



Główny Inspektorat Ochrony Środowiska

Analiza danych oraz opracowanie informacji dla odbiorców krajowych i międzynarodowych: roczny raport za rok 2019

w ramach zadania „Monitoring rozkładu pionowego ozonu, całkowitej zawartości ozonu nad Polską i Europą Środkową oraz promieniowania UV-B w Polsce w latach 2017 – 2020”



**Narodowy Fundusz
Ochrony Środowiska
i Gospodarki Wodnej**

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

Warszawa, czerwiec 2020

JEDNOSTKA PROWADZĄCA: Zakład Monitorowania Jakości Powietrza, IMGW-PIB

KIEROWNIK TEMATU: mgr Julita Biszczuk-Jakubowska

WYKONAWCY:

Zakład Monitorowania Jakości Powietrza:

mgr Julita Biszczuk–Jakubowska

mgr Aleksander Curyło

mgr Bogumił Kois

Zakład Teledetekcji Satelitarnej w Krakowie:

dr Bożena Łapeta

mgr Monika Hajto

mgr Rafał Iwański

Stacja Pomiarów Aerologicznych w Legionowie: mgr Michał Perski

Stacja Meteorologiczna w Łebie: mgr Mariusz Gieryk

Stacja Hydrologiczno-Meteorologiczna w Zakopanem: mgr Paweł Parzuchowski

Przy cytowaniu danych należy podawać źródło danych:

Państwowy Monitoring Środowiska, Inspekcja Ochrony Środowiska

Analiza danych oraz opracowywanie informacji dla odbiorców krajowych i międzynarodowych: roczny raport za rok 2019.

1 Sprawozdanie z realizacji zadań 1-3 za rok 2019.

- 1.1 Profile ozonu
- 1.2 Pomiary promieniowania UV-B
- 1.3 Ozon całkowity z danych satelitarnych

2 Raport za rok 2019.

- 2.1 Wstęp
- 2.2 Ocena stanu warstwy ozonowej w 2019 roku na podstawie wyników monitoringu.
- 2.3 Analiza rozkładu pionowego ozonu nad Legionowem w 2019 roku.
- 2.4 Ozon całkowity z danych satelitarnych nad Europą Środkową w 2019 roku.
- 2.5 Promieniowanie UV-B zmierzone na sieci monitoringu w 2019 roku.
- 2.6 Wnioski

3 Opracowanie informacji dla odbiorców krajowych i międzynarodowych

4 Podsumowanie

5 Literatura

1 Sprawozdanie z realizacji zadań 1-3 za rok 2019.

1.1 Profile ozonu

W okresie od stycznia do grudnia 2019 roku na Stacji Pomiarów Aerologicznych w Legionowie wykonywano systematycznie, co najmniej raz w tygodniu sondáže ozonowe, elektrochemiczną sondą ozonową ECC6A produkcji Science Pump Corporation, USA. Sondáže wykonywano w systemie sondażowym DigiCORA MW41/RS41-SG i w systemie nawigacyjnym GPS. Wyniki pomiarów były gromadzone na bieżąco na serwerach IMGW-PIB i po zakończeniu etapu pracy przekazane do GIOŚ na płycie CD.

Program pomiarowy został zrealizowany w 100%

Tabela 1. Charakterystyka sondáže ozonowych w Legionowie.

Liczba sondáže		Pułap (km)	Średnia wysokość (km)
Razem	Standard		
51	51	≥ 30	34,1
-	-	$26 \div < 30$	-
Razem 51	51	≥ 26	34,1
1	1	< 26	

Tabela 2. Wyniki porównania całkowitej zawartości ozonu obliczonej z sondáže (O_3S) ze zmierzoną spektrofotometrem: naziemnym (Dobsona) lub satelitarnym (OMI/OMPS) (O_3D).

Liczba sondáže	O_3D/O_3S Współczynnik korekcji	Średni współczynnik	Uwagi
42	$0,85 \div 1,00$	0,95	$O_3D \leq O_3S$
7	$1,01 \div 1,15$	1,04	$O_3D > O_3S$
Razem 49	$0,85 \div 1,15$	0,96	
1	-	-	$O_3D/O_3S > 1,15$
2	-	-	nieudany sondaż

Z wykonanych w roku 2019 sondáže, dwa z nich były nieudane: 12 czerwca z powodu przedwczesnego pęknięcia balonu; 3 lipca z powodu prawdopodobnego zanieczyszczenia czujnika: zmierzono bardzo niskie koncentracje ozonu w całym sondażu.

Całkowita zawartość ozonu w profilu (O_3S) była porównywana z pomiarem całkowitej zawartości ozonu w atmosferze O_3D (pomiar naziemny lub satelitarny) i obliczano najlepsze dopasowanie współczynnika korekcji. Wyniki porównania wskazują na bardzo dobrą zgodność obu systemów pomiarowych. W 49 przypadkach współczynnik korekcji mieści się w granicach $0,85 \div 1,15$, średni współczynnik wynosi 0,96.

Po każdym sondażu ozonu opracowane wyniki przekazywano pocztą elektroniczną do Departamentu Monitoringu Środowiska GIOŚ oraz przez Internet do bazy danych ozonowych w Norweskim Instytucie Ochrony Powietrza w Oslo (NILU). Dane sondażu ozonowych, po ich zweryfikowaniu pomiarem całkowitego ozonu spektrofotometrem Dobsona w Belsku, były przekazywane przez Internet do bazy Globalnej Sieci Detekcji Zmian Składu Atmosfery (NDACC) w USA oraz Światowej Bazy Danych Ozonu i UV (WOUDC) w Toronto w Kanadzie. Wykaz sondażu ozonowych przedstawia Tabela 3.

Tabela 3. Wykaz sondażu wykonanych w Legionowie od 01.01.2019 r. do 31.12.2019 r.

L.P.	Data	H [km]	1 O ₃ [D]	2 O ₃ [D]	1+2 O ₃ [D]	3 O ₃ [D]	CF	Uwagi
01	2019-01-02	34,6	335,1	15,4	350,5	316,0	0,90	
02	2019-01-09	32,6	302,3	17,8	320,1	318,0	0,99	
03	2019-01-16	34,8	302,8	18,8	321,6	313,9	0,98	
04	2019-01-23	34,6	374,7	22,8	397,6	396,2	1,00	
05	2019-01-30	34,9	357,6	20,2	377,8	350,4	0,93	
06	2019-02-07	34,2	294,7	23,5	318,2	289,0	0,91	
07	2019-02-13	34,9	339,3	20,9	360,2	359,6	1,00	
08	2019-02-20	33,7	378,5	27,5	405,9	394,0	0,97	
09	2019-02-27	34,5	266,7	18,9	285,6	288,0	1,01	
10	2019-03-07	31,7	295,2	28,1	323,4	359,0	1,11	
11	2019-03-13	34,7	389,1	29,7	418,8	410,0	0,98	
12	2019-03-20	34,8	284,9	22,0	306,9	315,0	1,03	
13	2019-03-27	34,2	319,1	20,7	339,8	344,4	1,01	
14	2019-04-03	34,4	291,4	28,8	320,2	319,5	1,00	
15	2019-04-10	35,0	386,3	25,9	412,2	395,0	0,96	
16	2019-04-17	34,1	349,2	28,6	377,8	363,0	0,96	
17	2019-04-24	34,6	313,8	34,4	348,2	348,2	1,00	
18	2019-05-01	32,4	386,4	43,8	430,2	412,0	0,96	
19	2019-05-08	34,1	354,4	34,3	388,7	406,5	1,05	
20	2019-05-15	35,9	340,5	27,1	367,7	366,1	1,00	
21	2019-05-29	33,7	253,0	35,8	288,8	351,0	-	CF>1,15
22	2019-06-05	33,7	313,5	43,6	357,2	337,0	0,94	
23	2019-06-12	22,5	174,2	-	-	308,0	-	Niski pułap
24	2019-06-19	36,0	263,8	29,3	293,1	300,6	1,03	
25	2019-06-26	34,8	308,0	38,1	346,1	329,0	0,95	
26	2019-07-03	35,4	11,2	-	-	331,0	-	Błędny pomiar
27	2019-07-04	34,7	359,6	41,7	401,3	353,0	0,88	
28	2019-07-10	34,7	376,4	43,7	420,1	368,0	0,88	
29	2019-07-17	34,5	365,9	41,7	407,6	360,0	0,88	
30	2019-07-24	33,9	277,0	44,1	321,1	310,0	0,97	
31	2019-07-31	33,6	256,4	42,5	299,0	303,0	1,01	
32	2019-08-07	35,5	300,7	30,7	331,4	331,0	1,00	
33	2019-08-14	35,7	310,1	33,7	343,8	321,0	0,93	
34	2019-08-21	33,5	250,7	43,0	293,7	293,0	1,00	
35	2019-08-28	34,0	295,5	41,1	336,6	301,0	0,89	
36	2019-09-04	34,8	254,6	35,0	289,6	271,2	0,94	
37	2019-09-12	34,5	262,0	34,4	296,4	297,0	1,00	
38	2019-09-18	32,9	311,5	41,1	352,6	343,0	0,97	
39	2019-09-25	33,9	270,3	34,3	304,6	289,0	0,95	
40	2019-10-02	34,1	246,6	31,7	278,3	272,0	0,98	
41	2019-10-09	34,1	266,1	33,2	299,3	268,0	0,90	
42	2019-10-16	32,8	249,7	37,5	287,2	269,0	0,94	
43	2019-10-23	33,3	239,5	30,0	269,4	265,0	0,98	
44	2019-10-30	32,7	262,2	29,6	291,8	276,0	0,95	
45	2019-11-06	32,9	292,9	27,1	320,1	289,0	0,90	

46	2019-11-13	34,2	270,8	22,4	293,2	271,0	0,92	
47	2019-11-20	33,9	266,2	21,9	288,1	274,0	0,95	
48	2019-11-27	32,7	244,5	17,7	262,2	244,0	0,93	
49	2019-12-04	34,2	227,6	18,1	245,7	227,0	0,92	
50	2019-12-11	34,7	304,1	21,0	325,1	293,0	0,90	
51	2019-12-18	34,5	306,4	24,9	331,3	307,0	0,93	
52	2019-12-24	32,5	354,0	34,5	388,6	356,9	0,92	

- H - Pułap sondażu.
1 O₃S - Zawartość ozonu w jednostkach Dobsona [D], scałkowana do maksymalnej wysokości 35km.
2 O₃S - Zawartość ozonu obliczona z średniej wartości stosunku zmieszania w warstwie od 16hPa do pułapu danych O₃.
1+2 - O₃S - Całkowita zawartość ozonu w sondażu (CZO₃).
3 - O₃D - CZO₃ zmierzona spektrofotometrem naziemnym Dobsona w Belsku lub spektrofotometrem OMI

*Opracowane graficznie profile ozonu są zawarte w **Załączniku 1**.*

1.2 Pomiary promieniowania UV-B

Na stacjach IMGW-PIB w Łebie, Legionowie i Zakopanem, pomiary promieniowania nadfioletowego były wykonywane przyrządem typu Robertson-Berger, model UV Biometer SL501, który mierzy rumieniowo czynne promieniowanie UV-B w zakresie 280-320nm. Dane były na bieżąco przekazywane i archiwizowane na dysku twardym serwera w Warszawie, a następnie opracowywane. W roku 2019 pomiary były wykonywane bezawaryjnie. Uzyskane w roku 2019 dane zostały przekazane do GIOŚ na płycie CD.

Program pomiarowy został zrealizowany w 100%.

*Wyniki pomiarów promieniowania UV-B uzyskane z czujników SL501 z Łeby, Legionowa i Zakopanego znajdują się w **Załączniku 2**.*

1.3 Ozon całkowity z danych satelitarnych

Satelitarny monitoring całkowitej zawartości ozonu w 2019 roku, podobnie jak w latach ubiegłych, był prowadzony z wykorzystaniem danych satelitarnych z czujnika Ozone Mapping and Profiler Suite (OMPS) znajdującego się na pokładzie satelitów meteorologicznych Suomi NPP (S-NPP) oraz NOAA-20. Całkowita zawartość ozonu wyznaczana była za pomocą oprogramowania OMPSNADIR_SPA V.1.0.1 przygotowanego przez NASA, Direct Readout Laboratory, GODDARD SPACE FLIGHT CENTER, (<https://directreadout.sci.gsfc.nasa.gov>) i wdrożonego do pracy operacyjnej w Zakładzie Teledetekcji Satelitarnej IMGW-PIB.

Pola całkowitej zawartości ozonu wygenerowane z danych OMPS/SNPP były następnie przekształcane do regularnej siatki współrzędnych. Wybrano siatkę współrzędnych geograficznych w zakresie 40°-64° szerokości geograficznej północnej i 10°-28° długości geograficznej wschodniej z krokiem 0,25°. Interpolację przestrzenną wykonano metodą Natural Neighbour.

W 2019 roku nie było większych problemów z odbiorem danych satelitarnych i mapy rozkładu całkowitej zawartości ozonu nad Europą Środkową nie były generowane jedynie w ciągu 6 dni, co stanowi 1,6% badanego okresu.

Otrzymane w 2019 r. mapy zostały przekazane do GIOŚ na płycie CD.

Tabela 4. Wykaz map ozonu całkowitego opracowanych w Zakładzie Teledetekcji Satelitarnej IMGW-PIB na podstawie danych z czujnika Ozone Mapping and Profiler Suite (OMPS) w 2019 r.

Dzień	Miesiące											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
01	x	x	x	x	x o	x	x	x	x	x	x	x
02	x o	x	x	x	x	x	x	x	x	x o	x	x
03	x	x	x	x o	x	x	x o	x	x	x	x	x
04	x	x	x	x	x	x	x o	x	x o	x	x	x o
05	x	x	x	x	x	x o	x	x	x	x	x	x
06	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x o	x
07	x	x o	x o	x	x	x	x	x o	x	x	x	x
08	x	x	x	x	x o	x	x	x	x	x o	x	x
09	x o	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
10	x	x	x	x o	x	x	x o	x	x	x	x	x
11	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x o
12	x	x	x	x	x	x o	x	x	x o	x	x	x
13	x	x o	x o	x	x	x	x	x	x	x	x o	x
14	x	x	x	x	x	x	x	x o	x	x	x	x
15	x	x	x	x	x o	x	x	x	x	x	x	x
16	x o	x	x	x	x	x	x	x	x	x o	x	x
17	x	x	x	x o	x	x	x	x	x	x	x	x
18	x	x	x	x	x	x	x o	x	x o	x	x	x o
19	x	x	x	x	x	x o	x	x	x	x	x	x
20	x	x o	x o	x	x	x	x	x	x	-	x o	x
21	x	x	x	x	x	x	x	x o	x	x	x	x
22	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
23	x o	x	x	x	x	x	x	x	x	x o	x	x
24	x	x	x	x o	x	x	x o	x	x	x	x	x o
25	x	x	x	x	x	x	x	x	x o	x	x	x
26	x	x	x	x	x	x o	x	x	x	x	x	x
27	x	x o	x o	x	x	x	-	x	x	x	x o	x
28	x	x	x	x	x	x	-	x o	-	x	x	x
29	x	■	x	x	x o	x	x	x	-	x	x	x
30	x o	■	x	x	x	x	x	x	x	x o	x	x
31	x	■	x	■	x	■	x o	x	■	-	■	x

Literą "x" zaznaczone są dni z mapami ozonu całkowitego
 Literą "o" zaznaczone są dni, w których był wykonywany sondaż ozonowy

Program pomiarowy zrealizowano w 98,4%

Satelitarne mapy ozonowe z dni sondażowych są zawarte w **Załączniku 1.**

2 RAPORT ZA ROK 2019

2.1 Wstęp

Ozon powstaje w atmosferze w wyniku interakcji intensywnego promieniowania UV z tlenem cząsteczkowym (O_2), którym oddychamy (Chapman, 1930). Po jego dysocjacji, atomy mogą się łączyć tworząc O_2 , ale tlen atomowy może się połączyć z O_2 aby utworzyć ozon (O_3). Warunkiem powstania ozonu jest obecność trzeciej dowolnej cząsteczki, która przejmie nadmiar energii. Ozon jest niszczoney gdy reaguje z cząsteczkami zawierającymi atomy azotu, wodoru, chloru i bromu. Koncentracja ozonu w atmosferze jest wynikiem bilansu pomiędzy promieniowaniem słonecznym, które tworzy ozon i reakcji chemicznych, które go niszczą. Średnio, w atmosferze przypadają trzy cząsteczki ozonu na milion cząsteczek powietrza, a maksymalne nasycenie atmosfery ozonem występuje latem na wysokości ~35km i wynosi ~10 cząsteczek O_3 na milion cząsteczek powietrza. Główne źródło ozonu znajduje się w strefie międzyzwrotnikowej na wysokościach powyżej 25km. Stamtąd ozon jest przenoszony w stronę biegunów. W rezultacie powstaje warstwa ozonowa, która rozprzestrzenia się nad całym globem.

