek rumieniowych o 6,2% w stosunku do poziomu z 1976 r. Poziom UV 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 w Belsku w najbliższym okresie będą decydować zmiany w zachmurzeniu i aerozolu indukowane zmianami klimatu.

Stacje pomiarowe IMGW-PIB mierzące promieniowanie UV-B w Łebie, Legionowie i w Zakopanem, wykorzystują mierniki Solar Light UV biometer model 501. Od utworzenia sieci monitoringu w 1993 r. pracują one bez większych awarii.

W 2020 roku na wszystkich stacjach obserwowano epizodycznie wartości Indeksu UV zbliżające się do ekstremów wieloletnich w seriach pomiarowych, a nawet je przekraczające.

Najwięcej dni z ekstremalnymi wartościami Indeksu UV występowało w Legionowie i Łebie oraz kilka dla Zakopanego. Podwyższone wartości promieniowania UV-B obserwowano w kwietniu, wczesną wiosną oraz w pojedynczych dniach lata. Przykładowy przebieg roczny Indeksu UV dla stacji w Zakopanem (Rys.17) pokazuje, że zwiększenie promieniowania w kwietniu oraz w sierpniu i we wrześniu można przypisać mniejszej niż średnia wartość ozonu całkowitego (niebieskie kropki). Natomiast za letnie ekstrema odpowiada, przede wszystkim mniejsza ilość aerozoli. Podobny rozkład ekstremalnych wartości Indeksu UV zaobserwowano w przebiegach dla Łeby i Legionowa.

