



Raport o stanie warstwy ozonowej i natężeniu promieniowania UV-B za 2021 r.

w ramach zadania „Monitoring rozkładu pionowego ozonu, całkowitej zawartości ozonu nad Polską i Europą Środkową oraz promieniowania UV-B w Polsce w latach 2021 – 2022”



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

JEDNOSTKA PROWADZĄCA: Wydział Monitorowania Jakości Powietrza, IMGW-PIB

KIEROWNIK TEMATU: mgr Julita Biszczuk-Jakubowska

WYKONAWCY:

Wydział Monitorowania Jakości Powietrza:

mgr Julita Biszczuk–Jakubowska

mgr Aleksander Curyło

mgr Bogumił Kois

Zakład Teledetekcji Satelitarnej w Krakowie:

dr Bożena Łapeta

mgr Monika Hajto

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

Spis treści

1	Sprawozdanie z realizacji zadań 1-3 za rok 2021	2
1.1	Pomiary rozkładu pionowego ozonu sondą ECC 6AB	2
1.2	Pomiary natężenia promieniowania UV-B	4
1.3	Wyznaczenie całkowitej zawartości ozonu nad Polską i Europą Środkową	4
2	Raport za rok 2021	7
2.1	Wstęp	7
2.2	Ocena stanu warstwy ozonowej w 2021 roku na podstawie wyników monitoringu	9
2.3	Analiza rozkładu pionowego ozonu nad Legionowem w 2021 roku	11
2.4	Ozon całkowity z danych satelitarnych nad Europą Środkową w 2021 roku	23
2.5	Promieniowanie UV-B zmierzone na sieci monitoringu w 2021 roku	30
2.6	Wnioski	43
3	Opracowanie informacji dla odbiorców krajowych i międzynarodowych	45
4	Podsumowanie	48
5	Literatura	49
	Spis załączników	53

1 Sprawozdanie z realizacji zadań 1-3 za rok 2021.

Prezentowane Sprawozdanie oraz Raport zawierają wyniki i analizy pomiarów realizowanych w ramach programu monitorowania rozkładu pionowego ozonu, całkowitej zawartości ozonu nad Polską i Europą Środkową oraz promieniowania UV-B w Polsce uzyskanych w okresie I-XII 2021 r. w ramach umowy nr GIOŚ/30/2021/DMŚ/NFOŚ z dnia 15.02.2021 r. na „Monitoring rozkładu pionowego ozonu, całkowitej zawartości ozonu nad Polską i Europą Środkową oraz promieniowania UV-B w Polsce w latach 2021 – 2022”.

1.1 Pomiary rozkładu pionowego ozonu sondą ECC 6AB

W okresie od stycznia do grudnia 2021 roku na Stacji Pomiarów Aerologicznych w Legionowie wykonywano systematycznie, co najmniej raz w tygodniu sondaże ozonowe, elektrochemiczną sondą ozonową ECC6AB produkcji Science Pump Corporation, USA. Sondaże 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 sondaży ozonowych w Legionowie

Liczba sondaży		Pułap (km)	Średnia wysokość (km)
Razem	Standard		
47	47	≥30	34,59
1	1	26 ÷ <30	27,06
Razem 48	48	≥26	34,43
3	3	<26	22,89

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

Liczba sondaży	O_3D/O_3S Współczynnik korekcji	Średni współczynnik	Uwagi
39	0,85÷1,00	0,953	$O_3D \leq O_3S$
9	1,00÷1,15	1,017	$O_3D > O_3S$
Razem 48	0,85÷1,15	0,965	$0,85 < O_3D / O_3S < 1,15$
3	-	-	Niski pułap

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 normalizacji. Wyniki porównania wskazują na bardzo dobrą zgodność

obu systemów pomiarowych. W 48 przypadkach współczynnik normalizacji mieści się w granicach $0,85 \div 1,15$, średni współczynnik wynosi 0,965.

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 01.01.2021 r. do 31.12.2021 r.

L.P.	Data	H [m]	1 O3S D	2 O3S D	1+2 O3S D	3 O3D D	NF	Uwagi
01	2021-01-06	35060	290,5	28,6	319,1	300,0	0,940	
02	2021-01-13	34995	303,8	28,6	332,4	333,0	1,002	
03	2021-01-20	34047	299,3	28,6	327,9	324,0	0,988	
04	2021-01-27	35572	354,6	28,6	383,2	385,0	1,005	
05	2021-02-03	34940	328,2	31,2	359,4	377,0	1,049	
06	2021-02-10	35650	315,4	31,2	346,6	345,0	0,995	
07	2021-02-17	35668	374,1	31,2	405,3	379,7	0,937	
08	2021-02-24	35714	306,7	31,2	337,9	323,0	0,956	
09	2021-03-03	33918	286,8	33,8	320,6	324,0	1,011	
10	2021-03-10	34514	352,6	33,8	386,4	383,0	0,991	
11	2021-03-17	33153	440,3	33,8	474,1	454,0	0,958	
12	2021-03-24	34875	343,0	33,8	376,8	351,0	0,932	
13	2021-03-31	34619	325,1	33,8	358,9	334,0	0,931	
14	2021-04-07	35184	453,9	33,4	487,2	458,0	0,940	
15	2021-04-14	34223	338,1	33,4	371,4	371,6	1,000	
16	2021-04-21	34973	383,3	33,4	416,7	384,0	0,922	
17	2021-04-28	32773	402,3	38,4	440,7	398,0	0,903	
18	2021-05-05	21865	182,8	----	----	365,0	----	Niski pułap
19	2021-05-12	33753	315,7	31,3	347,0	343,0	0,989	
20	2021-05-19	30690	302,6	54,8	357,4	353,0	0,988	
21	2021-05-26	35135	333,2	31,3	364,5	376,0	1,031	
22	2021-06-02	25127	245,9	121,9	367,9	358,0	0,973	
23	2021-06-09	34982	318,5	29,8	348,3	356,0	1,022	
24	2021-06-16	21093	129,1	----	----	333,0	----	Niski pułap
25	2021-06-30	23466	194,5	----	----	328,0	----	Niski pułap
26	2021-07-07	35304	294,1	29,8	323,9	304,0	0,939	
27	2021-07-14	35227	281,9	29,8	311,7	292,0	0,937	
28	2021-07-21	35095	306,5	29,8	336,3	327,0	0,972	
29	2021-07-28	35430	297,1	29,8	326,9	311,0	0,951	
30	2021-08-04	34870	325,0	30,8	355,8	345,0	0,970	
31	2021-08-11	34661	318,2	30,8	349,0	329,0	0,943	
32	2021-08-18	35317	317,8	30,8	348,5	329,0	0,944	
33	2021-08-25	35198	281,3	30,8	312,0	314,0	1,006	
34	2021-09-01	35135	283,5	32,0	315,5	314,0	0,995	
35	2021-09-08	33878	264,5	32,1	296,6	302,0	1,018	
36	2021-09-15	33370	267,8	33,0	300,8	275,0	0,914	
37	2021-09-22	34785	277,1	32,0	309,2	296,0	0,957	
38	2021-09-29	35525	251,9	32,0	283,9	267,0	0,940	
39	2021-10-06	36332	264,9	31,9	296,8	289,0	0,974	

L.P.	Data	H [m]	1 O ₃ S D	2 O ₃ S D	1+2 O ₃ S D	3 O ₃ D D	NF	Uwagi
40	2021-10-13	33942	323,5	31,9	355,4	330,0	0,929	
41	2021-10-20	34952	236,5	31,9	268,4	256,0	0,954	
42	2021-10-27	35313	224,3	31,9	256,2	249,0	0,972	
43	2021-11-03	33466	286,8	30,7	317,5	301,0	0,948	
44	2021-11-10	34041	253,5	30,7	284,3	283,0	0,996	
45	2021-11-18	27058	232,6	74,0	306,6	298,0	0,972	
46	2021-11-24	34171	295,9	30,7	326,6	302,0	0,925	
47	2021-12-01	33273	272,2	28,7	300,9	268,0	0,891	
48	2021-12-08	34128	304,7	28,7	333,4	316,2	0,948	
49	2021-12-15	34804	273,5	28,7	302,1	305,0	1,009	
50	2021-12-22	33880	310,2	28,7	338,9	320,0	0,944	
51	2021-12-29	34499	345,5	28,7	374,2	345,0	0,922	

- H - Pułap sondażu
1 O₃S - Zawartość ozonu w jednostkach Dobsona [D], scałkowana do wysokości pułapu danych O₃ sondażu
2 O₃S - Zawartość ozonu obliczona z średniej wartości stosunku mieszania lub z klimatycznych średnich powyżej pułapu danych O₃.
1+2 - O₃S - Całkowita zawartość ozonu w sondażu (CZO₃).
3 - O₃D - CZO₃ zmierzona spektrofotometrem naziemnym Dobsona w Belsku lub spektrofotometrem OMPS
NF - Współczynnik normalizacji: CZO₃ zmierzona spektrofotometrem / CZO₃ w sondażu

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

1.2 Pomiary natężenia 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 ze stacji były na bieżąco przekazywane i archiwizowane na dysku twardym serwera w Warszawie, a następnie opracowywane. W roku 2021 pomiary były wykonywane bezawaryjnie. Uzyskane w roku 2021 dane zostały przekazane do GIOŚ na płycie CD.

Program pomiarowy został zrealizowany w 100%.

*Wyniki pomiarów (dobowe przebiegi oraz dawki) promieniowania UV-B uzyskane z czujników SL501 z Łeby, Legionowa i Zakopanego znajdują się w **Załączniku 2** oraz **Załączniku 3**.*

1.3 Wyznaczenie całkowitej zawartości ozonu nad Polską i Europą Środkową

Satelitarny monitoring całkowitej zawartości ozonu w 2021 roku, podobnie jak w latach ubiegłych, był prowadzony z wykorzystaniem danych satelitarnych z czujnika Ozone Mapping and Profiler Suite (OMPS) znajdującego się na pokładzie satelity meteorologicznych Suomi NPP (S-NPP). Całkowita zawartość ozonu wyznaczana była za pomocą oprogramowania OMPSNADIR_SPA V.1.0.1 przygotowanego przez NASA, Direct Readout Laboratory, GODDARD SPACE FLIGHT CENTER, (<https://directreadout.sci.gsfc.nasa.gov>) i wdrożonego do pracy operacyjnej w 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 2021 roku występowały okresowe problemy z odbiorem danych satelitarnych i mapy rozkładu całkowitej zawartości ozonu nad Europą Środkową nie były generowane w ciągu 21 dni, co stanowi 5,8% badanego okresu.

Otrzymane w 2021 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 2021 r.

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

Literą "x" zaznaczone są dni z mapami ozonu całkowitego

Literą "o" zaznaczone są dni, w których był wykonywany sondaż ozonowy

Program pomiarowy został zrealizowany w 94,2%

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

2 Raport za rok 2021

2.1 Wstęp

Ozon (O_3) jest gazem występującym w atmosferze w śladowych ilościach, ale mimo to o kluczowym znaczeniu dla biosfery i zmieniającego się klimatu. Znaczenie to wynika z właściwości fizycznych ozonu pochłaniania promieniowania w pasmach UV i w podczerwieni.

Warstwa ozonowa w atmosferze Ziemi została odkryta w 1913 roku przez francuskich fizyków Fabry'ego i Buissona, którzy zauważyli, że natężenie promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni Ziemi jest zgodne z widmem promieniowania ciała doskonale czarnego o temperaturze 5500-6000K, z tym wyjątkiem, że na końcu widma ultrafioletowego nie ma promieniowania poniżej długości fali około 310nm. Założono, że to brakujące promieniowanie jest pochłaniane przez jakiś składnik atmosfery. Ostatecznie, widmo brakującego promieniowania zostało dopasowane do jednej znanej substancji chemicznej - ozonu. Właściwości ozonu zostały szczegółowo zbadane przez brytyjskiego meteorologa G.M.B. Dobsona, który skonstruował spektrofotometr – przyrząd do pomiaru całkowitej zawartości ozonu w atmosferze. W latach 1928-1958 Dobson stworzył działającą do dziś ogólnosiwiatową sieć stacji monitorowania ozonu.

Warstwa ozonowa pochłania słoneczne promieniowanie UV: w całości w stratosferze zabójcze promieniowanie UV-C (100-280nm) i częściowo, przepuszczając do powierzchni Ziemi tylko kilka procent, promieniowanie UV-B (280-320nm). Cieńsza warstwa ozonowa zwiększa ilość słonecznego promieniowania UV-B, które negatywnie wpływa na cały ekosystem, w tym na zdrowie człowieka (np. nowotwory skóry, zaćma czy osłabienie układu odpornościowego).

Ozon powstaje w górnych warstwach atmosfery (Chapman, 1930) w wyniku interakcji intensywnego słonecznego promieniowania UV z tlenem (O_2). Po dysocjacji cząsteczki tlenu na atomy, tlen atomowy łączy się z inną cząsteczką O_2 tworząc ozon. Ozon rozpada się gdy reaguje z atomem tlenu. Ozon może się rozpadać również w katalitycznych cyklach reakcji z substancjami rodnikowymi zawierającymi atomy: azotu, wodoru, chloru, bromu oraz jodu. Koncentracja ozonu w atmosferze jest wynikiem równowagi pomiędzy promieniowaniem słonecznym, które tworzy ozon i reakcjami chemicznymi, które go niszczą. Średnio w atmosferze przypadają trzy cząsteczki ozonu na milion cząsteczek powietrza. Maksymalne nasycenie atmosfery ~ 10 cząsteczek O_3 na milion cząsteczek powietrza występuje latem na wysokości ~ 35 km. Ze źródła, w równikowej średniej stratosferze, ozon jest przenoszony w stronę biegunów. Stratosferyczna warstwa ozonowa na wysokościach 10-50km zawiera średnio 90% całkowitej zawartości ozonu w atmosferze.

Dolna granica stratosfery (tropopauza) ogranicza zasięg konwekcji, stabilizując klimat na powierzchni Ziemi. Część ozonu przenika przez tropopauzę do troposfery. Stratosferyczne wtargnięcia ozonu są częstsze późną wiosną, gdy strumień polarnej masy powietrza przemieszcza się w kierunku zachodnich Stanów Zjednoczonych, po zimach w których występowało zjawisko La Niña. Widocznym przykładem takiego zjawiska w Europie jest zaobserwowanie na szczycie Zugspitze (2962m n.p.m., Garmisch-Partenkirchen, Niemcy) podwojenia stratosferycznej składowej ozonu od połowy lat siedemdziesiątych do 2005 r. (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 powietrza na trajektoriach wykazały, że warstwy stratosferycznych intruzji w troposferze są obecne aż w 84% dni pomiarowych. Głębokie wtargnięcia stratosferyczne mogą podnieść poziom ozonu nawet na niższych wysokościach n.p.m. (Lin i in., 2015), jednak szanse na przedostanie się intruzji ozonu stratosferycznego do powierzchni Ziemi są niskie. Intruzje stratosferyczne są identyfikowane przez bardzo niskie wysokości tropopauzy ozonowej, bardzo niskie wilgotności oraz wysokie stężenia ozonu przyziemnego. Epizody transportu ozonu stratosferycznego do troposfery mogą mieć poważny wpływ na jakość powietrza, budżet ozonu troposferycznego i klimat.

Ozon troposferyczny jest silnym gazem cieplarnianym, wpływającym na zmianę klimatu (<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. Z wieloletnich serii obserwacji metodą pasków Schoenbeina (papierków testowych pokrytych jodkiem potasu i skrobią kukurydzianą) wiemy, że podczas ery przemysłowej stężenie ozonu przyziemnego wzrosło bardziej niż dwukrotnie. Potwierdza to także wieloletnia seria obserwacji ozonu przyziemnego w Krakowie w latach 1854-1878 (Degórska i in., 1996). W oparciu o sugerowane scenariusze wzrostu populacji i konsumpcji energii, obliczenia modelowe sugerują, że przyszłe zmiany O_3 będą największe w tropikach, szczególnie w Azji.

Już na początku lat 1970. w pomiarach na kilku stacjach (posiadających dobrze skalibrowane dane całkowitej zawartości ozonu (CZO_3), jak np. stacja w Belsku) w umiarkowanych szerokościach geograficznych półkuli północnej zauważono spadkowy trend zawartości ozonu w atmosferze. Pomiaru te stały się inspiracją do intensyfikacji badań w dziedzinie chemii atmosfery.

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 nawet przy niewielkiej ilości światła słonecznego rozpoczyna katalityczny cykl rozpadu ozonu.

W 1985 roku na półkuli południowej w rejonie Antarktydy odkryto nieoczekiwane zjawisko sezonowego spadku ozonu w atmosferze, ponad 50% w stosunku do norm wieloletnich („dziura ozonowa”). Dziurę ozonową definiuje się jako obszar z zawartością ozonu w kolumnie poniżej 220D ($1D = 2,69 \times 10^{20} O_3/m^2$), to jest poniżej wcześniej obserwowanych danych historycznych. Dziura ozonowa pojawia się wiosną każdego roku na rozległym obszarze, nawet do 30 milionów km^2 . Wir polarny rozpadający się późną wiosną w połączeniu z silną adwekcją subtropikalną może znacznie zwiększać poziom promieniowania UV-B na powierzchni Ziemi. W 2021 roku dziura ozonowa nad Antarktydą po raz pierwszy w historii pomiarów zamknęła się dopiero w grudniu (australijskie lato).

W obawie o dalszy los warstwy ozonowej w roku 1987 podpisano Protokół Montrealski (PM). Ponieważ szkodliwe działanie CFC na warstwę ozonową było dobrze udokumentowane, ich wytwarzanie zostało zakazane. Dzięki uregulowaniu produkcji i zużycia substancji zubożających warstwę ozonową w Protokole Montrealskim (1987), stężenie ozonu stratosferycznego przestało spadać pod koniec lat 1990. Pomiaru atmosferyczne potwierdzają skuteczność PM w zmniejszaniu

ilości substancji szkodliwych dla warstwy ozonowej. Pierwszym pozytywnym sygnałem potwierdzającym regenerację warstwy ozonowej są badania Solomon i in. (2016), którzy wykazali, że dziura ozonowa nad Antarktydą istotnie się kurczy. Przy ścisłym przestrzeganiu PM powrót warstwy ozonowej do stanu niezaburzonego potrwa kilkadziesiąt lat, z powodu długiego okresu półtrwania kluczowych substancji CFC.

Ozon stratosferyczny znajduje się w stanie bardzo delikatnej równowagi. Rola chloru i bromu w zubożeniu warstwy ozonowej w stratosferze Antarktyki jest dobrze znana. Rola jodu w destrukcji ozonu nie jest jeszcze dobrze poznana. Badania Cuevas i in. (2022) pokazują, że jod może zwiększyć niszczenie ozonu w dolnej części warstwy ozonowej podczas wiosny nad Antarktydą, a nawet zdominować jego utratę w lecie. Jod może również zmienić, o kilka dni, czas sezonowego formowania się i zamykania dziury ozonowej.

W ostatnich dziesięcioleciach badany jest wpływ aktywności słonecznej na stężenie ozonu w atmosferze. Dynamika górnych warstw atmosfery jest silnie kontrolowana przez intensywność słonecznego promieniowania UV. Pojawienie się i zastosowanie zaawansowanego modelowania atmosferycznego do problemu relacji słoneczno-klimatycznych ujawniło, że sprzężenie stratosfera-troposfera odgrywa istotną rolę. Badania Li i in. (2019) ujawniły wkład cyrkulacji atmosferycznej w relacje słoneczno-klimatyczne. Fakt, że długość cykli słonecznych jest zmienna, sugeruje, że fazy mogą być czynnikiem przyczyniającym się do relacji słoneczno-klimatycznych i wpływać na zmienność ozonu. Ostatnie badania Chidinma i in. (2021) wykazały spadek CZO₃ przy niskiej aktywności słonecznej i wzrost w fazie wysokiej aktywności.

Codzienne pomiary całkowitej zawartości ozonu w atmosferze spektrofotometrem Dobsona w Polsce rozpoczęto na stacji IGF PAN w Belsku w marcu 1963 roku. Program regularnych cotygodniowych sondaży ozonowych sondami elektrochemicznymi na Stacji Pomiarów Aerologicznych IMGW-PIB w Legionowie rozpoczęto w roku 1979.

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

W raporcie przedstawiono analizę stanu warstwy ozonowej i poziomu promieniowania UV-B na podstawie pomiarów wykonanych w IMGW-PIB w 2021 roku.

2.2 Ocena stanu warstwy ozonowej w 2021 roku na podstawie wyników monitoringu.

Elektrochemiczne sondy ozonowe są stosowane do uzyskiwania pionowych profili ozonu w atmosferze od ponad 50 lat (Brewer i Milford, 1960, Komhyr 1969). W sondach tych wykorzystywana jest szybka reakcja ozonu w wodnym roztworze jodku potasu (KI). W sondach typu ECC komory czujnika ozonu są połączone mostkiem jonowym, który zapobiega wyrównywaniu stężeń elektrolitu. Metoda pomiaru ozonu polega na absorpcji ozonu do roztworu katodowego i utlenianiu jonów jodu. Przy założeniu pełnego bilansu stechiometrycznego 1:1 (O₃ = I₂) jedna

cząsteczka ozonu powoduje przepływ prądu dwóch elektronów w zewnętrznym układzie elektrycznym.

Sondy ozonowe są przyrządami unoszonymi w powietrzu przez balony meteorologiczne, elektronicznie sprzężonymi ze standardową radiosondą meteorologiczną do przesyłania danych do odbiornika naziemnego. Sondy ozonowe zapewniają pomiar pionowego rozkładu ozonu w bardzo wysokiej rozdzielczości (~150m) do wysokości 30-35km. Każda sonda ozonowa jest unikalnym instrumentem, którą należy starannie przygotować na 3-7 dni przed wzlotem. W dniu wzlotu wyznaczana jest wydajność pompki zasysającej powietrze z ozonem do roztworu KI oraz mierzony tzw. prąd tła (to jest prąd czujnika w czystym powietrzu pozbawionym ozonu). Kalibracja czujników wprowadza pewną niepewność w seriach danych ozonowych. Testy w komorach symulacyjnych pokazują względne odchylenie ~5% między sondami od dwóch producentów, gdy czujniki sond są napełnione tym samym roztworem. Podobnie, błąd systematyczny 3%–10% występuje, gdy czujniki sond ozonowych tego samego typu są napełnione roztworami KI, różniącymi się objętością lub stężeniem. Te różnice należy uwzględnić na etapie przygotowania i korekty przetwarzania danych pomiarowych. Od 2004 r. sponsorowany przez WMO/GAW ASOPOS (Ocena Standardowych Procedur Operacyjnych Sond Ozonowych) zespół ekspertów okresowo ocenia dane sond ozonowych ECC oraz wyniki eksperymentów terenowych i laboratoryjnych z referencyjnymi pomiarami fotometrycznymi (Smit i in., 2012). Międzynarodowe wysiłki na rzecz poprawy jakości danych ozonu i ponownej oceny zapisów danych historycznych przyniosły znaczną poprawę dokładności danych na globalnej sieci Global Atmosphere Watch (GAW). Jednak w latach 2014 – 2016 w sondażach ozonowych na 14 z 37 regularnie raportujących stacji zauważono nagły spadek ozonu w stratosferze w stosunku do pomiarów satelitarnych (Stauffer i in., 2017). Zmiany sprzętowe w sondzie ozonowej były prawdopodobnie głównym czynnikiem ale wciąż trwają badania mające na celu zrozumienie tego spadku. Pokazuje to, jak ogromne znaczenie ma regularna ocena danych dotyczących ozonu. Najnowsze zalecenia dotyczące standardowej procedury przygotowania sond ozonowych do wzlotu opracował zespół ekspertów ASOPOS2 w sierpniu 2021 (GAW Report No. 268). Na światowej sieci WMO GAW działa obecnie ponad 100 stacji sondaży ozonowych. Dane z pomiarów sondażowych służą do kalibracji satelitów (Huang, i in., 2017), klimatologii w algorytmach satelitarnych oraz do analizy trendów ozonowych.