Ozon pochłania promieniowanie UV, co powoduje wzrost temperatury powietrza i powstanie stratosfery na wysokościach od 6-18km do ~50km. 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), w efekcie do powierzchni Ziemi dociera tylko kilka procent biologicznie czynnego promieniowania UV. Cieńsza warstwa ozonowa zwiększa ilość słonecznego promieniowania UV-B. Wiadomo, że 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). Warstwa ozonowa umożliwia życie na powierzchni naszej planety od około 600 milionów lat. Tlen potrzebny do wytworzenia cząsteczek ozonu zaczął się gromadzić w pierwotnej atmosferze przed 2 miliardami lat, w wyniku procesu fotosyntezy w jednokomórkowych organizmach (sinice).

Dolna granica stratosfery (tropopauza) ogranicza zasięg konwekcji, co stabilizuje klimat na powierzchni Ziemi. Głównym źródłem ozonu w troposferze jest ozon transportowany ze stratosfery. Wtargnięcia stratosferyczne są częstsze późną wiosną, gdy strumień polarnej masy powietrza wije się w kierunku zachodnich Stanów Zjednoczonych, po zimach w których występowało zjawisko La Niña. Głębokie wtargnięcia stratosferyczne mogą podnieść poziom ozonu nawet przy powierzchni Ziemi (Lin i in., 2015). W Europie, widocznym przykładem jest podwojenie stratosferycznej składowej ozonu na szczycie Zugspitze (2962m n.p.m., Garmisch-Partenkirchen, Niemcy) od połowy lat siedemdziesiątych do 2005 r., w przybliżeniu od 11 do 23ppb. (Trickl i in., 2020). Rutynowe pomiary ozonu i pary wodnej prowadzone w Garmisch-Partenkirchen od 2007 roku, w połączeniu z danymi radiosondażowymi i charakterystykami cząstek na trajektoriach pozwoliły odkryć, że warstwy stratosferycznych intruzji w troposferze są obecne aż w 84 procentach dni pomiarowych. Źródłem niewielkich ilości ozonu w troposferze są wyładowania atmosferyczne.

Ozon troposferyczny jest silnym gazem cieplarnianym, który jak się uważa, odpowiada za 1/3 efektu cieplarnianego (<http://www.ghgonline.org/otherstropozone.htm>). Rosnące spalanie biomasy w tropikach i konsumpcja paliw kopalnych w umiarkowanych szerokościach geograficznych znacznie zmodyfikowała globalny budżet ozonu w troposferze od czasu ery przed przemysłowej (umownie od roku 1850), co wpływa na radiacyjne wymuszenie klimatu. Z powodu ograniczonej liczby stacji sondażu ozonowych, które działają stale przez długi okres czasu, trendy ozonu troposferycznego są źle udokumentowane, szczególnie w tropikach i na półkuli południowej. Ograniczone dane sugerują jednak podwojenie ilości ozonu przy powierzchni nad kontynentem europejskim. W oparciu o sugerowane scenariusze wzrostu populacji i konsumpcji energii, obliczenia modelowe sugerują, że przyszłe zmiany będą największe w tropikach, szczególnie w Azji. Istnieje jednak duża niepewność, szczególnie jeśli chodzi o rolę spalania biomasy, ponieważ czułość klimatu na zmiany ozonu jest największa w tych rejonach. Stężenie ozonu trudno jest śledzić, z powodu jego krótkiego czasu życia i faktu, że może się ono zmieniać od miejsca do miejsca. Podczas epizodów foto-smogu stężenia ozonu mogą rosnać powyżej 100ppb. Wtedy prekursorzy ozonu (tlenki azotu i lotne węglowodory) są wykrywane w unoszonym powietrzu w odległości wielu kilometrów od centrów dużych miast.

Od kilkadziesiąt lat stratosferyczna warstwa ozonowa jest zaburzona. Ozon znajduje się w stanie bardzo delikatnej równowagi, a jego zawartość w atmosferze kontrolowana jest przez substancje 1000 razy mniej liczne. W 1974 roku odkryto, że emitowane przez człowieka związki chloru (CFC) po kilku latach przedostają się do wyższej stratosfery i tam rozpadają się powoli pod wpływem intensywnego promieniowania słonecznego. Uwolniony chlor powoduje katalityczny rozpad ozonu. Od początku lat 1980 problem ubożenia warstwy ozonowej stał się problemem globalnym. Na półkuli południowej w rejonie Antarktydy odkryto nieoczekiwanie w 1985 roku zjawisko sezonowego spadku ozonu w atmosferze ponad 50 procent w stosunku do norm wieloletnich („dziura ozonowa”). Dziurę ozonową definiuje się jako obszar z zawartością ozonu w kolumnie poniżej 220D ($1D = 2,69 \times 10^{20} \text{ O}_3/\text{m}^2$), to jest poniżej wcześniej obserwowanych danych historycznych. Dziura ozonowa pojawia się wiosną każdego roku na rozległym obszarze, nawet do 30 milionów km^2 . W obawie o dalszy los warstwy ozonowej podpisano w 1987 roku Protokół Montrealski (PM). Ponieważ szkodliwe działanie CFC na warstwę ozonową było dobrze udokumentowane, ich wytwarzanie zostało zakazane. Okazuje się jednak, że po roku 2012 nastąpił wzrost emisji CFC-11 ze wschodnich Chin kontynentalnych, jako wynik nowej produkcji i zastosowania, co jest niezgodne z porozumieniem PM dotyczącym stopniowego wycofywania światowej produkcji CFC do 2010 r. Przy ścisłym przestrzeganiu PM powrót warstwy ozonowej do stanu niezaburzonego potrwa kilkadziesiąt lat, z powodu długiego okresu półtrwania kluczowych substancji CFC.

Warstwa ozonowa przestała się zmniejszać w skali całego globu, ale nie zaobserwowano wyraźnego wzrostu pomiędzy 60° S i 60° N , to jest poza obszarami polarnymi ($60\text{--}90^\circ$). Połączone obserwacje z wielu satelitów wskazywały, że zawartość ozonu w dolnej stratosferze pomiędzy 60° S i 60° N w rzeczywistości zmniejsza się od 1998 roku, a całkowita zawartość ozonu w tym obszarze nie zmniejsza się tylko dlatego, że zwiększa się ilość ozonu w troposferze, który kompensuje spadek ozonu w stratosferze (Ball i in., 2018). Powody spadku ozonu w dolnej stratosferze nie są jasne, modele nie odtwarzają obserwowanych trendów. W styczniu 2020 roku doniesiono o pomiarach z

których wynika, że bardzo niewielkie ilości jodu w stratosferze mogą wyjaśniać dlaczego warstwa ozonowa nie regeneruje się tak szybko jak się oczekuje (<https://phys.org/news/2020-01-iodine-ozone-layer-recovery.html>). Przedstawiono hipotezę, że ozon na powierzchni Ziemi niszczy ozon w stratosferze. Ozon oddziałujący chemicznie z powierzchnią oceanów, może „wciągnąć” naturalnie występujący jod do atmosfery. Część tego jodu przenika do stratosfery, gdzie może wywoływać zubożenie 1,5-2 procent warstwy ozonowej. Nie umniejsza to sukcesu Protokołu Montrealskiego, ale jest ważne, gdyż zubożona warstwa ozonowa zwiększa ilość promieniowania UV-B dochodzącego do powierzchni Ziemi. Jeśli na przykład zanieczyszczenie ozonem na powierzchni Ziemi wzrośnie, może to spowodować jeszcze większe zniszczenie warstwy ozonowej w dolnej stratosferze.

Pozytywnym sygnałem potwierdzającym regenerację warstwy ozonowej są badania Solomon i in. (2016), którzy wykazali, że dziura ozonowa nad Antarktydą istotnie się kurczy. Aktualne obliczenia całorocznego trendu ozonu na podstawie zhomogenizowanych wielu czujników na satelitach wskazują, że w okresie spadku ilości efektywnego ładunku chloru w atmosferze, zawartość ozonu w atmosferze wzrasta w tempie $\sim 2\text{-}4\%/10\text{lat}$ w skali globalnej i powyżej równoleżnika 30° (Krzyściń i Baranowski, 2019).

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. Wypełnianie tego obowiązku jest realizowane m.in. poprzez wykonywanie regularnych, radiosondażowych pomiarów pionowego profilu ozonu, analizę całkowitej zawartości ozonu nad Polską i Europą Środkową z danych satelitarnych oraz monitoring biologicznie czynnego promieniowania UV-B za pomocą sieci przyrządów pomiarowych.

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

2.2 Ocena stanu warstwy ozonowej w 2019 roku na podstawie wyników monitoringu.

W roku 2019 kontynuowano rutynowe radiosondaże ozonowe, rozpoczęte na Stacji Pomiarów Aerologicznych w Legionowie w roku 1979. Pomiary są wykonywane rutynowo raz w tygodniu, w terminie 12UTC, z użyciem elektrochemicznej sondy ozonowej. Sonda ozonowa jest połączona ze standardową sondą aerologiczną. Obie sondy są unoszone w powietrzu przez balon meteorologiczny do wysokości około 35km. Do maja 1993 stosowano sondę OSE2 typu Brewer-Mast, a od czerwca 1993 używana jest znacznie dokładniejsza sonda ECC. W okresach spodziewanych ubytków ozonu od 1995 roku są wykonywane dodatkowe sondaże w ramach kampanii Match. Ponadto, sondaże ozonowe wykorzystywane są do walidacji satelitarnych profili ozonu (Huang i in., 2018).

Sonda ECC umożliwia pomiar ciśnienia cząstkowego ozonu, to jest części całkowitego ciśnienia mieszaniny gazów atmosferycznych wynikającej z obecności ozonu. Elektrochemiczny czujnik sondy wykrywa stężenia ozonu powyżej 3ppbv, błąd pomiaru w dolnej stratosferze wynosi $\sim 5\%$, i rośnie do $\sim 10\%$ w średniej stratosferze. Dla każdego sondażu wyznaczana jest całkowita

zawartość ozonu (CZO₃), która jest sumą zawartości ozonu w profilu (ozon scałkowany) i pozostałej zawartości ozonu do granicy atmosfery. Pozostała zawartość ozonu jest obliczana na podstawie średniej wartości mieszania ozon/powietrze w warstwie od powierzchni 16hPa do pułapu danych sondażu. Dla każdego sondażu obliczany jest najlepszy współczynnik korekcji Dobsona (CF), który jest ilorazem niezależnego pomiaru CZO₃ (średnia dzienna lub wartość około-południowa ze spektrofotometru Dobsona) na stacji IGF PAN w Belsku i/lub pomiaru satelitarnego: OMPS, SBUV, OMI) do CZO₃ w sondażu. W analizach uwzględniane są sondáže z CF w zakresie od 0,85 do 1,15.

2.3 Analiza rozkładu pionowego ozonu nad Legionowem w 2019 roku.

Na podstawie homogenicznej serii pomiarów z lat 1994 - 2019 obliczono zawartości ozonu w warstwach atmosfery pomiędzy standardowymi powierzchniami izobarycznymi, od powierzchni Ziemi (~1000hPa) do 10hPa (~31km) i od 10hPa do granicy atmosfery. Powierzchnia izobaryczna jest definiowana jako powierzchnia, na której wartość ciśnienia jest jednakowa we wszystkich jej punktach. W meteorologii ciśnienie atmosferyczne podaje się w hektopaskalach (hPa), przy czym 1hPa = 100Pa. Paskal (Pa) jest to ciśnienie występujące na powierzchni płaskiej 1m², na którą działa prostopadle siła 1N (niutona). Zawartość ozonu wyrażona jest w jednostkach Dobsona (1D = 2,69x10²⁰ molekuł O₃/m²). W Tabeli 5 przedstawiono zawartości ozonu w miesiącach 2019 roku i w wieloleciu 1994-2018, a także standaryzowane odchylenia średnich miesięcznych roku względem średniego rozkładu z wielolecia. Standaryzowane odchylenie pozwala w łatwy sposób wykryć anomalne zawartości ozonu w atmosferze – wskazują na to wartości odchylenia przekraczające +2 lub -2.

W średnim rozkładzie pionowym ozonu w warstwie 300/150hPa (~9-13,5km) następuje przejście od małych stężeń w troposferze do dużych w stratosferze. W dolnej stratosferze koncentracja rośnie z wysokością do maksimum w warstwie 50/30hPa (~21-24km), ale najwyższe stężenia są osiągnięte w średniej stratosferze w okresie letnim. Ozon ze źródła nad równikiem jest transportowany w stronę bieguna, kumuluje się w dolnej stratosferze w wysokich i umiarkowanych szerokościach geograficznych, osiąga maksymalną zawartość na przełomie zimy i wiosny. Ozon ze stratosfery przenika do troposfery a dodatkowe fotochemiczne źródło ozonu znajduje się w granicznej warstwie atmosfery.

W średnich miesięcznych zawartościach ozonu nad Legionowem w 2019 roku odnotowano istotne odchylenia od uśrednionego przebiegu wieloletniego. Największe spadki w warstwie maksymalnej koncentracji wystąpiły dużo później niż zwykle - dopiero w czerwcu, a nie jak zwykle na wiosnę. Na niższych wysokościach w stratosferze obserwowano wartości ozonu poniżej średnich wieloletnich w większości miesięcy za wyjątkiem maja, lipca i września. Mimo tego średnia roczna zawartość ozonu w stratosferze w 2019 roku pozostawała w granicach naturalnej wieloletniej zmienności ozonu.

Tabela 6. Zawartość ozonu w warstwach atmosfery nad Legionowem w 2019 r.

WYSZCZEGÓLNIENIE		Warstwy atmosfery między standardowymi powierzchniami izobarycznymi (hPa)											
		<u>~1000</u> 700	<u>700</u> 500	<u>500</u> 300	<u>300</u> 200	<u>200</u> 150	<u>150</u> 100	<u>100</u> 70	<u>70</u> 50	<u>50</u> 30	<u>30</u> 20	<u>20</u> 10	<u>10</u> 00
Styczeń.....	a	7,8	7,5	9,1	13,5	18,0	27,7	41,3	41,5	67,4	42,3	39,2	39,9
	b	8,0	7,5	8,8	11,2	15,4	28,6	33,6	39,2	61,5	39,3	41,5	41,7
	c	-0,3	-0,0	0,3	0,6	0,8	-0,1	1,3	0,6	1,5	1,2	-0,6	-0,7
Luty.....	a	11,0	8,3	8,7	8,9	14,9	27,2	39,9	40,3	56,3	40,9	41,0	45,0
	b	9,1	8,0	9,6	14,2	19,2	32,1	37,5	42,6	63,4	40,1	43,7	45,9
	c	1,7	0,5	-0,6	-1,2	-1,0	-0,6	0,3	-0,4	-1,3	0,3	-0,7	-0,4
Marzec.....	a	8,8	7,7	8,0	8,5	19,1	33,0	39,1	43,0	57,2	37,5	42,7	47,6
	b	11,1	8,8	11,4	18,6	23,0	35,2	38,1	42,1	62,1	38,9	44,2	48,7
	c	-2,1	-2,0	-1,5	-1,4	-0,9	-0,3	0,1	0,2	-1,1	-0,5	-0,5	-0,5
Kwiecień.....	a	13,5	9,8	10,5	13,3	26,7	31,5	33,3	31,8	58,4	36,9	44,5	51,8
	b	12,6	10,0	13,5	19,9	22,5	31,9	34,5	39,5	59,8	38,2	46,5	51,3
	c	0,8	-0,3	-1,1	-1,1	0,9	-0,1	-0,2	-1,7	-0,3	-0,5	-0,5	0,2
Maj.....	a	11,9	10,2	12,1	25,1	28,3	34,6	36,9	41,4	59,0	35,3	47,3	52,1
	b	13,7	10,7	12,3	16,2	20,3	27,8	29,4	35,3	55,2	37,7	49,1	52,6
	c	-1,6	-0,6	-0,1	1,5	2,2	1,4	2,0	2,6	1,2	-1,1	-0,8	-0,2
Czerwiec.....	a	15,6	11,3	13,7	10,6	13,0	23,3	19,7	28,2	50,5	36,8	50,0	53,7
	b	13,2	10,7	12,7	13,0	17,0	24,1	25,6	31,6	52,9	39,2	51,8	52,8
	c	1,6	0,4	0,6	-0,5	-1,1	-0,2	-1,9	-1,8	-1,2	-0,8	-1,0	0,5
Lipiec.....	a	9,2	10,0	14,5	21,7	19,0	22,7	25,6	33,9	55,7	39,9	50,8	55,6
	b	12,9	10,7	13,0	14,6	14,8	21,0	23,1	29,6	51,1	38,7	51,7	52,3
	c	-2,5	-0,9	1,1	1,2	1,5	0,7	1,3	2,3	1,7	0,8	-0,5	1,9
Sierpień.....	a	13,3	9,6	12,4	7,4	12,8	19,6	24,6	30,9	49,3	38,0	47,9	53,5
	b	12,4	10,2	12,5	11,1	11,6	18,9	23,5	28,9	47,7	37,3	49,9	51,5
	c	0,5	-0,6	-0,1	-1,1	0,5	0,2	0,4	1,1	0,4	0,3	-1,3	1,2
Wrzesień.....	a	10,9	8,6	10,1	12,9	11,4	17,8	26,4	31,7	47,2	32,1	44,6	51,7
	b	11,2	9,4	10,6	8,9	8,9	17,6	24,1	29,6	47,8	34,8	45,3	48,7
	c	-0,2	-0,8	-0,5	1,9	1,1	0,1	0,6	1,0	-0,2	-0,8	-0,2	1,4
Październik.....	a	9,9	9,2	10,5	6,1	6,3	14,8	20,2	28,8	49,1	35,4	42,7	48,3
	b	9,6	8,4	9,9	9,3	9,1	16,9	23,6	29,1	47,6	34,8	42,2	45,7
	c	0,3	1,3	0,4	-0,9	-1,4	-0,6	-1,1	-0,1	0,6	0,3	0,2	1,8
Listopad.....	a	8,5	8,5	10,1	8,1	10,0	20,6	28,3	33,6	49,4	35,7	35,7	41,5
	b	8,2	7,8	9,0	8,9	9,8	19,5	26,3	30,6	50,4	36,3	39,4	41,6
	c	0,3	1,2	0,9	-0,3	0,1	0,2	0,4	1,1	-0,3	-0,2	-0,9	-0,1
Grudzień.....	a	9,2	8,0	7,9	4,6	6,0	21,1	26,6	29,4	58,6	40,4	40,4	43,0
	b	7,9	7,6	9,0	9,4	11,2	22,9	29,1	33,9	54,6	38,2	39,2	39,5
	c	1,4	1,1	-0,9	-1,6	-2,0	-0,4	-0,6	-1,3	1,0	0,8	0,3	2,0

a – średnie miesięczne (D) w 2019 roku.

b – średnie miesięczne wieloletnie (D) z lat 1994-2018.

c – standaryzowane odchylenie: $(a-b)/\sigma$, gdzie σ jest odchyleniem standardowym średnich miesięcznych z lat 1994-2018.