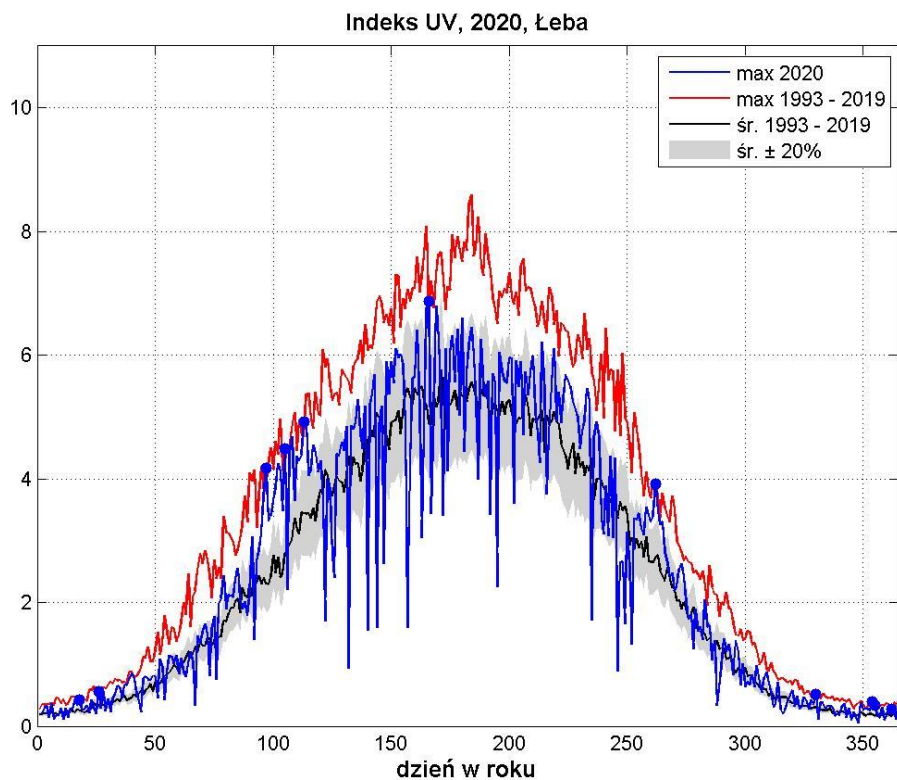


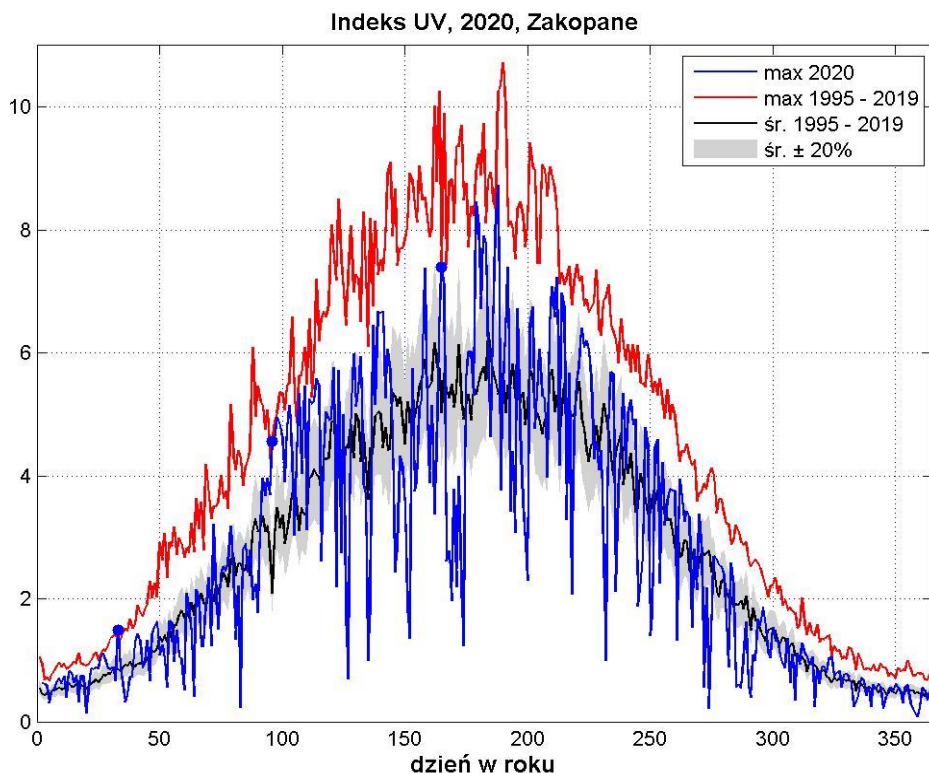
Rys.17 Przebiegi roczne Indeksu UV z 2020 roku obliczonego z wykorzystaniem modelu transferu promieniowania słonecznego FastRT dla stacji w Zakopanem z wykorzystaniem pomiarów satelitarnych ozonu całkowitego i aerozoli 2005-2020.

Dla 2020 roku maksymalną dawkę miesięczną, 471 MED (98,9kJ/m²) zmierzono w lipcu dla Legionowa, a maksymalną dawkę dobową, 23,27 MED (4886,7 J/m²) dla lipca w Zakopanem. Maksymalne miesięczne dawki dobowe wystąpiły: w czerwcu dla Łeby, w lipcu dla Legionowa i Zakopanego.

Największe wartości Indeksu UV na stacjach IMGW-PIB, w 2020 roku zmierzono odpowiednio: 14 czerwca w Łebie (UVI 6,9), 6 czerwca i 1 lipca w Legionowie (UVI 7,4),

6 lipca w Zakopanem (UVI 8,7). Największe dawki dzienne rumieniowego promieniowania UV zanotowano 14 czerwca w Łebie: 21,08 MED ($4426,8\text{J}/\text{m}^2$), 1 lipca w Legionowie: 21,80 MED. ($4578\text{J}/\text{m}^2$), 5 lipca w Zakopanem: 23,27 MED. ($4886,7\text{J}/\text{m}^2$). (Rys.18)