Od stycznia 1979 do maja 1993 w sondażach ozonowych w Legionowie wykorzystywano sondę OSE typu Brewer-Mast, pracującą w systemie radiosondażowym METEORIT/Marz. Od czerwca 1993 roku pomiary są wykonywane z użyciem sondy ECC5A/6A w systemie radiosondażowym Vaisala DIGICORA. Od 1995 roku, w latach chłodnych zim w stratosferze na półkuli północnej, wykonywane są dodatkowe sondaże ozonowe w projekcie Match – to jest statystyczne badanie procesu fotochemicznego niszczenia ozonu w stratosferze na trajektoriach cząstek w arktycznym wirze polarnym.

2.3 Analiza rozkładu pionowego ozonu nad Legionowem w 2021 roku.

W roku 2021 kontynuowano systematyczne sondáže ozonowe rozpoczęte w 1979 roku. Rutynowo w każdą środę w terminie 12UT wykonywano sondaż ozonu z użyciem elektrochemicznej sondy ozonowej ECC6AB, unoszonej w powietrzu przez balon meteorologiczny do maksymalnej wysokości 35km.

Na podstawie serii pomiarów z lat 1994 - 2021 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 podawane jest w hektopaskalach (hPa), przy czym 1hPa = 100Pa. Paskal (Pa) jest to ciśnienie występujące na powierzchni płaskiej 1m², na którą działa prostopadle siła 1 niutona (N). Zawartość ozonu wyrażona jest w jednostkach Dobsona (1D = 2,69x10²⁰ molekuł O₃/m²). W Tabeli 5 przedstawiono zawartości ozonu dla miesięcy 2021 roku i okresu 1994-2020, a także standaryzowane odchylenia średnich miesięcznych roku względem średniego wieloletniego rozkładu. Standaryzowane odchylenia pokazują anomalne zawartości ozonu w atmosferze, jeśli wartości odchyłeń przekraczają +2 lub -2.

W średnim wieloletnim 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 ozonu rośnie z wysokością do maksimum w warstwie 50/30hPa (~21-24km), ale najwyższe stężenia są osiągnięte w średniej stratosferze. Ozon ze źródła nad równikiem jest transportowany w stronę bieguna, kumuluje się w dolnej stratosferze w wysokich i umiarkowanych szerokościach geograficznych i osiąga maksymalną zawartość na przełomie zimy i wiosny. Maksimum roczne ozonu w warstwie granicznej (100/700hPa) świadczy o transporcie ozonu do troposfery, wysokie wartości ozonu latem wskazują na fotochemiczne źródło ozonu blisko powierzchni Ziemi.

W średnich miesięcznych zawartościach ozonu nad Legionowem w 2021 roku odnotowano istotne odchylenia od uśrednionego przebiegu rocznego. W styczniu ujemna anomalia obejmowała średnią stratosferę powyżej 30hPa. Obniżone koncentracje ozonu przesunęły się w dół, do dolnej stratosfery w lutym i marcu oraz do troposfery później na wiosnę. Anomalie ozonu przeciwnego znaku wystąpiły w dolnej stratosferze w kwietniu i sierpniu a w warstwie granicznej w lipcu. Zimowy wzrost ozonu został poprzedzony dodatnimi anomaliami w warstwie największej koncentracji ozonu.

Tabela 5. Zawartość ozonu w warstwach atmosfery nad Legionowem w 2021r.

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	8,2	7,4	8,2	14,1	18,0	30,2	43,7	44,9	58,8	32,5	34,0	40,2
	b	8,3	7,6	8,8	11,8	16,0	29,9	35,7	40,5	62,9	39,6	41,1	40,0
	c	-0,1	-0,2	-0,7	0,7	0,6	0,1	1,5	1,3	-1,0	-3,1	-1,9	0,0
Luty	a	9,2	8,3	9,2	13,2	20,1	24,3	29,4	43,0	70,9	44,4	46,1	46,0
	b	9,5	8,0	9,4	14,2	18,9	31,9	37,7	43,4	63,5	40,0	43,2	45,3
	c	-0,2	0,5	-0,2	-0,2	0,3	-1,0	-1,1	-0,1	1,2	1,2	0,7	0,3
Marzec	a	11,9	8,9	9,2	12,2	20,1	30,0	34,8	44,5	70,9	43,8	47,5	49,5
	b	11,1	8,8	10,9	17,8	22,6	34,8	37,6	41,9	62,1	38,7	44,4	48,6
	c	0,6	0,2	-0,9	-1,0	-0,7	-0,7	-0,4	0,6	1,6	1,4	0,8	0,4
Kwiecień	a	12,6	9,6	11,7	22,2	29,5	43,9	40,7	46,9	68,8	41,0	51,3	51,1
	b	12,9	10,0	12,9	18,6	21,9	30,9	34,2	39,6	60,0	38,1	47,0	50,9
	c	-0,2	-0,5	-0,5	0,6	1,7	2,2	1,2	1,7	2,0	0,8	0,8	0,1
Maj	a	12,3	9,3	12,4	21,6	21,5	23,3	28,1	36,1	58,0	35,6	49,1	50,7
	b	13,7	10,7	12,3	16,9	20,8	28,0	29,7	35,8	55,6	37,6	49,1	50,9
	c	-1,0	-1,6	0,1	0,9	0,2	-1,1	-0,5	0,1	0,7	-0,7	0,0	-0,1
Czerwiec	a	12,6	9,6	12,6	12,3	20,1	29,3	28,1	32,4	52,0	41,9	50,9	53,6
	b	13,5	10,8	12,7	12,8	16,4	23,9	25,2	31,7	53,5	39,6	52,8	50,1
	c	-0,5	-1,0	-0,0	-0,1	1,0	1,3	0,9	0,3	-0,7	1,0	-0,9	1,3
Lipiec	a	16,2	10,8	12,2	8,9	10,9	18,5	22,7	30,3	52,2	40,4	54,5	47,3
	b	12,9	10,5	12,9	14,8	14,7	20,7	23,2	29,8	51,3	38,8	52,0	49,5
	c	2,0	0,3	-0,5	-1,1	-1,6	-1,1	-0,2	0,2	0,3	0,8	0,8	-1,0
Sierpień	a	12,0	9,8	11,6	18,8	15,0	23,6	27,9	32,0	49,5	39,8	53,4	47,9
	b	12,8	10,2	12,3	10,3	11,2	18,3	23,3	28,8	48,0	37,1	49,7	49,9
	c	-0,5	-0,4	-0,5	2,8	1,6	1,7	1,6	1,5	0,3	0,8	1,0	-1,3
Wrzesień	a	12,9	9,8	10,9	9,1	8,1	15,2	24,3	30,5	49,6	37,1	46,3	49,4
	b	11,3	9,4	10,4	8,9	8,9	17,4	24,0	29,6	47,8	34,5	44,4	48,4
	c	1,2	0,4	0,4	0,1	-0,4	-0,7	0,1	0,4	0,5	0,8	0,5	1,2
Październik	a	10,0	7,8	9,9	8,1	7,7	17,6	23,5	32,4	51,6	37,5	42,2	45,1
	b	9,6	8,4	9,7	9,2	8,9	16,9	23,6	29,4	47,5	34,2	40,7	45,7
	c	0,3	-1,0	0,1	-0,3	-0,6	0,2	-0,0	1,3	1,6	1,0	0,4	-0,3
Listopad	a	10,1	8,3	11,1	9,4	9,6	15,8	23,8	34,4	56,4	41,3	45,5	44,1
	b	8,4	7,8	8,7	8,3	9,3	19,2	26,0	30,3	50,5	36,4	38,9	40,7
	c	1,8	1,0	2,1	0,4	0,1	-0,8	-0,5	1,6	2,1	1,8	1,5	1,2
Grudzień	a	8,9	8,1	8,4	7,5	10,4	23,2	35,2	39,5	64,4	42,6	41,5	39,1
	b	8,0	7,6	8,8	8,9	11,1	23,2	29,0	33,7	55,0	38,1	39,3	38,5
	c	0,9	1,3	-0,3	-0,5	-0,2	-0,0	1,4	1,7	2,5	1,6	0,6	0,3

a – średnie miesięczne (D) w 2021 roku.

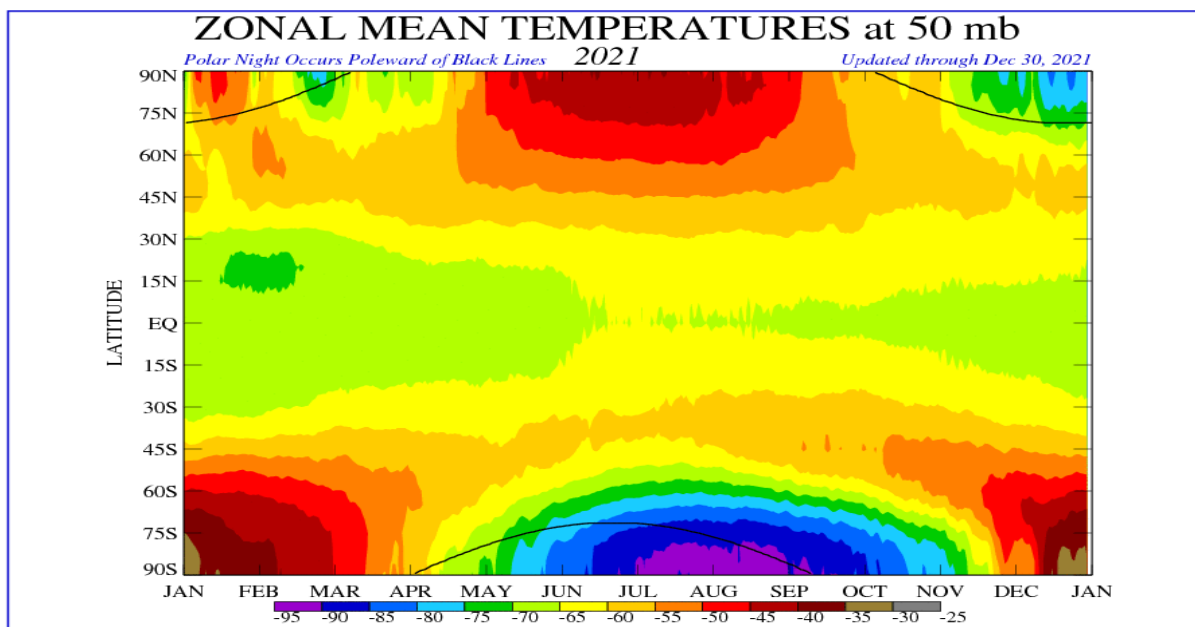
b – średnie miesięczne wieloletnie (D) z lat 1994-2020.

c –standaryzowane odchylenie: $(a-b)/\sigma$, gdzie σ jest odchyleniem standardowym średnich miesięcznych z lat 1994-2020

Zimowo-wiosenne ubytki ozonu stratosferycznego

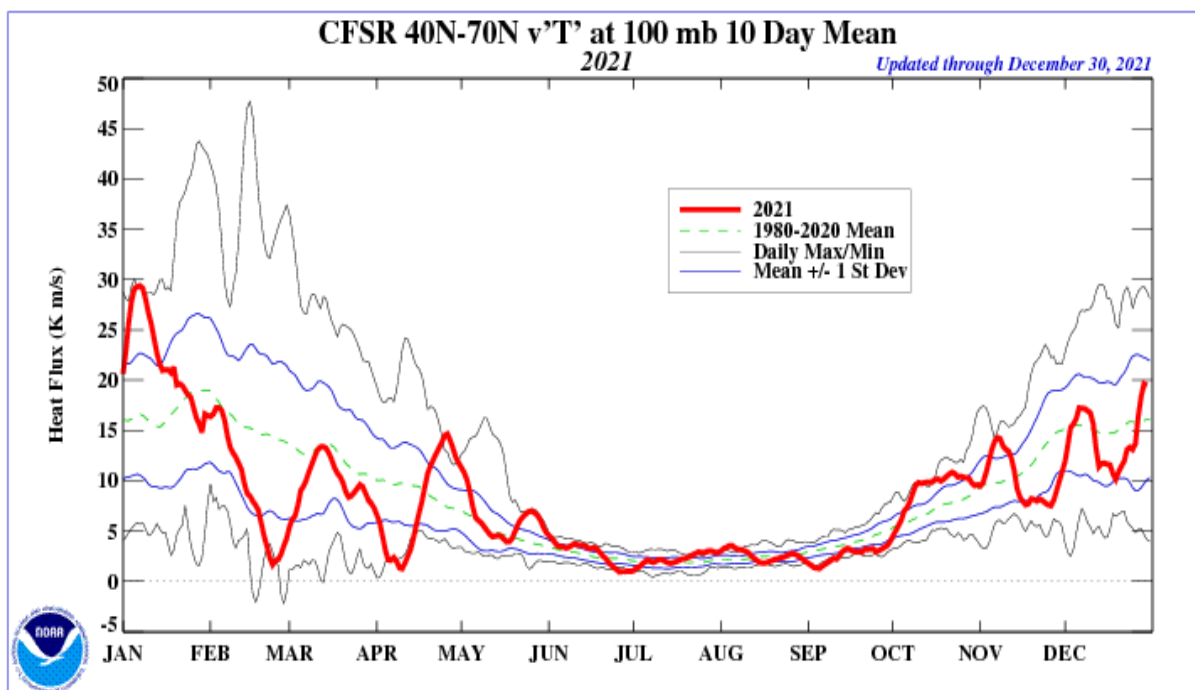
Podczas zimy 2020/2021 na półkuli północnej, poza krótkim okresem w grudniu, minimalne temperatury w stratosferze na powierzchni 50hPa utrzymywały się powyżej -78°C (Rys. 1), to jest powyżej progu formowania Polarnych Chmur Stratosferycznych (PSC), co w zasadzie wykluczyło możliwość fotochemicznego niszczenia ozonu z udziałem związków chloru. Od początku roku silny strumień ciepła makro-turbulencyjnego w strefie $40\text{-}70^{\circ}\text{N}$ przez warstwę 100hPa (Rys. 2) ograniczał powierzchnię wiru polarnego (Rys. 3). Na początku trzeciej dekady stycznia wir wydłużył się i przesunął do umiarkowanych szerokości geograficznych północnych (Rys. 4). Gdy Europa Środkowa znalazła się w jego zasięgu kolumna atmosferycznego ozonu była obniżona o około 15% (Rys. 5) a w profilu ozonu nad Legionowem pojawiła się ujemna anomalia w średniej stratosferze (Rys. 6). W dalszej części zimy 2020/21 wir polarny stał się bardziej stabilny w Arktyce i zubożone w ozon masy powietrza polarnego nie docierały już nad Polskę.

Z analizy map WMO wynika, że największy sezonowy ubytek CZO_3 , do 40% poniżej średniej wieloletniej, miał miejsce w rejonie północnego Pacyfiku na początku marca (Rys. 7). Prawdopodobną przyczynę wyjaśniają badania Sagi i in. (2017), którzy na podstawie wieloletnich (2002-2013) obserwacji Odin/SMR wykazali, 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). Stwierdzono, że niszczenie ozonu powodowane przez NO_x może się rozpocząć w czasie zimy i/lub na wiosnę, kiedy słabnie wir polarny.

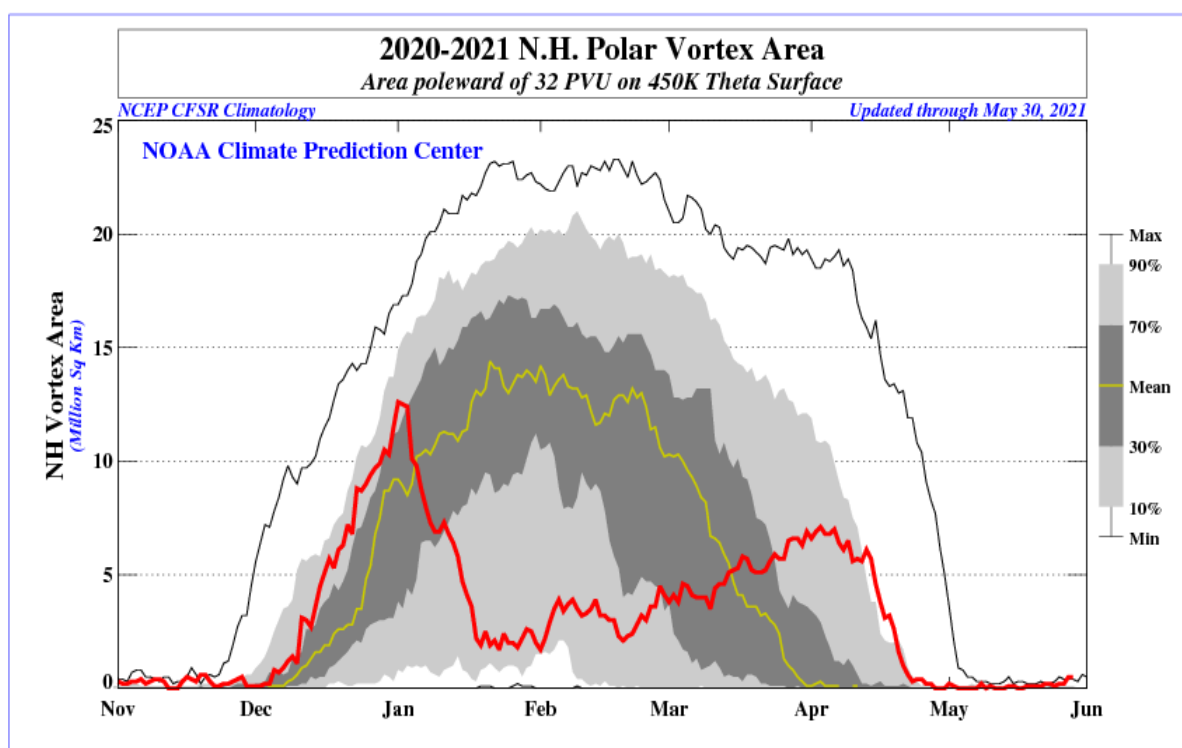


Rysunek 1. Średnia temperatura strefowa na powierzchni izobarycznej 50hPa dla 2021 r. Obszar nocy polarnej wokół biegunów zaznaczono czarną linią.

https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/stratosphere/polar/gif_files/time_lat_t50_2021.gif

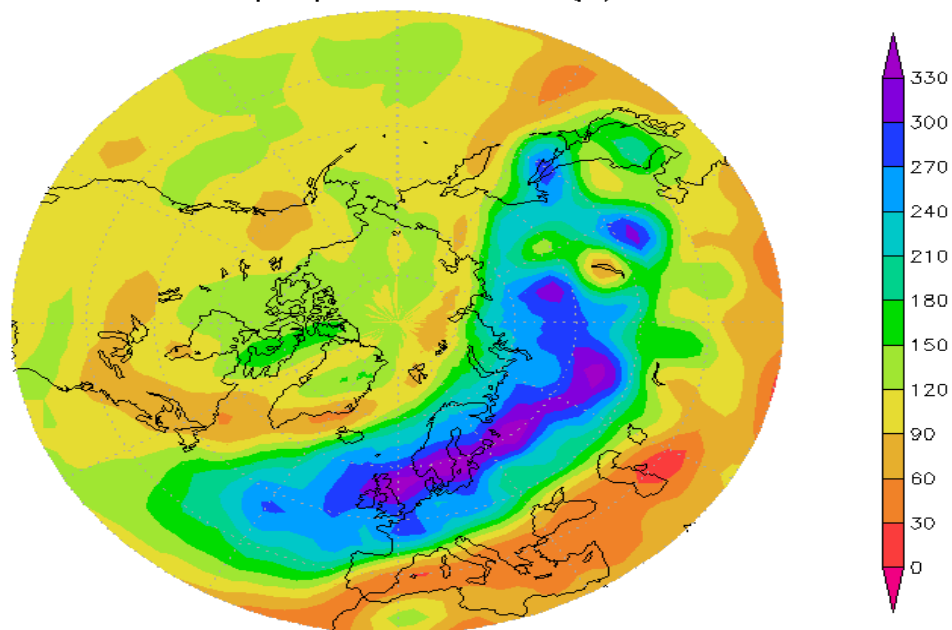


Rysunek 2. Zmiany w 2021 r. uśrednionego 10-dniowego strumienia ciepła makro-turbulencyjnego w strefie 40-70°N przez powierzchnię izobaryczną 100mb (15,5km).



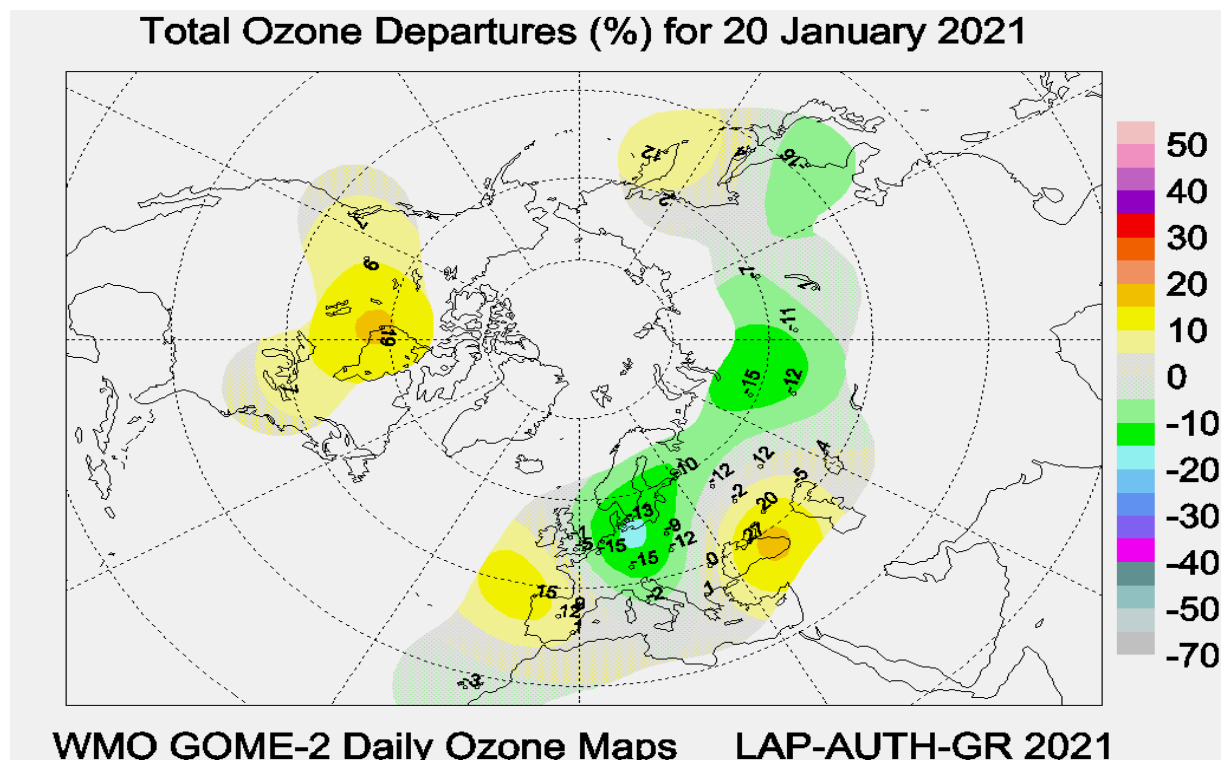
Rysunek 3. Powierzchnia arktycznego wiru polarnego na powierzchni izentropowej 450K w sezonie zimowo-wiosennym 2020/2021, na tle statystyki z lat ubiegłych według NOAA CPC.