Epizody ubytków ozonu nad Polską i Europą w 2019 roku

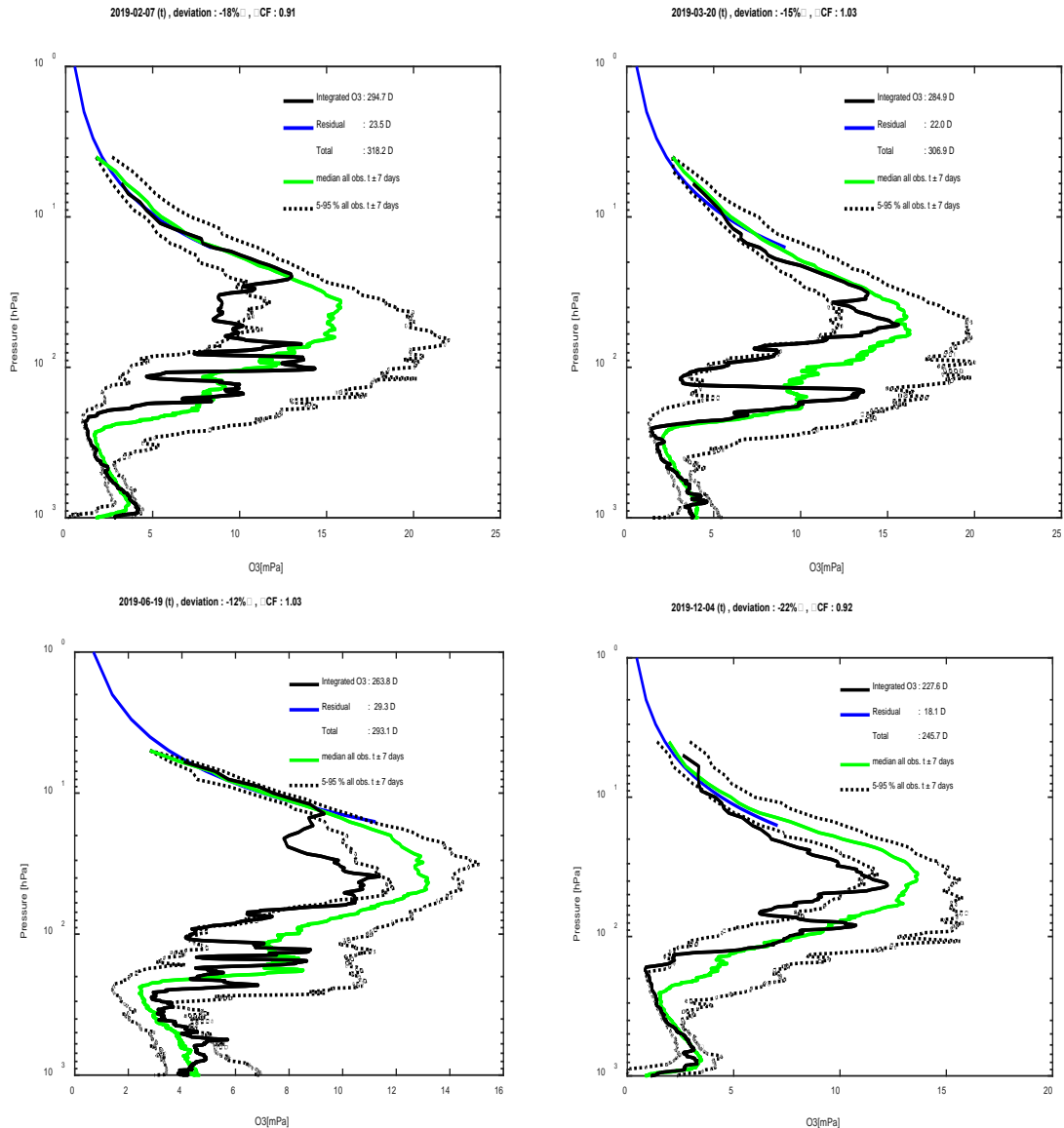
Kampanie pomiarowe Match prowadzone od 1994 roku wykazały, że proces niszczenia ozonu odbywa się w izolowanym obszarze chłodnego wiru polarnego, po aktywacji chloru na powierzchniach polarnych chmur stratosferycznych (PSC), tylko w oświetlonych przez Słońce szerokościach geograficznych. Rozpad ozonu w stratosferze nad Polską jest obserwowany zimą podczas epizodów przesunięcia arktycznego wiru do umiarkowanych szerokości geograficznych, albo w fazie jego rozpadu, gdy zubożone w ozon powietrze polarne zaczyna się mieszać z otaczającym powietrzem umiarkowanych szerokości geograficznych. Amplituda ubożenia warstwy ozonowej w Arktyce jest monitorowana w każdym roku od 1994 r. Całkowita zawartość ozonu mierzona za pomocą ośmiu spektrometrów UV-VIS SAOZ/NDACC rozmieszczonych w Arktyce porównywana jest z symulacjami w trójwymiarowym modelu transportu, w których ozon jest uważany za wskaźnik pasywny. Tą metodą można określić ewolucję dziennej szybkości niszczenia ozonu i amplitudy skumulowanej straty ozonu na koniec zimy. Amplituda zniszczenia waha się od 0-10% w relatywnie ciepłych zimach i krótkim czasie trwania wiru, do 25-39% w zimniejszych i dłuższych zimach. Jednakże, jak pokazuje zniszczenie 39% ozonu w sezonie zimy-wiosny 2010/11, strata nie zależy tylko od przedłużenia wiru na wiosnę, ale także od jego siły ograniczającej re-nitryfikację poprzez import azotu z zewnątrz, który jest oceniany przez pomiar całkowitej zawartości NO_2 za pomocą instrumentów SAOZ.

W 2019 roku epizody dużych spadków ozonu w stratosferze nad Legionowem wystąpiły we wszystkich sezonach (Rys. 1). Zasięg przestrzenny anomalii ozonu nad Polską i Europą w wybranych dniach obrazują procentowe odchylenia całkowitej zawartości ozonu nad półkulą północną, obliczone na podstawie danych satelitarnych GOME-2 i obserwacji naziemnych (Rys. 2). Do analizy źródła pochodzenia niedoborów ozonu nad Polską i Europą wykorzystano model HYSPLIT. Obliczono wsteczne trajektorie cząstek powietrza, kończące się w rejonie anomalii (Rys. 3).

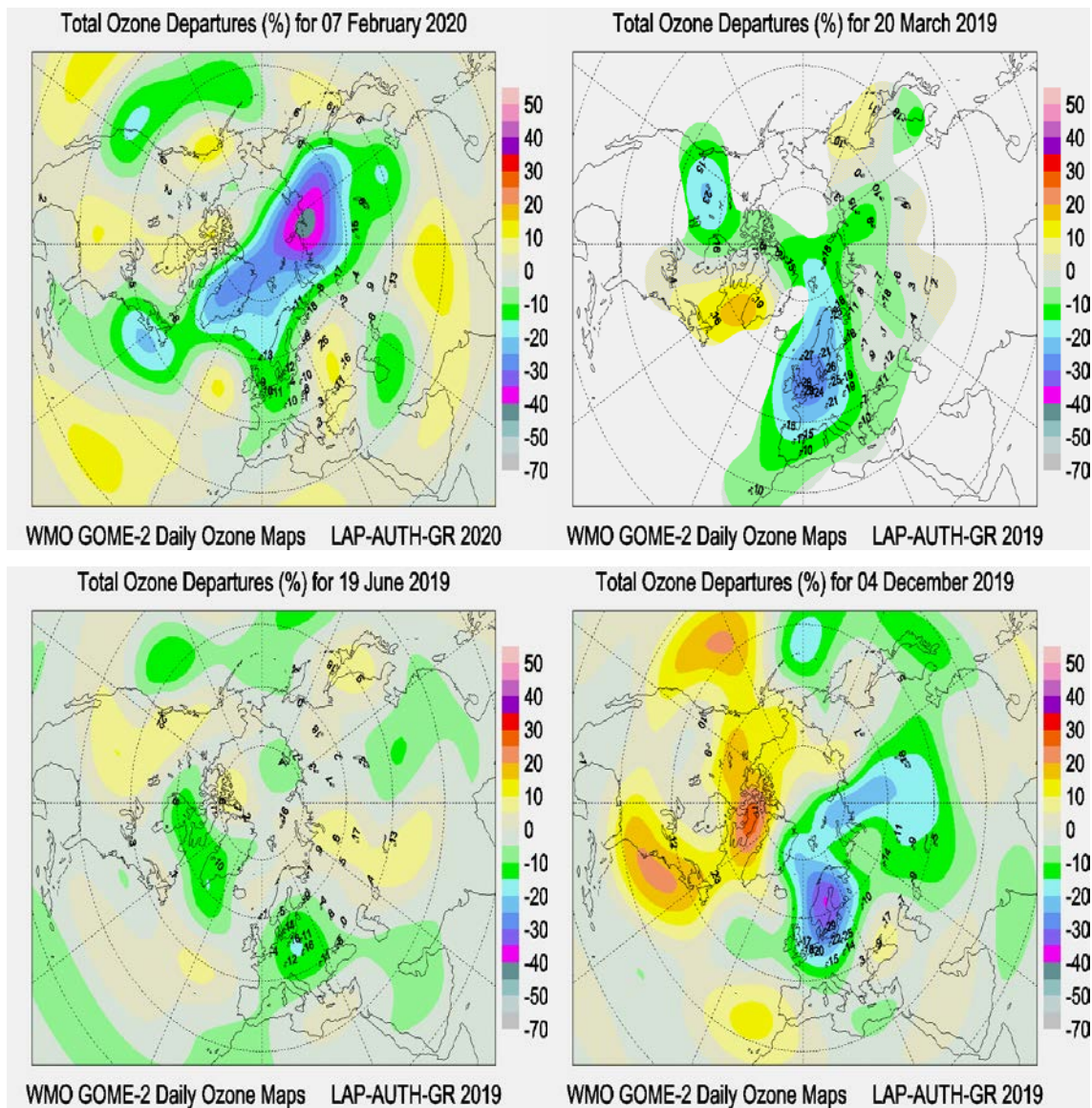
7 lutego obniżona koncentracja ozonu w warstwie maksimum (Rys. 1) była wynikiem transportu powietrza unoszonego ze zwrotnikowej części Oceanu Spokojnego (Rys. 3). Wzrost temperatury potencjalnej na trajektoriach oznacza, że miało miejsce nie-izentropowe mieszanie powietrza o naturalnie niskiej koncentracji ozonu subtropikalnego z powietrzem o wyższym stężeniu ozonu w wyższych szerokościach geograficznych.

20 marca obserwowano niedobory ozonu w średniej stratosferze, na skraju wiru polarnego przemieszczonego z Arktyki. Podczas zimy 2018/19 na półkuli północnej, poza krótkim okresem w grudniu, minimalne temperatury w stratosferze na powierzchni 50hPa utrzymywały się cały czas powyżej progu formowania PSC (Rys. 4). To wykluczyło w zasadzie możliwość niszczenia ozonu w dolnej stratosferze z udziałem związków chloru. Co zatem mogło być powodem spadku ozonu w stratosferze nad Legionowem? Odpowiedź dają badania Sagi i in. (2017). Na podstawie wieloletnich (2002-2013) obserwacji Odin/SMR wykazano, że ozon jest niszczone w średniej stratosferze, w fotochemicznym cyklu z tlenkami azotu. Głównym źródłem NO_x w stratosferze jest produkcja NO przez reakcję N_2O ze wzbudzonym atomem tlenu $\text{O}(^1\text{D})$, która pojawia się w niskich i umiarkowanych szerokościach geograficznych na wysokości około 30km (Brasseur i Solomon, 2005). Niszczenie ozonu powodowane przez NO_x może się rozpoczynać jeszcze w czasie zimy i/lub na wiosnę, kiedy słabnie wir polarny.

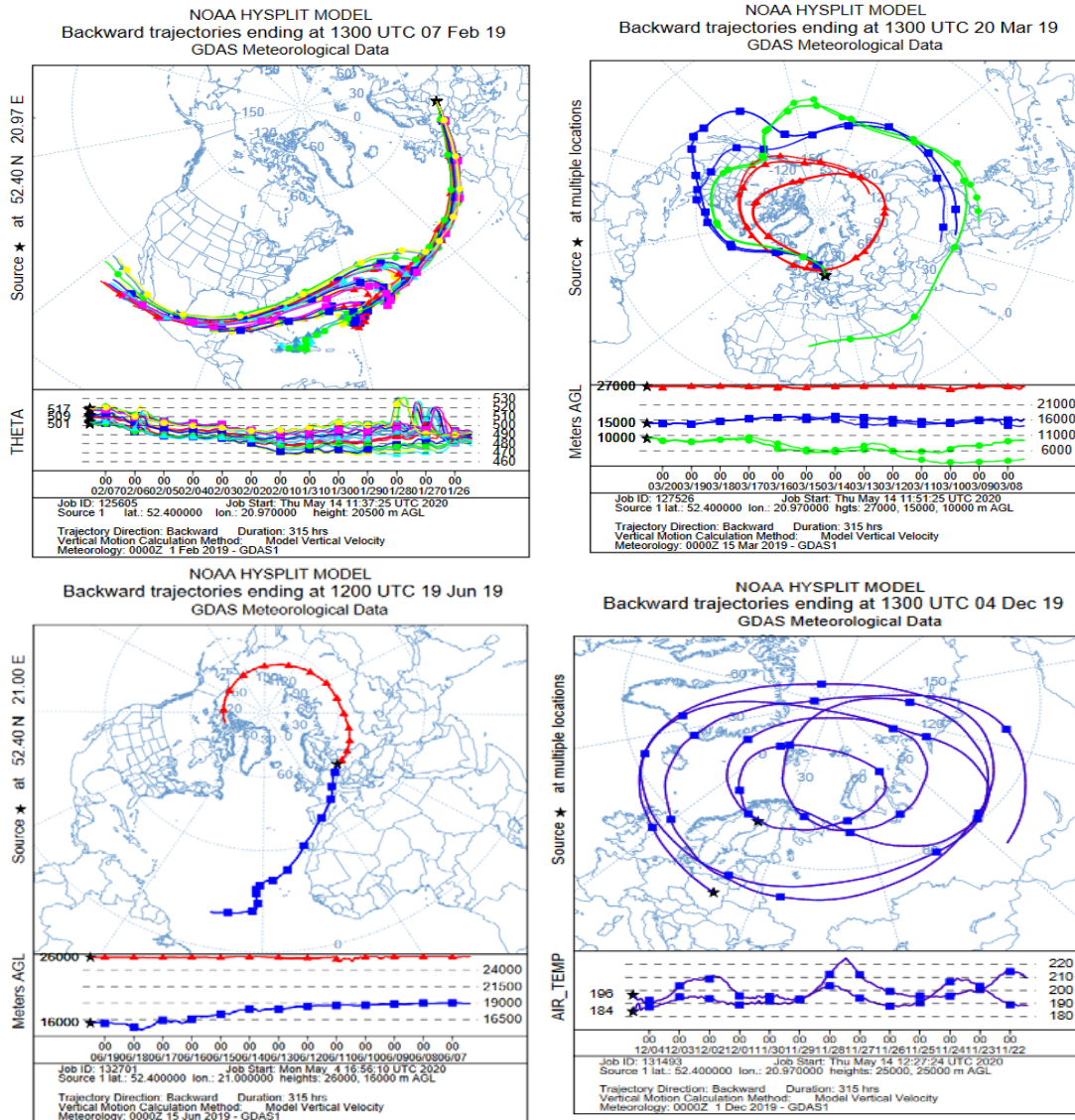
19 czerwca obserwowano obniżone koncentracje ozonu w średniej stratosferze (Rys. 1). Źródłem masy dla tego ubytku był rejon kanadyjskiej Arktyki (Rys. 3). Na niższych wysokościach w warstwie UTLS transport naturalnie niskich koncentracji ozonu w powietrzu uniesionym z dolnej atmosfery ze zwrotnikowej części Oceanu Atlantyckiego. Sumowanie ubytków ozonu na różnych wysokościach w stratosferze może stanowić zagrożenie wysokim poziomem promieniowania UV-B, tym bardziej jeśli występuje u progu lata.