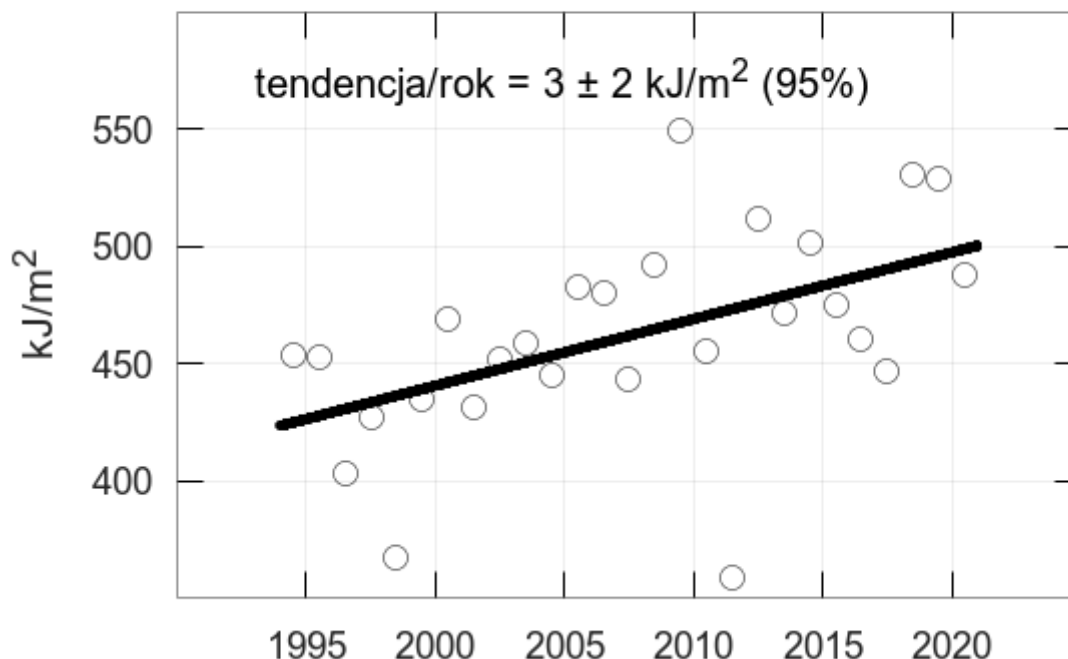




Rys.18. Przebiegi roczne Indeksu UV z 2020 roku dla stacji w Łebie, Legionowie i Zakopanem na tle średniego oraz maksymalnego Indeksu UV od początku pomiarów do 2020 roku dla każdej stacji. Niebieskie punkty oznaczają ekstremalne wartości w serii dla danego dnia roku zmierzone w 2020 rok

Regularne kalibracje czujników Solar Ligot 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 oraz, dla danych z początku serii pomiarowej w latach 90-tych z założenia że nowo kupione czujniki miały parametry deklarowane przez producenta. Dlatego do analizowania tendencji promieniowania na stacjach homogenizacji, gdzie skorygowano dane z początku pomiarów. Do obliczeń użyto dane o ozonie całkowitym i aerozolu z NASA Goddard Earth Sciences Data and Information Services Centre (GES DISC). Parametry aerozoli zostały przeliczone do zakresu UV-B, 305nm. Na Rys.19. przedstawiono serię danych po przeliczeniu dla stacji w Łebie. Okazało się, że występuje istotna statystycznie tendencja dodatnia wzrostu dawek rocznych promieniowania erytemalnego $UV=B +3 \pm 2 \text{ kJ/m}^2$ (poziom ufności 95%). Dawki roczne promieniowania zestawiono z medianami rocznymi ozonu całkowitego, 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.

UV-B erytemalne, suma roczna Łeba, 1994 - 2020



Rys.19. Seria dawek rocznych promieniowania erytemalnego UV-B dla stacji IMGW-PIB w Łebie z lat 1994 do 2020,

Dla Legionowa i Zakopanego nie znaleziono istotnej statystycznie tendencji.