NIES STRAS potential vorticity ($10^{-6} \text{m}^2 \text{s}^{-1} \text{kg}^{-1} \text{K}$) NCEP Reanalysis
 2021/01/20 12Z $\theta=675(\text{K})$

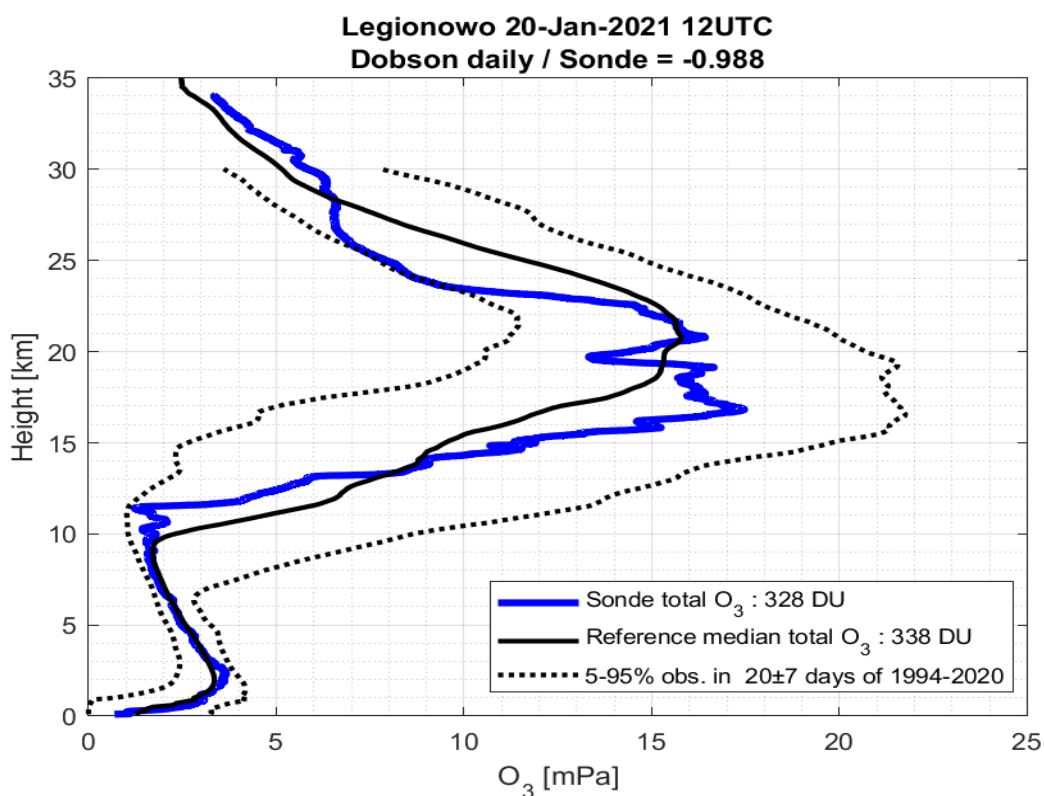


Rysunek 4. Położenie wiru polarnego nad półkulą północną na powierzchni izentropowej 675K (~25km) w dniu 20 stycznia 2021, 12UT na podstawie danych re-analiz NCEP, opracowane według Japońskiego Instytutu Badań Środowiska (NIES)

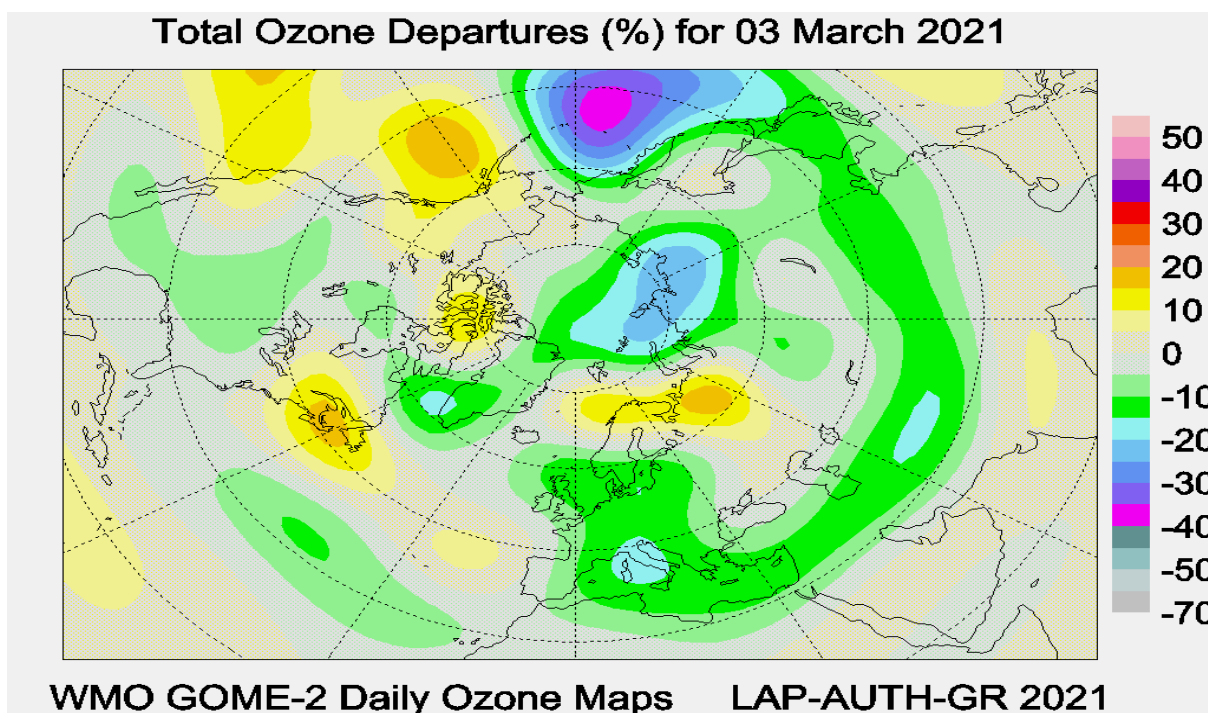
<https://db.cger.nies.go.jp/gem/stras/en/reanalysis.html?date=20210120&polar=n&k=675>



Rysunek 5. Mapa WMO procentowych odchyleń CZO₃ nad półkulą północną 20 stycznia 2021 r.



Rysunek 6. Sondaż ozonowy w Legionowie 20 stycznia 2021, 12 UT, na tle zmienności wieloletniej.



Rysunek 7. Mapa WMO GOME-2 procentowych odchyleń CZO3 nad półkulą północną 3 marca 2021 r.

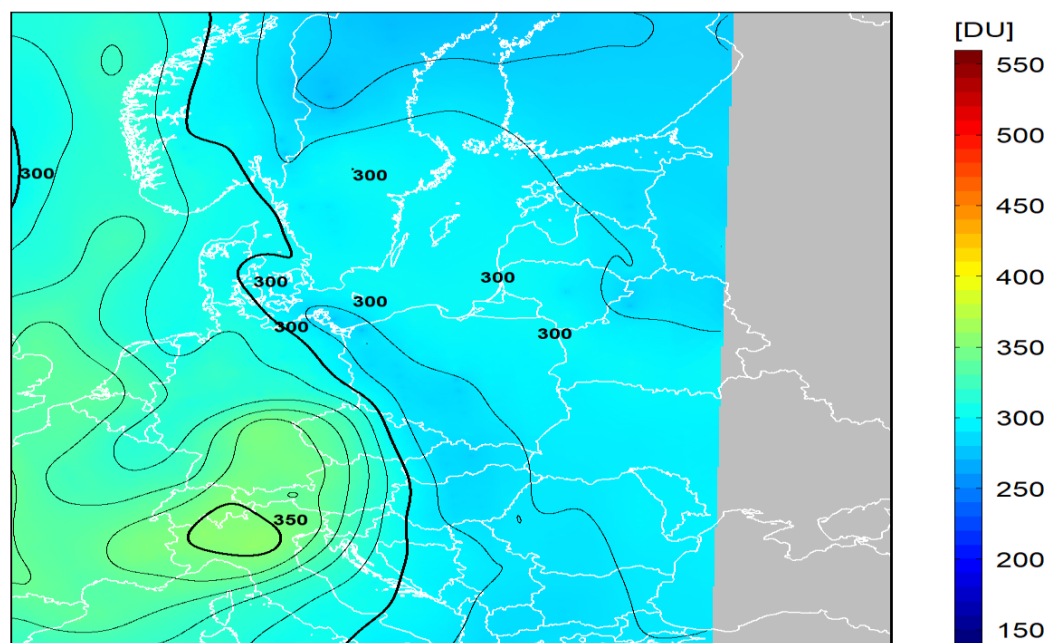
Letnia anomalia ozonu 14 lipca 2021

Niezwykle rzadkie są epizody, gdy powietrze stratosferyczne dynamicznie zanurza się w troposferze i dociera do powierzchni Ziemi, przynosząc ze sobą wysokie stężenia ozonu. Sytuację taką obserwowano 14 lipca 2021 r. w wyżowym układzie cyrkulacji z bardzo niską całkowitą zawartością ozonu nad Polską i wzrostem CZO₃ w rejonie Alp (Rys. 8). W sondażu w Legionowie zaobserwowano anomalny wzrost ciśnienia cząstkowego ozonu w dolnej troposferze, z maksymalnym stosunkiem mieszania ozonu ponad 80ppbv na wysokości 500m n.p.m. (Rys. 9). Analiza cząstek powietrza na trajektoriach docierających w rejon anomalii sugeruje dynamiczne zejście powietrza w dół, w wyniku transportu ze stratosfery (Rys. 10).

Podobny epizod przyływu ozonu pochodzącego ze stratosfery, aż do powierzchni Ziemi, zaobserwowano nad Niziną Północno-chińską (Chen i in., 2022). Pomiary godzinowe ujawniły, że stężenia ozonu przyziemnego wynosiły 80-90ppbv w kilku miastach od 23:00 w dniu 31 lipca do godziny 6:00 w dniu 1 sierpnia 2021 r. Pomiar wykazał, że ten przyływ ozonu nastąpił nagle i osiągnął 40-50ppbv w ciągu ~10 minut. Jednocześnie spadł stężenie powierzchniowego tlenu węgla (CO) sugeruje, że ten przyziemny wzrost ozonu wynikał z transportu w dół stratosferycznej masy powietrza bogatej w ozon i ubogiej w CO. Potwierdziły to zmiany w profilach wilgotności i ozonu. Podobne epizody pod względem jego wielkości, obszaru, gwałtowności i czasu trwania są bardzo rzadko dokumentowane.

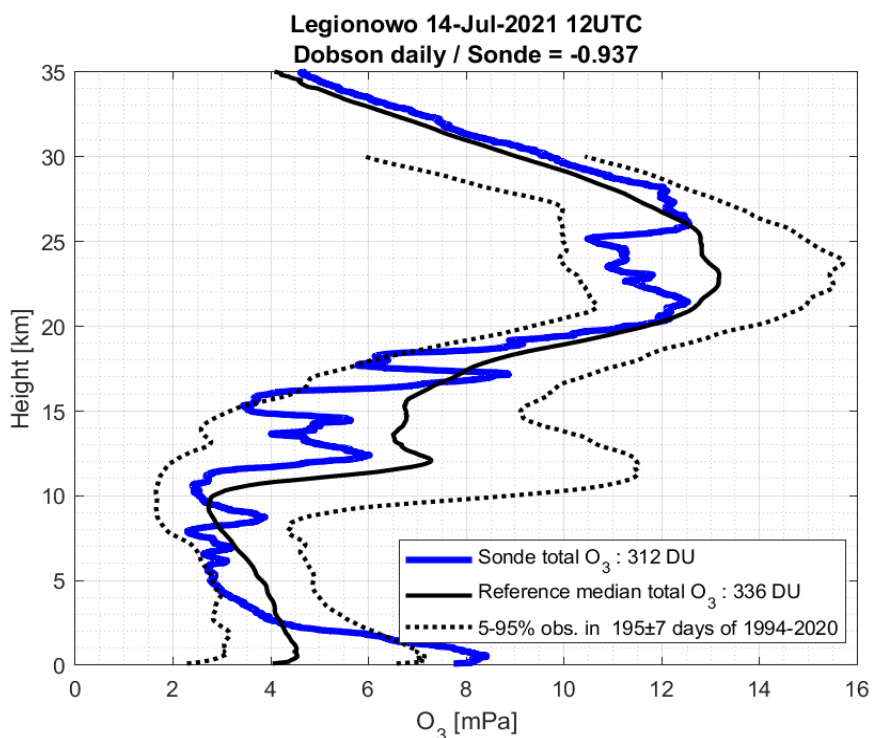
2021-07-14 godz. 12:06:13 - 12:13:20 UTC

Całkowita zawartość ozonu (O₃) w kolumnie atmosfery

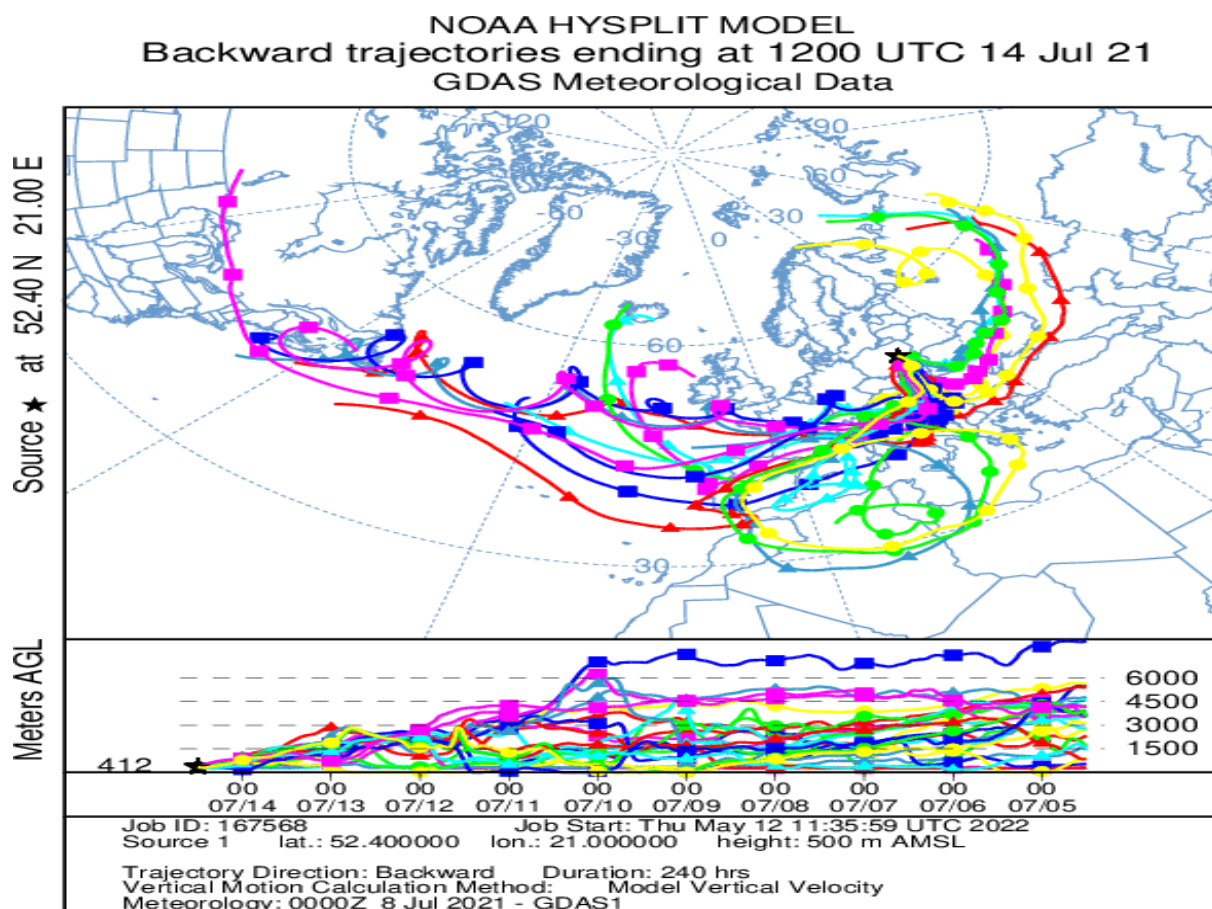


dane satelitarne: Suomi-NPP/OMPS

Rysunek 8. Satelitarny monitoring ozonu nad Polską z wykorzystaniem danych z czujnika OMPS, mapa całkowitej zawartości ozonu z dnia 14 lipca 2021 r.



Rysunek 9. Ciśnienie cząstkowe ozonu nad Legionowem 14 lipca 2021, 12UT, na tle zmienności wieloletniej.



Rysunek 10. Trajektorie wsteczne HYSPLIT dla zespołu cząstek powietrza kończących się nad Legionowem 14 lipca 2021 12UT na wysokości 500m n.p.m.

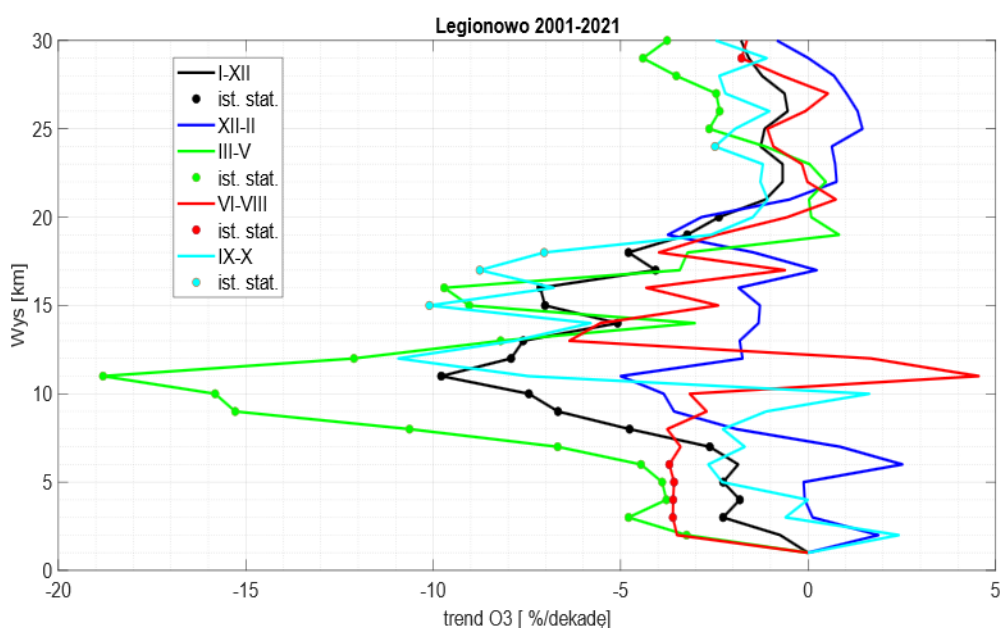
Trendy w pionowym profilu ozonu w latach 1994-2021

Do badania stanu warstwy ozonowej szczególnie przydatne są pionowe profile ozonu, a nie całkowite kolumny ozonu, ponieważ te ostatnie mogą wykazywać regenerację ozonu, gdy w rzeczywistości zubożenie w dolnej stratosferze może być ukryte przez zwiększenie troposferycznego ozonu (Ball i in., 2018).

Na podstawie połączonych rekordów danych satelitarnych w zakresie 60°S–60°N dla okresu 2000-2021 potwierdzono wcześniejsze wyniki pokazujące wzrost ozonu w górnej stratosferze. Jest to pozytywny efekt działania PM.

Nowym sygnałem trendowym jest zaobserwowany znaczny spadek ozonu w tropikach na powierzchni około 35hPa (~24km). Porównanie aktualnych trendów ozonu pochodzących z danych naziemnych z trendami satelitarnych danych ozonu wykazało zgodność, szczególnie w tropikach i europejskich regionach alpejskich (Godin- Beekman i in., 2022).

Do analizy stanu warstwy ozonowej nad Polską wykorzystano dane zhomogenizowanej serii sondażu ozonowych w Legionowie dla okresu 2001-2021. Zastosowano procedury homogenizacyjne opisane na stronie: <https://github.com/denizpoyraz/o3s-dqa-homogenization>. Wybrano podzbiór danych sond ozonowych z zalecanymi współczynnikami normalizacji Dobsona 0,9-1,1, które osiągnęły powierzchnię 16hPa. Następnie obliczono zawartości ozonu w 1km warstwach kończących się na ustalonych wysokościach 1-30km n.p.m. W przypadku braku w profilu danych z 10 lub więcej warstw, cały profil odrzucano. Oszacowano trend całoroczny i trendy sezonowe metodą liniowej regresji, z użyciem znormalizowanych zawartości średnich miesięcznych. Wyniki obliczenia trendów ozonu nad Legionowem w okresie 2001-2021 obrazuje rysunek 11. Trendy są wyrażone w procentach na dekadę, wyróżniono trendy istotne statystycznie na poziomie ufności 0,05.



Rysunek 11. Całoroczny i sezonowe trendy ozonu nad Legionowem w latach 2001-2021.

Otrzymane wyniki pokazują:

- niewielki spadek ozonu w średniej stratosferze w ciepłej porze roku,
- wyhamowanie dużych spadków ozonu w dolnej stratosferze,
- duży spadek ozonu w sąsiedztwie tropopauzy w ciepłej porze roku,
- spadek ozonu w dolnej troposferze w ciepłej porze roku.

W ciągu ostatnich 21 lat największe zmiany ozonu były obserwowane w ciepłej porze roku.

Niewielki spadek ozonu w średniej stratosferze w ciepłej porze roku można wiązać z podtlenkiem azotu (N_2O), mającym antropogeniczne i naturalne źródła. W przeciwieństwie do CFC, stosowanie i emisja N_2O nie są regulowane Protokołem Montrealskim. Podtlenek azotu jest największą pojedynczą substancją zubożającą warstwę ozonową, która, jeśli jej emisje nie będą kontrolowane pozostanie dominującą substancją zubożającą warstwę ozonową w XXI wieku.

Prawdopodobnie spadkowy trend ozonu w średniej stratosferze w ciepłej porze roku nad Legionowem jest przeszacowany. Na wielu stacjach sondazy ozonowych po 2013 roku obserwowano niższe koncentracje ozonu w średniej stratosferze w stosunku do pomiarów satelitarnych (Stauffer i in., 2017).

Po spadkowej tendencji ozonu w sezonie zimy i wiosny w szczytowym okresie nasycenia atmosfery substancjami niszczącymi warstwę ozonową (Litynska i in., 1997) nastąpiło wyhamowanie spadkowej tendencji ozonu w dolnej stratosferze. Trudno jednak ocenić jak duża część tych zmian jest generowana przez chemię, a jaka przez dynamikę atmosfery. Diallo i in. (2018, 2019) wykazali istnienie strukturalnej zmiany cyrkulacji prowadzącej do osiadania ozonu w sezonie zimowym na półkuli północnej w warstwie maksimum ozonu. Uzyskanie zgodności pomiędzy obserwowanymi i modelowanymi trendami ozonu stratosferycznego pozostaje wciąż wyzwaniem dla współczesnych modeli chemicznych i dynamicznych.

Dla zrozumienia stanu warstwy ozonowej ważne jest zrozumienie trendów ozonu w otoczeniu tropopauzy. Wzrost ozonu w troposferze swobodnej przyczyniałby się do ocieplania klimatu a spadek ozonu w najniższej części dolnej stratosfery oznaczałby, że coś jest nie tak w atmosferze, pomimo sukcesów Protokołu Montrealskiego (PM).

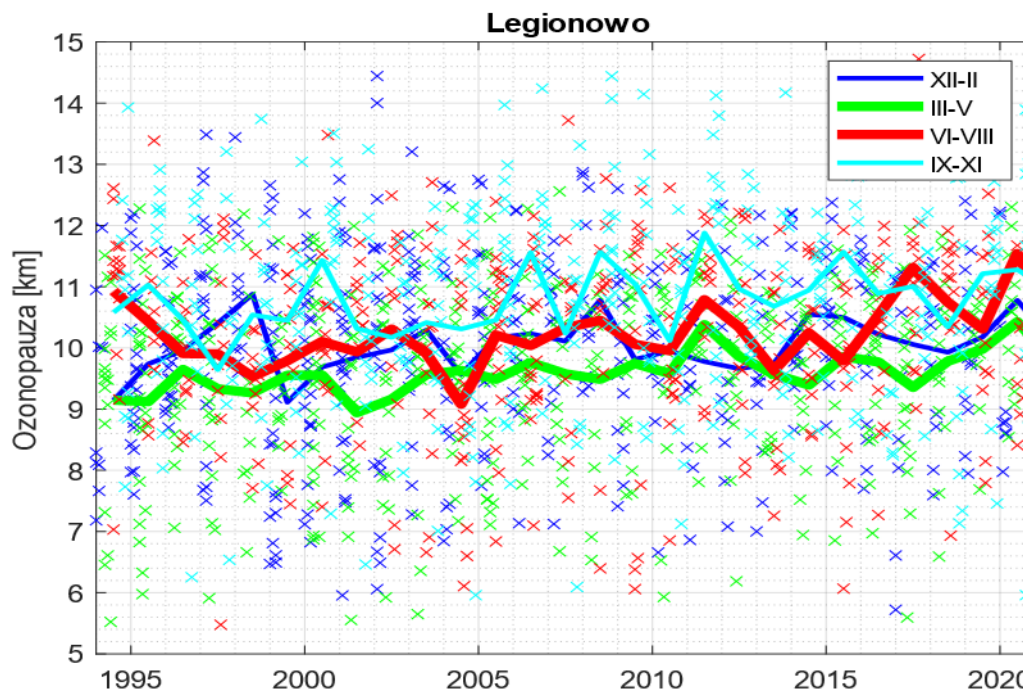
Dla każdego profilu ozonu nad Legionowem zdefiniowano tropopauzę chemiczną (ozonopauzę) jako dolną granicę bogatego w ozon powietrza stratosferycznego. Ozonopauza jest najmniejszą wysokością w profilu ze stosunkiem mieszania ozonu 100ppbv, przy spełnieniu dodatkowego warunku średniego stosunku mieszania ozonu co najmniej 110ppbv, w 1,5km warstwie bezpośrednio powyżej.