Rys. 1. Sondaże w Legionowie z dużymi ubytkami ozonu w stratosferze w 2019 roku

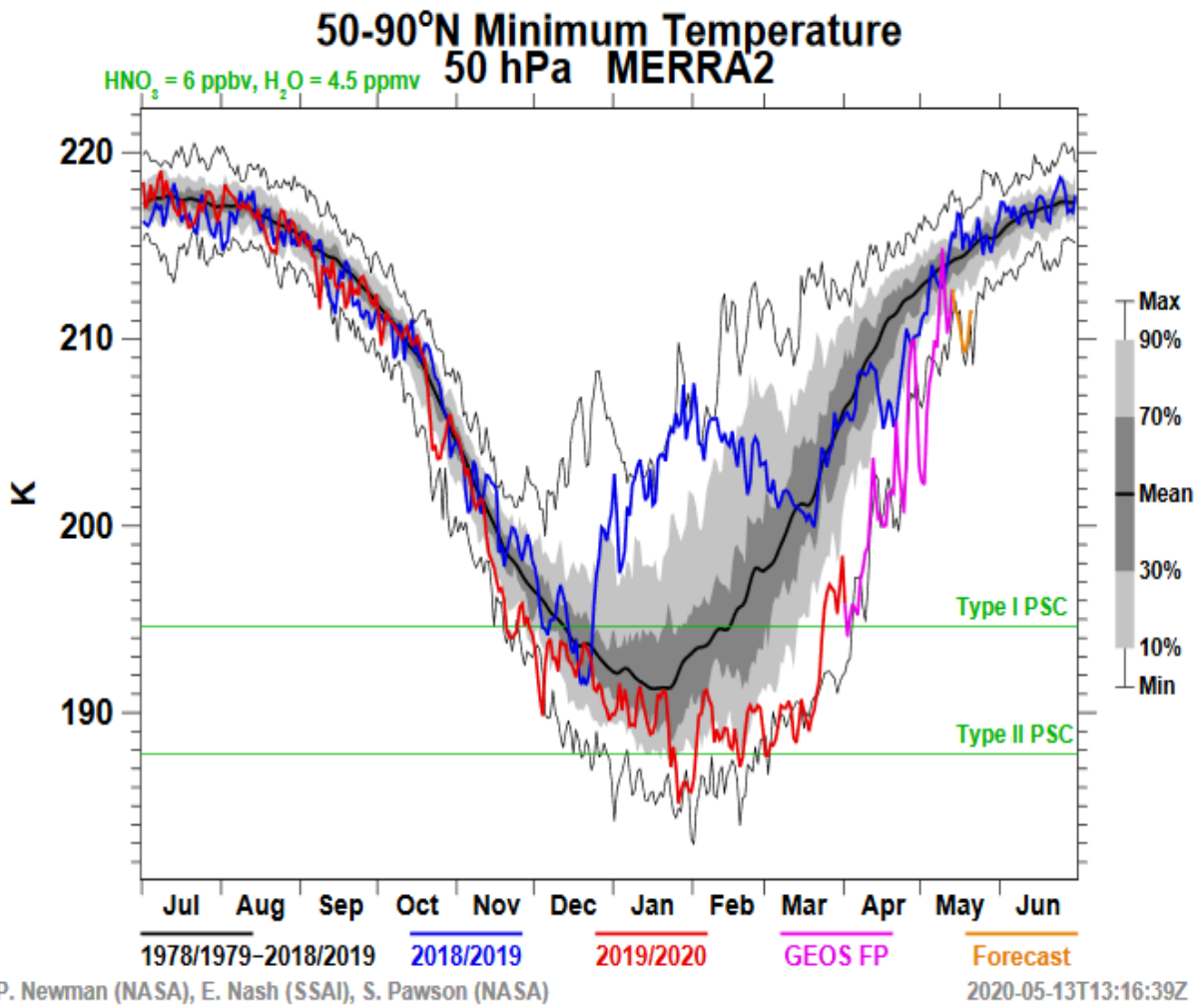


Rys. 2. Procentowe odchylenia całkowitej zawartości ozonu nad półkulą północną, od odpowiednich średnich miesięcznych wieloletnich, na podstawie danych satelitarnych GOME-2 i obserwacji naziemnych



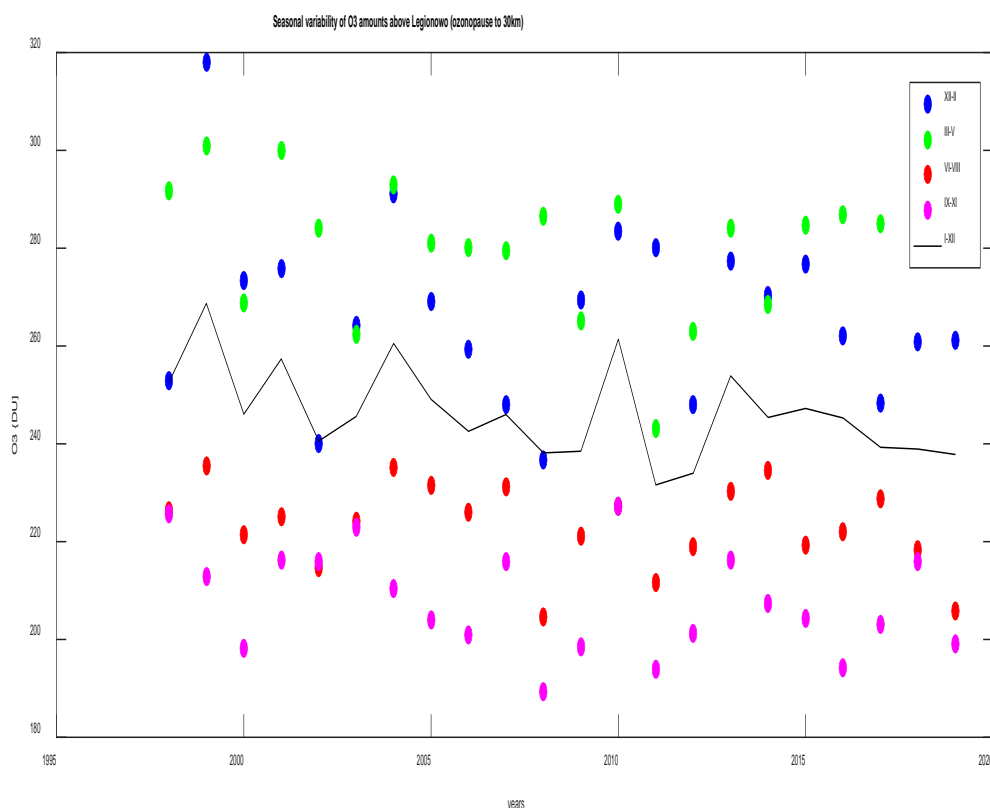
Rys. 3. Trajektorie wsteczne HYSPLIT cząstek powietrza pokazujące źródło masy dla ubytków ozonu stratosferycznego nad Polską w 2019 roku

Podczas ostatniej zimy (2019/2020) w stratosferze na półkuli północnej panowały wyjątkowe warunki meteorologiczne. Ekstremalnie niskie temperatury (Rys. 4) stwarzały dogodne warunki do fotochemicznego rozpadu ozonu na powierzchniach PSC w izolowanym obszarze wiru polarnego. Niszczenie ozonu mogło się rozpocząć jeszcze na jesieni. Np., cząstka chłodnego powietrza przemieszczająca się na trajektorii w oświetlonych rejonach pokazała ubytek ozonu nad Legionowem na wysokości 25km w dniu 4 grudnia (Rys. 3). Nad Skandynawią anomalia CZO3 była znacznie większa niż nad Polską (Rys. 2). Ponad 30% ubytek CZO3 połączony był ekstremalnie niską temperaturą (184K) na wysokości 25km (Rys. 3). Poniżej granicznej wartości 185K mogą się formować lodowe PSC (Rys. 4). Duża ilość chloru gromadząca się na powierzchniach lodowych kryształów PSC prowadzi do szybkiej destrukcji ozonu. Podczas zimy 2019/2020 w stratosferze na półkuli północnej powstały warunki meteorologiczne podobne do tych, które co roku prowadzą do powstawania wiosennej dziury ozonowej nad Antarktydą.



Rys. 4. Najniższe temperatury w stratosferze nad półkulą północną na północ od 50 równoleżnika na powierzchni 50hPa w sezonie zimowym 2018/19

Tendencje ozonu w stratosferze nad Legionowem w latach 1998-2019



Rys. 5. Sezonowa zmienność zawartości ozonu stratosferze do wysokości 30km w okresie spadku ilości substancji niszczących warstwę ozonową

Niekontrolowana przez kilkadziesiąt lat antropogeniczna emisja związków CFC (freony) i halonów doprowadziła do powstawania wiosennej dziury ozonowej nad Antarktydą, każdego roku od wczesnych lat 80 XX w., i mniejszych ubytków ozonu w niższych szerokościach geograficznych. W wyniku działań Protokołu Montrealskiego z 1987 roku i jego uzupełnień w kolejnych latach efektywne nasycenie atmosfery substancjami niszczącymi ozon w umiarkowanych szerokościach geograficznych stopniowo spada od ostatnich lat XX w. Po latach dużych spadków ozonu w Polsce i na świecie oczekiwana jest zmiana kierunku trendu CZO₃. Do analizy trendów ozonu w atmosferze wykorzystywane są zazwyczaj dane całkowitej zawartości ozonu. Ozon troposferyczny stanowiący około 10 procent całkowitej zawartości ozonu może maskować proces regeneracji warstwy ozonowej. Sondaż ozonowe dają możliwość dokładnego oszacowania zawartości ozonu w stratosferze, na wysokościach gdzie odbywa się proces fotochemicznego niszczenia ozonu.

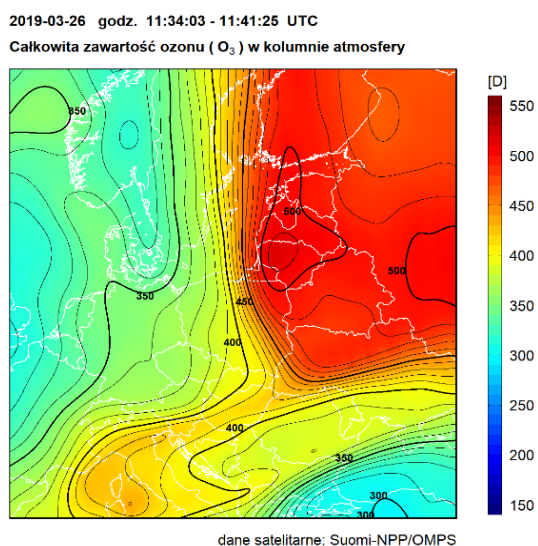
Zawartość ozonu w stratosferze obliczono wykorzystując pojęcie tropopauzy chemicznej (ozonopauzy). Ozonopauza stanowi dolną granicę bogatego w ozon powietrza stratosferycznego, ze stosunkiem mieszaniny ozon/powietrze powyżej 100ppbv. W pracy do obliczenia poziomu ozonopauzy wykorzystano definicję Bethan i in. (1996). Obliczono scałkowaną zawartość ozonu w sondażach nad Legionowem od poziomu ozonopauzy do wysokości 30km. Ograniczenie do tej wysokości jest uzasadnione, ponieważ wyżej błąd pomiaru ozonu w sondażu rośnie powyżej 10

procent. Na Rys 5. przedstawiono zmienność sezonowych zawartości ozonu w stratosferze nad Legionowem W ostatnich latach obserwuje się stabilizację poziomu zawartości ozonu w stratosferze nad Polską. Wyznaczony metodą liniowej regresji trend zawartości ozonu w stratosferze, w okresie spadku ilości substancji niszczących warstwę ozonową (1998-2019), jest nieistotny statystycznie.

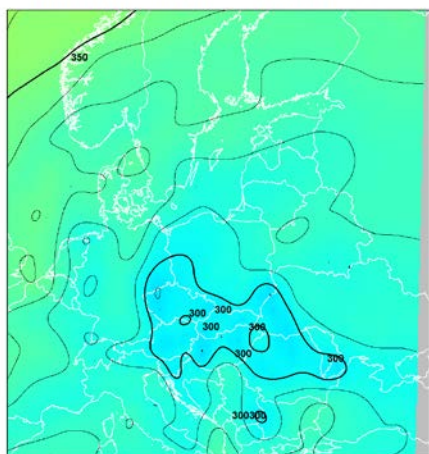
2.4 Ozon całkowity z danych satelitarnych nad Europą Środkową w 2018 roku

Satelitarny monitoring całkowitej zawartości ozonu w 2019 roku, podobnie jak w latach ubiegłych, był prowadzony z wykorzystaniem danych satelitarnych z czujnika Ozone Mapping and Profiler Suite (OMPS) znajdującego się na pokładzie satelitów meteorologicznego Suomi NPP (S-NPP) oraz NOAA-20. Całkowita zawartość ozonu wyznaczana była za pomocą oprogramowania OMPSNADIR_SPA V.1.0.1 przygotowanego przez NASA, Direct Readout Laboratory, GODDARD SPACE FLIGHT CENTER, (<https://directreadout.sci.gsfc.nasa.gov>) i wdrożonego do pracy operacyjnej w Zakładzie Teledetekcji Satelitarnej IMGW-PIB.

Pola całkowitej zawartości ozonu wygenerowane z danych OMPS/SNPP były następnie przekształcane do regularnej siatki współrzędnych. Wybrano siatkę współrzędnych geograficznych w zakresie 40°-64° szerokości geograficznej północnej i 10°-28° długości geograficznej wschodniej z krokiem 0,25°. Interpolację przestrzenną wykonano metodą Natural Neighbour. Na Rys. 6 przedstawiono przykładowe rozkłady całkowitej zawartości ozonu: z dnia 26 marca 2019 pokazujący duże zróżnicowanie pola całkowitej zawartości ozonu nad Europą Środkową związane z cyrkulacją powietrza oraz z dni 19 i 20 czerwca 2019 pokazujące ujemne anomalie całkowitej zawartości ozonu nad Polską.

