



**Instytut Geofizyki
Polskiej Akademii Nauk**

ZAKŁAD FIZYKI ATMOSFERY

**RAPORT SYNTETYCZNY: ANALIZA I INTERPRETACJA DANYCH,
OCENA TRENDÓW I SKALI ZJAWISKA W POLSCE NA TLE
GLOBALNYCH ZMIAN WARSTWY OZONOWEJ W 2016 ROKU**



Praca wykonana na zamówienie nr 6/2017/F

Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska



Praca finansowana wyłącznie ze środków rezerwy celowej budżetu państwa utworzonej na podstawie umowy o dofinansowanie w formie przekazania środków na cele nie inwestycyjne zawartej między **Narodowym Funduszem Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej** a **Głównym Inspektoratem Ochrony Środowiska** nr 235/2016/Wn-50/MN-PO/D z dnia 14.12.2016

Kierownik pracy

dr hab. Janusz Jarosławski, prof. PAN

Dyrektor IGF PAN

dr hab. inż. Beata Orlecka-Sikora, prof. PAN

Warszawa, 2017

**RAPORT SYNTETYCZNY: ANALIZA I INTERPRETACJA
DANYCH, OCENA TRENDÓW I SKALI ZJAWISKA W POLSCE,
NA TLE GLOBALNYCH ZMIAN WARSTWY OZONOWEJ W
2016 ROKU**

Wykonany na zamówienie Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska nr 6/2017/F z dnia 5.04.2017 r. Praca finansowana jest ze środków rezerwy celowej budżetu państwa utworzonej na podstawie umowy o dofinansowanie w formie przekazania środków na cele nie inwestycyjne zawartej między Narodowym Funduszem Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej a Głównym Inspektoratem Ochrony Środowiska nr 235/2016/WN-50/MN-PO/D z 14.12.2016 r. pt. „Monitoring całkowitej zawartości ozonu nad Polską i Europą, rozkładu pionowego ozonu oraz promieniowania UV-B w Polsce w latach 2017-2020” wykonywanej jako zadanie 1.

**Realizowanej przez : Jarosławski Janusz, Krzyścin Janusz, Pietruczuk
Aleksander, Rajewska-Więch Bonawentura - Zakład Fizyki Atmosfery
IGF PAN
we współpracy z: Biszczuk-Jakubowska Julita, Bogumił Kois - IMGW-PIB**

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, a jej tysięczną część 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 UVC (200nm - 280nm) powyżej 30km. Do powierzchni Ziemi dociera kilka procent nie zaabsorbowanego promieniowania UVB (280nm - 315nm) i większość promieniowania UVA (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.

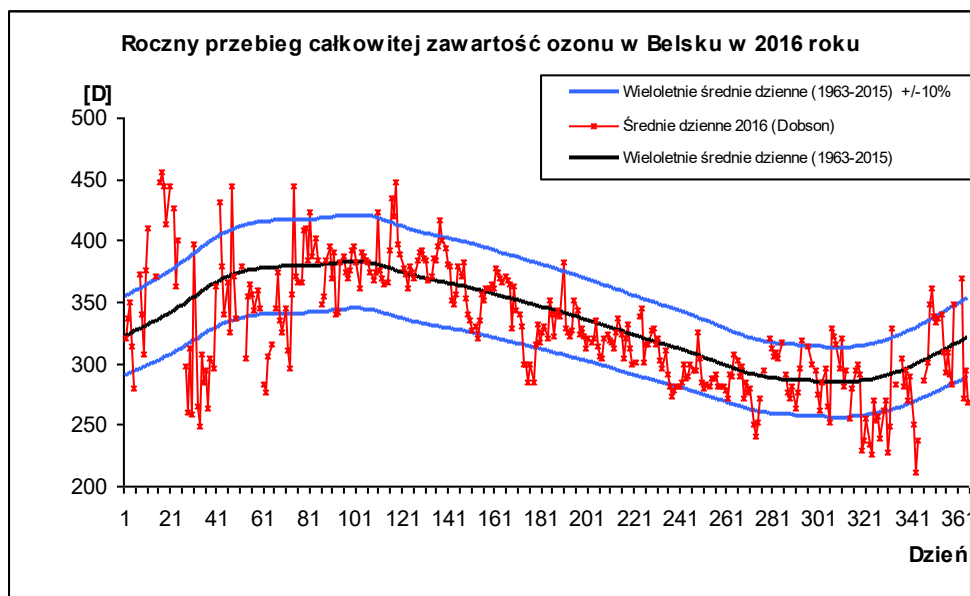
W 1987 r. społeczność międzynarodowa podjęła bezprecedensowy wysiłek i uzgodniła w ramach tzw. Protokołu Montrealskiego szereg działań, których skutkiem miało być zredukowanie emisji do atmosfery substancji niszczących warstwę ozonową. Obecnie istnieje przekonanie, że dzięki Protokołowi Montrealskiemu 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.

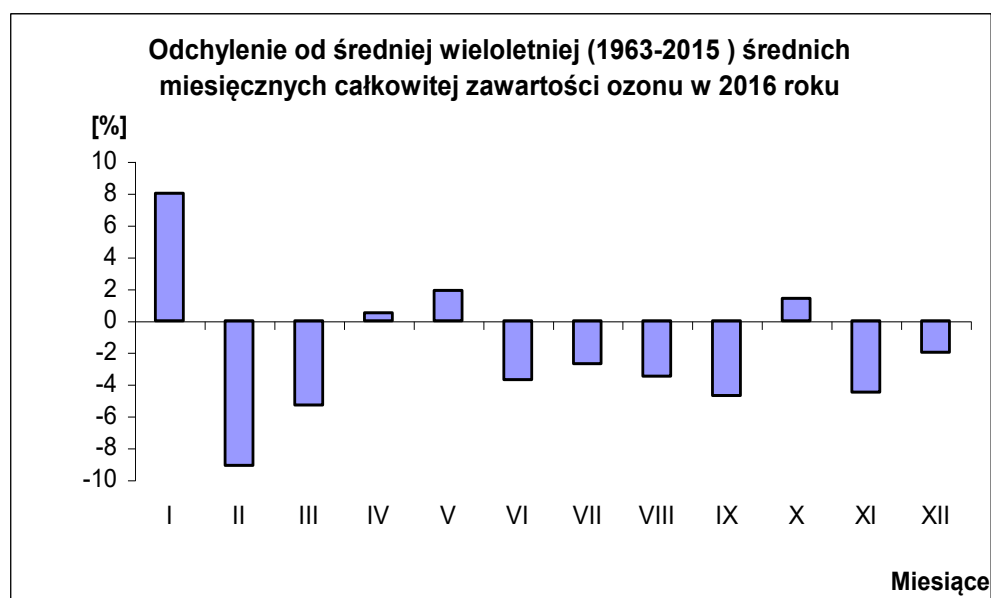
Całkowita zawartość ozonu

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

Analiza danych o całkowitej zawartości ozonu uzyskanych przy pomocy spektrofotometru Dobsona pozwala stwierdzić, że w 2016 roku obserwowano wartości średnich miesięcznych całkowitej zawartości ozonu (CZO₃) zbliżone do wieloletnich (1963-2015) średnich miesięcznych. Jedynie w lutym średnia miesięczna wartości CZO₃ (Rys. 2) była znacznie poniżej (~9%) wieloletniej normy. Dla pozostałych miesięcy średnie miesięczne wartości CZO₃ fluktuowały względem średniego poziomu w granicach od -5% (marchu) do 8% (stycznia). Wartości odchyłek średnich dziennych od średnich wieloletnich sporadycznie przekraczały -10% (Rys.1). Niskie dzienne wartości CZO₃ w stosunku do średnich wieloletnich pojawiły się na przełomie lutego - marca i listopada – grudnia.

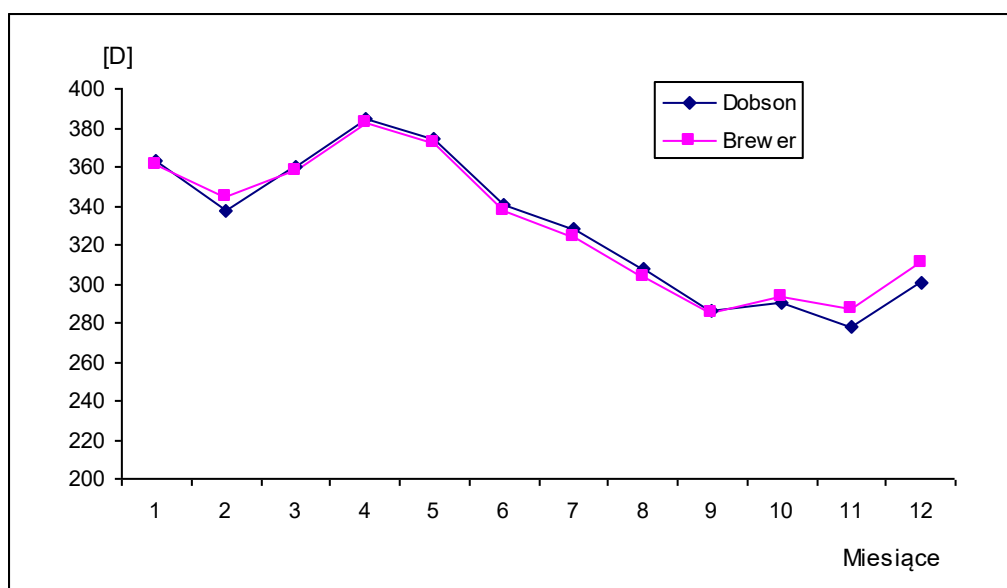


Rys.1. Roczny przebieg średnich dziennych całkowitej zawartości ozonu, Belsk 2016.



Rys.2. Odchylenie od średniej wieloletniej (1963-2015) średnich miesięcznych całkowitej zawartości ozonu w 2016 roku

Przez cały 2016 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.