Obecnie poziom zanieczyszczenia atmosfery substancjami niszczącymi warstwę ozonową pozostaje nadal wysoki i w danych ozonu stratosferycznego widoczne są oscylacje. Silny wzrost zawartości ozonu w sezonie wiosennym w 1km warstwie bezpośrednio nad tropopauzą trwający do roku 2004 można by łączyć ze zmniejszającą się koncentracją w stratosferze substancji niszczących warstwę ozonową w wyniku funkcjonowania Protokołu Montrealskiego ale w latach

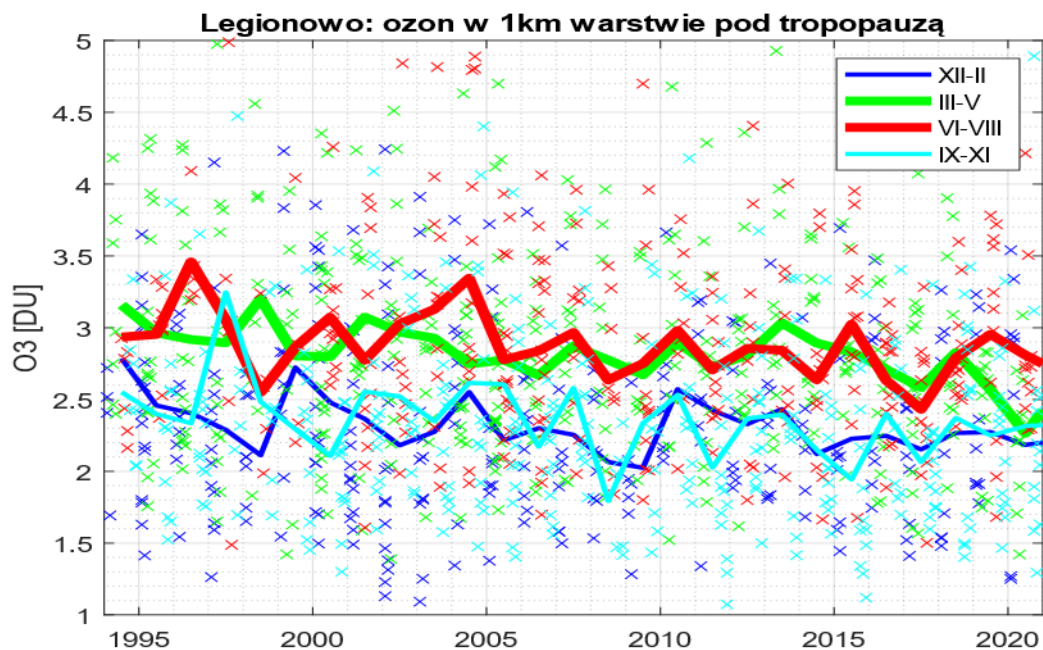
2004-2015 pojawiła się tendencja spadkowa (Rys. 14). Za wcześnie zatem, aby mówić o znaczącej naprawie warstwy ozonowej nad Polską.

Na zmiany ozonu oddziałują również zmiany klimatu, np. poprzez wzrost wysokości tropopauzy (Rys 11). W ciepłej porze roku, rosnącej wysokości tropopauzy w latach 2001-2021 towarzyszył spadek zawartości ozonu w warstwie bezpośrednio pod tropopauzą. Ze spadkiem ozonu w górnej troposferze wiąże się potencjalne zagrożenie. Ozon troposferyczny kontroluje bowiem zdolność utleniania dolnej atmosfery poprzez fotochemiczne połączenie z rodnikiem OH, i pełni w ten sposób pośrednio rolę swoistego detergentu usuwającego te zanieczyszczenia atmosfery, które są nierozpuszczalne w wodzie. Pomiary w rejonie tropikalnego zachodniego Pacyfiku, potwierdziły występowanie minimum OH. W rejonach silnej konwekcji do stratosfery mogą się przedostawać substancje niszczące warstwę ozonową (Rex i in., 2014). Negatywny trend ozonu pod tropopauzą w ciepłej porze roku nad Legionowem jest prawdopodobnie przeszacowany z powodu obserwacji podwyższonych wartości prądów tła w ostatnich latach.

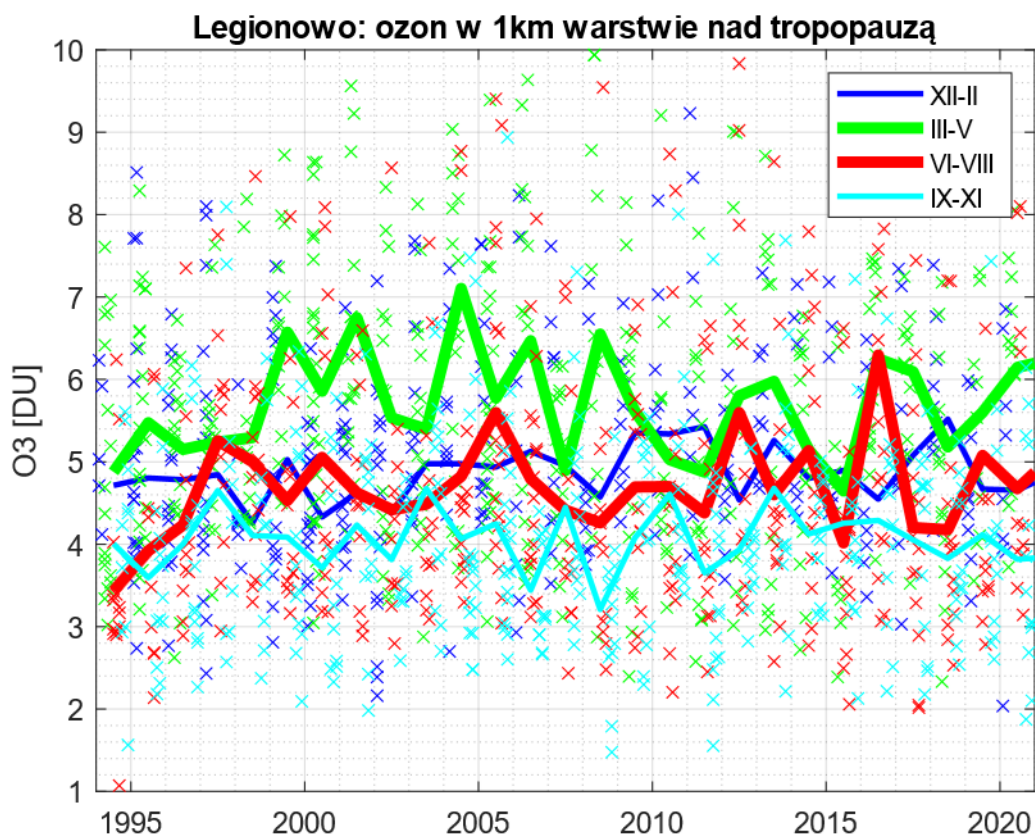
Spadek ozonu w dolnej troposferze w ciepłej porze roku nad Legionowem można łączyć z redukcją emisji antropogenicznych prekursorów ozonu (np. Cooper i in., 2014). Wiosną i latem 2020 roku na wielu stacjach w strefie umiarkowanych szerokości geograficznych półkuli północnej zauważono niespotykaną wcześniej ujemną anomalię ozonu. Badania międzynarodowego zespołu naukowców wykazały, że główną przyczyną tych anomalii było zmniejszenie ilości zanieczyszczeń w związku z blokadą COVID-19 (Steinbrecht i in., 2021).



Rysunek 12. Położenie tropopauzy chemicznej (ozonopauzy) w sezonach, na podstawie serii sondaży ozonowych w Legionowie.



Rysunek 13. Sezonowe zawartości ozonu nad Legionowem w 1km warstwie pod tropopauzą.

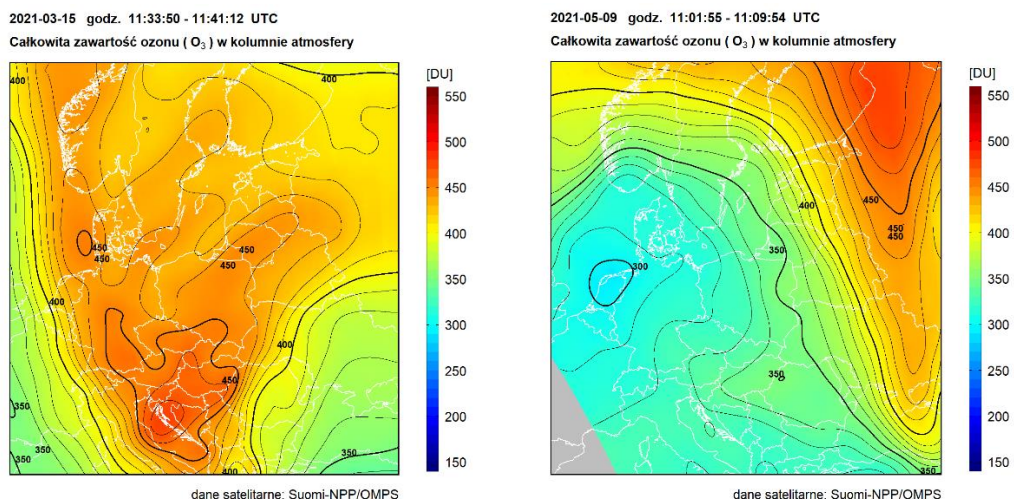


Rysunek 14. Sezonowe zawartości ozonu nad Legionowem w 1km warstwie nad tropopauzą.

2.4 Ozon całkowity z danych satelitarnych nad Europą Środkową w 2021 roku

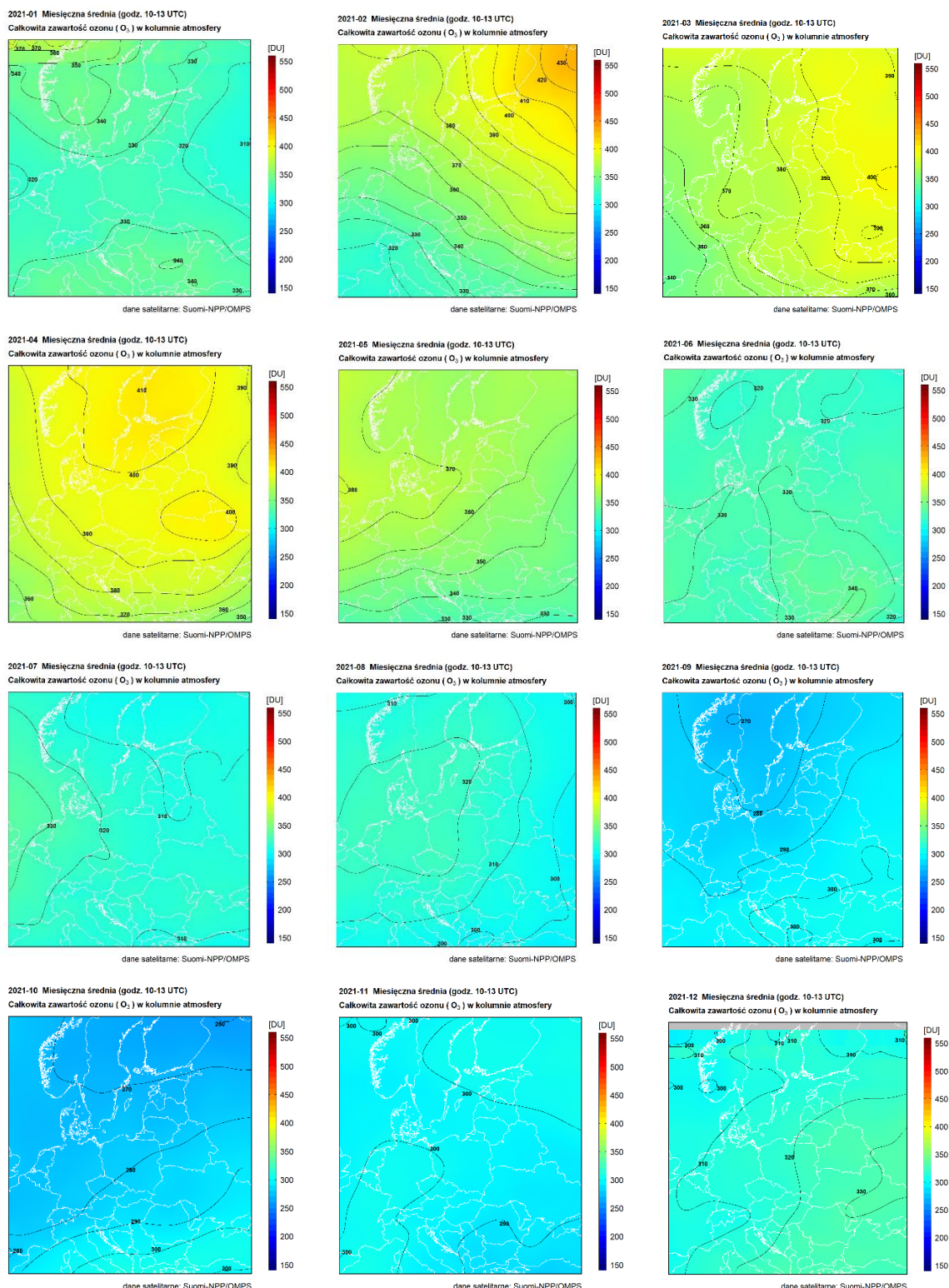
Satelitarny monitoring całkowitej zawartości ozonu w 2021 roku, podobnie jak w latach ubiegłych, był prowadzony z wykorzystaniem danych satelitarnych z czujnika Ozone Mapping and Profiler Suite (OMPS), znajdującego się na pokładzie satelitów meteorologicznych Suomi-NPP (S-NPP) i NOAA-20. Satelity te przelatują nad Polską dwa razy na dobę: w godzinach od 09:15 UTC do 13:00 UTC oraz od 23:30 UTC do 02:30 UTC. Ponieważ czujnik OMPS mierzy promieniowanie w paśmie optycznym spektrum, do monitoringu całkowitej zawartości ozonu mogły być wykorzystane jedynie dane z dziennych przelotów satelitów S-NPP i NOAA-20.

Pola całkowitej zawartości ozonu wygenerowane z danych OMPS były przekształcane do regularnej siatki współrzędnych. Wybrano siatkę współrzędnych geograficznych w zakresie 40°-64°N i 10°-28°E z krokiem 0,25°. Interpolację przestrzenną wykonano metodą odwróconych odległości. Na rysunku 15 przedstawiono przykładowe rozkłady całkowitej zawartości ozonu nad Europą Środkową w odwzorowaniu Merkatora (EPSG:3395).



Rysunek 15. Całkowita zawartość ozonu w kolumnie atmosfery (w Dobsonach - DU) w dniach 15 marca i 9 maja 2021 r., wyznaczona z danych S-NPP/OMPS.

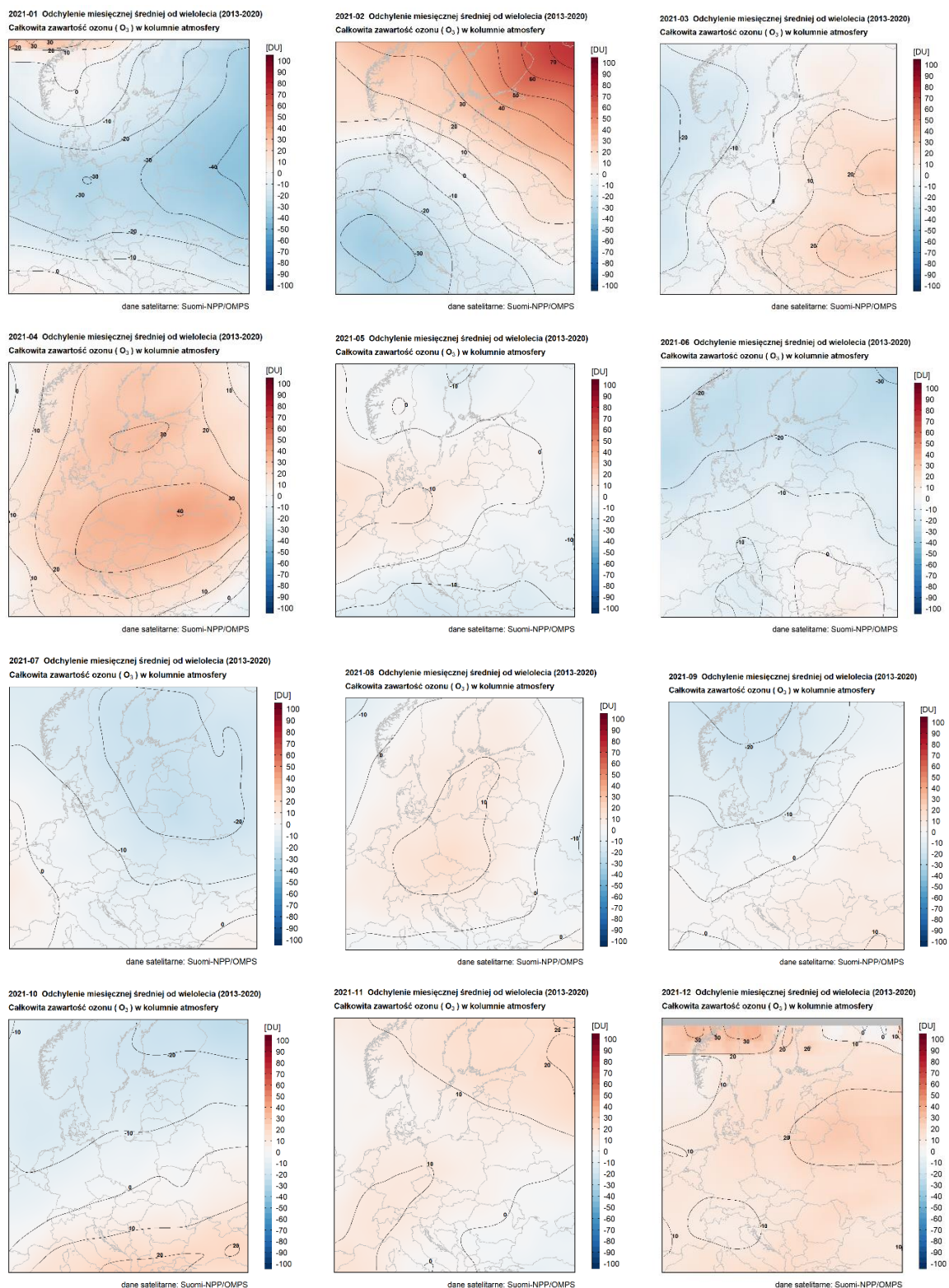
Dane o rozkładzie CZO₃ zostały wykorzystane do stworzenia średnich miesięcznych rozkładów całkowitej zawartości ozonu (Rys. 16) oraz odchylenia od średnich wieloletnich (Rys. 17). Średnie wieloletnie CZO₃ zostały obliczone na podstawie danych OMPS dla lat 2013-2020.



Rysunek 16. Średnie miesięczne rozkłady całkowitej zawartości ozonu w kolumnie atmosfery, wyznaczone z satelitarnych danych OMPS w 2021 r.

Otrzymana zmienność średnich miesięcznych rozkładów CZO₃ jest generalnie zgodna z cyklem rocznym tego parametru, który charakteryzują najwyższe wartości wiosną i najniższe jesienią. Jednak na uwagę zasługują wysokie wartości CZO₃ w kwietniu oraz lekko podwyższone

wartości CZO₃ nad Polską w sierpniu. Na rysunku 17 przedstawiono rozkłady odchyłeń średnich miesięcznych wartości CZO₃ w 2021 roku od średnich miesięcznych wieloletnich z lat 2013-2020.

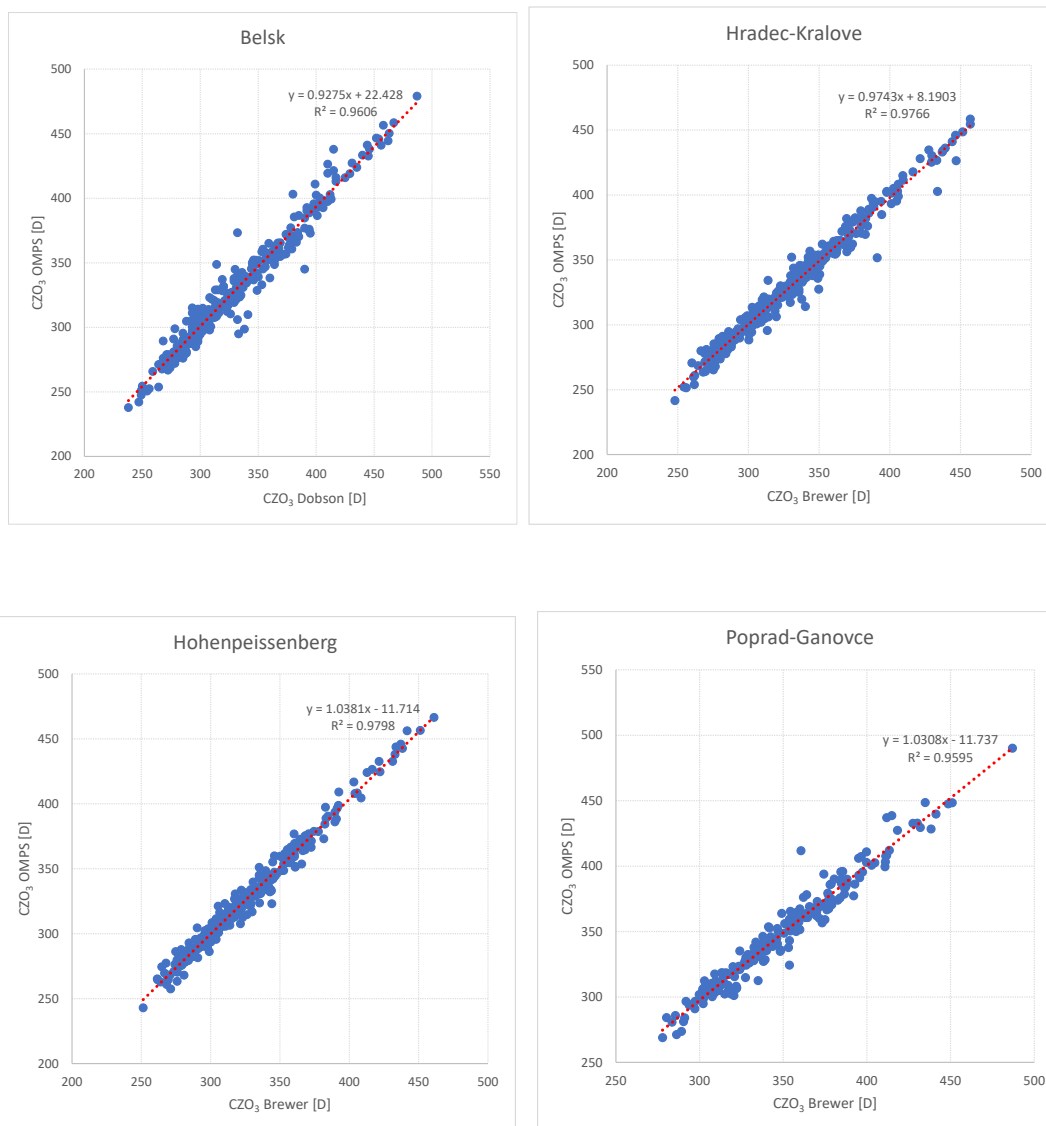


Rysunek 17. Rozkłady odchyłeń średnich miesięcznych zawartości ozonu wyznaczonych z danych OMPS w 2021 r. od średnich miesięcznych wieloletnich z okresu 2013-2020

Całkowita zawartość ozonu w Polsce w kwietniu 2021 była wyraźnie wyższa niż średnia wartość z lat poprzednich, maksymalnie o 11%. Podwyższone wartości CZO_3 względem okresu wieloletniego zanotowano również w sierpniu, listopadzie i grudniu. Natomiast w styczniu i lipcu 2021 wartości CZO_3 w Polsce były niższe od średniej wieloletniej.