Podsumowanie

Wypełnianie postanowień Protokołu Montrealskiego z 1987 r. i jego późniejszych poprawek dotyczących ochrony warstwy ozonowej było jedną z przyczyn zatrzymania się spadkowej tendencji w ozonie atmosferycznym obserwowanej poza strefą równikową do połowy lat 90-tych XX wieku (WMO, 2014). Steinbrecht i inni (2017) stwierdzili na podstawie pomiarów satelitarnych rozkładu pionowego ozonu istotnie statystyczny dodatni trend 1-2% na 10 lat w okresie 2000-2016 wysoko w stratosferze powyżej 5 hPa. W dolnych warstwach atmosfery (100-10 hPa) trendy były nieistotne statystycznie. Zaskakująco w pobliżu 100 hPa trendy stawały się lekko ujemne. Ostatnie prace (Frith i inni, 2014, Chipperfield i inni, 2017, Ball i inni, 2018) wskazują, że oczekiwany wzrostowy trend w całkowitej zawartości ozonu jednak nie pojawiał się w średniorocznych seriach czasowych CZO_3 po 2000 r. Jedynie w wybranych miesiącach (wrzesień i październik nad Antarktydą) obserwuje się statystycznie istotny dodatni trend w CZO_3 (Solomon i inni, 2016, Pazmino i inni, 2017).

Ball i inni (2018) analizując trendy w profilu pionowym rozkładu ozonu w 10 stopniowych pasach szerokościowych obejmujących obszar między biegunami (60S-60N) potwierdzili istnienie regeneracji warstwy ozonowej wysoko w stratosferze (10-1 hPa) i brak trendu w średniej stratosferze (32-10 hPa) w latach 1998-2016. Jednak stwierdzili zaskakująco trwałą spadkową tendencję ozonu w niskiej stratosferze (32-100 hPa), która istnieje do chwili obecnej od początku analizowanych serii czasowych (od 1985 r.). Utrzymywanie się całkowitej zawartości ozonu na stałym poziomie od końca lat 90-tych ubiegłego wieku jest wynikiem wzrostowego trendu w troposferze, który kompensuje ubytki ozonu w dolnej stratosferze. Wzrosty w wysokiej stratosferze, gdzie koncentracja ozonu jest z natury mała, mają niewielki wpływ na zmiany ozonu w całej kolumnie atmosfery. W tym momencie natura zmian ozonu w dolnej stratosferze nie jest poznana. Autorzy wnioskują na podstawie wyników Hossaini i inni (2017), że może to być efekt niszczenia ozonu w tej części atmosfery przez krótko żyjące substancje nie kontrolowane przez ustalenia Protokołu Montrealskiego i jego późniejsze poprawki. Należy podkreślić, że wyniki Ball i inni (2018) sugerują, że obecne przewidywania czasu regeneracji warstwy ozonowej (około 2050 w średnich szerokościach geograficznych, WMO, 2014), które są oparte na prognozach z wykorzystaniem modeli fizyczno-chemicznych i scenariuszy zmian klimatu, nie są wiarygodne i na ten moment wydaje się, że regeneracja warstwy ozonowej będzie przesunięta w czasie, o ile w ogóle nastąpi.

Podstawowym założeniem spodziewanej regeneracji warstwy ozonowej jest stopniowe eliminowanie substancji niszczących warstwę ozonową. Jednak takie substancje w sposób niekontrolowany mogą przenikać do atmosfery ze składowisk zużytego sprzętu (lodówki, klimatyzatory, gaśnice), zawierającego substancje, których stosowanie zostało wcześniej zakazane np. freonu CFC11 (Lickley et al., 2020). Wbrew zakazom, przemysł (we wschodniej Azji) wrócił do stosowania freonów w procesach technologicznych, co zostało stwierdzone w troposferycznych masach powietrza wychodzących z tego rejonu (Montzka et al., 2018, Dhomse et al., 2019). Takie nieoczekiwane sytuacje mogą odsunąć termin pełnej regeneracji warstwy ozonowej.

Liczne opracowania wskazują na znaczący wpływ zmian w cyrkulacji atmosfery na obserwowane długookresowe tendencje zmian w warstwie ozonowej. Zmiany w warstwie ozonowej są wypadkowym efektem zmniejszenia zanieczyszczenia atmosfery substancjami niszczącymi warstwę ozonową i specyficznej cyrkulacji w atmosferze prowadzącej do długookresowych oscylacji CZO₃. Wzrostowe, bez ustalonego kierunku, lub nawet spadkowe tendencje w CZO₃ związane z naturalnymi oscylacjami w dynamice dolnej

stratosfery mogą występować na przemian, utrudniając ocenę tempa regeneracji warstwy ozonowej.