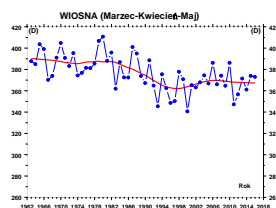
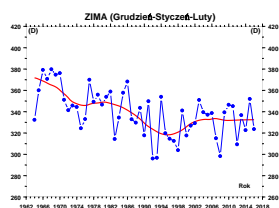


Rys.3. Przebieg średnich miesięcznych całkowitej zawartości ozonu zmierzonych spektrofotometrem Dobsona i Brewera, Belsk 2016

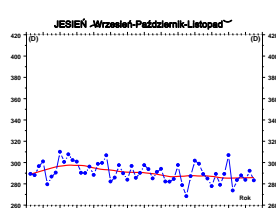
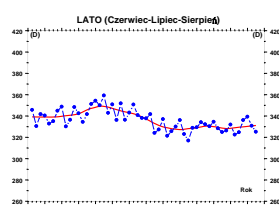
Zgodność danych o całkowitej zawartości ozonu uzyskanych ze spektrofotometru Brewera z danymi otrzymanymi przy pomocy spektrofotometru Dobsona może być oceniona jako dobra. Różnica średnich miesięcznych całkowitej zawartości ozonu uzyskanych za pomocą spektrofotometru Dobsona i Brewera mieści się w granicach 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.

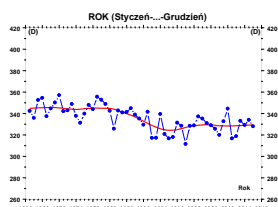
Analizując długookresowe zmiany średnich sezonowych CZO_3 w Belsku (krzywe o kolorze czerwonym na Rys.4 reprezentujące wygładzone metodą lokalnej regresji przebiegi średnich sezonowych) stwierdzamy, że od połowy lat 90-tych XX wieku następuje zmiana kierunku trendu w średnich sezonowych i w średniej rocznej CZO_3 . Wyraźna spadkowa tendencja, która pojawiła się z końcem lat 70-tych została zatrzymana około 1996 r. Od tego momentu obserwowano wzrostową tendencję w średnich rocznych CZO_3 , a także w zimowych i wiosennych średnich wartościach CZO_3 . Na początku XXI wieku powyższa tendencja została zahamowana. W ostatnich latach wydaje się, że średnie wartości CZO_3 oscylują wokół pewnego ustalonego poziomu.



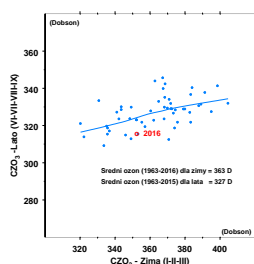
Rys.4. Średnie sezonowe całkowitej zawartości ozonu uzyskane z pomiarów spektrofotometrem Dobsona w COG IGF PAN, Belsk, w okresie 1963-2016



W 2016 r. średnia CZO_3 dla sezonu letniego (315 D) była około 3-4% niższa niż wieloletnia norma (327 D) dla tego okresu. W tej sytuacji przy braku zachmurzenia poziom promieniowania UV przy powierzchni Ziemi powinien być nieznacznie wyższy (około 3-4%) 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-



2016) normy (Rys.5). W 2016 r. powyższa zimowa średnia wynosiła 353 D, około 3% 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 odbudowane, gdyż deficyt CZO_3 pojawia 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). Czerwony punkt oznacza wartości w 2016 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.

Podobnie jak w latach ubiegłych, w roku 2016 satelitarny monitoring całkowitej zawartości ozonu dla Europy Środkowej prowadzony był w Dziale Teledetekcji Satelitarnej IMGW-PIB w Krakowie z wykorzystaniem danych pochodzących z czujnika TOVS satelitów NOAA-18 i 19. Satelitarne mapy całkowitego ozonu w okresie letnim były wykorzystywane do prognozy Indeksu UV.

Ze względu na obserwowane od kilku lat pogorszenie się jakości satelitarnego monitoringu całkowitej zawartości ozonu z wykorzystaniem danych TOVS, w 2017 zostanie uruchomione operacyjne wyznaczanie całkowitej zawartości ozonu z wykorzystaniem danych z czujnika OMPS (Ozone Mapping Profiler Suite) z satelity S-NPP. Jest to nowy czujnik zaprojektowany dla celów monitoringu całkowitej zawartości i profilu ozonu.

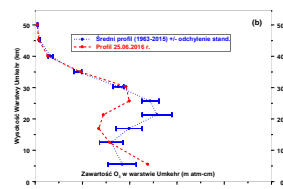
Pionowy rozkład ozonu

Serie pomiarów wykonywanych przy użyciu spektrofotometru Dobsona w świetle rozproszonym pochodzącym z nie zachmurzonego zenitu przy odległościach zenitalnych Słońca $60^{\circ} - 90^{\circ}$ umożliwiają wyznaczenie rozkładu pionowego ozonu tzw. metodą Umkehr (w dziesięciu 5km 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

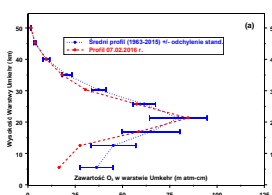
2016 roku wykonano 151 serii pomiarowych przy pomocy spektrofotometru Dobsona pozwalających wyznaczyć pionowy rozkład ozonu metodą Umkehr (w tym 37 pomiarów zwanych „krótki Umkehr”).

Na Rys.6 przedstawiono interesujące przykłady zmian zawartości ozonu w poszczególnych umkehrowskich warstwach atmosfery. Jak widać zmiany te w odniesieniu do średniej wieloletniej 1963-2015 (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.6 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.

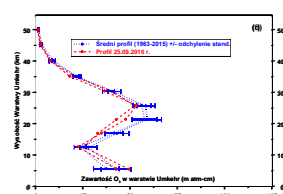
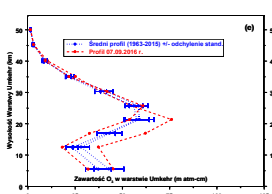
Należy dodać, że zmiany profilu ozonu przy ustalonej całkowitej zawartości ozonu są jednym z czynników wpływających na wielkość natężenia promieniowania UV-B docierającego do powierzchni Ziemi. Dane ozonowe ze stacji, które dysponują długimi, ciągłymi i wiarygodnymi seriami pomiarowymi są szczególnie 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 zrewaloryzowaną serią pomiarową. Wyniki pomiarów rozkładu pionowego ozonu metodą Umkehr w Belsku są szeroko stosowane w najpoważniejszych analizach statystycznych i metodycznych.

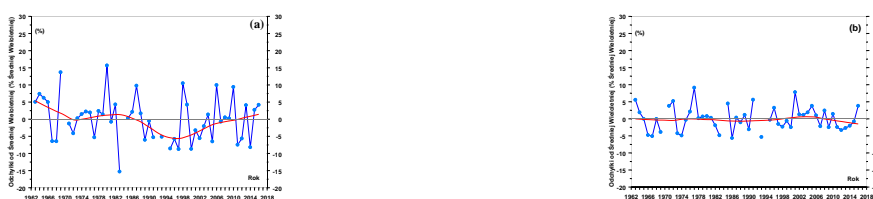


Rys.6. Pionowy profil O_3 dla wybranych dni w 2016 r. wyznaczony z pomiarów Umkehr spektrofotometrem Dobsona z zastosowaniem algorytmu

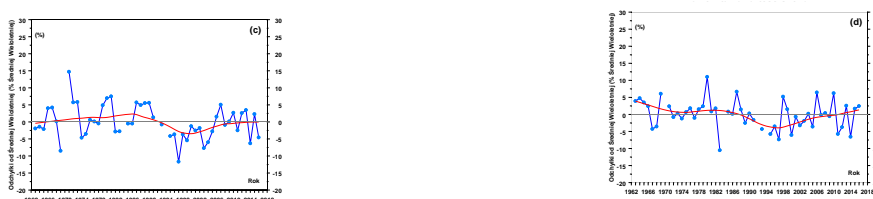


obliczeniowego *UMK04*.

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 (wzrost CO_2) na koncentrację ozonu na tych wysokościach.



Rys.7 Odchyłki średnich wiosennych (marzec-kwiecień-maj) od średniej wieloletniej zawartości ozonu w wybranych warstwach atmosfery z pomiarów Umkehr spektrofotometrem Dobsona w Belsku (1963-2016). 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