W ramach monitoringu prowadzono również weryfikację dokładności całkowitej zawartości ozonu wyznaczonej z danych satelitarnych poprzez porównanie ich z pomiarami naziemnymi dla czterech stacji z obszaru Europy Środkowej, które znajdują się w obrębie każdej transmisji S-NPP i NOAA-20. Stacje te to: Belsk (21°E, 52°N), Hohenpeissenberg (11°E, 47,8°N), Hradec-Kralove (15,8°E, 50,2°N) oraz Poprad-Ganovce (20,3°E, 49°N). Pomiary wykonywane były spektrofotometrem Brewera (Poprad-Ganovce, Hradec-Kralove, Hohenpeissenebrg) i Dobsona (Belsk). Wszystkie dane naziemne wykorzystane w analizie, z wyjątkiem danych dla Belska, pobrane zostały ze Światowego Centrum Danych Ozonowych i UV, znajdującego się w Toronto (Kanada) (www.woudc.org). Dane dla Belska zostały uzyskane bezpośrednio z Zakładu Fizyki Atmosfery IGF PAN. W przypadku stacji Poprad-Ganovce, dane dostępne w serwisie WOUDC obejmowały jedynie okres od stycznia do sierpnia 2021.

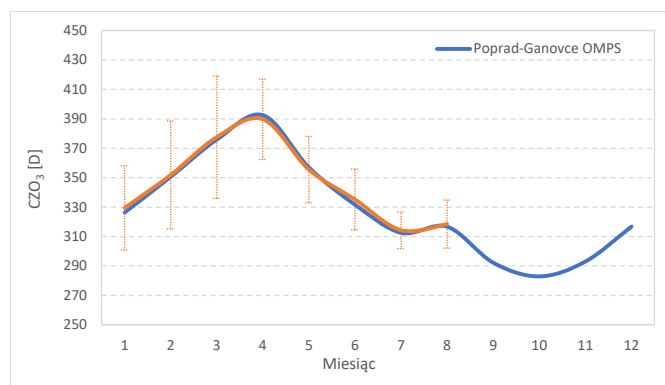
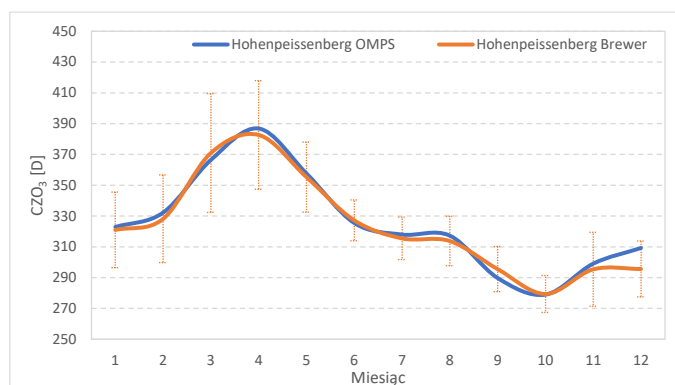
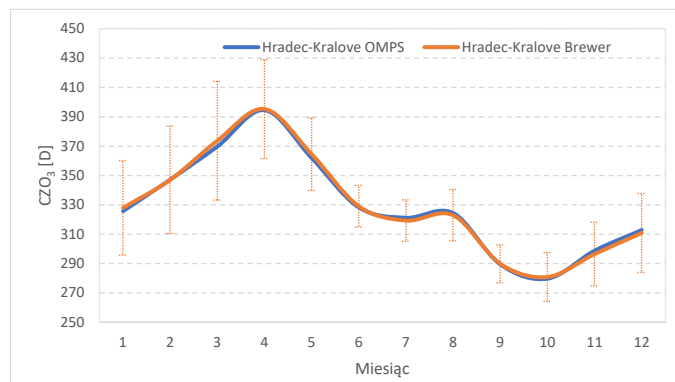
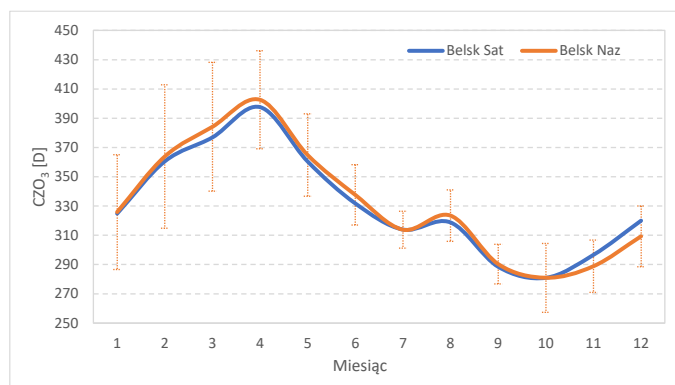
Porównanie wartości całkowitej zawartości ozonu wyznaczonej z danych satelitarnych i z danych pochodzących ze stacji pomiarów naziemnych pokazano na rysunku 18.



Rysunek 18. Porównanie całkowitej zawartości ozonu wyznaczonej z danych satelitarnych czujnika OMPS oraz zmierzonej spektrofotometrem dla stacji w Belsku, Hradec-Kralove, Hohenpeissenbergu oraz Popradzie-Ganovcu w 2021 roku.

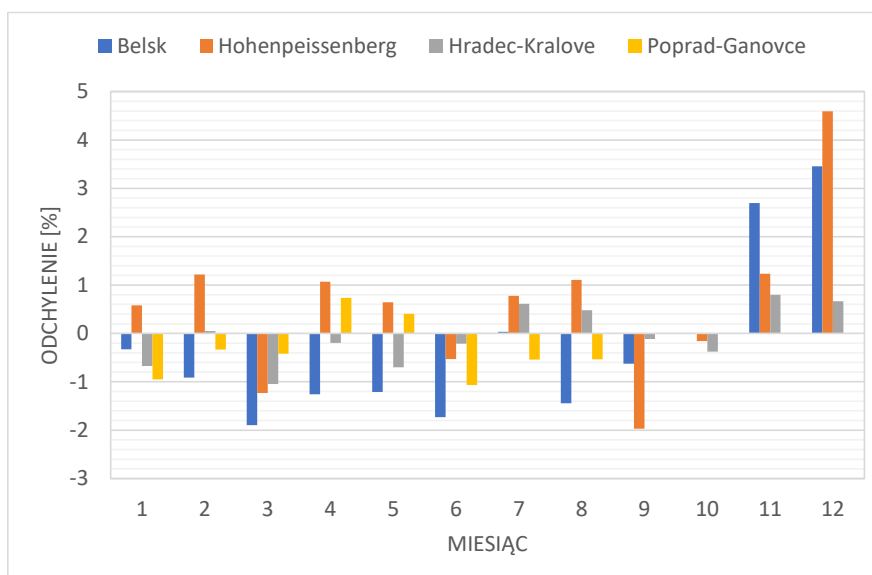
Łatwo zauważyć bardzo dobrą zgodność pomiędzy całkowitą zawartością ozonu wyznaczoną z danych satelitarnych oraz uzyskaną z pomiarów naziemnych dla wszystkich czterech stacji. Współczynniki determinacji regresji liniowej R^2 otrzymane dla poszczególnych stacji mieszczą się w przedziale od 0,96 do 0,98 (Rys. 18).

Bardzo dobrą zgodność pomiędzy danymi satelitarnymi a pomiarem naziemnym widać również w zmienności rocznej średnich miesięcznych wartości CZO₃ dla analizowanych stacji (Rys. 19). Dla wszystkich przebiegów średnich miesięcznych zauważyć można wzrost wartości CZO₃ w sierpniu oraz kwietniu.



Rysunek 19. Całkowita zawartość ozonu wyznaczona z danych OMPS oraz zmierzona spektrofotometrem na wybranych stacjach w 2021 roku. Słupki odpowiadają przedziałowi $\pm\sigma$ średnich z pomiarów naziemnych.

Analiza różnic średnich miesięcznych pokazuje, że w przypadku Belska, Hradec-Kralove oraz Popradu-Ganovce możemy mówić o zaniżaniu wartości CZO₃ przez dane satelitarne dla większości miesięcy, a w przypadku Hohenpeissenbergu - o zawyżaniu (Rys. 20). Stosunkowo wysokie, dodatnie wartości odchylenia uzyskano w listopadzie i grudniu dla Belska i Hohenpeissenberga. Wartości liczbowe różnic mieszczą się w przedziale od -1,96% do 4,9% (Rys. 20).



Rysunek 20. Rozkład odchylenia średnich miesięcznych wartościami całkowitej zawartości ozonu wyznaczonych dla Belska, Hohenpeissenbergu, Hradec-Kralove i Popradu wyznaczonych z danych satelitarnych OMPS od pomiarów naziemnych w roku 2021.

W celu określenia dokładności metody wyznaczania zawartości ozonu z danych satelitarnych OMPS, obliczono średnią różnicę pomiędzy całkowitą zawartością ozonu wyznaczoną z danych satelitarnych i naziemnych, średnią różnicę bezwzględną, korelację oraz błąd procentowy metody. Wyniki przedstawione zostały w tabeli 6.

Tabela 6. Wyniki porównania pomiędzy zawartością ozonu wyznaczoną z danych S-NPP/OMPS i zmierzoną spektrofotometrem w 2021 r. dla stacji Belsk, Hohenpeissenberg, Hradec-Kralove oraz Poprad-Ganovce

	Korelacja	Średnia różnica [D]	Średnia różnica bezwzględna [D]	RMSE %
Belsk	0,9801	-0,163	6,95	2,94
Hohenpeissenberg	0,9898	0,69	4,63	1,85
Hradec-Kralove	0,9882	-0,29	4,52	1,96
Poprad-Ganovce (na podstawie danych od stycznia do sierpnia)	0,9796	-1,08	5,51	2,44

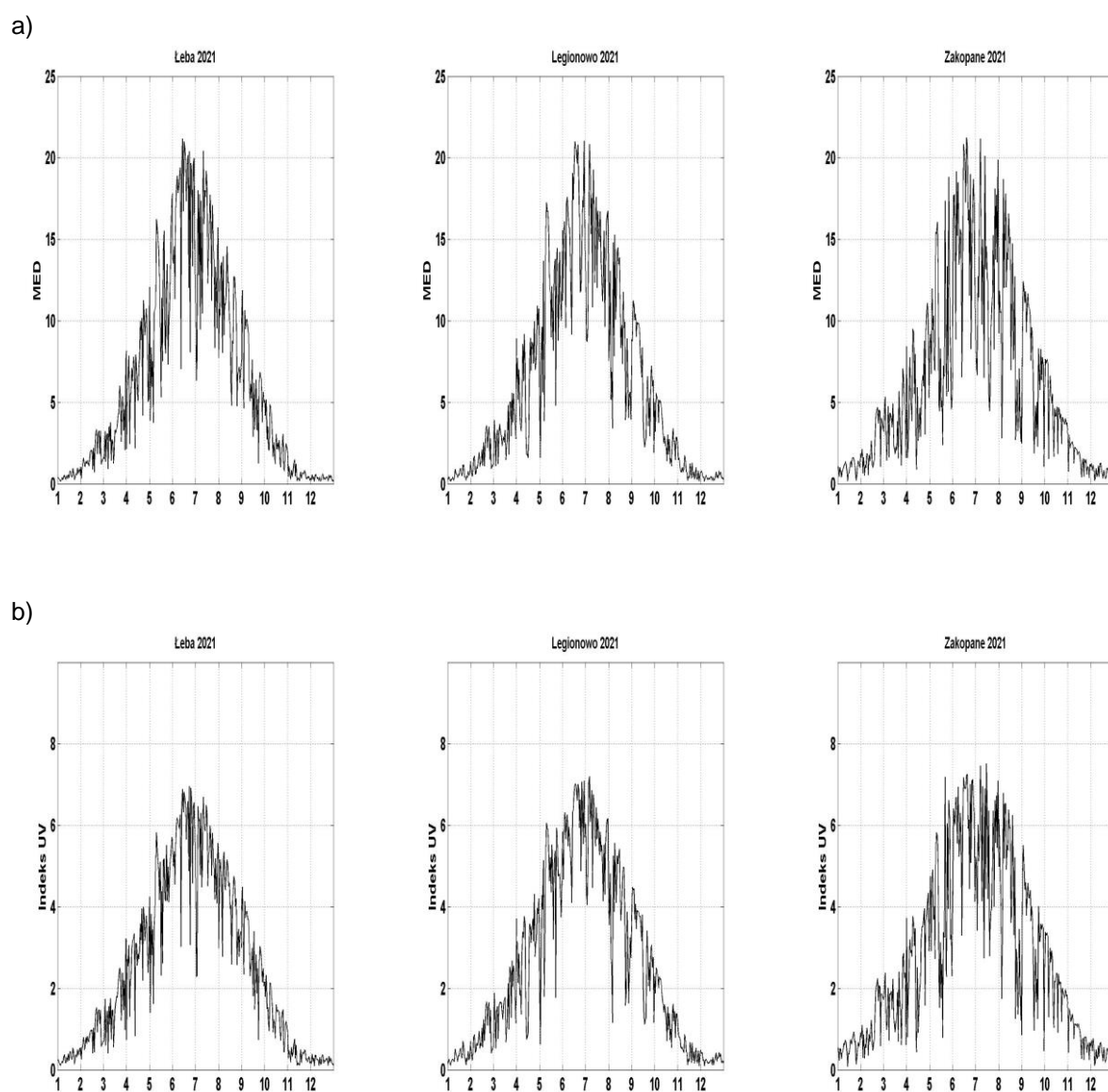
Dla wszystkich czterech stacji zgodność całkowitej zawartości ozonu wyznaczonej z danych OMPS z pomiarami naziemnymi jest bardzo dobra – średni błąd procentowy waha się w granicach

od 1,85% do 2,94%, Na uwagę zasługuje również bardzo wysoka korelacja, która dla wszystkich stacji jest większa od 0,97.

2.5 Promieniowanie UV-B zmierzone na sieci monitoringu w 2021 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.

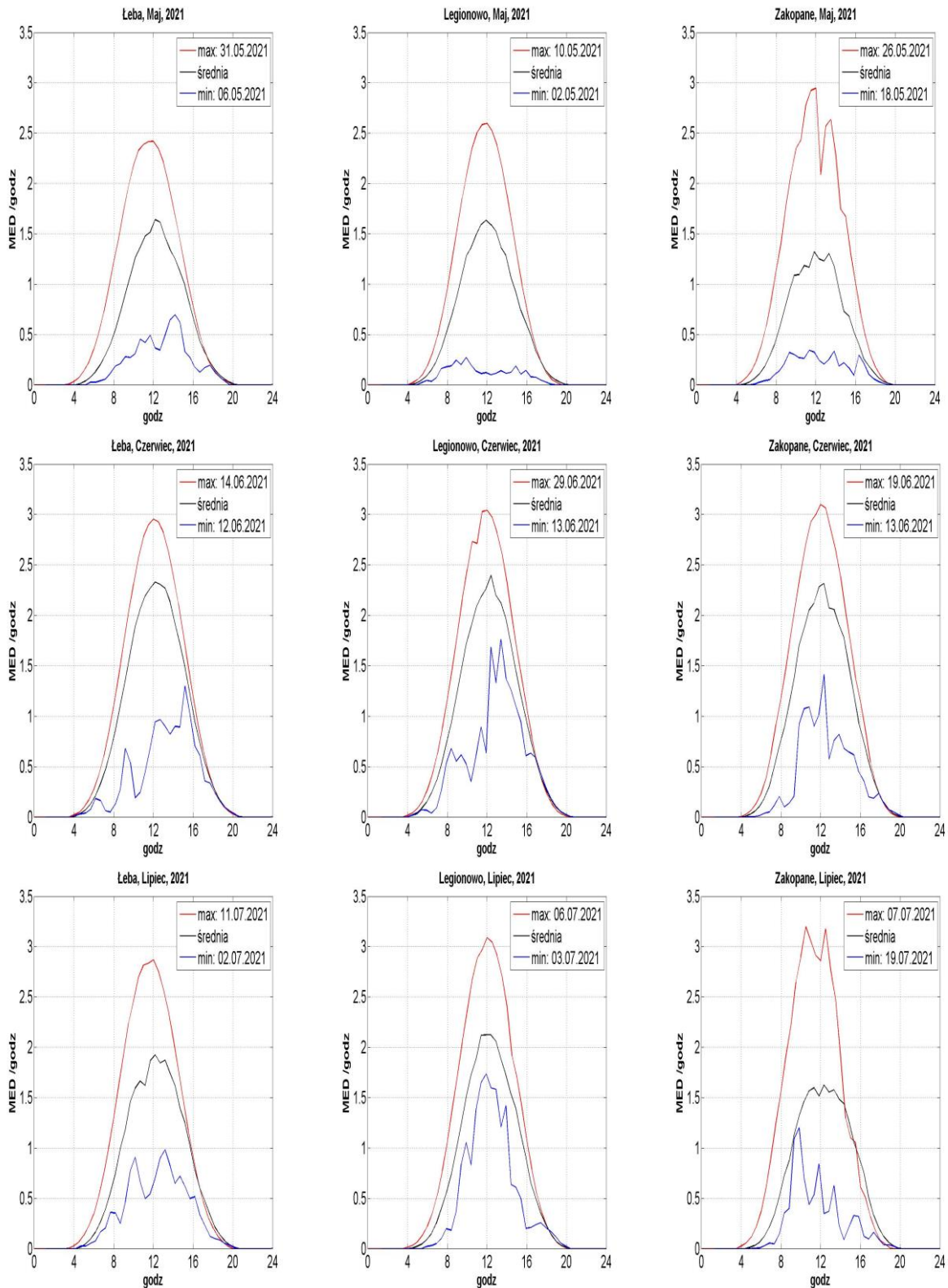
Poniżej przedstawiono wartości dawek dziennych UV-B [MED] i Indeksu UV zmierzone na stacjach IMGW-PIB w 2021 roku (Rys. 21).



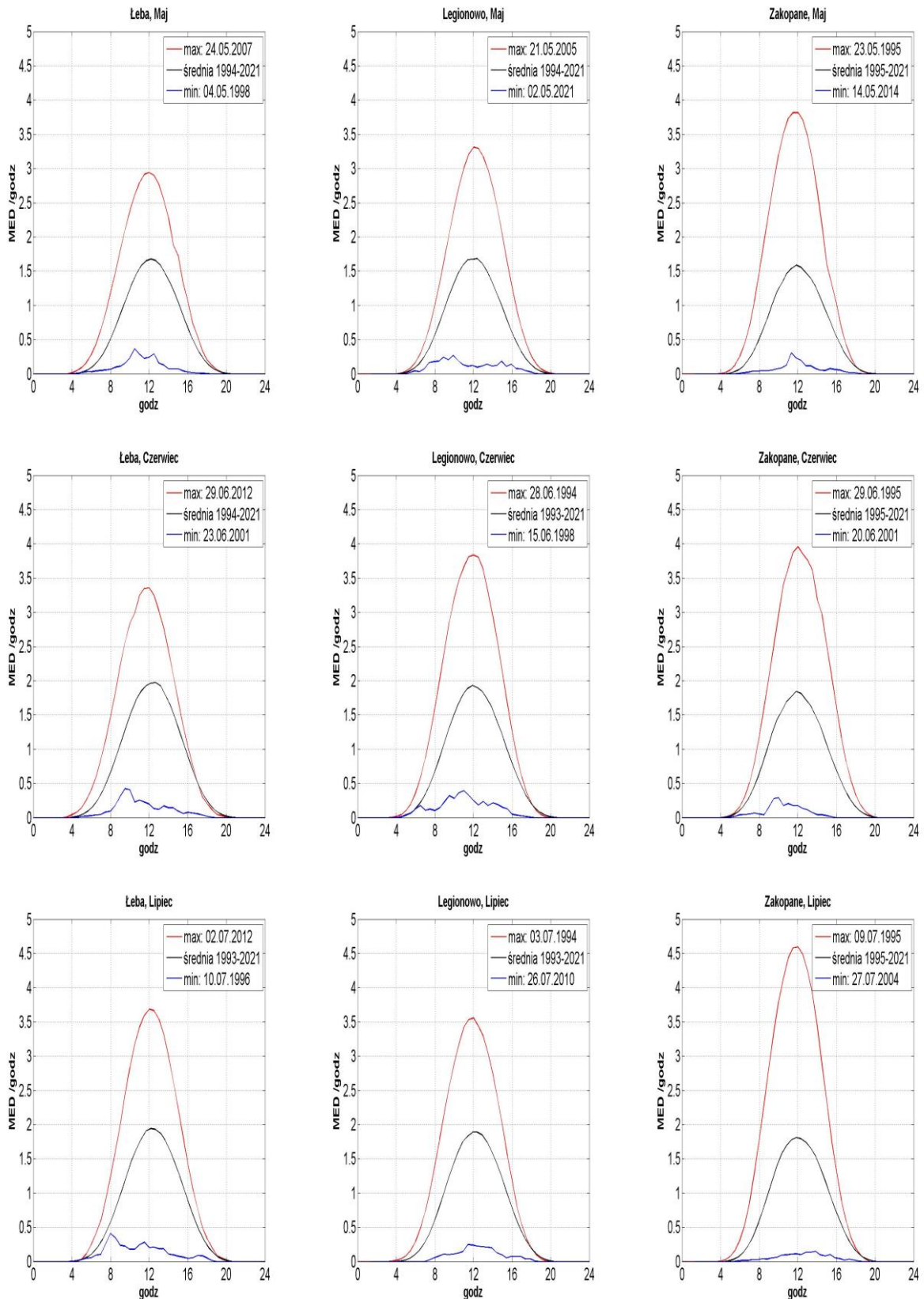
Rysunek 21. Wartości dawek dziennych UV-B [MED] (a) i Indeksu UV (b) z czujników SL501 w Łebie, Legionowie i Zakopanem w 2021 r.

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. Górskie położenie stacji w Zakopanem powoduje, że wraz z nadejściem okresu ciepłego zaczynają rozwijać się tam procesy konwekcyjne sprzyjające powstawaniu chmur. Natomiast nad położoną nad Bałtykiem stacją w Łebie często napływa powietrze z północy z małą ilością aerozoli. W efekcie w pomiarach obserwuje się często odwrócenie rozkładu geograficznego promieniowania, tzn. największe promieniowanie występuje w Łebie a najmniejsze w Zakopanym. W 2021 południkowy rozkład wielkości promieniowania UV można zauważyć porównując dawki miesięczne (Tab. 7) od września do grudnia. Natomiast od kwietnia do czerwca występuje rozkład odwrócony. Wpływ chmur na ilość promieniowania jest największy. Dlatego maksymalne promieniowania obserwuje się przy bezchmurnym niebie. Rozkład geograficzny maksimumów dobowych promieniowania jest na ogół południkowy. W 2021 rozkład południkowy występował dla miesięcy styczeń, luty, lipiec, sierpień, październik, listopad i grudzień (Tab. 7). O odstępstwie od tej reguły decydują inne czynniki, ilości ozonu całkowitego i aerozoli.

Na rysunkach 22 i 23 przedstawiono średnie, maksymalne i minimalne przebiegi dobowe promieniowania UV-B w maju, czerwcu i lipcu odpowiednio w 2021 roku oraz w całej serii pomiarowej, od 1993 do 2021 roku.



Rysunek 22. Średnie, maksymalne i minimalne przebiegi dobowe promieniowania UV-B (w MED/h) zmierzonego przyrządami SL501 w maju, czerwcu i lipcu 2021 r.



Rysunek 23. Średnie, maksymalne i minimalne przebiegi dobowe promieniowania UV-B (w MED/h) zmierzonego przyrządami SL501 w maju, czerwcu i lipcu dla całej serii pomiarowej od 1993 do 2021 r.