Mieszanie w stratosferze powietrza równikowego z natury ubogiego w ozon z powietrzem w średnich szerokościach geograficznych osłabia tempo naprawy warstwy ozonowej w wybranych rejonach na kuli ziemskiej (Ball i in. 2020). Dodatkowo stwierdzony wzrost koncentracji ozonu przyziemnego w strefie tropików sprzyja większej emisji jodu z powierzchni oceanu, powodując zmniejszenie zawartości ozonu w dolnej stratosferze nad równikiem, a następnie także i w strefie średnich szerokości geograficznych (Koenig i in. 2020). Potencjał niszczenia ozonu przez jod jest porównywalny z chlorem i bromem uwalnianym się z antropogenicznych gazów przenikających do stratosfery (Koenig i in. 2020), a których stosowanie zostało zabronione przez Protokół Montrealski z 1987 roku i późniejsze poprawki. Istnieją więc przesłanki do zatrzymania regeneracji warstwy ozonowej, a może i powrotu do spadkowej tendencji zawartości ozonu w stratosferze nad niektórymi obszarami.

Mechanizmy zarówno dynamiczne jak i chemiczne decydujące o zmianach w warstwie ozonowej nie są do końca rozpoznane. W tej sytuacji należy kontynuować prowadzony monitoring zmian całkowitej zawartości ozonu i jego profilu na stacjach naziemnych, a zwłaszcza na tych, które jak Belsk i Legionowo prowadzą ciągłe wieloletnie pomiary, zapewniając wysoką jakość danych i tym samym stwarzając podstawy do weryfikacji danych satelitarnych i hipotez dotyczących ewolucji warstwy ozonowej w wyniku współdziałania procesów dynamicznych i chemicznych zachodzących w atmosferze.

W średnich miesięcznych zawartościach ozonu nad Legionowem w 2020 roku odnotowano szereg anomalii w całym profilu, ale średnia roczna całkowita zawartość ozonu w sondażach była w granicach naturalnej zmienności.

Sondaże ozonowe użyte w publikacji Steinbrecht i wsp., 2021, w tym także sondaże z Legionowa, pokazały, że główny wkład do ujemnej anomalii ozonu w troposferze swobodnej w umiarkowanych szerokościach geograficznych półkuli północnej wiosną i latem 2020 pochodził ze zmniejszenia ilości zanieczyszczeń z powodu blokady COVID-19.

W marcu i kwietniu 2020 roku po raz pierwszy w historii obserwacji nad Arktyką pojawiły się wyraźne oznaki dziury ozonowej (sporadyczne spadki CZO₃ poniżej 220 D w różnych częściach wiru w okresie 3 tygodni) (Kuttippurath i wsp., 2021). Stabilne położenie wiru polarnego w Arktyce w sezonie zimowo-wiosennym 2019/2020 sprawiło, że zubożone w ozon masy polarnego powietrza stratosferycznego dotarły nad Polskę dopiero u progu lata. W sondażu ozonowym w Legionowie 17 czerwca ubytek ozonu był widoczny praktycznie

w całym profilu, a 14 czerwca 2020 na północy kraju odnotowano wysoki poziom promieniowania UV-B.