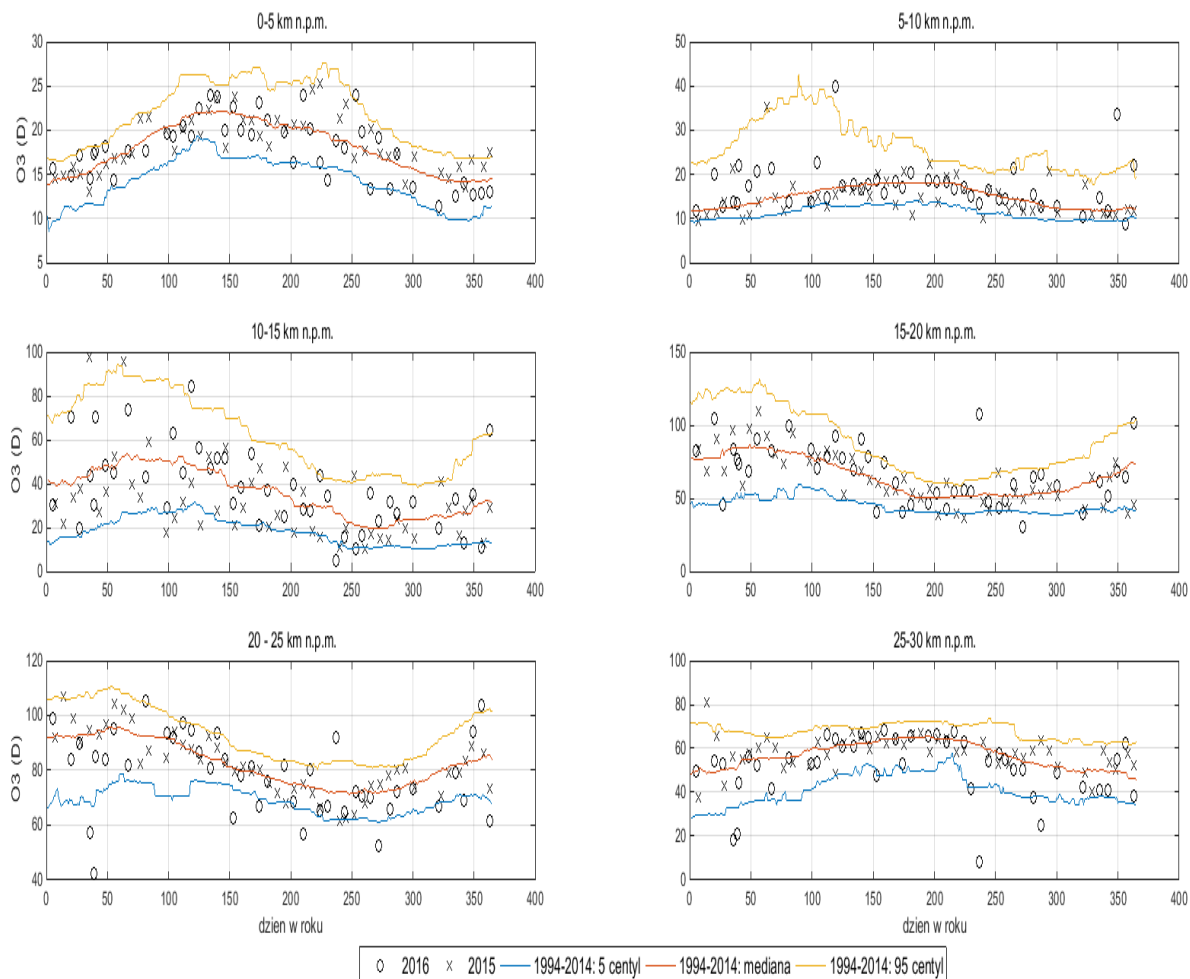
Na Rys.7 przedstawiono przebiegi średnich sezonowych (marzec-kwiecień-maj) zawartości ozonu w wybranych warstwach atmosfery (troposfera+dolna stratosfera, środkowa stratosfera, górna stratosfera, cała kolumna atmosfery) z pomiarów Umkehr spektrofotometrem Dobsona w Belsku. Profile ozonu na Rys.7 wyznaczono 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 (1963-2016) w wybranych warstwach atmosfery wskazują na wzrostową tendencję od połowy lat 90-tych XX wieku w zawartości ozonu w całej kolumnie atmosfery (Rys.7.d), w warstwach 0-22km (troposfera i dolna stratosfera, Rys.7.a) i 32,5-37,5km (górną stratosferą, Rys.7.c). W średniej stratosferze (22-27km – Rys.7.b) przez cały okres pomiarowy zawartość ozonu oscyluje wokół ustalonego poziomu bez wyraźnego trendu. Ponieważ o zmienności ozonu w wysokich warstwach atmosfery decydują przede wszystkim procesy chemiczne, więc wzrostowy trend w tych warstwach potwierdza skuteczność ograniczeń w produkcji substancji niszczących warstwę ozonową wprowadzonych przez Protokół Montrealski z 1987 r i późniejsze poprawki. Na zmiany ozonu w warstwach atmosfery bliżej powierzchni Ziemi (troposfera i dolna stratosfera) mogą dodatkowo wpływać procesy dynamiczne.

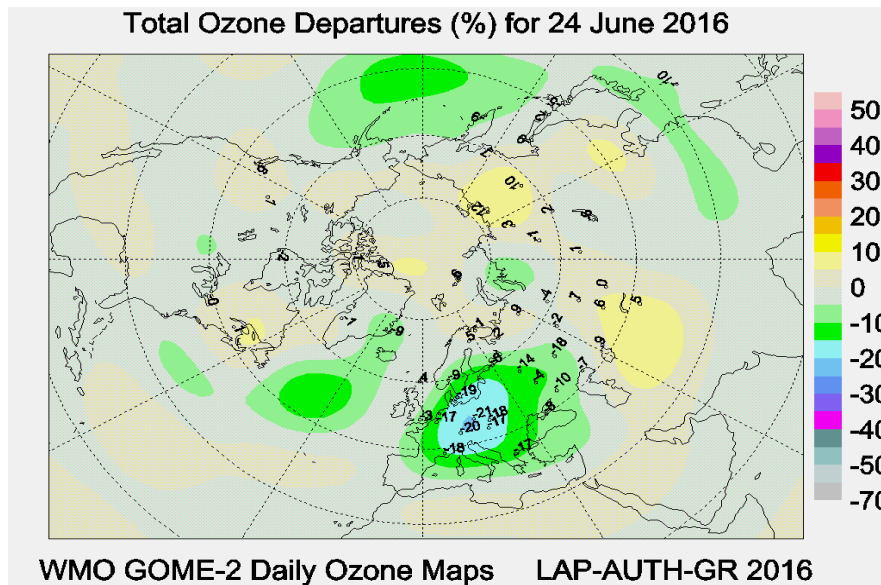
W 2016 roku na Stacji Aerologicznej IMGW-PIB w Legionowie koło Warszawy kontynuowano systematyczne sondáže ozonowe rozpoczęte w 1979 roku. Rutynowo w każdą środę w terminie 12UTC uzyskiwany jest profil ozonu z użyciem elektrochemicznej sondy ozonowej, unoszonej w powietrzu przez balon meteorologiczny do maksymalnej wysokości 35km. W kampanii Match 2015/16 na stacji w Legionowie od stycznia do marca wykonano dodatkowe 4 sondáže ozonowe.

Na podstawie homogenicznej serii sondáže ozonowych z lat 1994-2016 obliczono zawartość ozonu w warstwach atmosfery nad Legionowem (Rys.8). Zawartość ozonu obliczono w jednostkach Dobsona (D). Na wykresach prezentowane są wyniki dla pomiarów wykonanych w 2016 roku, i dla porównania z 2015 roku, na tle zmian wieloletnich z okresu 1994-2014. Do ustalenia źródła masy dla anomalii ozonu w sondážach ozonu wykorzystano model HYSPLIT, za pomocą którego obliczono wsteczne trajektorie cząstek powietrza kończące się na wybranych wysokościach nad Legionowem.



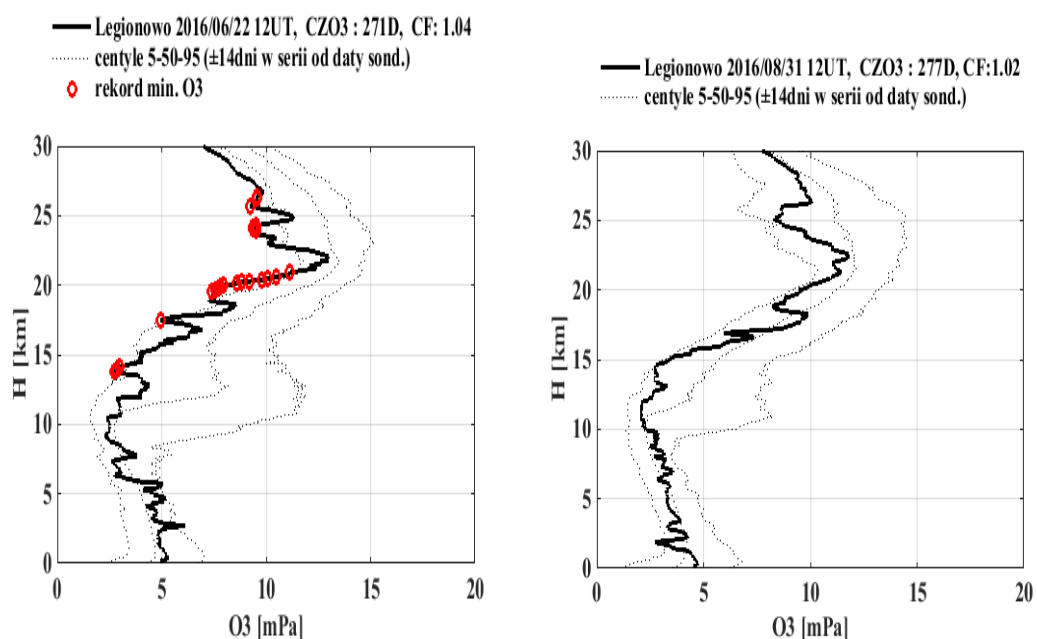
Rys.8. Zawartości ozonu w warstwach atmosfery nad Legionowem w latach 2015-2016, na tle zmienności wieloletniej (1994-2014)

W części Europy, obejmującej także Polskę, od kilkunastu lat obserwowane są epizody niewyjaśnionych letnich spadków całkowitej zawartości ozonu w atmosferze. W 2016 roku na początku lata (24 czerwca) wystąpił rekordowy spadek ozonu w centrum (~21%) w rejonie Alp. Spadek ten obejmował także Polskę, a w Belsku odnotowano rekordowy 18% spadek ozonu poniżej wieloletniej miesięcznej normy (Rys.9).



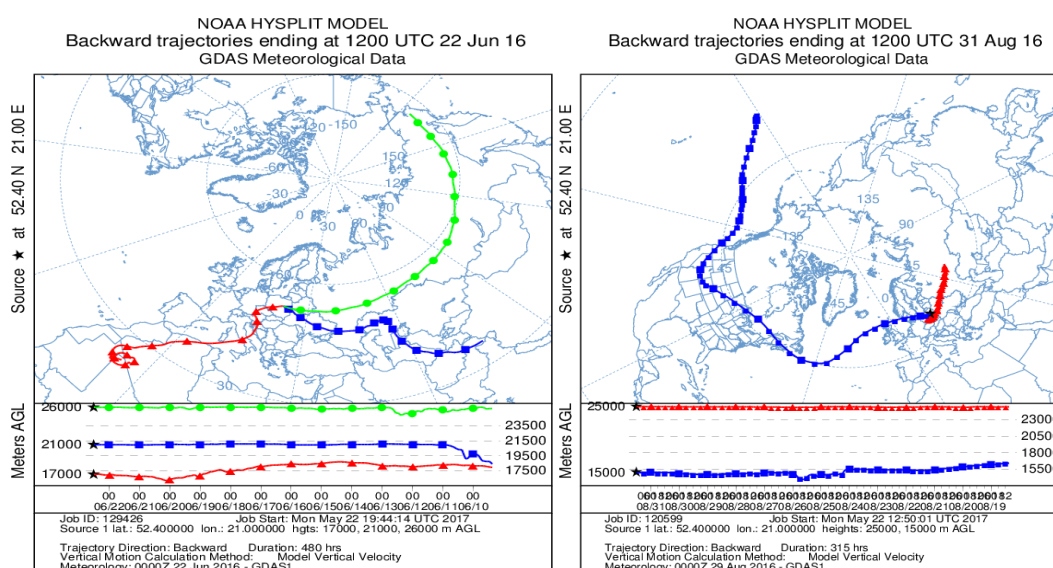
Rys.9. Mapa całkowitej zawartości ozonu nad półkula północną z pomiarów satelitarnych GOME-2 i naziemnych w dniu 24 czerwca 2016 roku.