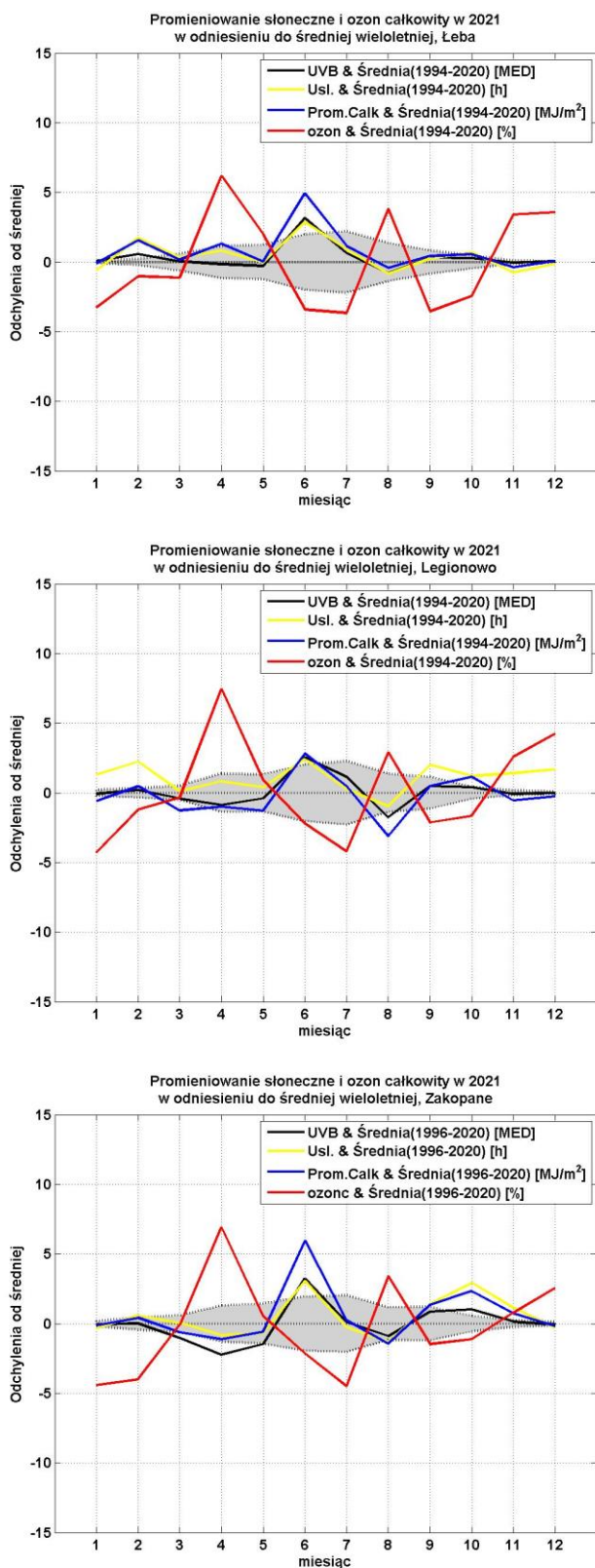
Tabela 7. Dienne – średnie, maksymalne i minimalne dawki UV-B oraz miesięczne dawki promieniowania UV-B (w MED) zmierzonych przyrządami SL501 w 2021 r.

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Łeba												
Śr. Dobowe	0,5	1,7	3,4	7,0	11,1	16,9	14,0	9,7	6,5	2,6	0,6	0,4
Max. Dob.	1,0	3,3	8,2	11,3	17,8	21,2	20,4	14,6	11,9	5,2	2,0	0,6
Min. Dob.	0,2	0,4	0,9	2,2	3,8	7,1	6,4	4,8	1,3	0,8	0,2	0,1
Dawka mies.	15,4	48,6	105,4	209,6	343,7	508,4	434,3	302,1	195,2	81,0	18,6	11,0
Legionowo												
Śr. Dobowe	0,5	1,7	3,3	6,5	10,9	16,1	14,3	9,0	6,8	3,2	0,8	0,4
Max. Dob.	1,4	3,6	8,9	10,9	17,2	21,0	20,8	15,3	11,2	5,6	2,5	0,8
Min. Dob.	0,2	0,5	1,1	1,6	1,6	9,2	8,7	3,4	1,9	1,1	0,2	0,2
Dawka mies.	16,9	46,7	103,0	195,6	338,0	483,3	443,5	277,7	205,2	97,8	24,8	13,4
Zakopane												
Śr. Dobowe	1,0	2,2	3,7	5,8	8,9	15,6	12,2	9,7	7,5	4,5	1,6	0,8
Max. Dob.	1,7	4,7	8,4	11,1	18,8	21,2	21,2	18,7	12,4	7,7	3,1	1,3
Min. Dob.	0,2	0,5	1,1	0,9	2,4	6,5	4,5	2,6	1,1	1,5	0,4	0,2
Dawka mies.	31,0	62,1	113,4	172,8	275,7	468,6	378,7	299,9	225,5	139,3	49,4	24,4

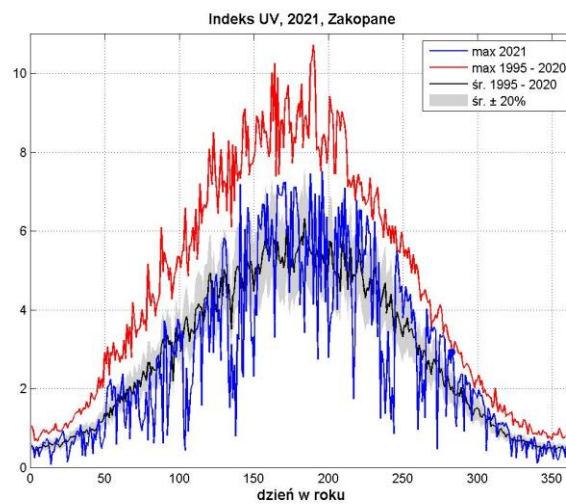
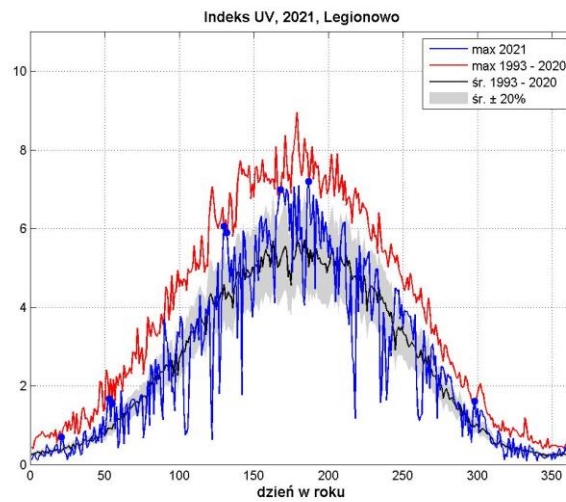
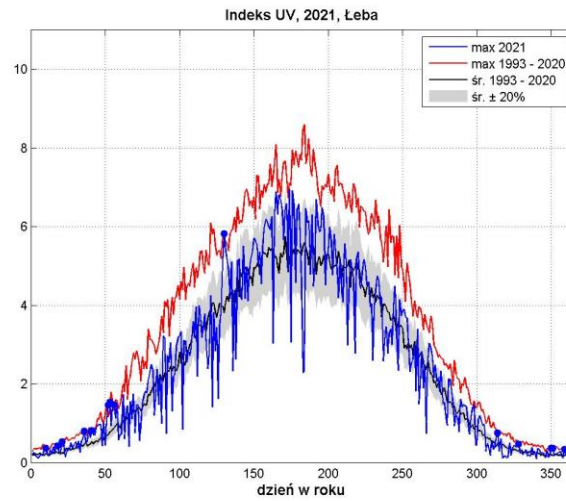
W 2021 roku maksymalną dawkę miesięczną 508,4 MED (Tab. 7) zmierzono w czerwcu dla Łeby i była to jedna z największych wartości w całej serii pomiarów z Łeby. Maksymalną dawkę dobową 21,18 MED zaobserwowano dla 14 czerwca w Łebie oraz 21,24 MED 19 lipca w Zakopanem. Dla Legionowa maksymalna dawka 21,04 MED wystąpiła w dniu 29 czerwca.

Ilość promieniowania UV docierającego do powierzchni Ziemi zależy od wielu czynników. Dlatego do oceny przyczyn jego zmiany wykorzystano prowadzone równolegle do monitoringu UV pomiary promieniowania całkowitego i usłonecznienia. Wielkości te pozwalają pośrednio wnioskować o zmianach promieniowania UV. 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 rysunku 24 porównano średnie miesięczne promieniowania UV-B, promieniowania całkowitego, ozonu i usłonecznienia w odniesieniu do średnich wieloletnich dla Łeby, Legionowa i Zakopanego. Z punktu widzenia monitoringu UV najbardziej istotne są miesiące gdy promieniowanie UV osiąga duże wartości. W 2021 roku większe od typowych wartości, identyfikowanych przez odchylenie standardowe (szary obszar) zaobserwowano dla czerwca na wszystkich stacjach oraz w mniejszym stopniu dla lutego w Łebie oraz października w Zakopanem (Rys. 24). W tych przypadkach występowała mniejsza niż średnia ilość ozonu całkowitego oraz było więcej dni bezchmurnych, czyli typowych czynników związanych z wyżową pogodą. W pozostałych miesiącach promieniowanie UV zwykle oscylowało w pobliżu wartości średnich.

W Zakopanem, w kwietniu UV było znacząco niższe od średniej wieloletniej, co korelowało z znacząco większą od średniej ilości ozonu całkowitego.



Rysunek 24. Odchylenie od średniej wieloletniej promieniowania UV-B, promieniowania całkowitego, ozonu całkowitego i usłonecznienia w 2021 r. Szary obszar reprezentuje zmienność promieniowania UV-B w granicach $\pm 1\sigma$. Średnie wieloletnie ozonu całkowitego obliczone na podstawie danych satelitarnych.



Rysunek 25. Przebiegi roczne Indeksu UV z 2021 roku dla stacji w Łebie, Legionowie i Zakopanem na tle średniego oraz maksymalnego Indeksu UV od początku pomiarów do 2021 roku dla każdej stacji. Niebieskie punkty oznaczają ekstremalne wartości w serii dla danego dnia roku zmierzone w 2021 roku.

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

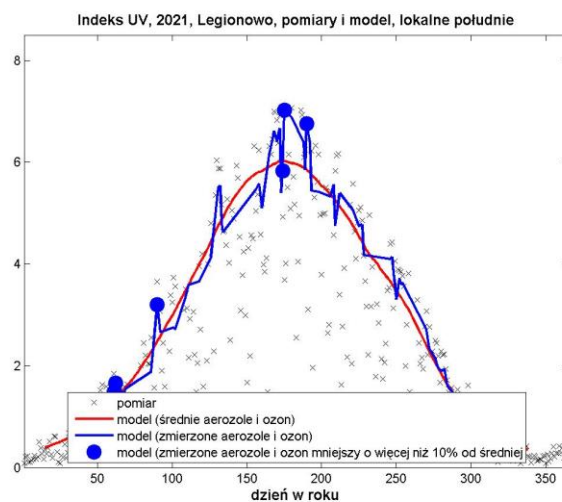
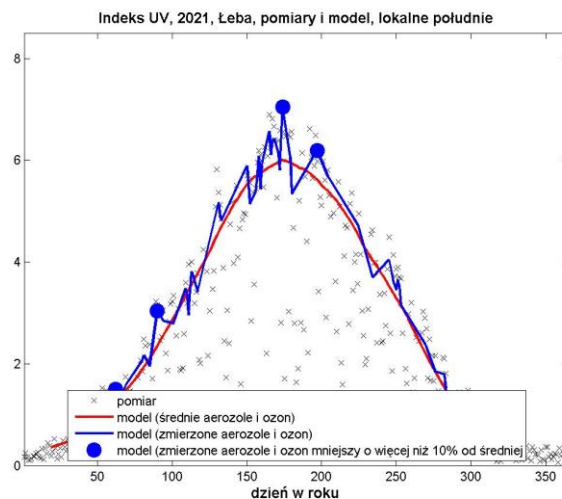
Na rysunku 25 przedstawiono przebiegi roczne Indeksu UV z 2021 roku na tle średniego oraz maksymalnego Indeksu UV z okresu od 1993 (Zakopane od 1995) do 2020 roku dla każdej ze stacji.

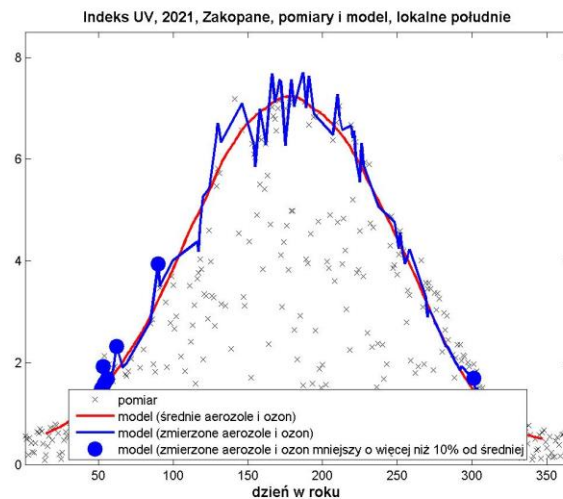
W roku 2021 dla Łeby i Legionowa obserwowano epizodycznie wartości Indeksu UV zbliżające się do ekstremów wieloletnich w seriach pomiarowych, a nawet je przekraczające. Ekstrema występowały w pojedynczych dniach w maju, czerwcu i lipcu. Największe wartości Indeksu UV na stacjach IMGW-PIB w 2021 roku zmierzono odpowiednio: 15 lipca w Zakopanem (UVI 7,5), 6 lipca w Legionowie (UVI 7,2) oraz 23 czerwca w Łebie (UVI 6,9). Ekstremalne wartości Indeksu UV zmierzono także w Łebie i Legionowie w styczniu oraz lutym.

Rozdzielenie wpływu chmur, ozonu i aerozoli na docierające do powierzchni Ziemi promieniowanie UV jest złożonym zagadnieniem, zwłaszcza gdy w danych lokalizacjach są dostępne jedynie pomiary za pomocą biernej teledetekcji. 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 w poszczególnych dniach. Korzystając z pomiarów satelitarnych, ozonu całkowitego i aerozoli z 2021 roku obliczono, używając model transferu promieniowania słonecznego FastRT, wartości Indeksu UV dla bezchmurnego nieba dla lokalnego południa (Rys. 26). Podobne obliczenie wykonano dla danych uśrednionych ozonu całkowitego i aerozoli 30-dniową średnią biegnącą z okresu 2005-2020. Na rysunku 26 umieszczono również pomiary Indeksu UV z 2021 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 2021 roku na stacjach w Łebie i Legionowie obserwowano podwyższone wartości promieniowania UV-B w czerwcu oraz w pojedynczych dniach maja i lipca. Zwiększenie

promieniowanie w czerwcu i lipcu związane było z mniejszą ilością ozonu całkowitego (niebieskie kropki) oraz aerozoli. Natomiast duże promieniowanie w maju spowodowane było mniejszą ilością aerozoli. Obserwowane na trzech stacjach zwiększenie promieniowania UV w okresie od początku roku do wczesnej wiosny na trzech stacjach oraz w sierpniu i we wrześniu można przypisać mniejszej niż średnia wartościom ozonu całkowitego.

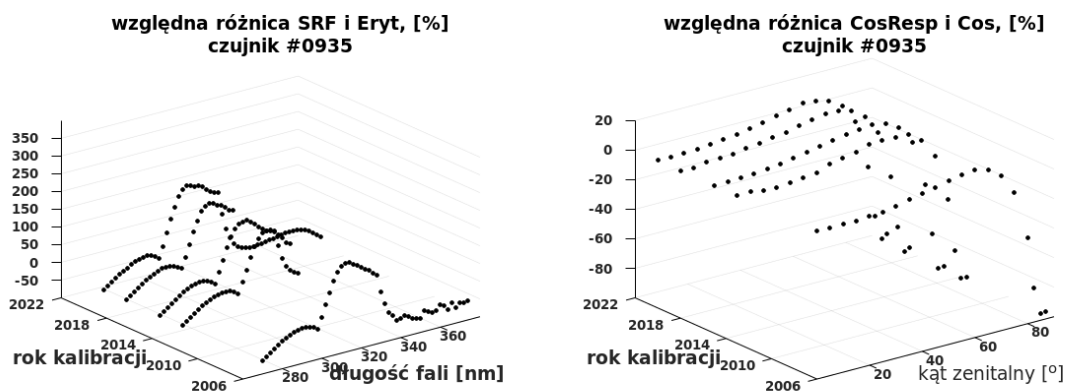


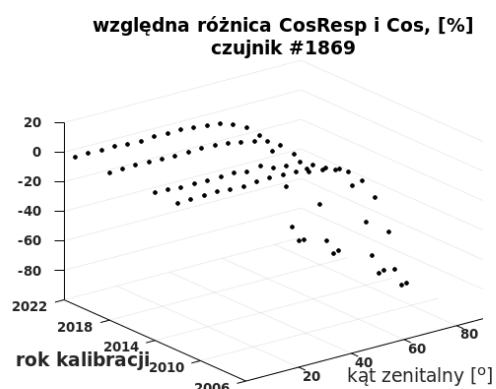
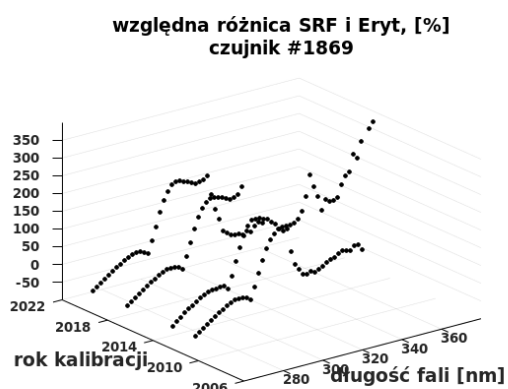
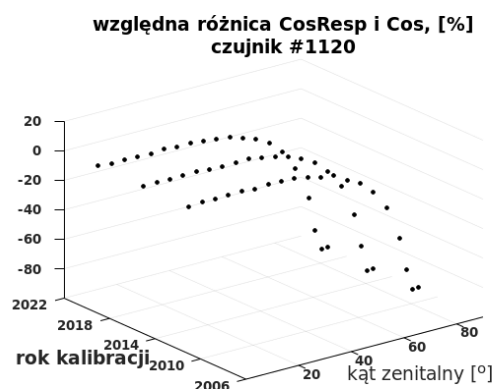
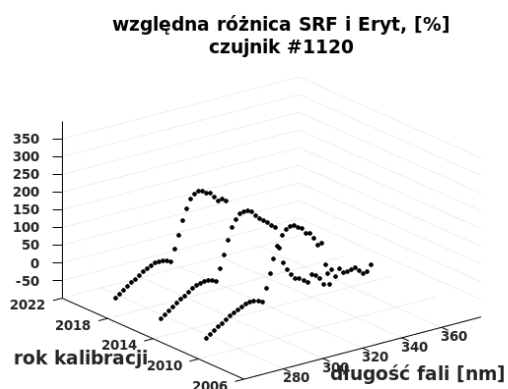
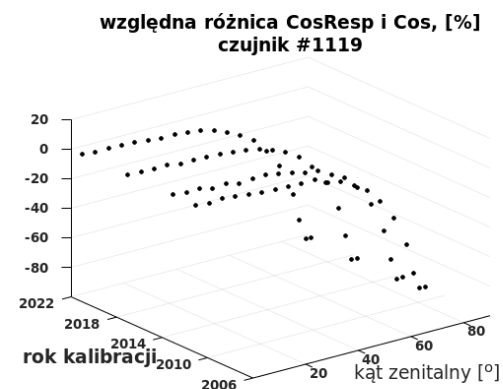
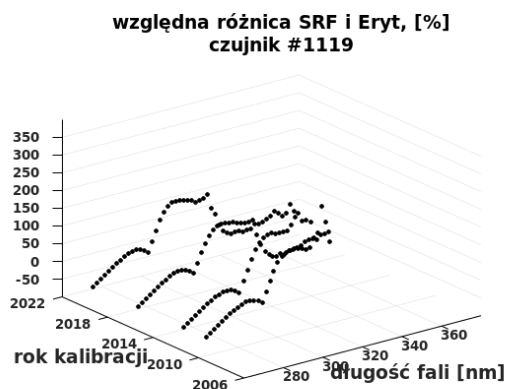
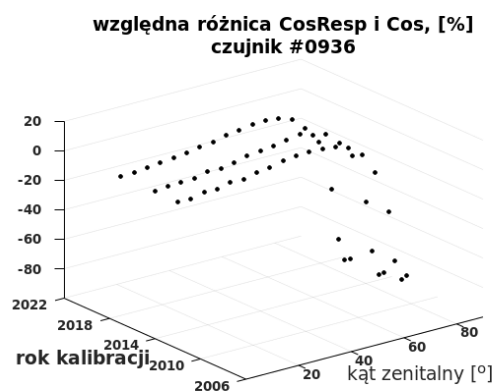
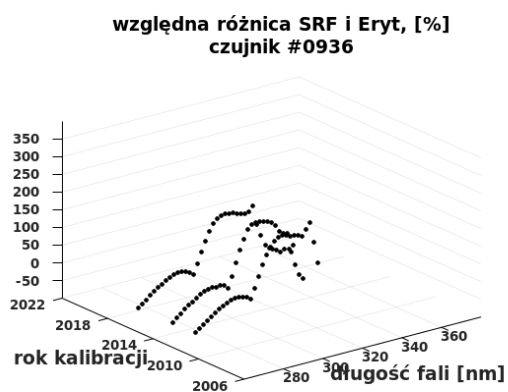


Rysunek 26. Przebiegi roczne Indeksu UV z 2021 roku obliczonego z wykorzystaniem modelu transferu promieniowania słonecznego FastRT dla stacji w Łebie, Legionowie i Zakopanem z wykorzystaniem pomiarów satelitarnych ozonu całkowitego i aerozoli 2005-2021.

Charakterystyka czujników UV-B używanych w pomiarach na stacjach IMGW-PIB

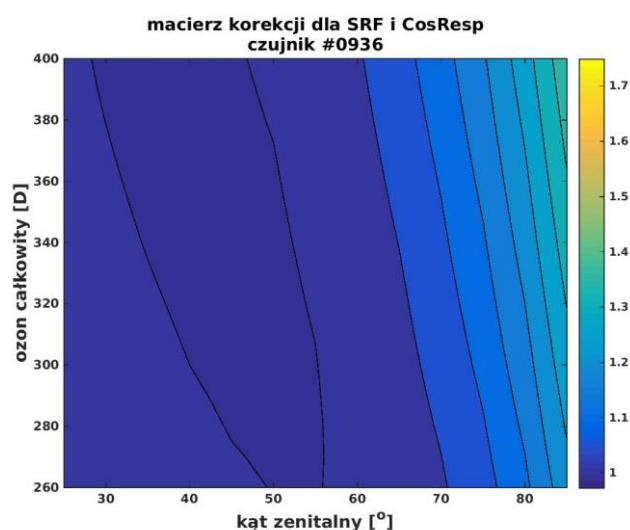
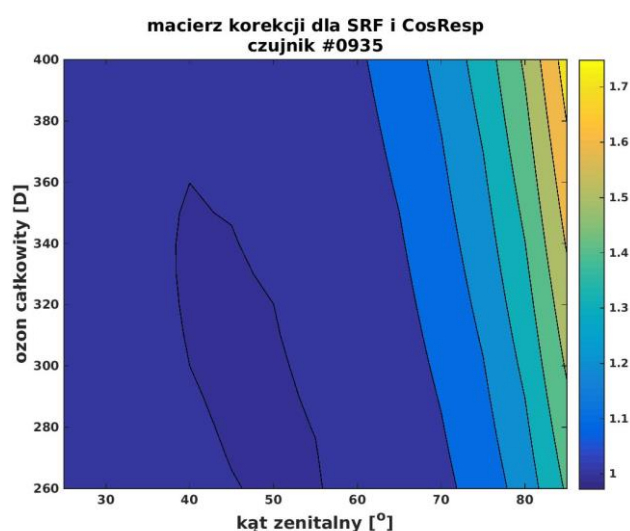
W ciągu ostatnich kilkunastu lat prowadzenia pomiarów promieniowania UV-B w IMGW-PIB czujniki SL501 wysyłane są regularnie do kalibracji w Międzynarodowym Centrum Kalibracji w Davos. Podczas kalibracji mierzone są charakterystyki laboratoryjne, spektralne i kątowe czujników oraz wykonywane jest porównanie z wzorcowym spektrofotometrem. Dzięki zmierzonym charakterystykom koryguje się zebrane dane. Im bardziej charakterystyka spektralna czujnika zbliżona jest do krzywej erytemalnej oraz charakterystyka kąтова do zależności cosinusowej tym lepszy jest czujnik. Na rysunku 27 pokazano względne różnice między odpowiedzią spektralną (SRF) czujnika a teoretyczną krzywą erytemalną oraz różnice między kątową odpowiedzią (CosResp) i funkcją cosinus. Widać, że czujniki różnią się między sobą, jednak dla danego czujnika charakterystyki pozostają podobne z czasem. Zmianę w czasie można zauważyć dla długości $\sim 320\text{nm}$, na granicy zakresów UV-B i UV-A dla czujników #0935 i #1869. Natomiast odpowiedź kąтова dla czujników nie zmienia się zauważalnie z czasem.