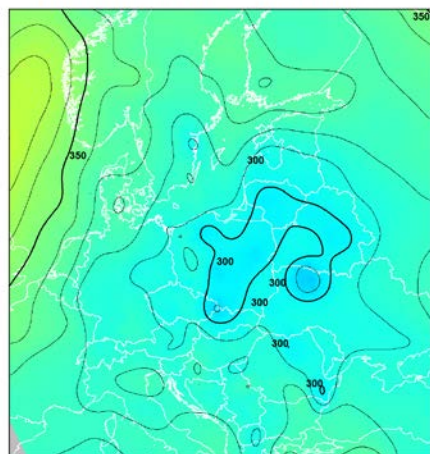


2019-06-19 godz. 11:40:47 - 11:48:09 UTC
Całkowita zawartość ozonu (O₃) w kolumnie atmosfery



dane satelitarne: Suomi-NPP/OMPS

2019-06-20 godz. 11:21:46 - 11:29:22 UTC
Całkowita zawartość ozonu (O₃) w kolumnie atmosfery

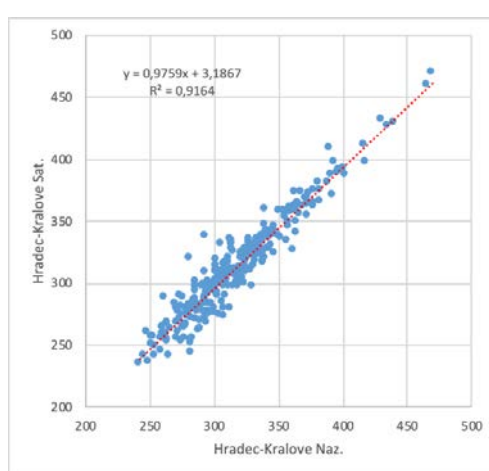
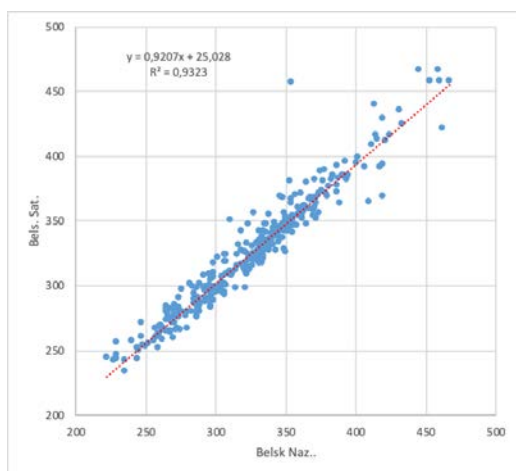


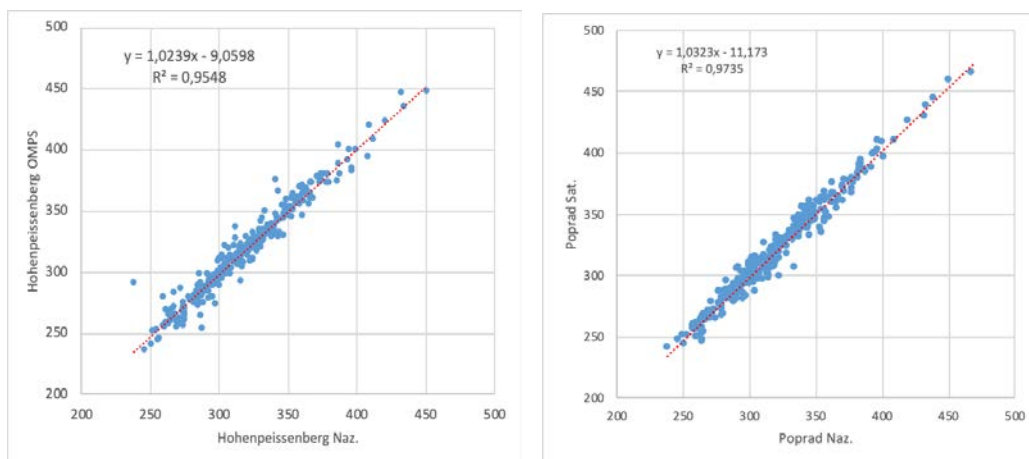
dane satelitarne: Suomi-NPP/OMPS

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

W 2019 roku nie było większych problemów z odbiorem danych satelitarnych i mapy rozkładu całkowitej zawartości ozonu nad Europą Środkową nie były generowane jedynie w ciągu 6 dni.

W ramach monitoringu prowadzono weryfikację dokładności całkowitej zawartości ozonu wyznaczonej z danych satelitarnych poprzez porównanie z pomiarami naziemnymi dla czterech stacji z obszaru Europy Środkowej, które znajdują się w obrębie każdej transmisji SNPP odbieranej w Zakładzie Teledetekcji Satelitarnej IMGW-PIB. Stacje te to: Belsk (21°E, 52°N), Hohenpeissenberg (11,0°E, 47,8°N), Hradec-Kralove (15,8°E, 50,2°N) oraz Poprad Ganovce (20,3°E, 49,0°N). Wszystkie dane naziemne wykorzystane w analizie pobrane zostały ze Światowego Centrum Danych Ozonowych i UV znajdującego się w Toronto (Kanada) (www.woudc.org). Na Rys. 7 przedstawiono wykresy prezentujące wyniki porównania dla wymienionych wyżej stacji w roku 2019.

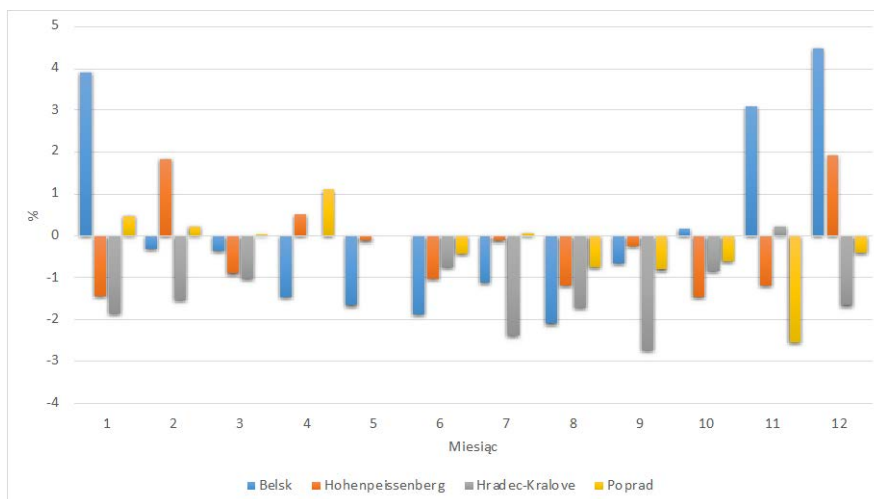




Rys. 7. Porównanie całkowitej zawartości ozonu wyznaczonej z danych satelitarnych OMPS/SNPP oraz zmierzonej spektrofotometrem dla stacji w Belsku, Hradec-Kralove, Hohenpeissenbergu oraz Popradzie w 2019 roku.

Łatwo zauważyć bardzo dobrą zgodność pomiędzy całkowitą zawartością ozonu wyznaczoną z danych satelitarnych oraz uzyskaną z pomiarów naziemnych dla wszystkich czterech stacji.

Dokładność całkowitej zawartości ozonu wyznaczonej z danych satelitarnych określono w skali miesiąca za pomocą procentowych różnic pomiędzy średnimi miesięcznymi wartościami całkowitej zawartości ozonu wyznaczonych z danych satelitarnych oraz zmierzonych na stacjach (Rys. 8).



Rys. 8. Rozkład procentowych różnic pomiędzy średnimi miesięcznymi wartościami całkowitej zawartości ozonu wyznaczonych dla Belska, Hohenpeissenberga, Hradec-Kralove i Popradu z danych satelitarnych OMPS/SNPP oraz z pomiarów naziemnych w roku 2019.

Dla większości miesięcy wykorzystanie danych satelitarnych OMPS/S-NN prowadzi do zaniżania całkowitej zawartości ozonu dla wszystkich stacji. Stosunkowo wysokie dodatnie wartości różnic procentowych uzyskano dla miesięcy zimowych dla Belska i Hohenpeissenberga. Wartości liczbowe różnic mieszczą się w przedziale od -2,7% do 4,5%.

W celu określenia dokładności metody wyznaczania zawartości ozonu z danych satelitarnych OMPS/SNPP, obliczono średnią różnicę pomiędzy całkowitą zawartością ozonu wyznaczoną

z danych satelitarnych i naziemnych, średnią różnicę bezwzględną, korelację oraz błąd procentowy metody. Obliczenia wykonano na podstawie wartości dobowych dla 2019 roku. Wyniki przedstawione zostały w Tabeli 7.

Tabela 7. Wyniki porównania pomiędzy ozonem wyznaczonym z danych OMPS/SNPP i zmierzonych spektrofotometrem w 2019, dla stacji Belsk, Hohenpeissenberg, Hradec-Kralove oraz Poprad Ganovce.

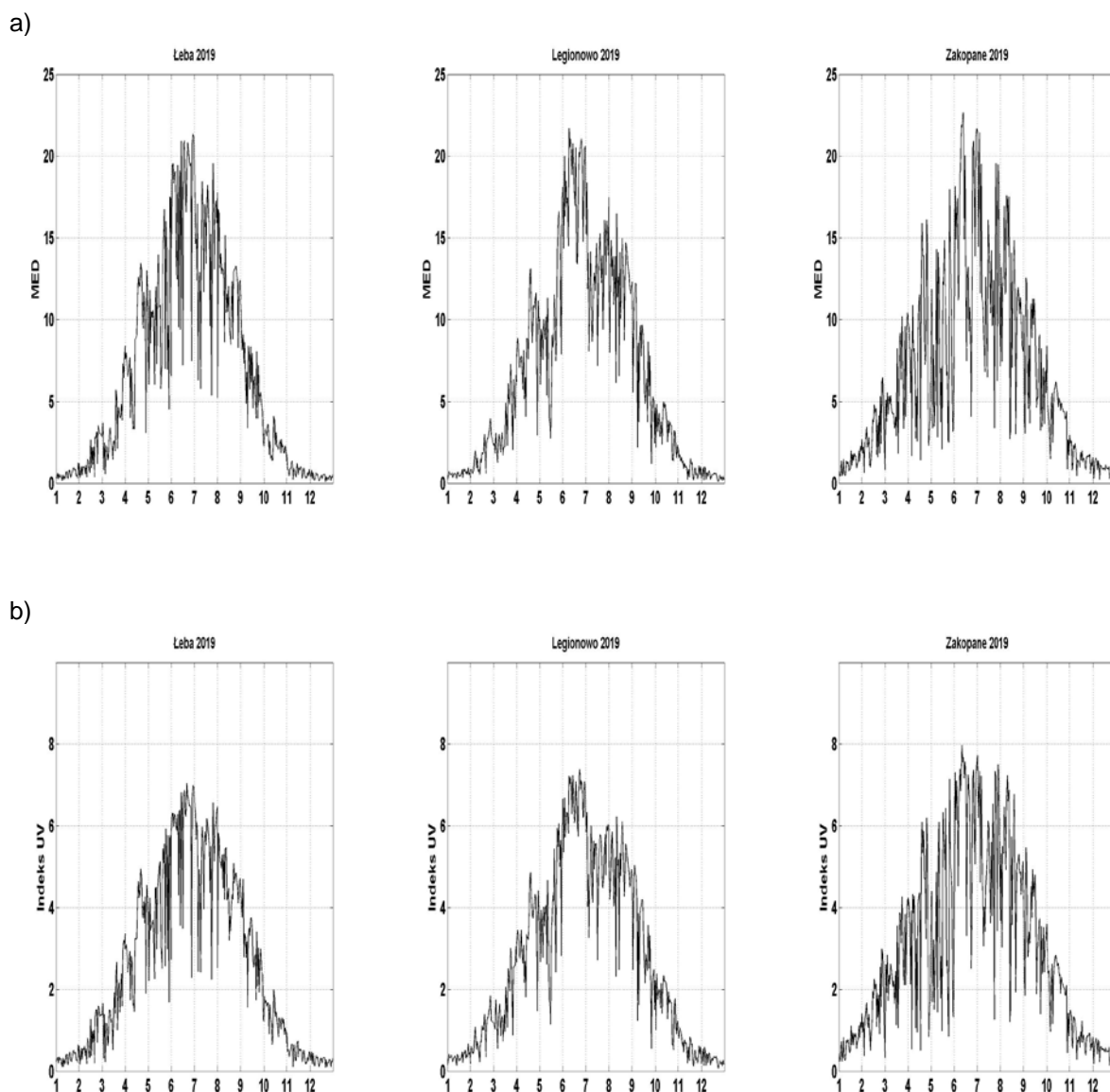
	Korelacja	Średnia różnica [D]	Średnia różnica bezwzględna [D]	RMSE %
Belsk	0,97	-0,71	8,38	3,74
Hohenpeissenberg	0,98	-1,43	5,79	2,64
Hradec-Kralove	0,96	-4,46	9,22	3,82
Poprad	0,99	-0,89	4,94	2,09

Dla wszystkich trzech stacji zgodność całkowitej zawartości ozonu wyznaczonej z danych OMPS z pomiarami naziemnymi jest bardzo dobra – średni błąd procentowy waha się w granicach od 2,09% do 3,82%. Na uwagę zasługuje również bardzo wysoka korelacja, która dla wszystkich stacji jest większa od 0,9.

2.5 Promieniowanie UV-B zmierzone na sieci monitoringu w 2019 roku

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

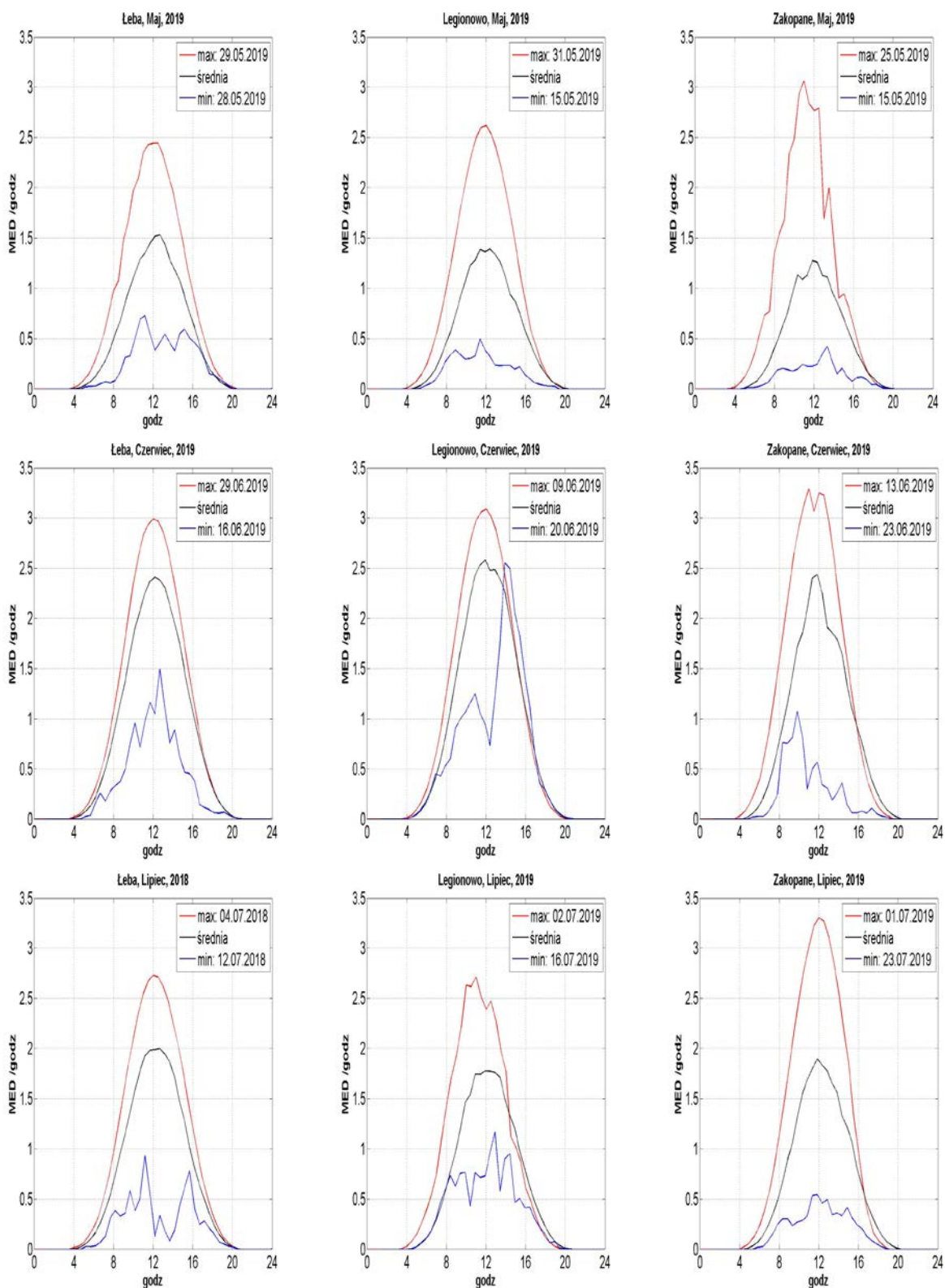
Poniżej przedstawiono wartości dawek dziennych UV-B [MED] i Indeksu UV zmierzone na stacjach IMGW-PIB w 2019 roku (Rys. 9).