W sondażu ozonowym w Legionowie 22 czerwca 2016r. na pewnych wysokościach w dolnej i średniej stratosferze pojawiły się rekordowo niskie koncentracje ozonu (Rys.10). Analiza trajektorii wstecznych dla cząstek osiagających Legionowo 22 czerwca 2016 12UT na wysokościach 17km i 21km pokazuje, że bardzo niska koncentracja ozonu na tych wysokościach była wynikiem transportu powietrza z rejonów (sub)tropikalnych. Na wysokości 26km obnizona koncentracja ozonu spowodowana była napływem powietrza pochodzącego z polarnej średniej stratosfery (Rys.11).



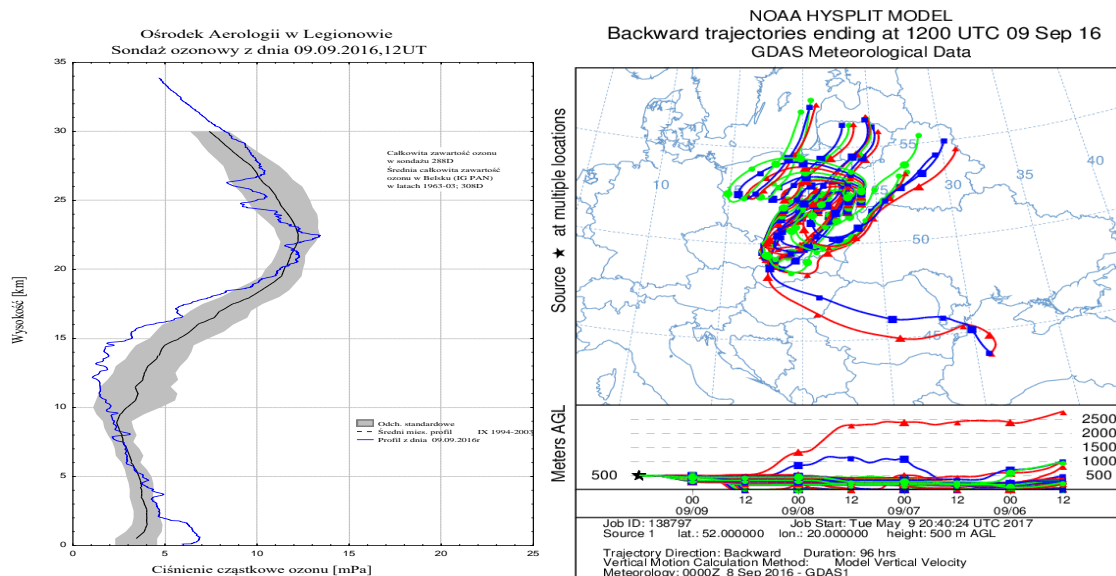
Rys.10. Sondáže ozonowe w Legionowie 22 czerwca i 31 sierpnia 2016 12UT.

W trzeciej dekadzie sierpnia i na początku września, podobnie jak w 2015 roku, nad znaczną częścią Europy obejmującą Polskę obserwowano spadki całkowitej zawartości ozonu przekraczające 10%. W sondażu z 31 sierpnia widoczne są niedobory ozonu w dwu warstwach, podobnie jak na początku lata (Rys.10). W średniej stratosferze widać bardzo powolny antycyklonalny ruch powietrza z wyższych szerokości geograficznych, a w dolnej części warstwy ozonowej wzmożoną adwekcję subtropikalną (Rys.11). Wydłużanie ciepłej pory roku w Polsce to jedna z cech zmieniającego się klimatu.



Rys.11. Wsteczne trajektorie cząstek powietrza dla anomalii w profilach ozonu nad Legionowem.

Przeciętna zawartość ozonu w dolnej troposferze osiąga maksimum na wiosnę (Rys.8), co oznacza, że ozon transportowany ze stratosfery daje największy wkład do bilansu ozonu troposferycznego. W okresie letnim nad Legionowem nadal pojawiają się epizody wysokich stężeń ozonu troposferycznego, związane z fotochemiczną produkcją ozonu, w powietrzu o wysokiej temperaturze zawierającym prekursorzy ozonu (tlenki azotu, lotne węglowodory, CO). W ostatnich latach maksima roczne ozonu w dolnej troposferze przesuwają się na koniec lata. Analiza trajektorii wstecznych dla epizodu kumulacji wysokich stężeń ozonu w planetarnej warstwie granicznej w dniu 9 września 2016 (Rys.12) ujawniła bardzo wolny ruch powietrza w wyżu nad Polską. Na stacji WIOŚ w Legionowie w ciągu kilku dni występowały przekroczenia normy dopuszczalnych stężeń ozonu przyziemnego.



Rys.12. Sondaż ozonowy w Legionowie 9 września 2016 i trajektorie wsteczne dla epizodu wysokich stężeń ozonu w warstwie granicznej atmosfery.

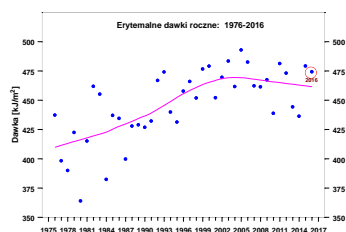
W roku 2016, w porównaniu do roku poprzedniego, osłabła adwekcja (sub)tropikalna charakteryzująca się naturalnie niskimi koncentracjami ozonu w górnej troposferze i dolnej stratosferze. Epizody obniżonej zawartości ozonu w dolnej stratosferze (10-15km) wystąpiły pod koniec lata (sierpień) i na początku zimy (grudzień). Letnie ubytki ozonu w dolnej stratosferze na nieco większych wysokościach (15-20km) najprawdopodobniej są wynikiem mieszania powietrza o normalnej zawartości ozonu z umiarkowanych szerokości geograficznych z powietrzem polarnym o zredukowanej zawartości ozonu, po rozpadzie arktycznego wiru polarnego na wiosnę. Podczas zimy 2015/16 w stratosferze nad Arktyką powstały warunki do destrukcji ozonu podobne do tych, które co roku występują nad Antarktydą. Adwekcja chłodnego arktycznego wiru polarnego nad Polskę na początku lutego ujawniła rekordowe dla tej pory roku ubytki ozonu w stratosferze (Rys.8).

Promieniowanie UV-B

W Centralnym Obserwatorium Geofizycznym PAN w Belsku monitoring promieniowania UV o skuteczności erytemalnej prowadzony jest od 1976 r. z zastosowaniem różnych modeli szerokopasmowych biometrów: Robertson-Berger (1976-1994), Solar Light (1992-2014), Kipp & Zonen (2006-2016). Seria czasowa w ubiegłych latach, także i w 2016 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 erytemalnej z pomiaru spektrofotometru Brewera No 64 (od 1995 r. do chwili obecnej). Jakość pomiarów ozonu i promieniowania UV spektrofotometrem Brewera w Belsku jest zapewniona przez corocznie porównania (od lata 1995 r.) ze światowym standardem – spektrofotometrem Brewera No.17.

Poziom promieniowania UV w 2016 r. był o 15% wyższy niż w połowie lat 70-tych ubiegłego wieku. Za wzrost poziomu promieniowania UV-B w Belsku w latach 1976-2000 odpowiedzialne są niemal w równym stopniu: zmiany w ozonie atmosferycznym, zachmurzeniu i aerozolu atmosferycznym. Dawki roczne w XXI wieku oscylują wokół ustalonego poziomu około 460 KJ/m² (Rys.13). Wydaje się, że o kierunku trendu w promieniowaniu UV w najbliższym okresie będą decydować zmiany w zachmurzeniu nad Belskiem prawdopodobnie związane ze zmianami klimatu.



Rys. 13. Dawki roczne promieniowania o skuteczności erytemalnej zmierzone w Belsku w okresie 1976-2016

Pomiary natężenia napromienienia o skuteczności erytemalnej z użyciem biometru Kipp&Zonen wskazały 28.06.2016 najwyższą w historii pomiarów w Belsku wartość tj. 8,3 indeksu UV (1 Indeks =25mW/m²). Nieco mniejsze wartości (8,2) zmierzono 22 i 24 czerwca. Powyższe wyniki zostały potwierdzone także przez wartości Ideksu otrzymane z pomiarów widm UV z zastosowaniem spektrofotometru Brewera. Wysokie wartości Indeksu (powyżej 8) obserwowano w dniach 22 i 24 czerwca w danych satelitarnych dla okolic Belska, które obliczono stosując algorytm wyznaczania indeksu UV dla bezchmurnego nieba na bazie satelitarnych pomiarów CZO₃ i grubości optycznej aerozolu (Rys.14, lewa strona). Natomiast nie tak wysoki Indeks, około 7, (Rys.14 prawa strona) pojawił się w danych satelitarnych z 28.06.2016, kiedy zanotowano rekordową wartość Indeksu UV w Belsku. Wysokie wartości indeksu w dniach 22 i 24.06.2016 były wynikiem niskich wartości CZO₃ (~15% poniżej normy). Natomiast 28.06.2016 wartość CZO₃ była jedynie 4% niższa od średniej wartości dla tego dnia. Specyficzna konfiguracja chmur nad Belskiem w tym dniu doprowadziła do wzmocnienia promieniowania UV przy powierzchni Ziemi w wyniku rozpraszania i odbicia

promieniowania słonecznego od krawędzi chmur. Satelitarny algorytm wyznaczania Indeksu UV nie uwzględniał tego typu zjawisk.