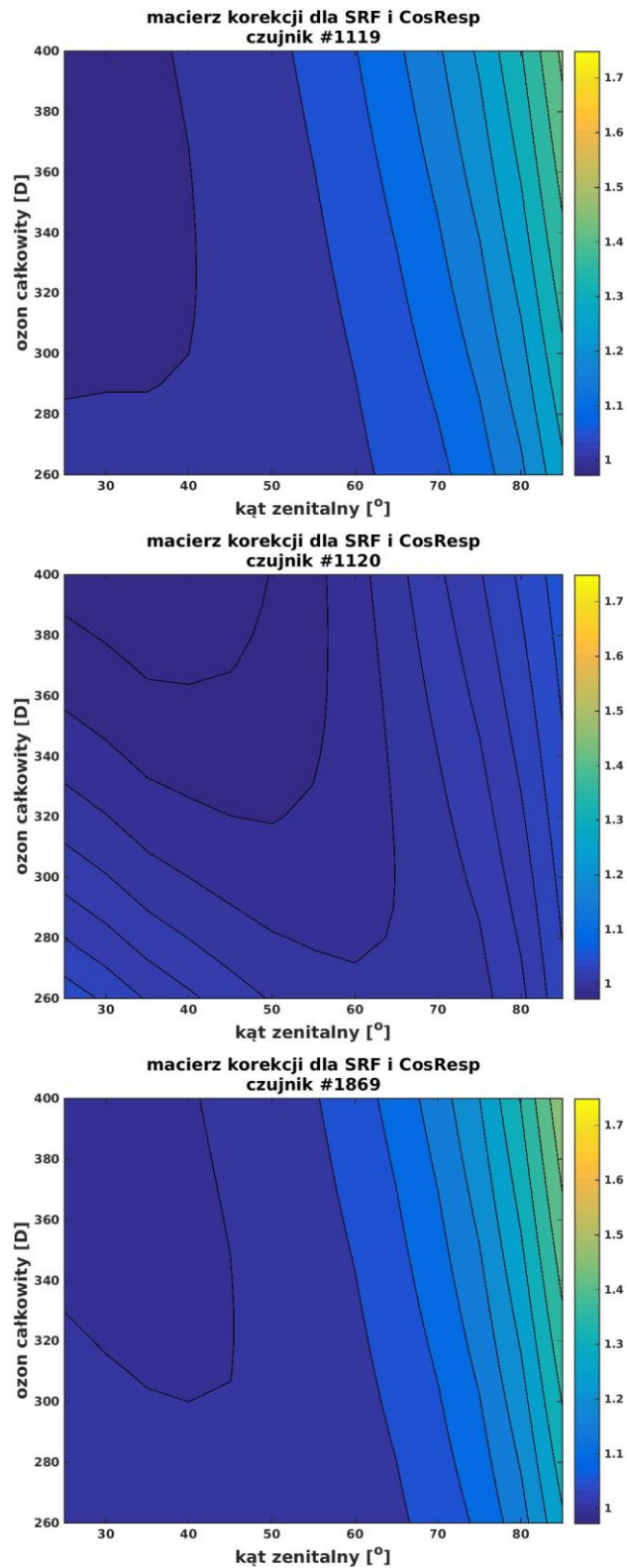




Rysunek 27. Różnice względne między odpowiedziami spektralnymi (SRF) i teoretyczną krzywą erytemalną oraz odpowiedziami kątowymi względem funkcji cosinus dla czujników używanych w IMGW-PIB.

Pomiary laboratoryjne charakterystyk spektralnych i kątowych dają możliwość lepszej oceny czujnika i użycie algorytmu do korekcji danych mającego poprawiać dokładność pomiarów. Czujniki używane w monitoringu na stacjach IMGW-PIB są szerokopasmowe, to znaczy że nie mierzą one widma tylko łączne promieniowanie dla całego zakresu czułości czujnika i jako wynik pomiaru otrzymuje się jedną wartość, która zawiera aktualną odpowiedź spektralną i kątową złożoną z aktualnym widmem promieniowania słonecznego. Wykorzystując model uvspec (Kylling, 2005) obliczono współczynniki korekcji dla każdego z czujników w zależności od ilości ozonu całkowitego i kąta zenitalnego. Wykorzystano ostatnie dostępne charakterystyki czujników oraz założono aerozole wiejskie o typowych parametrach optycznych. Otrzymane macierze korekcji (Rys. 28) wyglądają podobnie przy zmianie parametryzacji aerozoli na inne, typowo występujące w Polsce. Najlepszy czujnik to taki dla którego współczynniki korekcji w jak największym zakresie ozonu całkowitego i kąta zenitalnego jest bliski jedności. Dla najbardziej istotnego w monitoringu zakresu kątów, dla kątów mniejszych niż 60-70° czujniki wymagają kilkuprocentowej korekcji. Dla większych kątów są to korekcje od kilkunastu do kilkudziesięciu procent. Najlepiej dla dużych kątów wypada czujnik #1120.





Rysunek 28. Macierze korekcji uwzględniające zmierzone laboratoryjnie charakterystyki spektralne (SRF) i kątowe (CosResp) dla czujników używanych IMGW-PIB.

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.

Protokół Montrealski, wraz z jego uzupełnieniami zapobiegł katastrofalnemu zubożeniu warstwy ozonowej i dzięki temu oznaki jej regeneracji są teraz widoczne. Pełnego powrotu warstwy ozonowej do stanu sprzed 1980. można oczekiwać w drugiej połowie XXI w. Długa skala czasowa odzysku warstwy ozonowej wynika z powolnego tempa, w jakim substancje zubożające warstwę ozonową są usuwane z atmosfery w procesach naturalnych. Dlatego należy zapewnić wysokiej jakości pomiary satelitarne i naziemne całkowitej zawartości ozonu oraz profili ozonu. Duże znaczenie mają pomiary na 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.

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. Niszczenie stratosferycznej warstwy ozonowej nad Arktyką jest mniejsze niż nad Antarktydą i wykazuje większe wahania z roku na rok z powodu wysoce zmiennych warunków meteorologicznych w rejonach polarnych półkuli północnej. W marcu i kwietniu 2020 roku nad Arktyką pojawiły się wyraźne oznaki dziury ozonowej. Ale nawet największe ubytki ozonu w Arktyce nie prowadzą do całkowitej zawartości ozonu tak niskiej jak nad Antarktydą, ponieważ zawartości ozonu w Arktyce na początku zimy są znacznie większe niż te nad Antarktydą. W związku z tym rozległa i powtarzająca się dziura ozonowa nad Antarktydą nie pojawia się w Arktyce.

W ostatnich latach na stan warstwy ozonowej w obszarach polarnych i poza nimi wpływają interakcje ozonu z klimatem, poprzez zmiany w cyrkulacji atmosfery i wzrost koncentracji gazów cieplarnianych w atmosferze. Informacje o rozmieszczeniu pionowym są szczególnie ważne w badaniach transportu ozonu, ponieważ ruch w atmosferze jest głównie poziomy. Dokładne dane sondaży ozonowych pochodzące ze światowej sieci GAW są coraz ważniejsze dla zrozumienia

długoterminowych zmian zarówno w ozonie troposferycznym, jak i stratosferycznym - każdy z nich może mieć wpływ na zmiany w quasi-poziomym transporcie dalekiego zasięgu, a także pionową wymianę / mieszanie między warstwami.

Analiza aktualnych trendów ozonu, na podstawie zhomogenizowanej serii danych sond ozonowych w Legionowie w latach 2001-2021 wykazała wyhamowanie spadków ozonu w dolnej stratosferze.

Nowym sygnałem trendowym jest pojawienie się spadku ozonu w średniej stratosferze w cieplej porze roku, który można wiązać z podtlenkiem azotu. W przeciwieństwie do CFC, stosowanie i emisja N_2O nie są regulowane Protokołem Montrealskim. Podtlenek azotu jest największą pojedynczą substancją zubożającą warstwę ozonową, która, jeśli jej emisje nie będą kontrolowane pozostanie dominującą substancją zubożającą warstwę ozonową w XXI wieku. Zmniejszenie emisji podtlenku azotu zwiększyłoby zatem tempo odbudowy warstwy ozonowej i zmniejszyłoby antropogeniczne wymuszanie klimatu.

Spadkowy trend ozonu w dolnej troposferze można przypisywać zmniejszeniu ilości zanieczyszczeń prekursorów ozonu. Na wielu stacjach w strefie umiarkowanych szerokości geograficznych półkuli północnej wiosną i latem 2020 roku zauważono niespotykaną wcześniej ujemną anomalie ozonu w troposferze swobodnej. Badanie międzynarodowego zespołu naukowców wykazało, że główną przyczyną anomalii było zmniejszenie ilości zanieczyszczeń w związku z blokadą COVID-19.

Dane satelitarne pokazują, że całkowita zawartość ozonu w Polsce w kwietniu 2021 roku była wyraźnie wyższa niż średnia wartość z lat poprzednich, maksymalnie o 11%. Podwyższone wartości CZO_3 względem okresu wieloletniego zanotowano również w sierpniu i grudniu, odpowiednio o nie więcej niż 6% i 8%. Natomiast w styczniu 2021 wartości CZO_3 w Polsce były niższe od średniej wieloletniej o ok. 9%.

Dla 2021 roku maksymalną dawkę miesięczną 508,4 MED zmierzono w czerwcu dla Łeby i była to jedna z największych wartości w całej serii pomiarów z Łeby. Maksymalną dawkę dobową, 21,18 MED zaobserwowano dla 14 czerwca w Łeby oraz 21,24 MED 19 lipca w Zakopanem. Dla Legionowa maksymalna dawka 21,04 MED wystąpiła w dniu 29 czerwca.

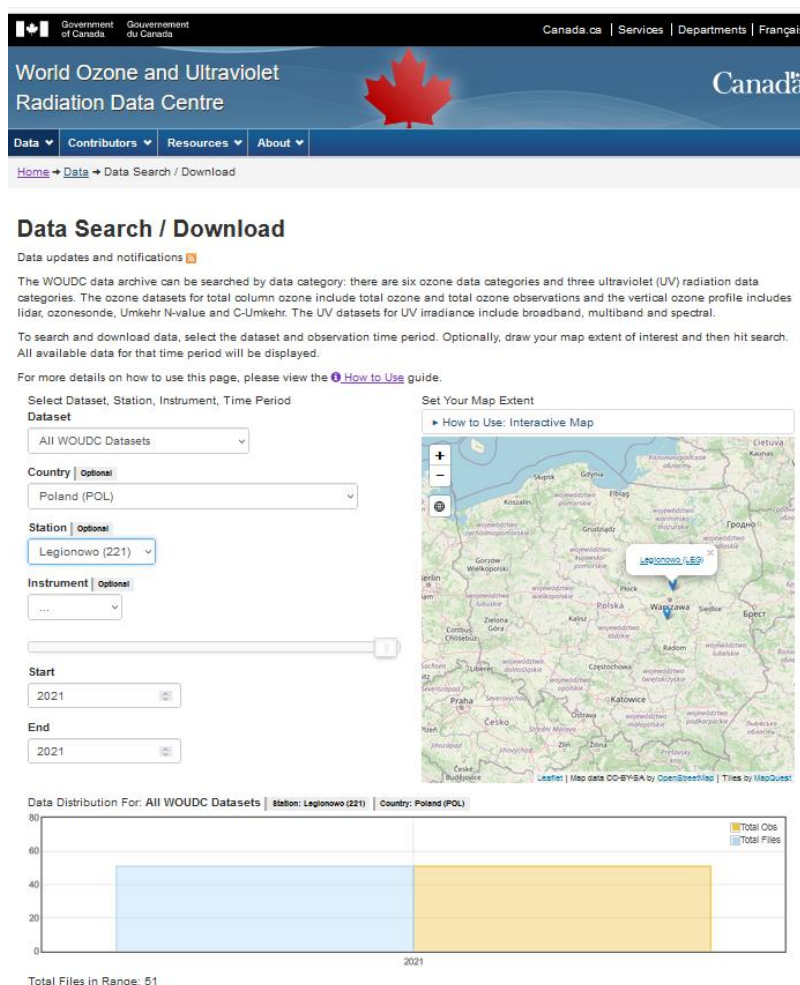
W 2021 roku na stacjach w Łeby i Legionowie obserwowano podwyższone wartości promieniowania UV-B w czerwcu oraz w pojedynczych dniach maja i lipca. Zwiększenie promieniowanie w czerwcu i lipcu związane było z mniejszą ilością ozonu całkowitego oraz aerozoli. Natomiast duże promieniowanie w maju spowodowane było mniejszą ilością aerozoli.

Największe wartości Indeksu UV na stacjach IMGW-PIB, w 2021 roku zmierzono odpowiednio: 15 lipca w Zakopanem (UVI 7,5), 6 lipca w Legionowie (UVI 7,2) oraz 23 czerwca w Łeby (UVI 6,9). Ekstremalne wartości Indeksu UV zmierzono także w Łeby i Legionowie w styczniu oraz lutym.

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, sondáže ozonowe w Legionowie wykonuje się w systemie Światowego Monitoringu Ozonu WMO z podstawową częstotliwością 1 raz w tygodniu. Wykonuje się również dodatkowe sondáže związane z udziałem w projekcie MATCH badania chemicznego niszczenia ozonu w stratosferze w wirze polarnym. Wyniki sondáže ozonowych 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. Od 2021 roku, po migracji bazy danych NDACC do nowego centrum obliczeniowego NASA LaRC, wyniki sondáže ozonowych są dostępne publicznie po upływie 1 roku od pomiaru.



Rysunek 29. Raport o danych sondáže ozonowych z Legionowa w bazie WOUDC

Od 1994 roku wyniki sondáže 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 sondażu 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 rysunku 30 przedstawiono fragment listingu zawartości serwera.

Name	Ext	Size	Date	Attr
[-.]			<DIR>	
ws_ftp	log	254	2006-08-10 09:06	-644
nilu_20220518_1115	txt	311 654	2022-05-25 10:40	-644
nilu_20220511_1117	txt	348 986	2022-05-13 18:47	-644
nilu_20220504_1118	txt	319 920	2022-05-05 08:55	-644
nilu_20220427_1118	txt	337 338	2022-05-05 08:55	-644
nilu_20220420_1115	txt	337 026	2022-05-05 08:55	-644
nilu_20220413_1117	txt	341 450	2022-04-13 17:23	-644
nilu_20220406_1115	txt	329 624	2022-04-11 10:43	-644
nilu_20220331_1115	txt	337 234	2022-03-31 20:04	-644
nilu_20220330_1115	txt	320 230	2022-03-30 16:52	-644
nilu_20220328_1115	txt	328 606	2022-03-28 16:11	-644
nilu_20220323_1115	txt	331 206	2022-03-28 11:36	-644
nilu_20220316_1121	txt	330 943	2022-03-28 11:36	-644
nilu_20220309_1117	txt	340 560	2022-03-28 11:37	-644
nilu_20220302_1119	txt	332 140	2022-03-28 11:37	-644
nilu_20220223_1118	txt	342 281	2022-03-01 09:02	-644
nilu_20220218_1117	txt	332 450	2022-03-01 09:02	-644
nilu_20220209_1117	txt	334 112	2022-03-01 09:02	-644
nilu_20220202_1120	txt	344 723	2022-02-02 16:44	-644
nilu_20220201_1124	txt	321 892	2022-02-01 16:38	-644
nilu_20220126_1119	txt	325 326	2022-01-27 14:49	-644
nilu_20220112_1129	txt	350 442	2022-01-27 14:49	-644
nilu_20220105_1121	txt	333 387	2022-01-27 14:49	-644

Rysunek 30. Raport o danych przekazywanych do bazy NILU

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 to nas do przesyłania na serwer NDACC plików w ustalonym formacie zawierających metadane oraz pionowe profile PTUW i O₃, oraz do corocznego raportowania pracy stacji. W sierpniu 2021 roku przesłano do NDACC raport roczny dotyczący danych sond ozonowych z poprzedniego roku oraz zaktualizowany opis metadanych.

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 lipcu 2021 roku.

Współpraca międzynarodowa

- Wiosną i latem 2020 roku na wielu stacjach w strefie umiarkowanych szerokości geograficznych półkuli północnej zauważono niespotykaną wcześniej ujemną anomalię ozonu w troposferze swobodnej. Badanie międzynarodowego zespołu naukowców wykazało, że główną przyczyną anomalii było zmniejszenie ilości zanieczyszczeń w związku z blokadą COVID-19. W badaniach zostały wykorzystane dane sondażu ozonowych w Legionowie. Podsumowaniem międzynarodowej współpracy była, opublikowana 7 lutego 2021 r. w czasopiśmie *Geophysical Research Letters*, publikacja „COVID-19 Crisis Reduces Free Tropospheric Ozone Across the Northern Hemisphere”.
- W dniu 23 kwietnia 2021 r. uczestniczono w zorganizowanym przez ekspertów ASOPOS międzynarodowym spotkaniu online O3-DQA (Europe & Oceania). Spotkanie było adresowane do grupy około 20 ekspertów odpowiedzialnych za utrzymywanie wysokiej jakości danych sondażu ozonowych. Podczas spotkania zaprezentowano wyniki homogenizacji serii sondażu ozonową sondą ozonową ECC dla stacji w Legionowie za okres 06.1993-03.2021. Zhomogenizowane serie sondażu ozonowych są używane do kalibracji satelitarnych profilu ozonu. Stanowią one także podstawę do oceny stanu warstwy ozonowej w publikacjach WMO Ozone Assessments.
- W dniach 28 czerwca – 2 lipca 2021 r. uczestniczono online w organizowanym przez WMO GAW Symposium 2021.
- W grudniu 2021 przesłano do publikacji w czasopiśmie *Atmos. Meas. Tech.* artykuł zatytułowany „Combined UV and IR ozone profile retrieval from TROPOMI and CrIS measurements”, dotyczący walidacji danych satelitarnych ozonu troposferycznego z użyciem danych sondażu ozonowych w Legionowie. O ważności pracy świadczy fakt, że błędy systematyczne i odchylenia standardowe satelitarnych technik pomiaru ozonu troposferycznego są często 2-3 razy większe niż w przypadku pomiarów sondą ECC. Brak informacji na temat czasowych zmian błędów systematycznych w satelitarnych pomiarów ozonu troposferycznego ograniczyłby ich przydatność do badania długoterminowych trendów

4 Podsumowanie

W 2021 roku realizowano program monitorowania rozkładu pionowego ozonu, całkowitej zawartości ozonu nad Polską i Europą oraz promieniowania UV-B w Polsce.

W 2021 roku na Stacji Aerologicznej w Legionowie wykonano 51 rutynowych sondaży ozonowych, program pomiarowy został wykonany 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 2021 program pomiarowy został wykonany w 100%.

W 2021 roku w Obserwatorium Fizyczno – Meteorologicznym / Światowym Centrum Promieniowania (PMOD/WRC) w Davos (Szwajcaria) przeprowadzono kalibrację 2 czujników SL501 z sieci IMGW-PIB: #1119 i #1869. W ramach kalibracji wykonano laboratoryjne pomiary charakterystyk spektralnej i kątowej czujników oraz porównanie ze spektrofotometrem wzorcowym. Dla czujników zostały wydane certyfikaty kalibracji.

Satelitarny monitoring całkowitej zawartości ozonu w 2021 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). 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 2021 roku występowały okresowe problemy z odbiorem danych satelitarnych i mapy rozkładu całkowitej zawartości ozonu nad Europą Środkową nie były generowane w ciągu 21 dni, co stanowi 5,8% badanego okresu.

Wyniki sondaży 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 na serwerach IMGW-PIB.

Dane pomiarowe, powstałe w wyniku realizacji umów monitoringu w roku 2021, 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. Brewer, A. W. and Milford, J. R.: The Oxford-Kew ozondesonde, *P. R. Soc. Lond. A.*, 256, 470–495, <https://doi.org/10.1098/rspa.1960.0120>, 1960
3. 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.
4. Chen, Z., Liu, J., Qie, X., Cheng, X., Shen, Y., Yang, M., and Liu, X.: Transport of large stratospheric ozone to the surface by a dying typhoon and shallow convection, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* [preprint], <https://doi.org/10.5194/acp-2022-60>, in review, 2022.
5. Chidinma O.E., Yi-hua Yan, Zhang Yin, Okoro Ugochukwu Kingsley, Okeke Francisca Nneka ,Impact of solar and geomagnetic activities on total column ozone in China, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Volume 223, 2021,105738,ISSN 1364-6826, <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105738>.
6. Cooper, O. R., Parrish, D. D., Ziemke, J., Balashov, N. V., Cupeiro, M., Galbally, I. E., Gilge, S., Horowitz, L., Jensen, N. R., Lamarque, J.-F., Naik, V., Oltmans, S. J., Schwab, J., Shindell, D. T., Thompson, A. M., Thouret, V., Wang, Y., and Zbinden, R. M.: Global distribution and trends of tropospheric ozone: An observation-based review, *Elem. Sci. Anth.*, 2, 000029, doi:10.12952/journal.elementa.000029, 2014
7. Cuevas, C.A., Fernandez R.P., Kinnison and Saiz-Lopez A. Earth, Atmospheric and Planetary Sciences The influence of iodine on the Antarctic stratospheric ozone hole February 7,2022 <https://doi.org/10.1073/pnas.2110864119>
8. Degórska M., Rajewska-Więch B., Krzyściń J., 1996, Seria obserwacji ozonu przyziemnego wykonana w Krakowie w latach 1854-1878 i próba oceny jej współczesnej wartości, *Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc.*, M-18(273), 55-60.
9. Diallo, M., Riese, M., Birner, T., Konopka, P., Müller, R., Hegglin, M. I., Santee, M. L., Baldwin, M., Legras, B., and Ploeger, F.: Response of stratospheric water vapor and

ozone to the unusual timing of El Niño and the QBO disruption in 2015–2016, *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 13055-13073, <https://doi.org/10.5194/acp-18-13055-2018>, 2018.

10. 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

11. GAW Report No. 268 , Research Infrastructure Quality Assurance ,WEATHER CLIMATE WATER Ozonesonde Measurement Principles and Best Operational Practices ASOPOS 2.0 (Assessment of Standard Operating Procedures for Ozonesondes) August 2021

12. Godin-Beekmann, S., Azouz, N., Sofieva, V., Hubert, D., Petropavlovskikh, I., Effertz, P., Ancellet, G., Degenstein, D., Zawada, D., Froidevaux, L., Frith, S., Wild, J., Davis, S., Steinbrecht, W., Leblanc, T., Querel, R., Tourpali, K., Damadeo, R., Maillard-Barras, E., Stübi, R., Vigouroux, C., Arosio, C., Nedoluha, G., Boyd, I., and van Malderen, R.: Updated trends of the stratospheric ozone vertical distribution in the 60° S–60° N latitude range based on the LOTUS regression model, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* [preprint], <https://doi.org/10.5194/acp-2022-137>, in review, 2022.

13. 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., Piters, 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.