Bibliografia

- Ball, W. T., Alsing, J., Mortlock, D. J., Staehelin, J., Haigh, J. D., Peter, T., Tummon, F., Stübi, R., Stenke, A., Anderson, J., Bourassa, A., Davis, S. M., Degenstein, D., Frith, S., Froidevaux, L., Roth, C., Sofieva, V., Wang, R., Wild, J., Yu, P., Ziemke, J. R., and Rozanov, E. V.: Evidence for a continuous decline in lower stratospheric ozone offsetting ozone layer recovery, *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 1379-1394, <https://doi.org/10.5194/acp-18-1379-2018>, 2018.
- Ball, W.T., Chiodo G., Abalos M., Alsing J.: Inconsistencies between chemistry climate model and observed lower stratospheric trends since 1998, *Atmospheric Chemistry and Physics*, DOI: 10.5194/acp-2019-734, 2020
- Chipperfield, M.P., Bekki, S., Dhomse, S., Harris, N.R.P., Hassler, B., Hossaini, R., Steinbrecht, W., Thiéblemont, R., and Weber, M.: Detecting recovery of the stratospheric ozone layer, *Nature*, 549, 211-218, doi:10.1038/nature23581, 2017.
- Czerwińska, A.E., and Krzyścin, J.W.: Climatological aspects of the increase of the skin cancer (melanoma) incidence rate in Europe, *International Journal of Climatology*, 2019 (in press), <https://doi.org/10.1002/joc.6391>.
- Dhomse S.S., Feng W., Montzka S.A., Hossaini R., Keeble J., Pyle J.A., Daniel J.S., Chipperfield M.P., Delay in recovery of the Antarctic ozone hole from unexpected CFC-11 emission, *Nature Communications*, 10, 5781, DOI: 10.1038/s41467-019-13717-x, 2019.
- Frith, S.M., Kramarova, N.A., Stolarski, R.S., McPeters, R.D., Bhartia, P.K., and Labow, G.J.: Recent changes in total column ozone based on the SBUV Version 8.6 Merged Ozone Data Set, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119, 9735-9751, doi:10.1002/2014JD021889, 2014.
- Hossaini, R., Chipperfield, M.P., Montzka, S.A., Leeson, A.A., Dhomse, S., and Pyle, J.A.: The increasing threat to stratospheric ozone from dichloromethane, *Nature Communication*, 8, doi: 10.1038/ncomms15962, 2017.
- Koenig T.K., Baidar S., Campuzano-Jost P., Cuevas C.A., Dix B., Fernandez R.P., Guo H., Hall S.R., Kinnison D., Nault B.A., Ullmann K., Jimenez J.L., Saiz-Lopez A., Volkamer R.: 2020, Quantitative detection of iodine in the stratosphere, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117 (4), 1860-1866, DOI: 10.1073/pnas.1916828117, 2020.
- Krzyścin, J.W., Long-term changes in ozone mini-hole event frequency over the northern hemisphere derived from ground-based measurements, *Int. J. Climatol.* 22; 1425-1439, 2002
- Krzyścin, J.W., and Rajewska-Więch B., Ozone recovery as seen in perspective of the Dobson spectrophotometer measurements at Belsk (52°N, 21°E) in the period 1963-2008, *Atmospheric Environment* 43, 6369-6375, 2009a.
- Krzyścin, J.W., and Rajewska-Więch B., Trends in the ozone vertical distribution from the Umkehr observations at Belsk, 1963-2007, *International Journal of Remote Sensing*, vol.30, 3917-3926, 2009b.