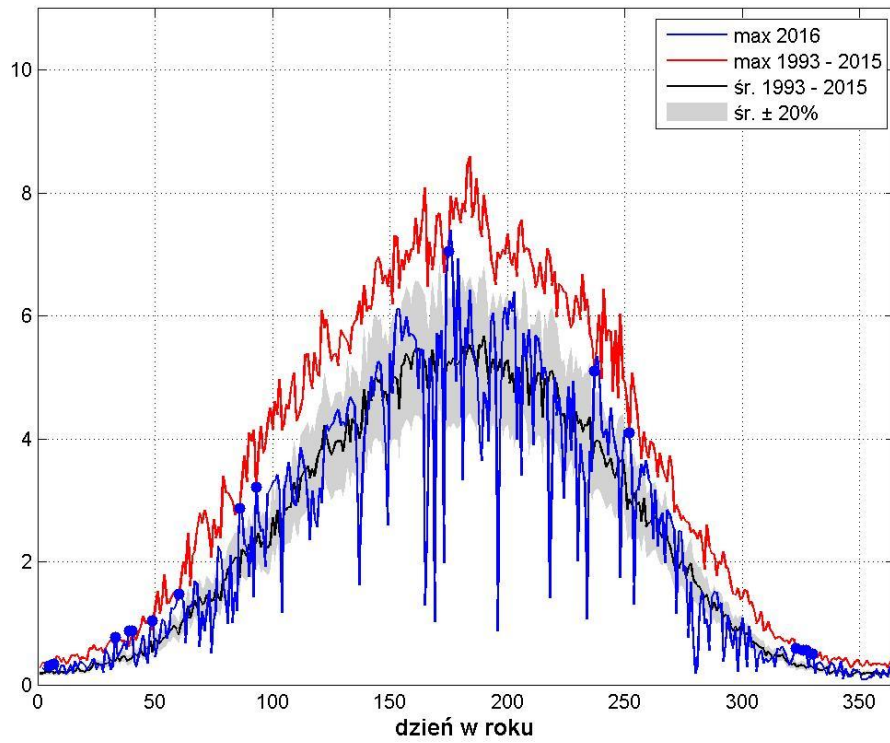
Rys. 14. Indeks UV nad Europą wyznaczony z pomiarów spektrofotometrem GOME-2 na platformie satelitarnej MetOp-A w dniach 24.06.2016 i 28.06.2016

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

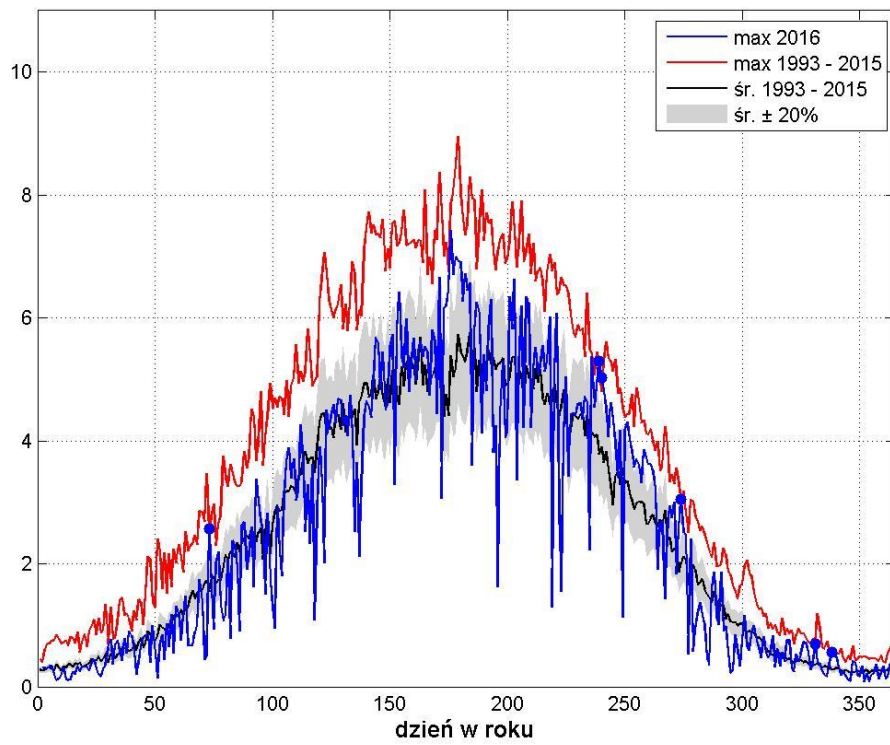
W pomiarach 2016 roku na stacjach w Łebie, Legionowie i Zakopanem wyróżnia się okres w trzeciej dekadzie czerwca, kiedy obserwowano w poszczególnych dniach podwyższone wartości Indeksu UV dla wszystkich stacji oraz ekstremalną wartość w serii dla Łeby. Podwyższone promieniowanie związane było z napływem nad Polskę ubogich w ozon mas powietrza w średniej i górnej stratosferze oraz wyżową pogodą występującą w tym okresie w Polsce. Podobna sytuacja miała miejsce na przełomie sierpnia i września gdzie także obserwowane były podwyższone a nawet ekstremalne w serii wartości promieniowania UV-B. Tak jak w latach ubiegłych obserwowano również ekstremalne zwiększenie promieniowania UV w poszczególnych dniach wczesną wiosną w Łebie. Maksymalne miesięczne dawki promieniowania dla Łeby, Legionowa i Zakopanego wystąpiły w czerwcu. Największą dawkę dobową zmierzono w czerwcu na stacji w Łebie.

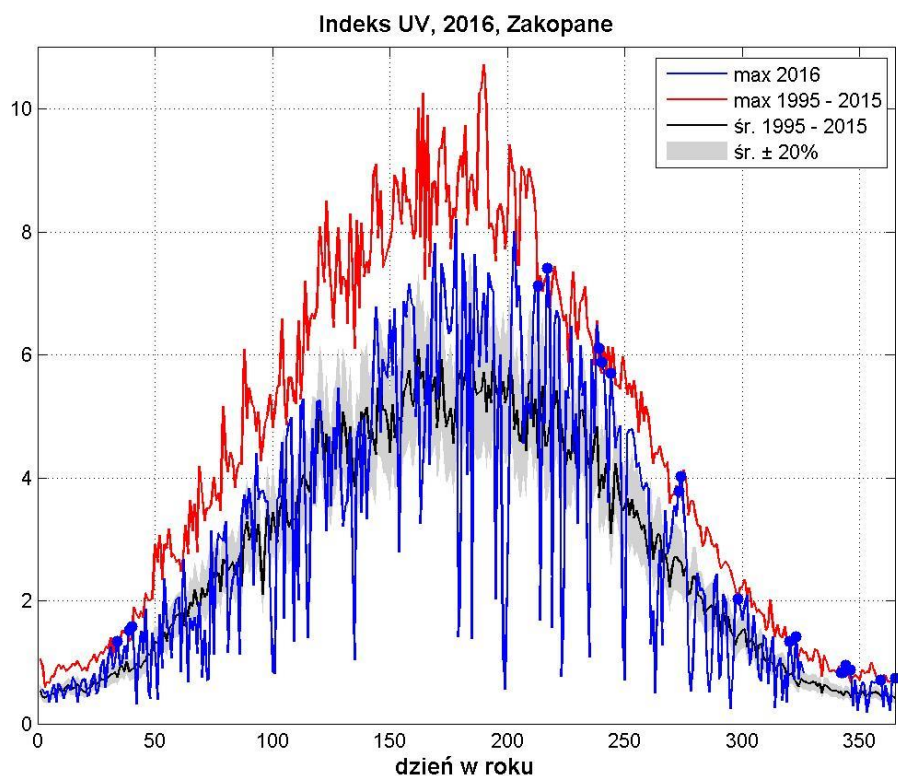
Na Rys.15 przedstawiono przebiegi roczne Indeksu UV z 2016 roku dla stacji w Łebie, Legionowie i Zakopanem na tle średniego oraz maksymalnego Indeksu UV od początku pomiarów do 2015 roku dla każdej stacji. Niebieskimi kropkami zaznaczono rekordowe wartości Indeksu UV. W 2016 roku w Łebie zanotowano 16 dni z rekordowymi wartościami Indeksu UV, w Legionowie 6, a w Zakopanem 20. W większości były to dni w okresie zimowym, ale na każdej ze stacji wystąpiło również kilka dni z rekordowymi wartościami Indeksu UV w lecie.