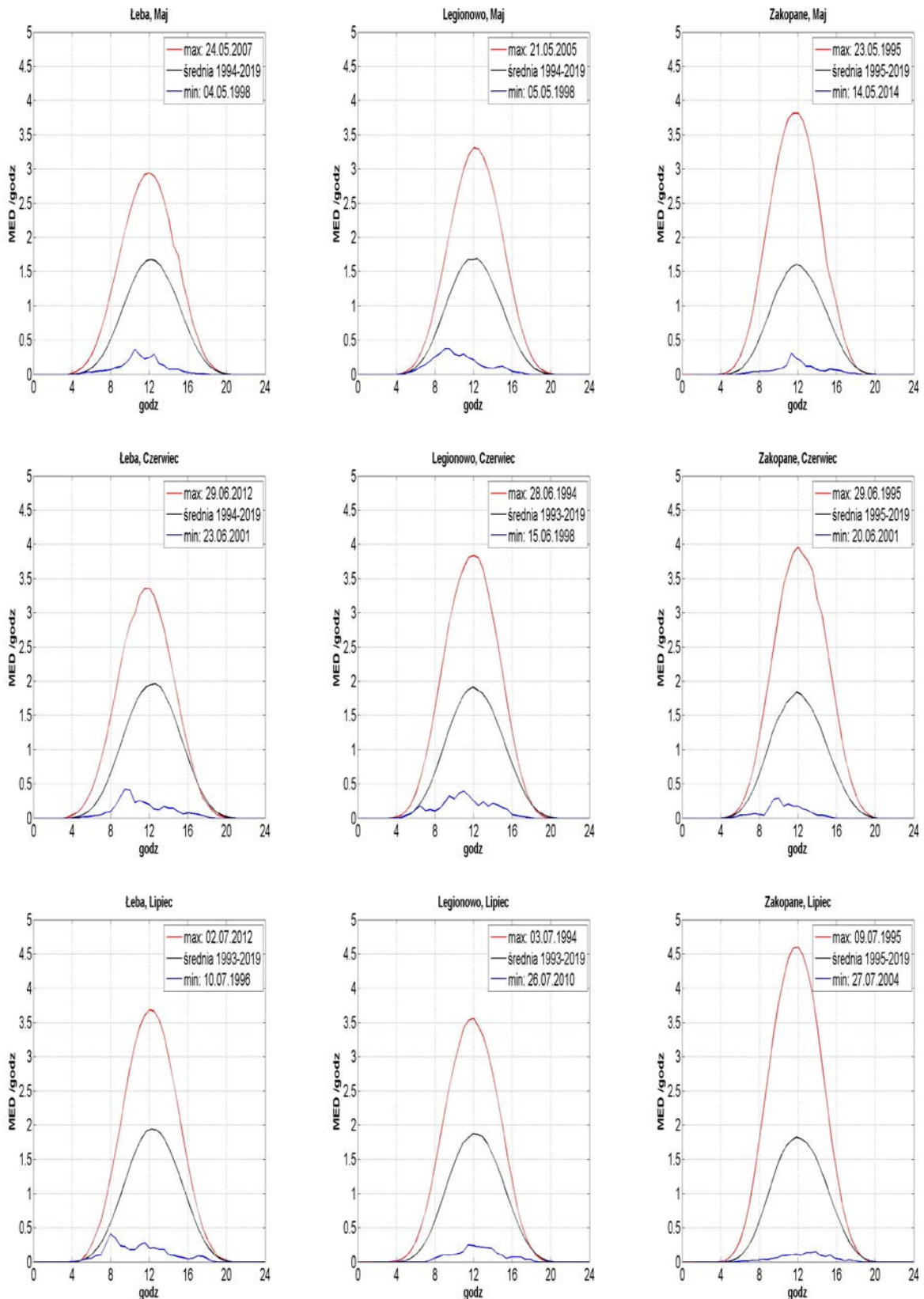
Rys. 9. Wartości dawek dziennych UV-B [MED] (a) i Indeksu UV (b) z czujników SL501 w Łebie, Legionowie i Zakopanem w 2019 r.

Stacje monitoringu UV-B w IMGW-PIB ułożone są południkowo. Gdyby nie zróżnicowanie ilości chmur, ozonu i aerozoli, ilość promieniowania UV-B docierającego do powierzchni Ziemi powinna być największa dla stacji Zakopane a najmniejsza dla Łeby. Południkowy rozkład wielkości promieniowania UV powinno się zauważyć porównując średnie dzienne oraz przebiegi dzienne z maksymalną dawką w poszczególnych miesiącach dla trzech stacji. Dla średnich miesięcznych efekt taki występuje dla zimniej pory roku od stycznia do marca oraz od września do grudnia. (Tabela 8, Rys. 10). Maksima dobowe układają się południkowy dla lutego, marca, czerwca i od września do grudnia, czyli większości miesięcy. W miesiącach letnich południkowy rozkład jest zaburzony. Wynika to z faktu, że wraz z nadejściem okresu ciepłego zaczynają rozwijać się procesy konwekcyjne sprzyjające powstawaniu chmur. Widać to bardzo dobrze na przebiegach dobowych dla serii, gdzie analizujemy większą ilość danych niż dla pojedynczego roku (Rys. 11). Dla miesięcy od maja do lipca obserwujemy maksima dobowe z północy na południe, natomiast średnie miesięczne, odwrotnie z

południa na północ. Maksymalne dawki dobowe odpowiadają sytuacjom bezchmurnego nieba, najczęściej z małą ilością ozonu i aerozoli, natomiast wartości średnie opisują typowe promieniowanie na danej stacji w wybranym miesiącu.



Rys. 10. Średnie, maksymalne i minimalne przebiegi dobowe promieniowania UV-B (w MED/h) zmierzonych przyrządami SL501 w maju, czerwcu i lipcu 2019 r.



Rys. 11. Średnie, maksymalne i minimalne przebiegi dobowe promieniowania UV-B (w MED/h) zmierzono przyrządami SL501 w maju, czerwcu i lipcu dla całej serii pomiarowej od 1993 (Zakopane od 1995) do 2019 r.

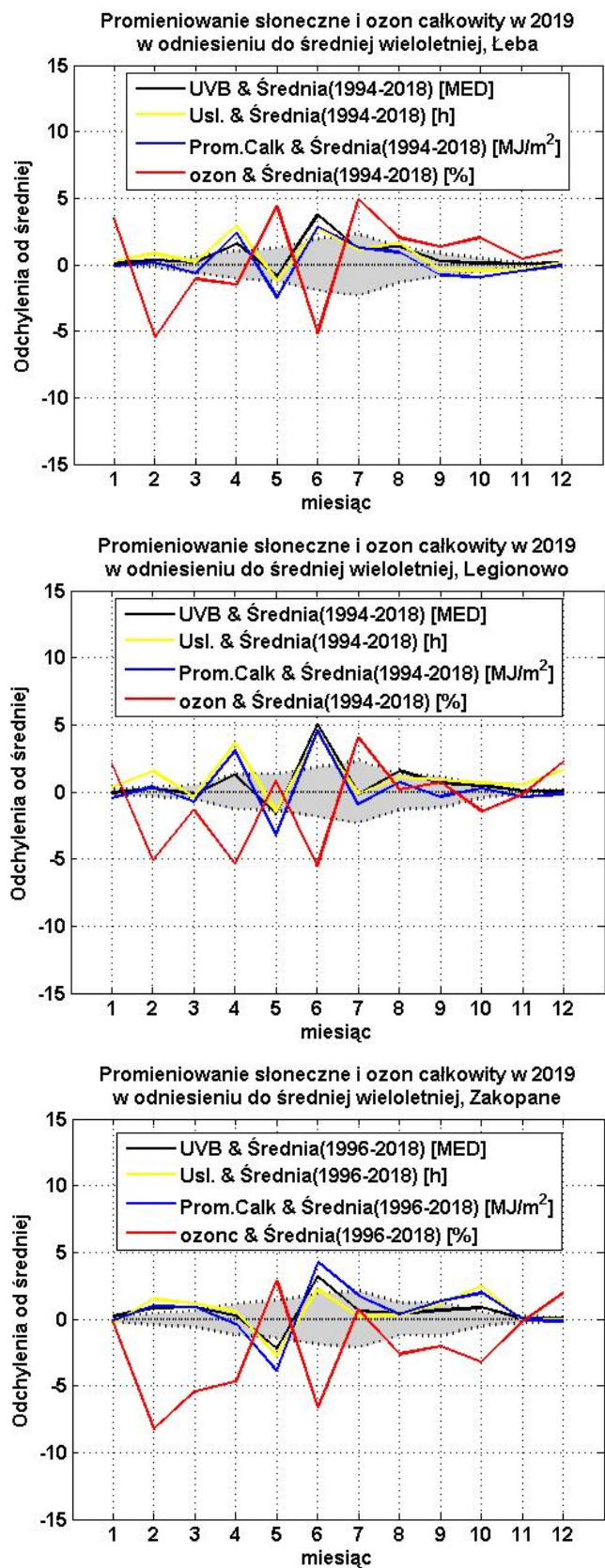
Tabela 4. Dienne – średnie, maksymalne i minimalne dawki UV-B oraz miesięczne dawki promieniowania UV-B (w MED) zmierzonego przyrządami SL501 w 2019 r.

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Łeba												
Śr. Dobowe	0,5	1,5	3,5	8,6	10,5	17,3	14,5	11,8	6,4	2,4	0,8	0,4
Max. Dob.	1,2	3,5	8,4	13,4	17,5	21,4	19,6	16,7	10,9	4,1	1,8	0,8
Min. Dob.	0,2	0,3	0,6	3,1	4,5	7,2	5,4	5,2	2,6	1,3	0,3	0,1
Dawka mies.	16,5	42,3	108,7	257,1	325,1	519,9	450,3	365,7	192,4	75,5	22,8	12,3
Legionowo												
Śr. Dobowe	0,6	1,7	3,6	8,5	9,7	18,4	12,9	12,2	6,9	3,2	1,0	0,5
Max. Dob.	1,0	3,9	7,3	13,1	17,9	21,7	18,4	16,5	12,3	5,0	2,1	1,0
Min. Dob.	0,2	0,6	1,3	2,9	2,8	13,4	7,2	6,1	1,2	1,3	0,2	0,1
Dawka mies.	17,8	48,3	110,6	255,7	300,2	551,0	400,2	377,2	208,4	100,0	29,2	14,6
Zakopane												
Śr. Dobowe	1,2	3,0	5,6	8,1	8,3	15,5	12,7	10,9	7,3	4,3	1,6	0,9
Max. Dob.	2,4	6,5	10,4	16,1	18,0	22,7	21,5	17,6	12,6	8,4	2,9	1,6
Min. Dob.	0,4	0,7	0,8	1,4	2,1	4,1	3,4	2,7	3,0	0,9	0,5	0,3
Dawka mies.	38,3	84,2	172,5	242,2	256,4	465,6	392,4	338,6	219,2	134,6	46,5	27,1

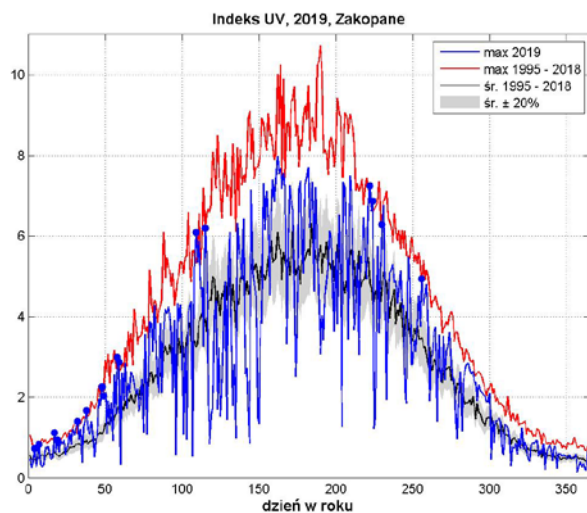
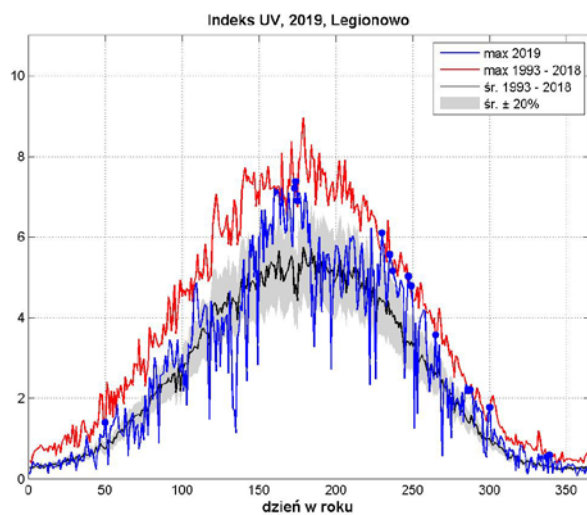
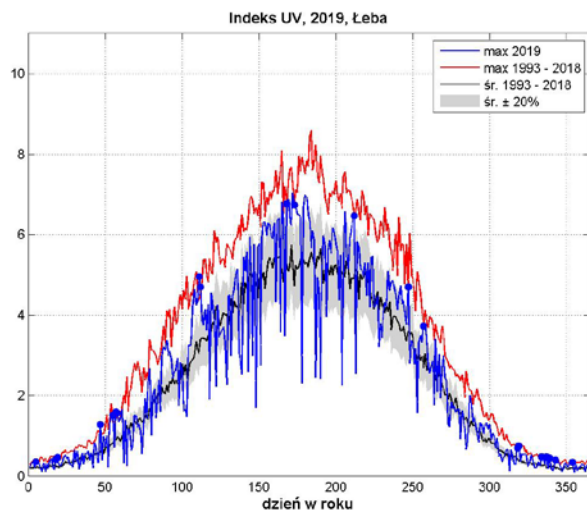
Dla 2019 roku maksymalną dawkę miesięczną, 551 MED zmierzono w czerwcu dla Legionowa a maksymalną dawkę dobową, 22,7 MED w czerwcu w Zakopanem. W czerwcu wystąpiły także maksima miesięczne i maksima dobowe dla Łeby i Zakopanego.

Ilość promieniowania UV docierającego do powierzchni Ziemi zależy od wielu czynników. Dlatego do oceny przyczyn jego zmiany wykorzystano prowadzone równoległe do monitoringu UV-B pomiary promieniowania całkowitego i usłonecznienia. Wielkości te pozwalają pośrednio wnioskować o zmianach promieniowania UV-B. Promieniowanie całkowite jest w zakresie od UV, poprzez zakres promieniowania widzialnego aż do bliskiej podczerwieni. Ze względu na duży zakres widma słonecznego jaki ono obejmuje oraz fakt, że w tym zakresie długości fal, ozon głównie oddziałuje w niewielkim zakresie (UV-B), można promieniowanie całkowite traktować jako niezależne od ilości ozonu. Na ilość promieniowania całkowitego, podobnie jak na UV mają wpływ aerozole. Im aerozoli jest więcej tym promieniowania słonecznego dociera mniej. Natomiast usłonecznienie dobrze identyfikuje dni z bezchmurną pogodą. Na Rys. 12 przedstawiono porównanie średnich miesięcznych promieniowania UV-B, promieniowania całkowitego, ozonu i usłonecznienia w odniesieniu do średnich wieloletnich dla Łeby, Legionowa i Zakopanego. Z punktu widzenia monitoringu UV-B najbardziej istotne są miesiące gdy promieniowanie to osiąga duże wartości. W 2019 roku większe od typowych wartości, identyfikowanych przez odchylenie standardowe (szary obszar) zaobserwowano dla lutego, kwietnia, czerwca i sierpnia w Łebie i Legionowie oraz dla lutego, czerwca i października w Zakopanem. Dla wszystkich stacji wyróżniają się pomiary z czerwca, co związane było z wyjątkowo słoneczną pogodą w tym miesiącu. Potwierdzają to pomiary promieniowania całkowitego i usłonecznienia. Dodatkowo, w czerwcu była mniejsza niż średnia ilość ozonu, co jest powiązane z

panującą wyższą pogodą. Podobna sytuacja miała miejsce w lutym na wszystkich stacjach oraz w kwietniu dla Łeby i Legionowa.



Rys. 12. Procentowe odchylenia od średniej wieloletniej promieniowania UV-B, promieniowania całkowitego, ozonu całkowitego i usłonecznienia w 2019 r. Szary obszar reprezentuje zmienność promieniowania UV-B w granicach $\pm 1\sigma$. Średnie wieloletnie ozonu całkowitego obliczono na podstawie danych satelitarnych.



Rys. 13. Przebiegi roczne Indeksu UV z 2019 roku dla stacji w Łebie, Legionowie i Zakopanem na tle średniego oraz maksymalnego Indeksu UV od początku pomiarów do 2019 r. dla każdej stacji. Niebieskie punkty oznaczają ekstremalne wartości w serii dla danego dnia roku zmierzone w 2019 r.