- Krzyścin, J.W., Rajewska-Więch, B., and Jarosławski, J., The long-term variability of atmospheric ozone from the 50-yr observations carried out at Belsk (51.84°N, 20.78°E), Poland, *Tellus B*, **65**, 21779, <http://dx.doi.org/10.3402/tellusb.v65i0.21779>, 2013.
- Krzyścin, J.W., The ozone recovery in the NH extratropics: the trend analyses of SBUV/SBUV-2 merged ozone data in the 1979-2012 period, *Atmospheric Environment* 98, 17-24, 2015.
- Krzyścin, J.W., and Rajewska-Więch, B., Specific variability of total ozone over Central Europe in the period 1979-2014. *International Journal of Climatology*, 36(10) 3539-3549, 2016.
- Krzyścin J, and Baranowski, D., Signs of the ozone recovery based on multi-sensor reanalysis of total ozone for the period 1979-2017. *Atmospheric Environment*, 199, 334-344, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.11.050>, 2019.
- Krzyścin J., Rajewska-Więch B., i Borkowski J. Stan warstwy ozonowej nad Polską w okresie 1979-2018. *Przegląd Geofizyczny*, 65, Zeszyt 3-4, 103-121, doi: 1032045/PG-2020-011,2020
- Kuttippurath Jayanarayanan Feng Wuhu, Müller Rolf, Kumar Pankaj, Raj Sarath, PillaiGopalakrishnaGopikrishnan, Raina Roy **Arctic on the verge of an ozone hole?** *Atmospheric Chemistry and Physics Discussion* started: 24 February 2021 <https://doi.org/10.5194/acp-2020-1313>
- Newchurch, M.J., Yang E.S., Cunnold D.M., Reinsel G.C., Zawodny J.C., and Russel III J.M., Evidence for slowdown in stratospheric ozone loss: First stage of ozone recovery, *Journal of Geophysical Research*, vol.108, 4507, 2003.
- Pazmino, A., Godin-Beekmann, S., Hauchecorne, A., Claud, C., Khaykin, S., Goutail, F., Wolfram, E., Salvador, J., and Quel, E.: Symptoms of total ozone recovery inside the Antarctic vortex during Austral spring, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/acp-2017-1157>, in review, 2017.
- Rajewska-Więch B., and Krzyścin J., Changes in total column ozone at Belsk in perspective of ozone changes over Europe 1963-2008 (in Polish), *Przegląd Geofizyczny*, Z. 1-2, s. 49-59, 2010.
- Solomon, S., Ivy, D.J., Kinnison, J., Mills, M.J., Neely, R.R., and Schmidt, A.: Emergence of healing in the Antarctic ozone layer, *Science*, 353, 269-274, doi: 10.1126/science.aae0061, 2016.
- Stauffer, Ryan Michael and Thompson, Anne M. and Kollonige, Debra E and Witte, Jacquelyn Cecile and Tarasick, David W. and Davies, Jonathan and Voemel, Holger and Morris, Gary A. and VanMalderen, Roeland and Johnson, Bryan J. J. and et al. **A Post-2013 Drop-off in Total Ozone at a Third of Global Ozonesonde Stations: ECC Instrument Artifacts?** *Journal Earth and Space Science Open Archive*, 2019 DOI={ 10.1002/essoar.10501543.3 },url={ <https://doi.org/10.1002/essoar.10501543.3> }
- Steinbrecht, W., Froidevaux, L., Fuller, R., Wang, R., Anderson, J., Roth, C., Bourassa, A., Degenstein, D., Damadeo, R., Zawodny, J., Frith, S., McPeters, R., Bhartia, P., Wild, J., Long, C., Davis, S., Rosenlof, K., Sofieva, V., Walker, K., Rahpoe, N., Rozanov, A., Weber, M., Laeng, A., von Clarmann, T., Stiller, G., Kramarova, N., Godin-Beekmann, S., Leblanc, T., Querel, R., Swart, D., Boyd, I., Hocke, K., Kämpfer, N., Maillard Barras, E., Moreira, L., Nedoluha, G., Vigouroux, C., Blumenstock, T., Schneider, M., García, O., Jones, N., Mahieu, E., Smale, D.,

- Kotkamp, M., Robinson, J., Petropavlovskikh, I., Harris, N., Hassler, B., Hubert, D., and Tummon, F.: An update on ozone profile trends for the period 2000 to 2016, *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 10675-10690, <https://doi.org/10.5194/acp-17-10675-2017>, 2017.
- Steinbrecht, W., Kubistin, D., Plass-Dülmer, C., Davies, J., Tarasick, D. W., Gathen, P., et al. (2021). **COVID-19 crisis reduces free tropospheric ozone across the Northern Hemisphere**. *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL091987. <https://doi.org/10.1029/2020GL091987>
- Van der A, R., Allaart, M. and Eskes, H., Multi-Sensor Reanalysis (MSR) of total ozone, version 2. Dataset. Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI), 2015. 015. [doi:10.21944/temis-ozone-msr2](https://doi.org/10.21944/temis-ozone-msr2)
- WMO: Scientific Assessment of ozone Depletion: 2014, Global Ozone Research and Monitoring Project Report, World Meteorological Organization, Report No. 55, p.416, Geneva, Switzerland, 2014.