Indeks UV, 2016, Łeba



Indeks UV, 2016, Legionowo

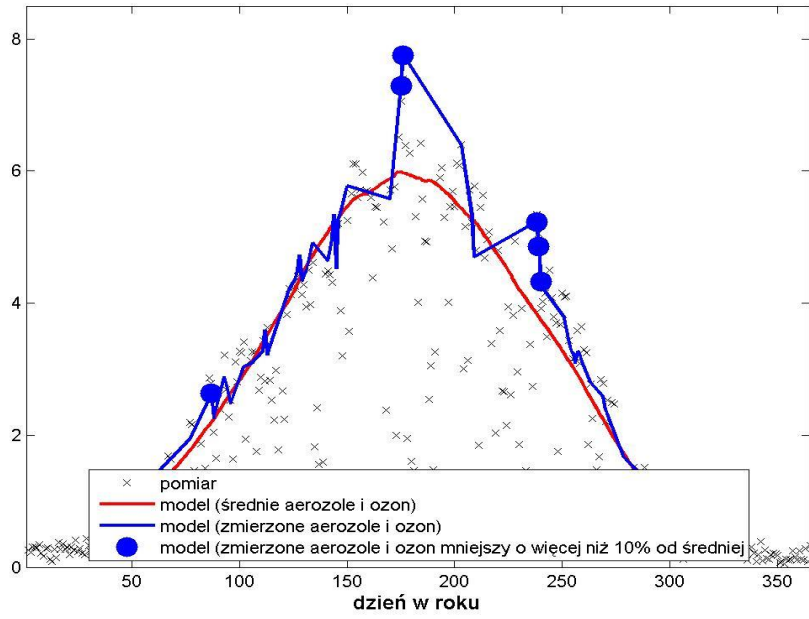




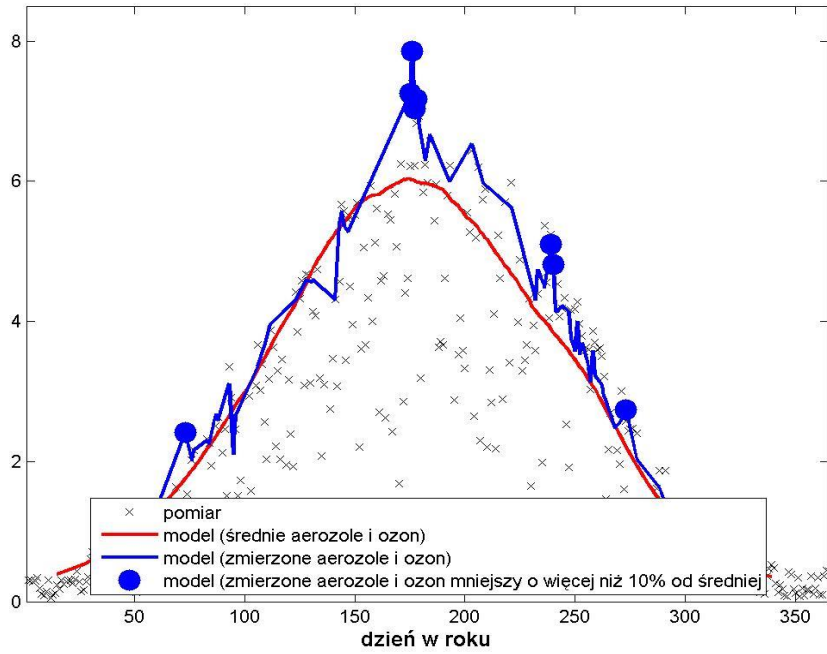
Rys.15. Przebiegi roczne Indeksu UV z 2016 roku dla stacji w Łebie, Legionowie i Zakopanem na tle średniego oraz maksymalnego Indeksu UV od początku pomiarów do 2015 roku dla każdej stacji,

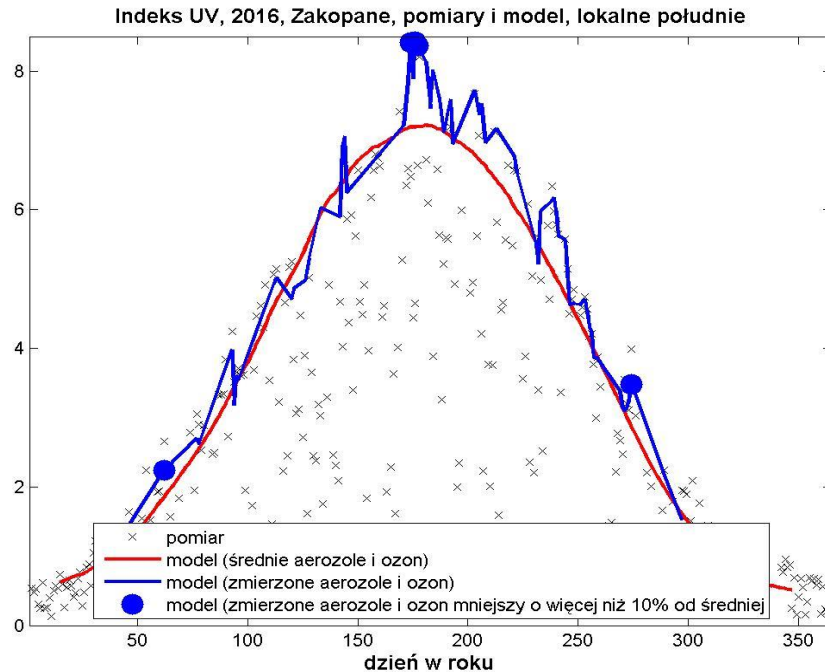
Korzystając z pomiarów satelitarnych OMI ozonu całkowitego i aerozoli z 2016 roku obliczono, używając model transferu promieniowania słonecznego FastRT wartości Indeksu UV dla bezchmurnego nieba dla lokalnego południa. Podobne obliczenie wykonano dla danych ozonu całkowitego i aerozoli uśrednionych 30-dniową średnią bieżącą z okresu 2005-2015. Na Rys.16 przedstawiono pomiary Indeksu UV w 2016 roku oraz zaznaczono wartości Indeksu UV gdy ozon całkowity był mniejszy o więcej niż 10% od średniej na stacjach Łeba, Legionowo i Zakopane.

Indeks UV, 2016, Łeba, pomiary i model, lokalne południe



Indeks UV, 2016, Legionowo, pomiary i model, lokalne południe





Rys.16. Przebiegi roczne Indeksu UV z 2016 roku obliczonego z wykorzystaniem modelu transferu promieniowania słonecznego FastRT dla stacji w Łebie, Legionowie i Zakopanem z wykorzystaniem pomiarów satelitarnych ozonu całkowitego i aerozoli OMI 2005-2016.

Zestawienie wartości dla 2016 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.

Okazuje się, że podwyższone wartości promieniowania UV da się wytłumaczyć spadkami ozonu w trzeciej dekadzie czerwca, na przełomie sierpnia i września oraz w pojedynczych dniach wczesną wiosną i na jesieni. Analizując pozostałe dni lata można wywnioskować, że podwyższone wartości promieniowania często były związane z mniejszą ilością aerozoli.

Opracowany w IMGW-PIB w 2000 r. operacyjny, automatyczny system prognozy Indeksu UV działał w 2016 r. od końca kwietnia do końca września. Jednodniowe mapy Indeksu UV dla bezchmurnego nieba oraz z uwzględnieniem prognozy zachmurzenia, bierzący Indkes UV (pomiar przyrządami UVEM-6C firmy OPTIX pracującymi w ramach

sieci monitoringu operacyjnego od 2006 r.) i podstawowe informacje o Indeksie UV były publikowane na stronie Pogodynki i GIOŚ. (Rys.17, Rys.18)

Indeks UV

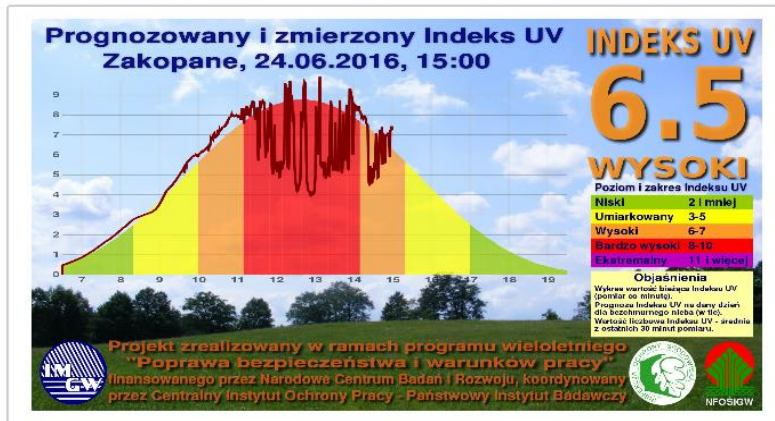
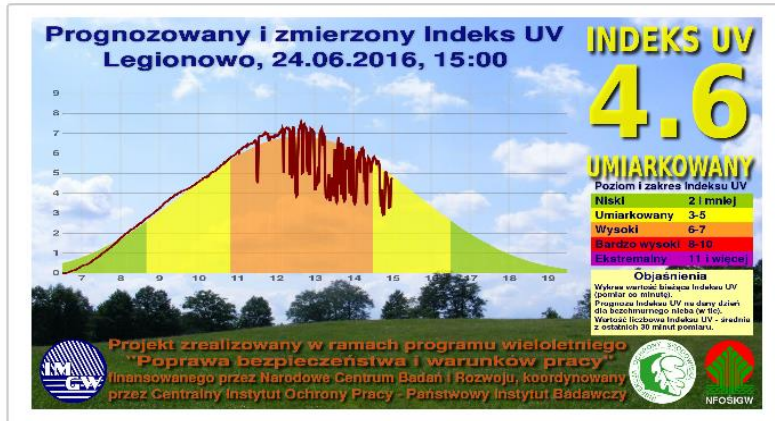
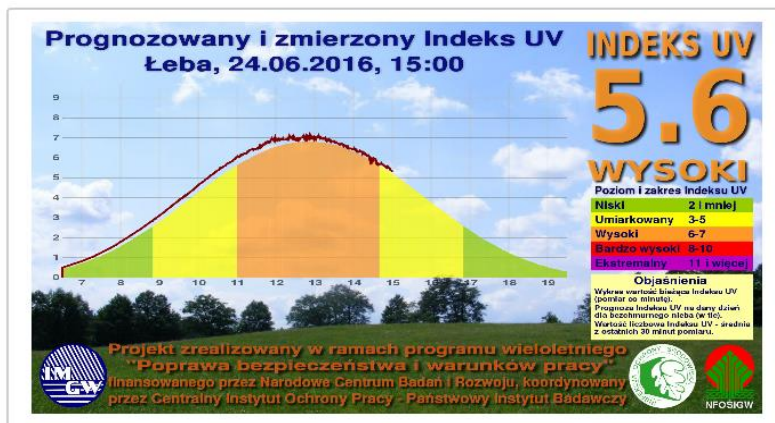
Pomiar Indeksu UV w czasie rzeczywistym (aktualizowany co 5 minut)

Nadmierne opalanie jest szkodliwe, może powodować raka skóry, zaćmę, obniżenie odporności biologicznej. Indywidualna wrażliwość człowieka na promieniowanie UV zależy od typu jego skóry.

AKTUALNY INDEKS UV

PROGNOZA INDEKSU UV

MATERIAŁY EDUKACYJNE



Monitoring promieniowania UV jest realizowany przez Ośrodek Oceanografii i Monitoringu Hydrosfery i Atmosfery IMGW-PIB w ramach Państwowego Monitoringu Środowiska na zlecenie Głównego Inspektora Ochrony Środowiska, finansowany ze środków Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej.



Rys.17. Przykładowe informacje o bieżącym i prognozowanym Indeksie UV z dnia 24.06.2016 r. opublikowane na stronie internetowej Pogodynki i GIOŚ.