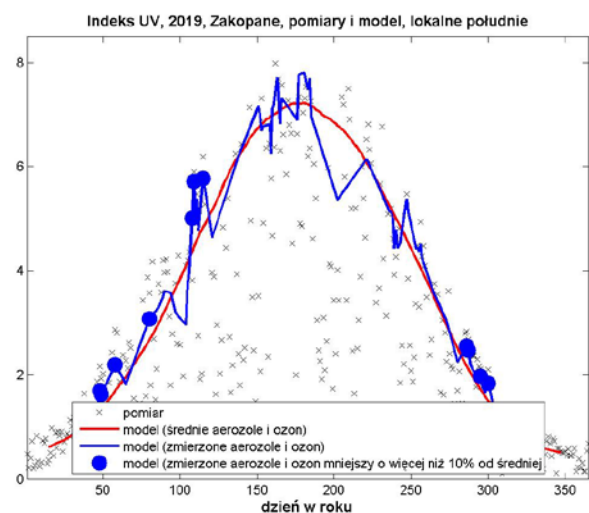
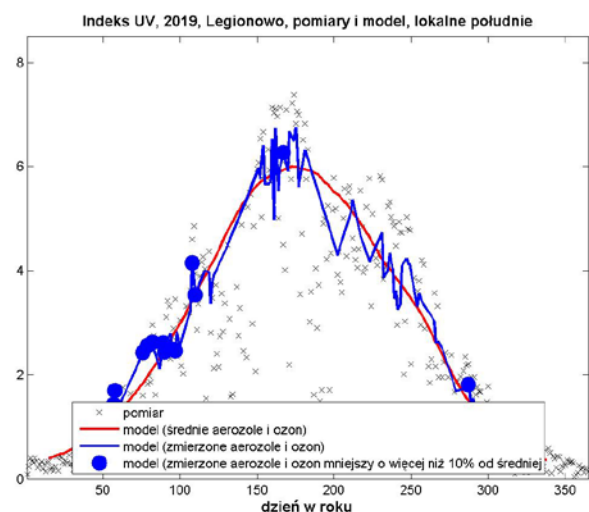
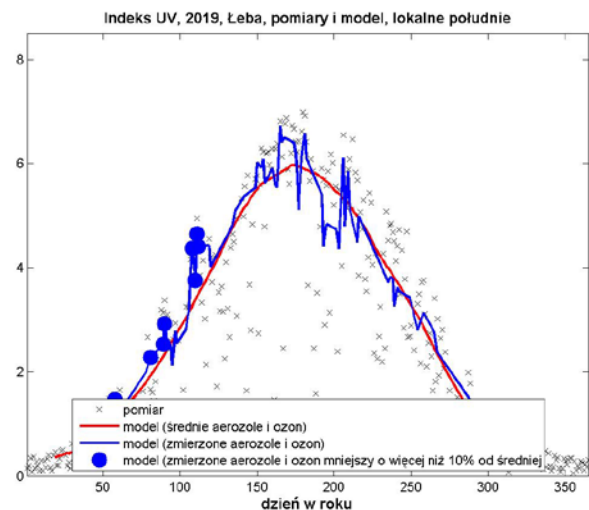
Promieniowanie UV-B docierające do powierzchni Ziemi potrafi spaść prawie do zera przy bardzo gęstych chmurach a tuż po ich przejściu gwałtownie wzrosnąć. Dawka dzienna, czyli suma dobową promieniowania takiego dnia nie będzie wysoka mimo to, tego dnia można doznać oparzeń słonecznych. Dla uwzględnienia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

Na Rys. 13 przedstawiono przebieg roczny Indeksu UV z 2019 roku na tle średniego oraz maksymalnego Indeksu UV z okresu od 1993 (Zakopane od 1995) do 2018 roku dla każdej ze stacji.

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

Rozdzielenie wpływu chmur, ozonu i aerozoli na docierające do powierzchni Ziemi promieniowanie UV-B jest złożonym zagadnieniem, zwłaszcza gdy w danych lokalizacjach są dostępne jedynie pomiary za pomocą biernej teledetekcji. W tych sytuacjach, obecność chmur zmniejsza dokładność wyznaczenia ozonu a pomiar aerozoli czyni praktycznie niemożliwym. Nawet w przypadkach gdy jest bezchmurne niebo własności optyczne aerozoli są wyznaczane zwykle dla dłuższych długości fal niż UV. Nieliczne pomiary w zakresie UV używane do wyznaczania aerozoli są zwykle mało dokładne. W efekcie niewiele jest danych gdy mamy dobrej jakości równoczesny pomiar ozonu, aerozoli oraz potrafimy w miarę dobrze ocenić efekt jaki dają chmury. Poniżej umieszczone wykresy zostały tak przygotowane aby wyjaśnić przyczyny dużego wzrostu promieniowania UV-B w poszczególnych dniach. Korzystając z pomiarów satelitarnych, ozonu całkowitego i aerozoli z 2019 roku obliczono, używając model transferu promieniowania słonecznego FastRT wartości Indeksu UV dla bezchmurnego nieba dla lokalnego południa (Rys. 14). Podobne obliczenie wykonano dla danych uśrednionych ozonu całkowitego i aerozoli 30-dniową średnią biegnącą z okresu 2005-2018. Na Rys. 14 umieszczono również pomiary Indeksu UV z 2019 roku. Zestawienie wartości z wybranego roku ze średnią wieloletnią pozwala wyróżnić dni o nietypowo dużych wartościach promieniowania. Natomiast modelowanie FastRT pozwala ocenić czy zwiększone promieniowanie da się wytłumaczyć mniejszą ilością ozonu i aerozoli. Domyślnie zakłada się, że duże wartości promieniowania odpowiadają pomiarom przy bezchmurnym niebie. Dodatkowo niebieskimi kropkami wyróżniono dni, w których ilość ozonu była mniejsza od średniej wieloletniej co najmniej o 10%. Dzięki temu można zlokalizować dni, w których duży wzrost promieniowania można wytłumaczyć dużymi spadkami ozonu. Pozostałe dni z dużymi wielkościami promieniowania można tłumaczyć spadkami ilości aerozoli.

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

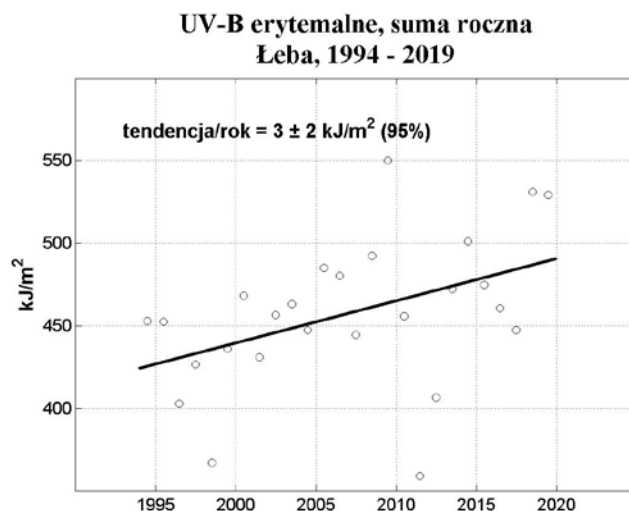


Rys. 14. Przebiegi roczne Indeksu UV z 2019 roku obliczonego z wykorzystaniem modelu transferu promieniowania słonecznego FastRT dla stacji w Łebie, Legionowie i Zakopanem z wykorzystaniem pomiarów satelitarnych ozonu całkowitego i aerozoli 2005-2018.

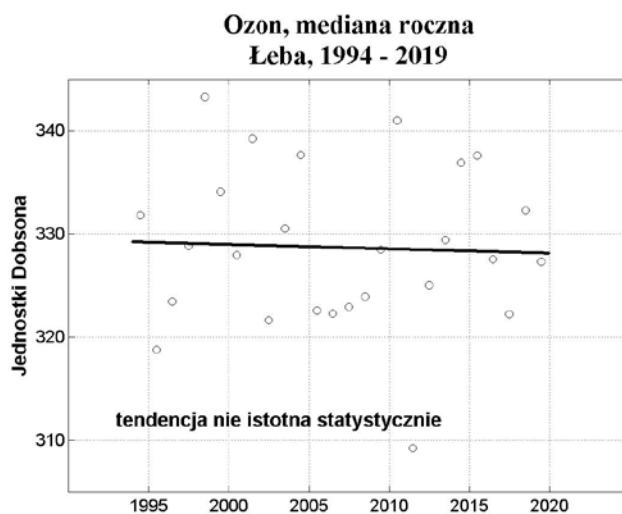
Długoterminowe zmiany promieniowania UV-B na przykładzie pomiarów z Łeby

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 niezbędne jest wykonanie tzw. homogenizacji, gdzie skorygowane zostaną dane z początku pomiarów. Dane dla każdego z czujników zostały porównane dla warunków bezchmurnego nieba z promieniowaniem obliczonym z użyciem modelu transferu promieniowania słonecznego, libradtran (Mayer and Kylling 2005), Jako sytuacje bezchmurne przyjęto takie, gdy występowało pełne usłonecznienie uzyskane z równoległe prowadzonych na stacjach pomiarów aktynometrycznych. Do obliczeń użyto dane o ozonie całkowitym i aerozoluach z NASA Goddard Earth Sciences Data and Information Services Centre (GES DISC). Parametry aerozoli zostały przeliczone do zakresu UV-B, 305nm. Na Rys. 15a przedstawiono serię danych po przeliczeniu dla stacji w Łebie. Okazało się, że występuje istotna statystycznie tendencja dodatnia wzrostu dawek rocznych promieniowania erytemalnego UV-B (poziom ufności 95%). Dawki roczne promieniowania zestawiono z medianami rocznymi ozonu całkowitego, Rys. 15b i głębokością optyczną aerozoli, Rys. 15c. Okazało się, że w analizowanym okresie ozon całkowity nie wykazuje żadnej istotnej statystycznie tendencji w przeciwieństwie do ilości aerozoli, których ilość zmniejszyła się w czasie, co może tłumaczyć wzrost promieniowania UV-B. Dodatkowo, w 2019 roku zmierzono jedną z najwyższych w serii pomiarów w Łebie dawkę roczną: 529 kJ/m².

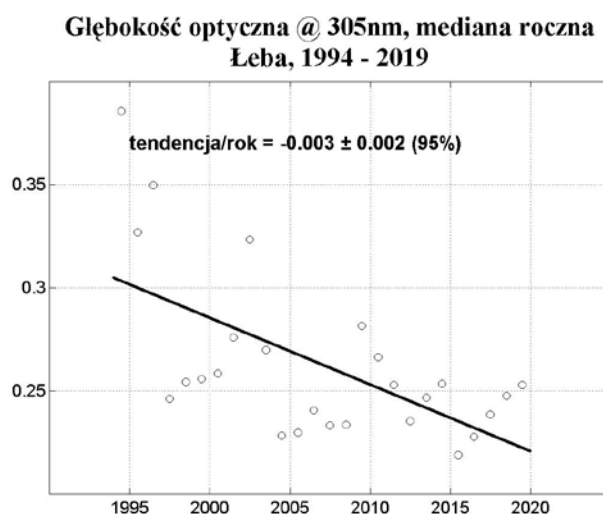
a)



b)



c)



Rys. 15. Seria promieniowania erytemalnego UV-B, mediany ozonu całkowitego i aerozoli dla stacji IMGW-PIB w Łebie z lat 1994 do 2019,

2.6 Wnioski

Polska jest stroną Konwencji Wiedeńskiej o ochronie warstwy ozonowej i Protokołu Montrealskiego (PM) w sprawie substancji zubożających warstwę ozonową od dnia 11 października 1990 r. i wywiązuje się z przyjętych zobowiązań. W przypadku Konwencji zobowiązanie dotyczy zapewnienia środków niezbędnych do wykonywania pomiarów ozonu atmosferycznego i natężenia słonecznego promieniowania UV-B zgodnie z programem Państwowego Monitoringu Środowiska. Zasadniczym zaleceniem Protokołu Montrealskiego i jego poprawek jest redukcja substancji kontrolowanych aż do ich całkowitej eliminacji w odniesieniu do produkcji i zużycia (zgodnie z wprowadzonymi definicjami). Niewypełnianie postanowień Protokołu Montrealskiego może opóźnić, a nawet uniemożliwić regenerację warstwy ozonowej.

Od ponad 40 lat obserwowane są wyraźne zmiany ilości i rozkładu przestrzennego ozonu w atmosferze. Warstwa stratosferycznego ozonu jest naturalnym filtrem słonecznego promieniowania UV, co ma podstawowe znaczenie dla życia na Ziemi, a jej rozrzedzenie jest przedmiotem zainteresowania opinii publicznej i środowiska naukowego. Ubytki ozonu w rejonach polarnych, w tym regularnie, od 1985 r., pojawiająca się wiosenna dziura ozonowa nad Antarktydą, powodują znaczny wzrost promieniowania UV-B docierającego do powierzchni Ziemi. Dodatkowo, duże zmiany w profilu ozonu powodują zmiany cyrkulacji atmosferycznej zarówno w skali regionalnej jak i globalnej poprzez modyfikację struktury termicznej atmosfery. Może to mieć istotny wpływ na zmiany klimatu. W ostatnich latach na stan warstwy ozonowej w obszarach polarnych i poza nimi wpływają zmiany cyrkulacji atmosfery i wzrost koncentracji gazów cieplarnianych w atmosferze. Nad Polską i Europą pojawiają się epizody jednoczesnej adwekcji na różnych wysokościach, polarnej masy z fotochemicznym ubytkiem ozonu i masy subtropikalnej o naturalnie niskiej zawartości ozonu. Podczas tych epizodów pojawiają się wysokie wartości Indeksu UV. Wir polarny rozpadający się później na wiosnę, nawet bez fotochemicznych ubytków, w połączeniu z silną adwekcją subtropikalną może znacznie zwiększać poziom promieniowania UV-B. W ostatnich latach pojawiło się niespodziewane zmniejszenie grubości ochronnej warstwy ozonowej nad dużymi obszarami w strefie umiarkowanych szerokości geograficznych półkuli północnej, w tym również nad Polską. Analiza epizodów ubytków ozonu w warstwach górnej troposfery i dolnej stratosfery nad Legionowem sugeruje silne unoszenie powietrza i jego transport z niskich szerokości geograficznych. Jest to zgodne z symulacjami w modelach, które pokazują długoterminowy wzrost unoszenia tropikalnego powietrza wywołany przeszłym wzrostem zawartości gazów cieplarnianych. W ostatnim czasie zwrócono uwagę, że istnieją gazy takie jak N_2O , których emisja nie jest monitorowana przez PM. Koncentracja N_2O systematycznie rośnie i może wpływać na osłabienie warstwy ozonowej w średniej stratosferze w okresie letnim ze względu na długi okres połowicznego rozpadu (>100lat).

Mimo zmniejszającej się zawartości w atmosferze chlorowcopochodnych gazów zagrożenie dla warstwy ozonowej będzie występować w okresie najbliższych kilkudziesięciu lat. Dlatego należy zapewnić wysokiej jakości pomiary satelitarne całkowitej zawartości ozonu i profili ozonu w skali globu i na wybranych stacjach naziemnych z długimi seriami pomiarowymi (Belsk od 1963 r., Legionowo od 1979 r.). Pomiary naziemne są wykorzystywane do walidacji pomiarów satelitarnych, prowadzenia bieżącego monitoringu ozonu i analizy trendów. Bez wysokiej jakości pomiarów nie będzie możliwe śledzenie oczekiwanej regeneracji warstwy ozonowej przypisywanej spadkowi zawartości SZWO, a także zrozumienie znacznego wychłodzenia średniej stratosfery i ocieplenia troposfery, których można oczekiwać w następnych dziesięcioleciach.

Dane satelitarne ozonu pokazują wzrost ozonu w górnej stratosferze w okresie ostatnich 20 lat. Jest to pozytywny efekt działania Protokołu Montrealskiego. W warstwie UTLS widoczne jest zmniejszanie zawartości ozonu w ciągu całego roku, najbardziej na wiosnę. Nad Polską i Europą obserwowane są epizody niewyjaśnionych spadków całkowitej zawartości ozonu, w ekstremalnych przypadkach nawet ponad 20% w stosunku do średniej wieloletniej. W szerokościach geograficznych Polski na warstwę UTLS przypada znaczna część całej warstwy ozonowej, niedobory ozonu w tym rejonie atmosfery mogą zatem prowadzić do wysokich dawek promieniowania UV-B. Zmiany

zawartości ozonu nad Polską potwierdza najnowsza analiza połączonych danych satelitarnych. Wykazano, że w warstwie UTLS pomiędzy 60°S-60°N mimo zmniejszania zawartości freonów w atmosferze po roku 1998 obserwowane jest ciągle zmniejszanie zawartości ozonu. Modele nie odtwarzają dobrze obserwowanych trendów ozonu. Jedną z niezwyfikowanych hipotez mówi o zagrożeniu dla warstwy ozonowej substancjami VSLs (ang. Very Short Lived Substances). Do tej pory uważano, że VSLs mimo, że zawierają w swoim składzie chlor są przyjazne dla warstwy ozonowej ('ozone friendly') ponieważ rozpadają się w czasie krótszym niż 6 miesięcy i nie zdołają dotrzeć do wyższych warstw atmosfery. Silna konwekcja może powodować unoszenie wilgotnych mas powietrza do wysokości gdzie panują najniższe temperatury (otoczenie tropopauzy). Substancje, które niszczą warstwę ozonową po przedostaniu się do stratosfery mogą niszczyć ozon w skali globalnej.

Dla 2019 roku maksymalną dawkę miesięczną promieniowania UV-B, 551 MED (115,71 kJ/m²) zmierzono w czerwcu dla Legionowa a maksymalną dawkę dobową, 22,7 MED (4,77 kJ/m²) w czerwcu w Zakopanem. W czerwcu wystąpiły także maksima miesięczne i maksima dobowe dla Łeby i Zakopanego.

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

Analiza serii danych erytemalnego promieniowania UV-B ze stacji w Łebie pokazała tendencję wzrostową $+3 \pm 2$ kJ/m² (poziom ufności 95%).