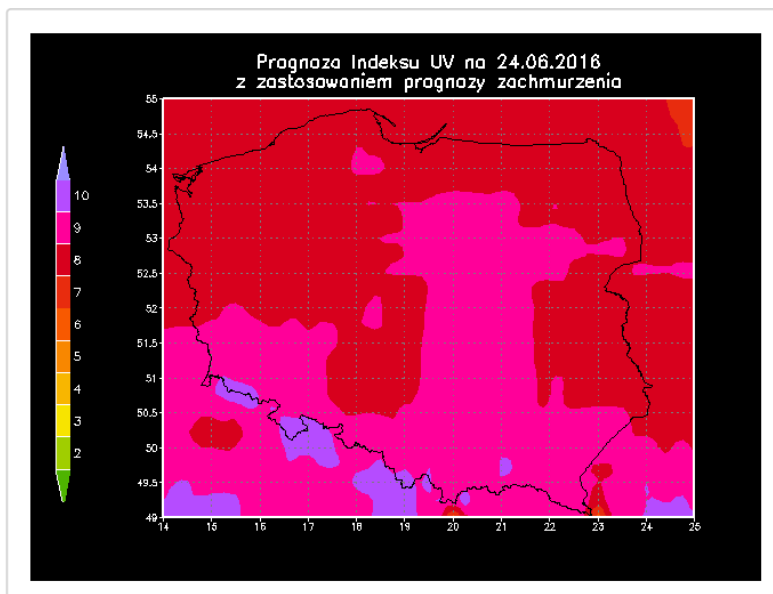
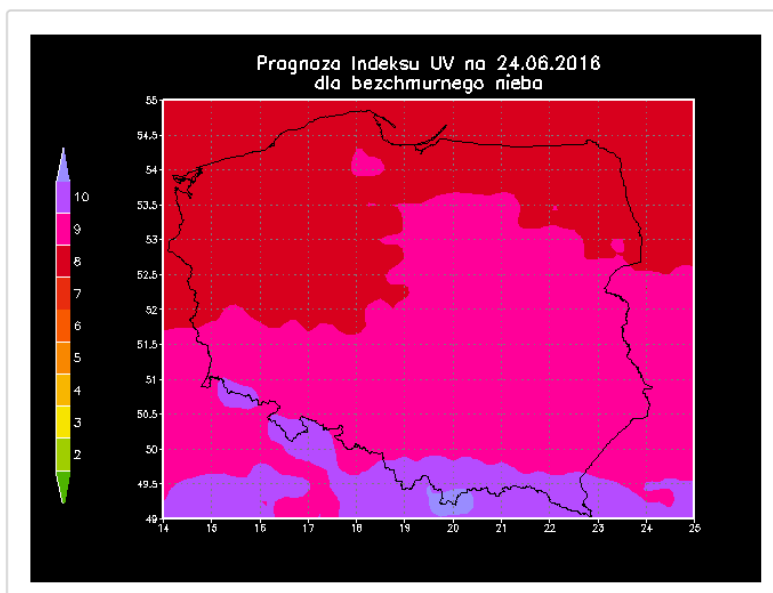
Prognoza Indeksu UV (aktualizowany raz na dobę)

Nadmierne opalanie jest szkodliwe, może powodować raka skóry, zaćmę, obniżenie odporności biologicznej. Indywidualna wrażliwość człowieka na promieniowanie UV zależy od typu jego skóry.

AKTUALNY INDEKS UV

PROGNOZA INDEKSU UV

MATERIAŁY EDUKACYJNE



Monitoring promieniowania UV jest realizowany przez Ośrodek Oceanografii i Monitoringu Hydrosfery i Atmosfery IMGW-PIB w ramach Państwowego Monitoringu Środowiska na zlecenie Głównego Inspektora Ochrony Środowiska, finansowany ze środków Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej.

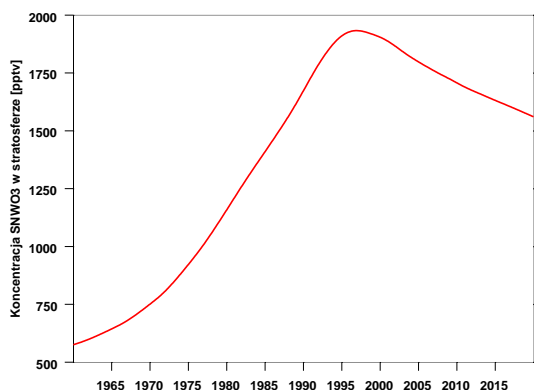


Rys.18. Przykładowa mapa prognozy Indeksu UV dla bezchmurnego nieba z zastosowaniem prognozy zachmurzenia z dnia 24.06.2016 r. opublikowane na stronie internetowej Pogodyнки i GIOŚ.

Globalne zmiany całkowitej zawartości ozonu

Dla oceny długookresowej zmienności ozonu nad Polską i nad innymi obszarami na półkuli północnej i południowej, wykorzystano dane satelitarne pochodzące z globalnej bazy danych Ozone_MSR (Multi-Sensor Reanalysis). Baza prowadzona jest przez holenderski Królewski Instytut Meteorologiczny (KNMI) i zawiera dane CZO₃ od listopada 1978 do marca 2017 r. (uzupełniane na bieżąco) z rozdzielczością 1° (szerokość geograficzna) x 1,5° (długość geograficzna).

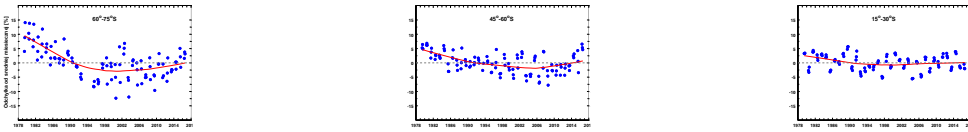
Zwykle długookresowe zmiany ozonu wiąże się ze zmianami koncentracji w stratosferze substancji niszczących warstwę ozonową (SNWO₃). Koncentracja SNWO₃ w stratosferze w średnich szerokościach geograficznych zaczyna maleć w drugiej połowie lat 90-tych XX wieku (Rys.19) w wyniku ograniczeń w produkcji SNWO₃ wprowadzonych przez Protokół Montrealski (PM) z 1987 r. i jego późniejsze poprawki. W tej sytuacji pod koniec lat 90-tych XX wieku w danych ozonowych powinien pojawić się słaby 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.



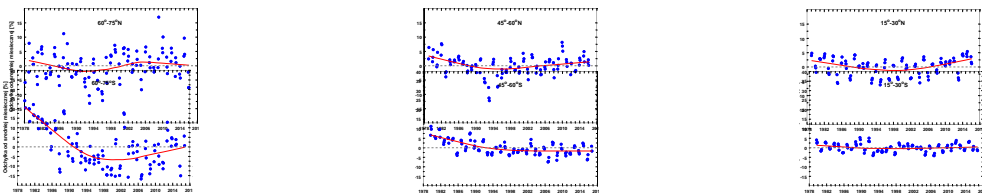
Rys.19. Zawartość substancji niszczących warstwę ozonową (SNWO₃) w stratosferze (1960-2020) w średnich szerokościach geograficznych według obliczeń modelowych (krzywa czerwona)

Na Rys.20-23 dla wybranych stref o szerokości 15 stopni równomiernie pokrywających cały glob przedstawiono serie czasowe odchyłek średnich miesięcznych CZO₃ w okresie 1979-2016 od wieloletnich średnich miesięcznych (1979-2016) wyznaczonych jako procent średnich wieloletnich. Serie czasowe przedstawiono dla poszczególnych sezonów: zima (grudzień/styczeń/luty na półkuli północnej (PPn); czerwiec/lipiec/sierpień na półkuli południowej (PPł), wiosna (marzec/kwiecień/maj dla PPn; wrzesień/październik/listopad dla

PPł), lato (czerwiec/lipiec/sierpień dla PPn, grudzień/styczeń/luty dla PPł), jesień (wrzesień/październik/listopad dla PPn, marzec/kwiecień/maj dla PPł).

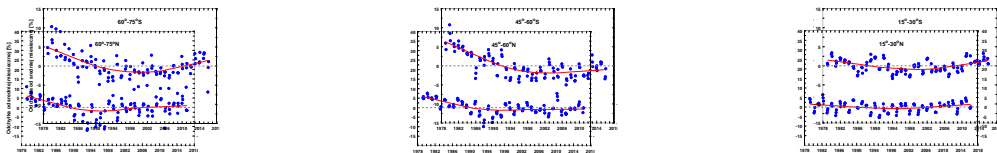


Rys.20. Względne odchyłki miesięczne CZO_3 (niebieskie kółka) dla sezonów zimowych w strefie $60^\circ\text{-}75^\circ$ i $45^\circ\text{-}60^\circ$ i $15^\circ\text{-}30^\circ$ dla półkuli południowej

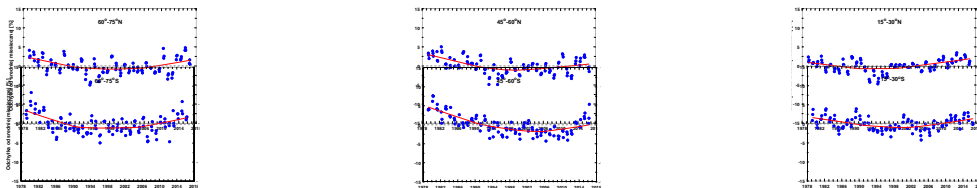


(górny rząd) i północnej (dolny rząd) w okresie 1979-2016. Czerwona krzywa reprezentuje dane wygładzone metoda LOWES

Rys.21. Analogicznie jak Rys.20, ale względne odchyłki miesięczne CZO_3 dla sezonów wiosennych. Zakres zmienności dla osi pionowej wynosi $\{-20\%, 40\%\}$ wobec $\{-20\%, 20\%\}$ na Rys.20



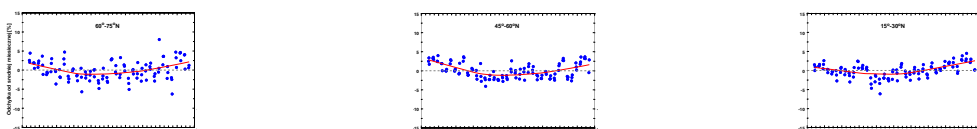
Rys.22. Analogicznie jak Rys.20, ale względne odchyłki miesięczne CZO_3 dla



sezonów letnich

Rys.23. Analogicznie jak Rys.20, ale względne odchyłki miesięczne CZO_3 dla sezonów jesiennych