3 Opracowanie informacji dla odbiorców krajowych i międzynarodowych

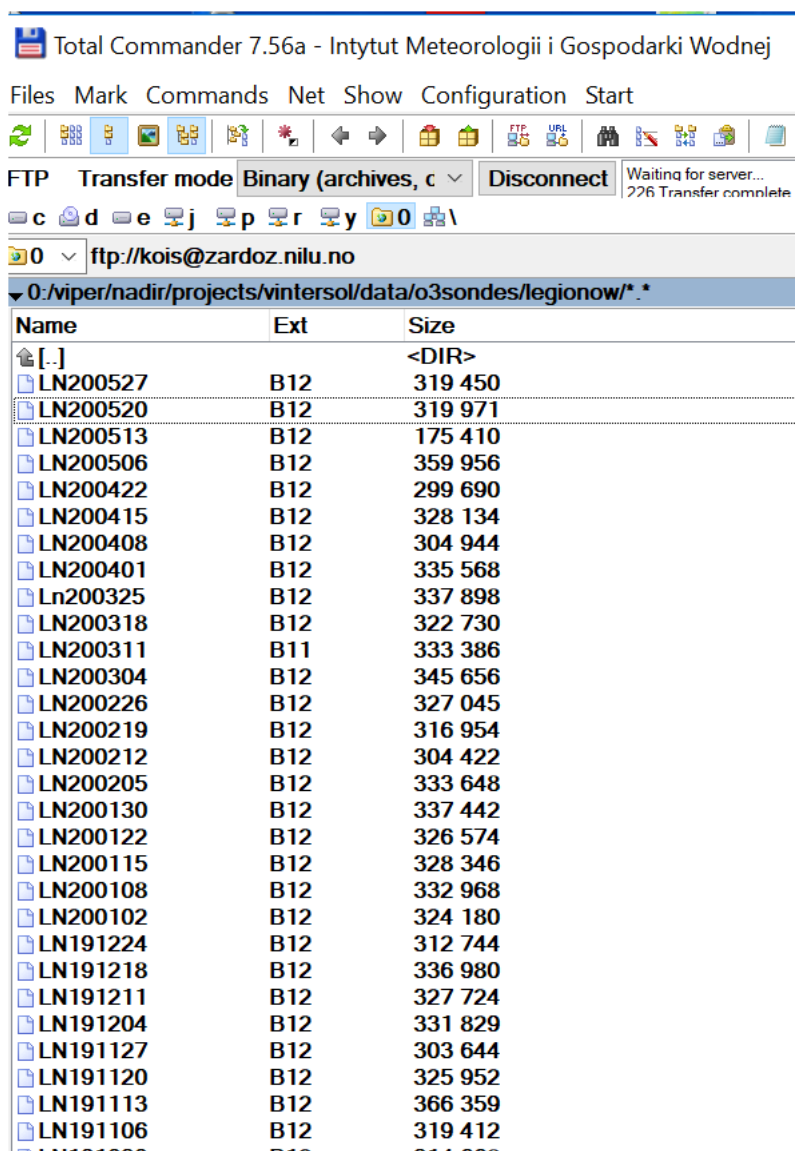
Badanie globalnego procesu ubożenia warstwy ozonowej z natury rzeczy wymaga współpracy międzynarodowej. Polska jest sygnatariuszem Wiedeńskiej Konwencji o Ochronie Warstwy Ozonowej, zobowiązującej nas do monitorowania w Polsce ozonu atmosferycznego i promieniowania UV-B.

Od 1979 roku, sondaże ozonowe w Legionowie wykonuje się w systemie Światowego Monitoringu Ozonu WMO z podstawową częstotliwością 1 raz w tygodniu. Wykonuje się również dodatkowe sondaże związane są z udziałem w projekcie MATCH badania chemicznego niszczenia ozonu w stratosferze w wirze polarnym. Wyniki w postaci plików CSV zawierających metadane oraz pionowe profile PTUW i O₃ z jednego sondażu są systematycznie przekazywane do bazy Globalnej Sieci Detekcji Zmian Składu Atmosfery (NDACC) w Maryland, USA i do Światowej Bazy Danych Ozonu i UV (WOUDC) w Toronto, w Kanadzie. Poniżej przedstawiono wykaz ostatnio przekazanych danych do bazy danych WOUDC.

Observation Date (UTC) ↓	Agency	Platform ID	GAW
2020-05-27	PIMWM	221	LEG
2020-05-20	PIMWM	221	LEG
2020-05-13	PIMWM	221	LEG
2020-05-06	PIMWM	221	LEG
2020-04-29	PIMWM	221	LEG
2020-04-22	PIMWM	221	LEG
2020-04-15	PIMWM	221	LEG
2020-04-08	PIMWM	221	LEG
2020-04-01	PIMWM	221	LEG
2020-03-25	PIMWM	221	LEG
2020-03-18	PIMWM	221	LEG
2020-03-11	PIMWM	221	LEG

Rys. 16. Fragment listingu sondaży ozonowych z Legionowa w bazie danych WOUDC

Od 1994 roku wyniki sondaży są przekazywane regularnie do Bazy Danych w Norweskim Instytucie Badania Powietrza (NILU) w Oslo, w Norwegii, w ramach współpracy w programach Unii Europejskiej, dotyczących badania ozonu w stratosferze. Wyniki sondaży ozonowych wysyłane są w trybie operacyjnym - po zakończeniu sondażu automatycznie generowana jest depesza w ustalonym formacie NILU zawierająca metadane oraz pionowe profile PTUW i O₃. Depesza ta w postaci pliku tekstowego LN jest po wstępnej kontroli danych przesyłana na serwer ftp w NILU. Na Rys. 17 przedstawiono fragment listingu zawartości serwera.



Rys. 17. Fragment listingu zawartości serwera ftp zardoz.nilu.no z pomiarami z Legionowa

Od 2005 roku stacja w Legionowie jest częścią sieci NDACC (ang. Network for the Detection of Atmospheric Composition Change – Globalna Sieć Detekcji Zmian Składu Atmosfery). Obliguje nas to do przesyłania na serwer NDACC plików w ustalonym formacie zawierających metadane oraz pionowe profile PTUW i O₃, oraz do corocznego raportowania pracy stacji. Ostatni raport zawierający m.in. harmonogram przekazywania danych został przesłany w sierpniu 2019 roku.

Dane dotyczące ciśnienia cząstkowego ozonu w atmosferze nad Legionowem z poprzedniego roku i w ujęciu retrospekcyjnym oraz dane o promieniowaniu UV-B z poprzedniego roku z sieci IMGW-PIB są zamieszczane w rocznikach Głównego Urzędu Statystycznego. Ostatni zestaw danych przekazano do GIOŚ w czerwcu 2019 roku.

Współpraca międzynarodowa

- W dniach 22-24 maja 2019 uczestniczono w międzynarodowej konferencji UTCL – Assessment Measure in Human Bioclimatology - 10 years of application. Konferencja

została zorganizowana przez Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN, International Society of Biometeorology oraz IMGW-PIB. Spotkanie odbyło się w siedzibie IMGW-PIB w Warszawie. Na konferencji zaprezentowano poster: "Information of IMGW-PIB on the healthy use of solar UV radiation".

- W dniu 19 września 2019 uczestniczono w spotkaniu w Royal Meteorological Institute of Belgium (RMI) zorganizowanym z okazji 50-lecia sondażu ozonowych w Uccle: „50 YEARS OF OZONESONDE LAUNCHES AT UCCLE”. Podczas serii wykładów dokonano przeglądu badań w dziedzinie ozonu atmosferycznego.
- W dniu 20 września 2019 uczestnictwo w spotkaniu roboczym w RMI „EUROPEAN PI OZONESONDE MEETING” adresowanym do osób, odpowiedzialnych za QA/QC (zapewnienie jakości/kontrolę jakości) wyników sondażu ozonowych, na europejskich stacjach sondażu ozonowych. Dokonano przeglądu meta danych na stacji w Legionowie. Stwierdzono, że sondáže ozonowe ze względu na swoją dokładność i dużą rozdzielczość pionową są niezastąpionym źródłem danych do walidacji satelitarnych profilu ozonu. Niejednorodności w długich seriach sondażu ozonowych są spowodowane: zmianami instrumentów i operacyjnych procedur działania. Sondy ozonowe charakteryzuje niepewność pomiaru $\pm(5-10-20)\%$. Celem jest osiągnięcie $\pm 5\%$ w stosunku do pomiaru referencyjnego w 2020 roku. Po spotkaniu wprowadzono pewne korekty w procedurze przygotowania sond ozonowych do wzlotu na stacji w Legionowie, dla uzyskania pełnej zgodności z zaleceniami standardowej procedury działania WMO.
- 31 października 2019 roku wysłano do publikacji w International Journal of Biometeorology manuskrypt zatytułowany "Scenarios of vitamin D3 status in Poland for pre-industrial and modern behavior".

4 Podsumowanie

W 2019 roku realizowano program monitorowania rozkładu pionowego ozonu, całkowitej zawartości ozonu nad Polską i Europą oraz promieniowania UV-B w Polsce.

W 2019 roku na Stacji Pomiarów Aerologicznych w Legionowie wykonano 52 rutynowe sondáže ozonowe, program pomiarowy został zrealizowany w 100%.

Stacje pomiarowe promieniowania UV-B w Łebie, Legionowie i w Zakopanem, wykorzystujące mierniki Solar Light UV biometer model 501, od utworzenia sieci monitoringu w 1993 r. pracują bez większych awarii. W roku 2019 program pomiarowy został wykonany w 100%.

W 2019 roku w Obserwatorium Fizyczno – Meteorologicznym / Światowym Centrum Promieniowania (PMOD/WRC) w Davos (Szwajcaria) przeprowadzono kalibrację czujnika SL501 #1120 z sieci IMGW-PIB. W ramach kalibracji wykonano laboratoryjne pomiary charakterystyk spektralnej i kątovej czujników oraz porównanie ze spektrofotometrem wzorcowym. Dla czujnika został wydany certyfikat kalibracji.

Satelitarny monitoring całkowitej zawartości ozonu w 2019 roku, podobnie jak w latach ubiegłych, był prowadzony z wykorzystaniem danych satelitarnych z czujnika Ozone Mapping and Profiler Suite (OMPS) znajdującego się na pokładzie satelitów meteorologicznego Suomi NPP (S-NPP) oraz NOAA-20. Całkowita zawartość ozonu wyznaczana była za pomocą oprogramowania OMPSNADIR_SPA V.1.0.1 przygotowanego przez NASA, Direct Readout Laboratory, GODDARD SPACE FLIGHT CENTER, (<https://directreadout.sci.gsfc.nasa.gov>) i wdrożonego do pracy operacyjnej w Zakładzie Teledetekcji Satelitarnej IMGW-PIB. W 2019 roku nie było większych problemów z odbiorem danych satelitarnych i mapy rozkładu całkowitej zawartości ozonu nad Europą Środkową nie były generowane jedynie w ciągu 6 dni.

Wyniki sondáže ozonowych były regularnie przekazywane do Bazy Danych w NILU, w Norwegii gdzie są wykorzystywane do opracowania wyników kampanii MATCH, do bazy Globalnej Sieci Detekcji Zmian Składu Atmosfery (NDACC) w Maryland, USA oraz do Światowej Bazy Danych Ozonu i UV (WOUDC) w Toronto, Kanada.

Wyniki realizowanego monitoringu pionowego rozkładu ozonu i UV-B są regularnie publikowane w wydawnictwach GIOŚ i GUS.

Dane pomiarowe powstałe w wyniku realizacji umowy monitoringu są gromadzone, przechowywane i archiwizowane w systemach IMGW-PIB w Warszawie z wyłączeniem surowych danych satelitarnych, które są przechowywane na płytach DVD w Zakładzie Teledetekcji Satelitarnej IMGW-PIB w Krakowie.

Dane pomiarowe, powstałe w wyniku realizacji umów monitoringu w roku 2019, zostały dołączone do niniejszego raportu na płycie CD.

5 Literatura

1. 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.
2. Brasseur, G. P. and Solomon, S.: *Aeronomy of the Middle Atmosphere, Chemistry and Physics of the Stratosphere and Mesosphere*, Vol. 32 of Atmospheric and Oceanographic Sciences Library, Springer, Dordrecht, the Netherlands, 2005.
3. Diallo, M., Konopka, P., Santee, M. L., Müller, R., Tao, M., Walker, K. A., Legras, B., Riese, M., Ern, M., and Ploeger, F.: Structural changes in the shallow and transition branch of the Brewer–Dobson circulation induced by El Niño, *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 425–446, <https://doi.org/10.5194/acp-19-425-2019>, 2019.
4. Danielsen, E. Stratospheric-tropospheric exchange based on radioactivity, ozone and potential vorticity. *J. Atmos. Sci.* 1968,25, 502–518.
5. Engelsen O. and Kylling A., Fast simulation tool for ultraviolet radiation at the Earth's surface. *Optical Engineering*, 44 (4), 041012 (2005).
6. GES DISC. <http://disc.gsfc.nasa.gov>
7. Goutail F., Pommereau J-P, Pazmino A., Lefevre F, Chipperfield M, Feng W,(2), Van Roozendael M.(3), Jepsen N., Hansen G., Kivi R, Bogner K., Strong K, and Walker K. Total ozone loss during the 2017/18 Arctic winter and comparison to previous years. *Geophysical Research Abstracts* Vol. 20, EGU2018-1978, 2018 EGU General Assembly 2018.
8. Huang, G., Liu, X., Chance, K., Yang, K., Bhartia, P. K., Cai, Z., Allaart, M., Ancellet, G., Calpini, B., Coetzee, G. J. R., Cuevas-Agulló, E., Cupeiro, M., De Backer, H., Dubey, M. K., Fuelberg, H. E., Fujiwara, M., Godin-Beekmann, S., Hall, T. J., Johnson, B., Joseph, E., Kivi, R., Kois, B., Komala, N., König-Langlo, G., Laneve, G., Leblanc, T., Marchand, M., Minschwaner, K. R., Morris, G., Newchurch, M. J., Ogino, S.-Y., Ohkawara, N., Piders, A. J. M., Posny, F., Querel, R., Scheele, R., Schmidlin, F. J., Schnell, R. C., Schrems, O., Selkirk, H., Shiotani, M., Skrivánková, P., Stübi, R., Taha, G., Tarasick, D. W., Thompson, A. M., Thouret, V., Tully, M. B., Van Malderen, R., Vömel, H., von der Gathen, P., Witte, J. C., and Yela, M.: Validation of 10-year SAO OMI Ozone Profile (PROFOZ) product using ozonesonde observations, *Atmos. Meas. Tech.*, 10, 2455-2475, <https://doi.org/10.5194/amt-10-2455-2017> , 2017.
9. Krzyściński J.W, Baranowski D., B. Signs of the ozone recovery based on multi sensor reanalysis of total ozone for the period 1979–2017 *Atmospheric Environment Volume 199*, 15 February 2019, Pages 334-344.
10. Lin, Meiyun, Fiore, Arlene M., Horowitz, Larry W., Langford, Andrew O., Oltmans, Samuel J., Tarasick, David, Rieder, Harald E. Climate variability modulates western US ozone air quality in spring via deep stratospheric intrusions. *Nature Communications*, 2015/05/12/online, <https://doi.org/10.1038/ncomms8105>
11. Mayer B, Kylling A (2005). The libRadtran software package for radiative transfer calculations - description and examples of use *Atmos. Chem. Phys.* 5 1855-1877.
12. Miyauchi M., Hirai C., Nakajima H., The solar exposure time required for vitamin D3 synthesis in the human body estimated by numerical simulation and observation in Japan. *Journal of Nutritional Science and Vitaminology* 59(4), 257-263 (2013).

13. Rigby, M., Park, S., Saito, T. *et al.* Increase in CFC-11 emissions from eastern China based on atmospheric observations. *Nature* **569**, 546–550 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1193-4>
14. Sagi K, Pérot K , Murtagh D , and Orsolini Y Two mechanisms of stratospheric ozone loss in the Northern Hemisphere, studied using data assimilation of Odin/SMR atmospheric observations *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 1791–1803, 2017 www.atmos-chem-phys.net/17/1791/2017/ doi:10.5194/acp-17-1791-2017.
15. Solomon S, Ivy D. J., Kinnison D. , Mills M.J., Neely R., Schmidt A. D., Emergence of healing in the Antarctic ozone layer *Science*, 2016.
16. Trickl, T., Vogelmann, H., Ries, L., and Sprenger, M.: Very high stratospheric influence observed in the free troposphere over the northern Alps – just a local phenomenon?, *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 243–266, <https://doi.org/10.5194/acp-20-243-2020> , 2020.

Podziękowania

Dziękujemy zespołowi Zakładu Fizyki Atmosfery IGF PAN za udostępnienie serii pomiarów całkowitej zawartości ozonu mierzonej spektrofotometrem Dobsona w Centralnym Obserwatorium Geofizycznym w Belsku.

Dziękujemy również zespołowi Pracowni Promieniowania Słonecznego z Centrum Hydrologiczno-Meteorologicznej Sieci Pomiarowo-Obserwacyjnej IMGW-PIB za udostępnienie do analizy danych promieniowania całkowitego i usłonecznienia ze stacji w Łebie i Zakopanem.