Od końca lat 90-tych XX wieku zawartość w stratosferze substancji niszczących warstwę ozonową zaczyna się stopniowo zmniejszać i w konsekwencji we wszystkich

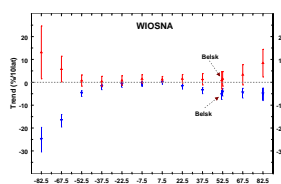
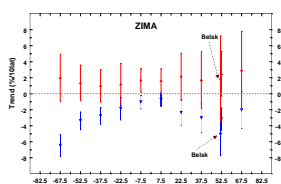


analizowanych strefach i sezonach nie obserwuje się spadkowej tendencji w CZO_3 , którą zanotowano we wcześniejszym okresie. Najmniejsze ubytki ozonu w tym okresie zanotowano w strefie okołorównikowej (15°S - 15°N) i w sezonach jesiennych. Natomiast największe ubytki ozonu miały miejsce pod koniec XX wieku w strefie poza-równikowej w sezonach wiosennych zwłaszcza na półkuli południowej w wysokich szerokościach geograficznych. Wzrostowej tendencji w XXI wieku nie widać tylko w sezonach wiosennych w strefie 60°S - 60°N . Przebieg wygładzonych odchylek wskazuje też, że w niektórych przypadkach (np. strefa równikowa, jesień i lato w Arktyce) na końcu serii pomiarowej poziom ozonu może być co najmniej równy temu jaki notowano na początku serii pomiarowej w 1979 r., czyli przed okresem intensywnej destrukcji ozonu przez substancje antropogeniczne wprowadzane do stratosfery w latach 80-tych i na początku lat 90-tych ubiegłego wieku. Obecnie poziom zanieczyszczenia atmosfery substancjami niszczącymi warstwę ozonową jest nadal wysoki (Rys.19) i nie wydaje się prawdopodobne, że stosunkowe niewielkie zmniejszenie tej koncentracji w XXI wieku doprowadziło w niektórych regionach do pełnej naprawy warstwy ozonowej. Istnieją, więc prawdopodobnie inne mechanizmy powodujące intensywną naprawę warstwy ozonowej. Takimi mechanizmami mogą być np. zmiany w dynamice atmosfery związane ze zmianami klimatu, np. wzrost intensywności cyrkulacji Brewera-Dobsona (co było sugerowane przez niektóre modele klimatu), który powoduje zwiększony transport ozonu ze strefy tropikalnej w kierunku biegunów. Nie można też wykluczyć ewentualności, że w analizowanej serii czasowej poziom ozonu w ostatnich kilku latach jest zawyżony w wyniku nieodpowiedniej kalibracji spektrofotometrów działających na platformach satelitarnych.

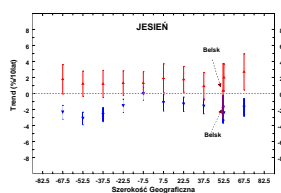
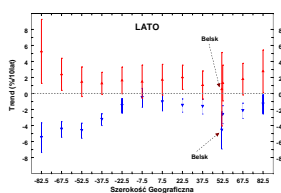
Na Rys.24 przedstawiono liniowe sezonowe trendy CZO_3 (odpowiednio dla zimy, wiosny, lata i jesieni) dla dwóch okresów: od początku serii czasowej (1979 r.) do momentu T_0 , kiedy w danej strefie koncentracja SNWO_3 w stratosferze jest maksymalna (np. $T_0=1995$ w strefie równikowej i $T_0=2000$ w wysokich szerokościach geograficznych) i dla okresu T_0 -2016, w którym spodziewano się wzrostowego trendu (regeneracji) ozonu atmosferycznego. Dla każdej strefy szerokościowej i sezonu wyznaczono liniowe trendy (reprezentowane przez dwie proste połączone w punkcie T_0) stosując standardową regresję wieloliniową z uwzględnieniem fluktuacji ozonu indukowanych przez naturalne procesy występujące w atmosferze Ziemi.

W modelu statystycznym zastosowano 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 (dla ozonu w PPn) i Antarktycznych (dla ozonu w PPł) oscylacji, grubość optyczną aerozolu w stratosferze dla fali 550nm, intensywność cyrkulacji Brewera-Dobsona parametryzowaną przez strumień ciepła w kierunku bieguna północnego (dla ozonu w PPn) lub południowego (dla ozonu w PPł) i dipolowe oscylacje temperatury wody powierzchniowej Oceanu Indyjskiego (tzw. DMI). W szacowaniu niepewności trendu uwzględniono zmniejszenie liczby stopni swobody modelu regresyjnego ze względu na istniejące autokorelacje rzędu 1 w serii czasowej wartości resztkowych modelu.



Rys.24. Sezonowe (zima, wiosna, lato, i jesień) liniowe trendy w % na 10 lat w okresie 1979-T₀ (niebieskie punkty, okres wzrostu koncentracji w stratosferze substancji niszczących warstwę ozonową) i w okresie T₀-2016 (czerwone punkty, okres zmniejszenia koncentracji tych substancji). Pionowe kreski wyznaczają zakres błędów szacowania trendu na poziomie $\pm 2\sigma$ (dwa odchylenia



standardowe).

Średnie miesięczne CZO₃ według bazy danych KNMI MSR ozone.

<https://climexp.knmi.nl/select.cgi?id=someone@somewhere&field=o3col>

Średnie miesięczne CZO₃ dla Belska pochodzą z pomiarów spektrofotometrem Dobsona i znajdują się w światowej bazie danych WOUDC w Toronto, Kanada

W okresie wzrostu koncentracji w stratosferze substancji niszczących ozon (1979-T₀) niemal we wszystkich strefach i sezonach znaleziono istotne statystycznie ujemne trendy CZO₃. Tylko nad równikiem (strefa 15°S-15°N) znaleziono nieistotne statystyczne trendy rzędu -1% na 10 lat. Trendy zwykle stają się bardziej ujemne ze wzrostem szerokości geograficznej, osiągając wartości powyżej 10% na 10 lat w wysokich szerokościach geograficznych PPł na wiosnę, co związane jest z rozwojem „dziury ozonowej” nad Antarktydą w tym sezonie. Ekstremalnie ujemny trend ~25% na 10 lat wyznaczono nad biegunem południowym na wiosnę, co oznacza ~50% zmniejszenie grubości warstwy ozonowej nad tym obszarem w okresie 1979-2000. Latem spadkowe trendy CZO₃ na PPł w średnich i wysokich szerokościach geograficznych (~3-5% na 10 lat) są silniejsze niż te

występujące na PPn (~2% na 10 lat), co jest związane z transportem w kierunku równika mas powietrza ubogich w ozon, które w sezonie wiosennym było zamknięte w obszarze wiru polarnego. W strefie około równikowej i zwrotnikowej ujemne trendy na obu półkulach są niemal identyczne odpowiednio ~1% i 2 %. W Arktyce ekstremalnie ujemne trendy (~5%/10 lat) występują w sezonie wiosennym i są znacznie mniejsze co do wartości bezwzględnej niż te wyznaczone nad Antarktydą. Nad Arktyką tylko epizodycznie dochodzi do niszczenia ozonu w skali spotykanej corocznie wiosną nad Antarktydą.

W okresie zmniejszania się koncentracji substancji niszczących warstwę ozonową (T0-2016) pojawił się trend wzrostowy ~1-2%/10lat w strefie niskich i średnich szerokości. Trend ten jest na ogół istotny statystycznie w sezonie letnim i jesiennym. Powyżej 60° szerokości geograficznej południowej i północnej na wiosnę dodatni trend jest szczególnie duży i może osiągać 13%/10 lat i 8%/10 lat odpowiednio nad biegunem południowym i północnym.

W danych ozonowych z Belska widzimy silniejsze spadkowe trendy w latach 1979-1998 niż korespondujące z nimi trendy w strefie 45°-60°N. Widoczne jest to szczególnie latem, kiedy trend w Belsku jest -4,6%/10lat wobec trendu w pasie szerokościowym 45°-60°N - 1,6%/10lat. Po 1998 r. latem i wiosną ozon nad Belskiem odbudowuje się wolniej niż ozon w korespondującej strefie średnich szerokości geograficznych. Należy zwrócić uwagę, że oszacowania trendów dla Belska uzyskano z większym błędem, gdyż lokalne dynamiczne procesy nie są parametryzowane w modelu trendowym, a więc różnice między trendami w Belsku i strefie 45°-60°N mogą być po części przypadkowe.

Podsumowanie

W ostatnich kilkunastu latach warstwa ozonowa na obu półkulach odbudowuje się po okresie (do końca lat 90-tych XX wieku), kiedy była niszczone przez substancje antropogeniczne zawierające związki chloru i bromu (freony, halony). Wydaje się, że wypełnianie postanowień Protokołu Montrealskiego z 1987 r. i jego późniejszych poprawek dotyczących ochrony warstwy ozonowej spowodowało zmniejszanie się koncentracji substancji niszczących warstwę ozonową w stratosferze, a w konsekwencji pojawienie się wzrostowej tendencji w ozonie atmosferycznym. Jednak tempo regeneracji warstwy ozonowej jest zaskakująco wysokie i w niektórych rejonach stwierdzono poziom ozonu taki jak w 1979 r. (np. Arktyka w sezonie letnim i jesiennym), czyli przed okresem intensywnej destrukcji ozonu. W tym momencie nie można zidentyfikować źródeł nieoczekiwanego silnego dodatniego trendu CZO₃. Niewykluczone jest, że po części taki trend ma charakter nie fizyczny ale jest związany z zawyżaniem wartości ozonu przez satelitarne spektrofotometri nad tym rejonem. Wymagane jest, więc globalne porównanie danych

satelitarnych z wynikami pomiarów na stacjach naziemnych w celu wprowadzenia ewentualnej korekcji tych danych.

Modele fizyczno-chemiczne klimatu z uwzględnieniem warstwy ozonowej nie przewidują naprawy warstwy ozonowej w średnich szerokościach geograficznych w najbliższych 2-3 dekadach. W tym momencie nie można ocenić, czy w następnych dekadach pojawi się wyraźna tendencja wzrostowa w CZO₃ w Polsce i jakie będzie tempo 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 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.