14. Komhyr, W. D.: Electrochemical concentration cells for gas analysis, *Ann. Geophys.*, 25, 203–210, 1969.

15. Kuttippurath Jayanarayanan Feng , Wuhu, Müller Rolf, Kumar Pankaj, Raj Sarath, Pillai Gopalakrishna Gopikrishnan, Raina Roy Arctic on the verge of an ozone hole? Atmospheric Chemistry and Physics Discussion started: 24 February 2021 <https://doi.org/10.5194/acp-2021-1313>

16. Li Y., M.P. Chipperfield, W. Feng, S.S. Dhomse, R.J. Pope, F. Li, D. Guo Decrease in winter total column ozone over the Tibetan Plateau during 1979-2017 *Atmos. Chem. Phys.* (2019), p. 28, [10.5194/acp-2019-710](https://doi.org/10.5194/acp-2019-710)

17. Litynska Z., B. Kois, B. Jaworska, 1997. The variation of ozone concentration profile over Poland. Eastern Europe and global change, 3 to 10 October 1994, Cassandra, Halkidiki, Greece, European Commission, Science Research Development, pp. 213-224.
18. Logan, J. A., Staehelin, J., Megretskaia, I. A., Cammas, J.-P., Thouret, V., Claude, H., De Backer, H., Steinbacher, M., Scheel, H.-E., Stübi, R., Fröhlich, M., and Derwent, R.: Changes in ozone over Europe: Analysis of ozone measurements from sondes, regular aircraft (MOZAIC) and alpine surface sites, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 117, D09301, doi:10.1029/2011JD016952, 2012.
19. Mayer B, Kylling A (2005). The libRadtran software package for radiative transfer calculations - description and examples of use *Atmos. Chem. Phys.* 5 1855-1877.
20. Oltmans, S. J.: Surface ozone measurements in clean air, *J. Geophys. Res.-Oceans*, 86, 1174–1180, <https://doi.org/10.1029/JC086iC02p01174>, 1981.
21. Rex, M., Wohltmann, I., Ridder, T., Lehmann, R., Rosenlof, K., Wennberg, P., Weisenstein, D., Notholt, J., Krüger, K., Mohr, V., and Tegtmeier, S.: A tropical West Pacific OH minimum and implications for stratospheric composition, *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 4827–4841, <https://doi.org/10.5194/acp-14-4827-2014>, 2014.
22. Smit, H. G. J., and O3S-DQA, 2012: Guidelines for Homogenization of Ozonesonde Data, SI2N/O3S-DQA Activity as part of “Past Changes in the Vertical Distribution of Ozone Assessment”, available at <https://www.wccos-josie.org/o3s-dqa>
23. 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.
24. 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.
25. Stauffer, Ryan Michael and Thompson, Anne M. and Kollonige, Debra E and Witte, Jacquelyn Cecile and Tarasick, David W. and Davies, Jonathan and Voemel, Holger and Morris, Gary A. and Van Malderen, Roeland and Johnson, Bryan J. J. and et al. A Post-2013 Drop-off in Total Ozone at a Third of Global Ozonesonde Stations: ECC Instrument Artifacts? *Journal Earth and Space Science Open Archive*, 2019 DOI = {10.1002/essoar.10501543.3}, url={<https://doi.org/10.1002/essoar.10501543.3>}

26. Steinbrecht, W., Kubistin, D., Plass-Dülmer, C., Davies, J., Tarasick, D. W., Gathen, P., et al. (2021). COVID-19 crisis reduces free tropospheric ozone across the Northern Hemisphere. *Geophysical Research Letters*, 48, e2021GL091987. <https://doi.org/10.1029/2021GL091987>
27. 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.
28. Webb, A. R. and O. Engelsen (2006) Calculated Ultraviolet Exposure Levels for a Healthy Vitamin D Status. *Photochemistry and Photobiology*. 82(6), 1697-1703.
29. WMO: Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2014, World Meteorological Organization, Global Ozone Research and Monitoring Project – Report No. 55, Geneva, Switzerland, 416 pp., available at: http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/ozone_2014/ozone_asst_report.html, 2014.

Spis załączników:

Załącznik 1: Profile ozonu z sondaży ozonowych wykonanych w okresie od 1.01 do 31.11.2021 r. i odpowiadające im satelitarne mapy całkowitej zawartości ozonu w atmosferze

Załącznik 2: Dobowe przebiegi promieniowania UV-B z miesięcy styczeń – grudzień 2021 r. (średnie, maksymalne i minimalne) zmierzone za pomocą przyrządu Solar Light (Łeba, Legionowo, Zakopane)

Załącznik 3: Dawki dobowe promieniowania UV-B z miesięcy styczeń – grudzień 2021 r. zmierzone za pomocą przyrządu Solar Light (Łeba, Legionowo, Zakopane)

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 Badań i Rozwoju IMGW-PIB za udostępnienie do analizy danych promieniowania całkowitego i usłonecznienia ze stacji w Łebie i Zakopanem.

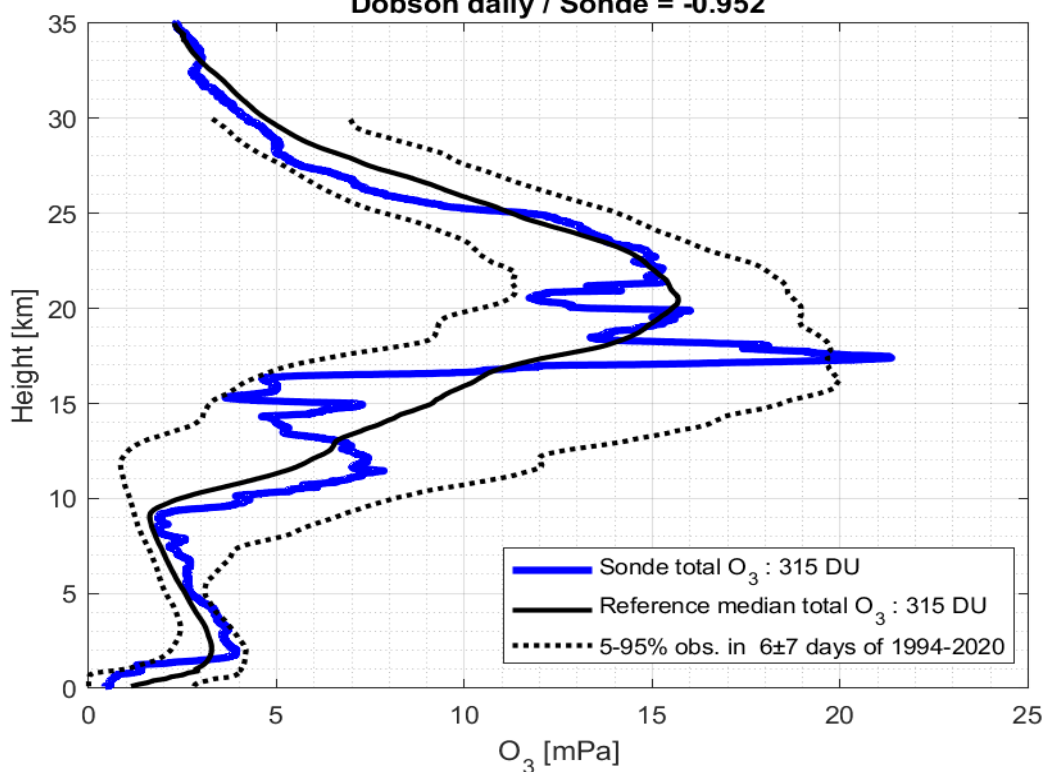
ZAŁĄCZNIKI

1. PROFILE OZONU Z SONDAŻY OZONOWYCH WYKONANYCH W OKRESIE 1.01 DO 31.12.2021 R. I ODPOWIADAJĄCE IM SATELITARNE MAPY CAŁKOWITEJ ZAWARTOŚCI OZONU W ATMOSFERZE.
2. DOBOWE PRZEBIEGI PROMIENIOWANIA UV-B Z MIESIĘCY STYCZEŃ - GRUDZIEŃ 2021 R. (ŚREDNIE, MAKSYMALNE I MINIMALNE) ZMIERZONE ZA POMOCĄ PRZYRZĄDU SOLAR LIGHT (ŁEBA, LEGIONOWO, ZAKOPANE).
3. DAWKI DOBOWE PROMIENIOWANIA UV-B Z MIESIĘCY STYCZEŃ - GRUDZIEŃ 2021 R. ZMIERZONE ZA POMOCĄ PRZYRZĄDU SOLAR LIGHT (ŁEBA, LEGIONOWO, ZAKOPANE).

ZAŁĄCZNIK 1

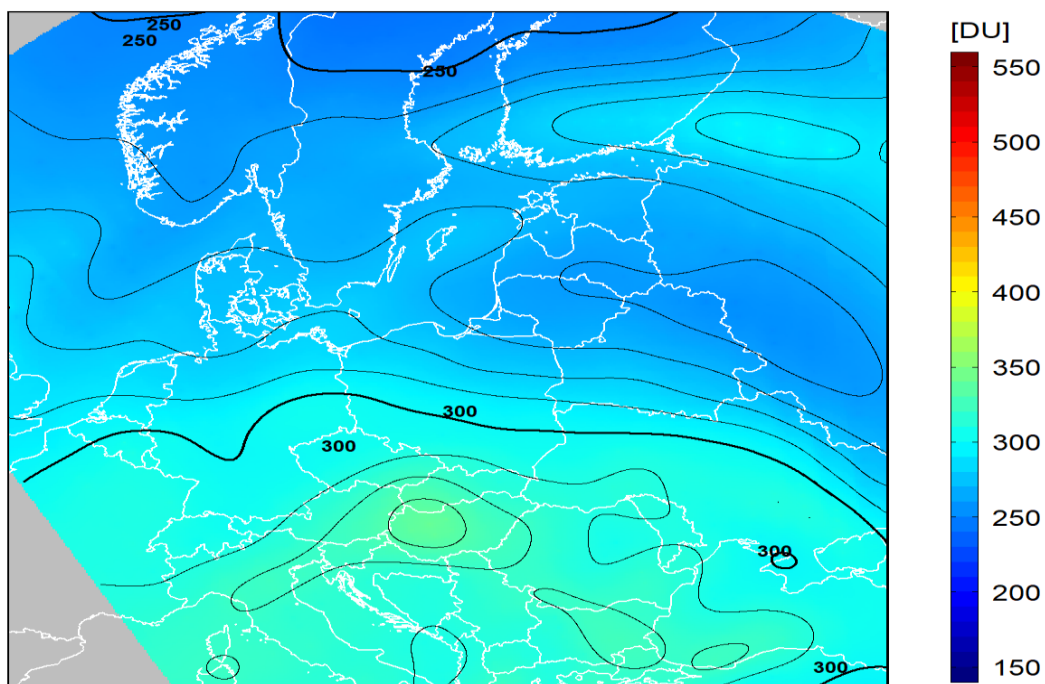
PROFILE OZONU Z SONDAŻY OZONOWYCH WYKONANYCH
W OKRESIE 1.01 DO 31.12.2021 R. I ODPOWIADAJĄCE IM
SATELITARNE MAPY CAŁKOWITEJ ZAWARTOŚCI OZONU
W ATMOSFERZE

Legionowo 06-Jan-2021 12UTC
 Dobson daily / Sonde = -0.952



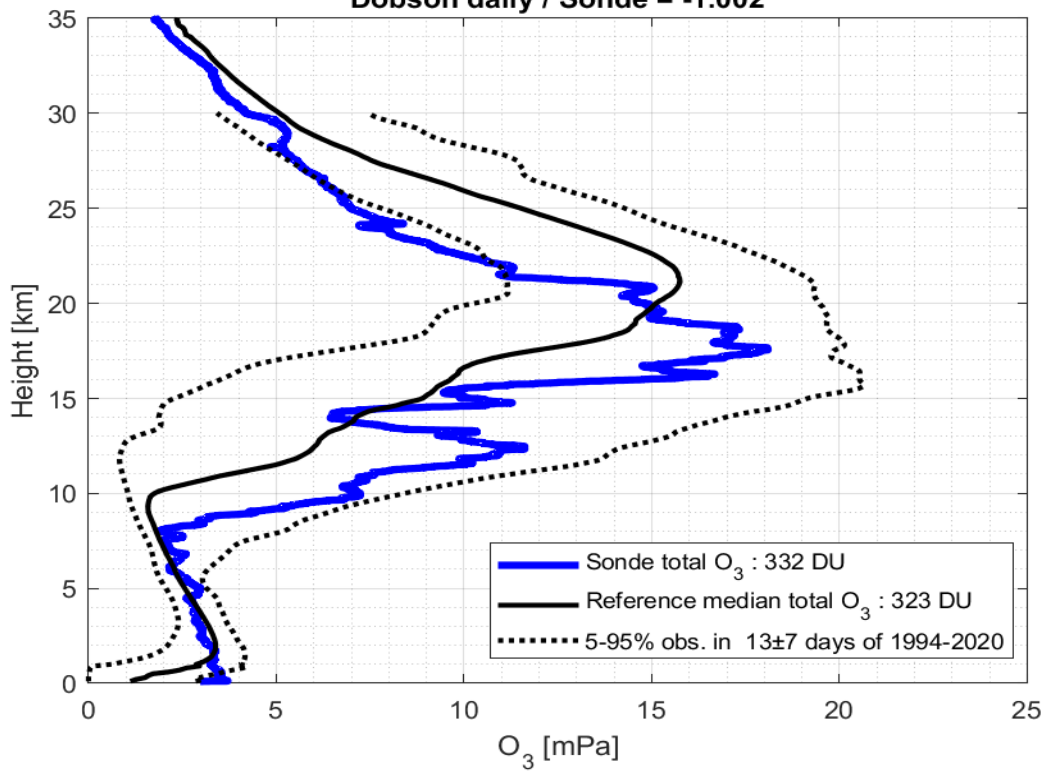
2021-01-06 godz. 11:08:30 - 11:16:14 UTC

Całkowita zawartość ozonu (O₃) w kolumnie atmosfery



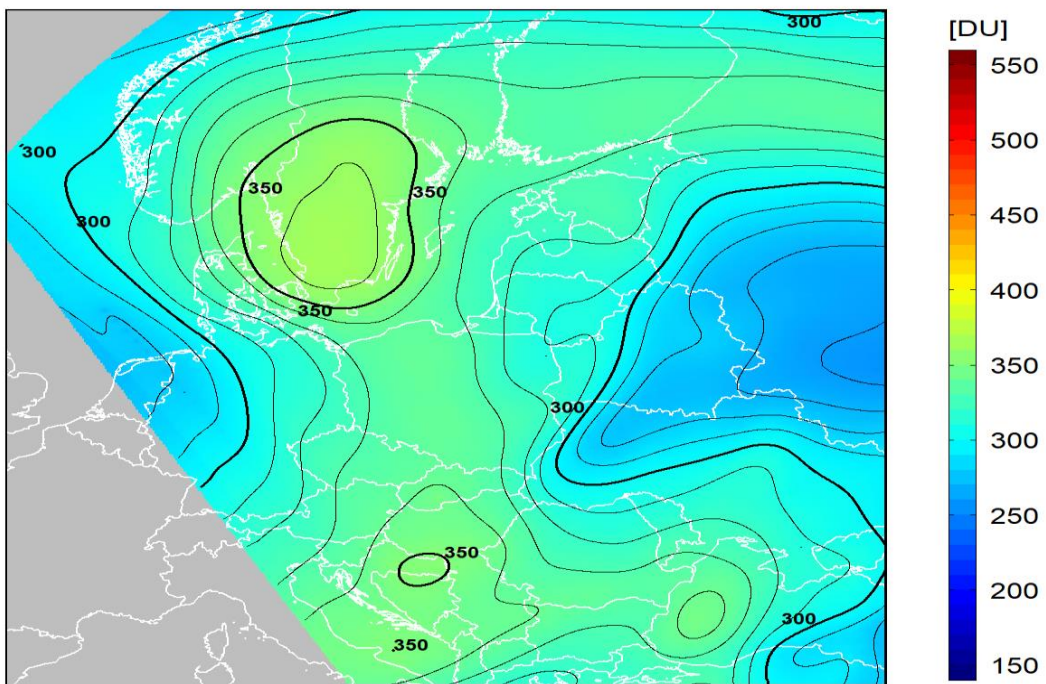
dane satelitarne: Suomi-NPP/OMPS

Legionowo 13-Jan-2021 12UTC
Dobson daily / Sonde = -1.002



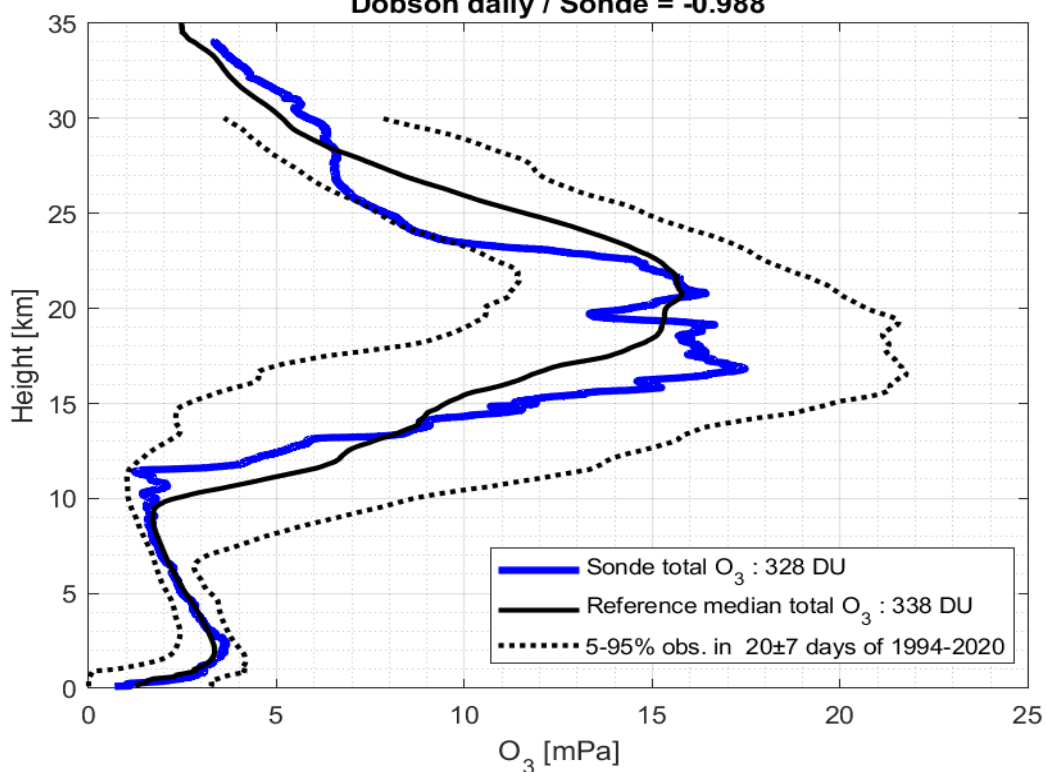
2021-01-13 godz. 10:36:51 - 10:44:50 UTC

Całkowita zawartość ozonu (O₃) w kolumnie atmosfery



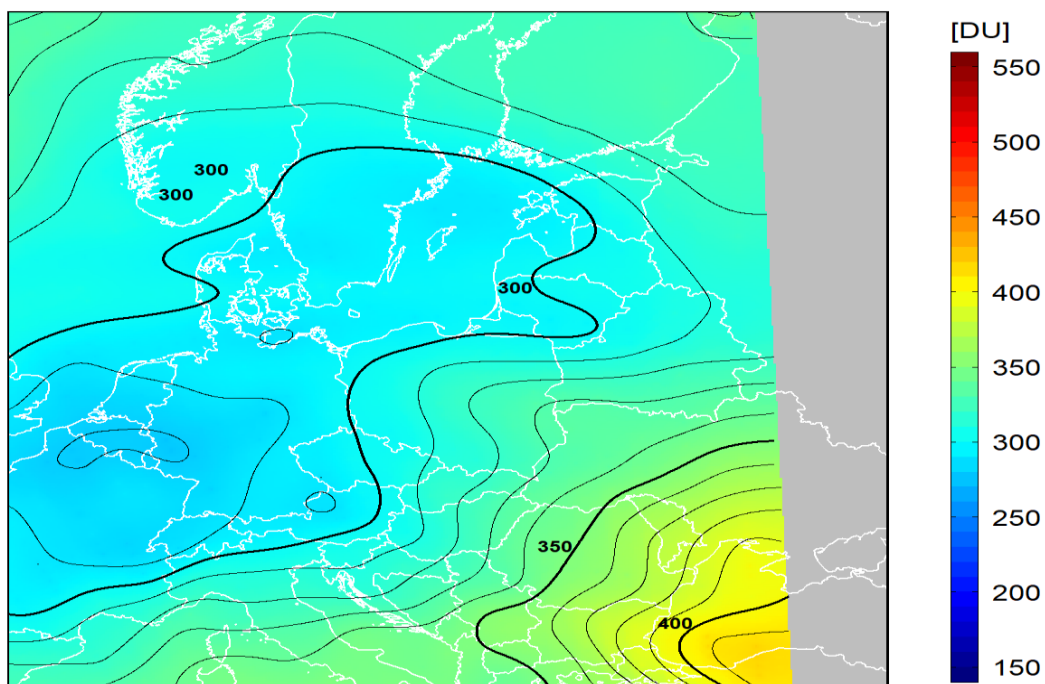
dane satelitarne: Suomi-NPP/OMPS

Legionowo 20-Jan-2021 12UTC
Dobson daily / Sonde = -0.988



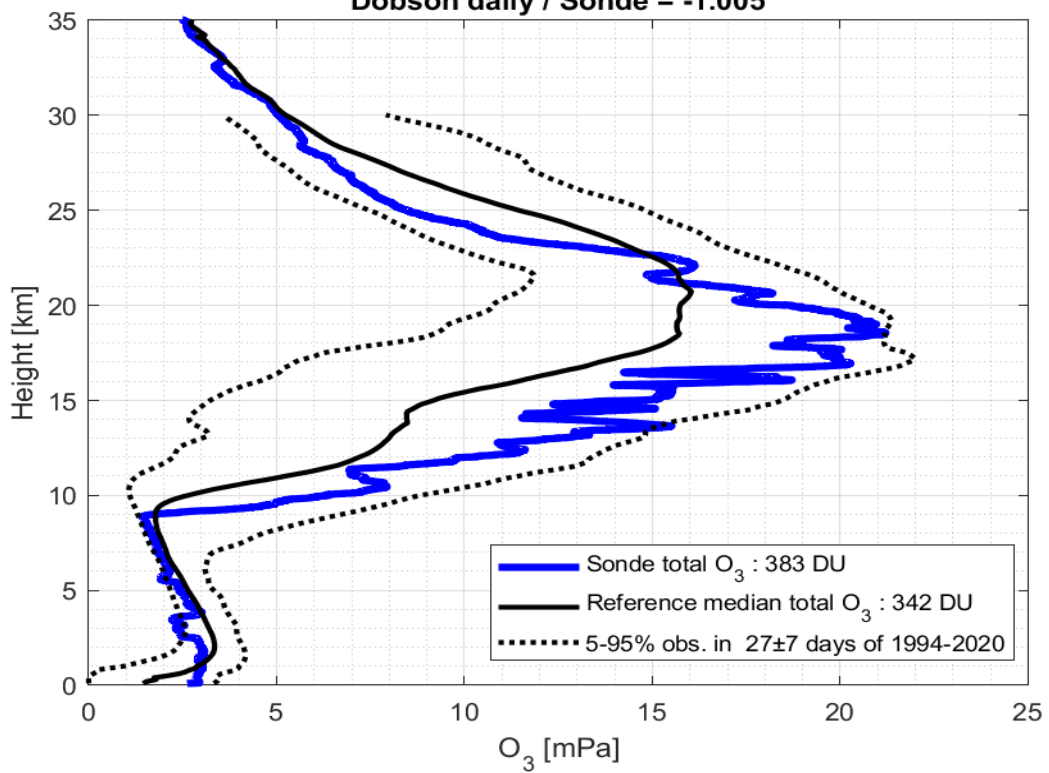
2021-01-20 godz. 11:46:42 - 11:53:48 UTC

Całkowita zawartość ozonu (O₃) w kolumnie atmosfery



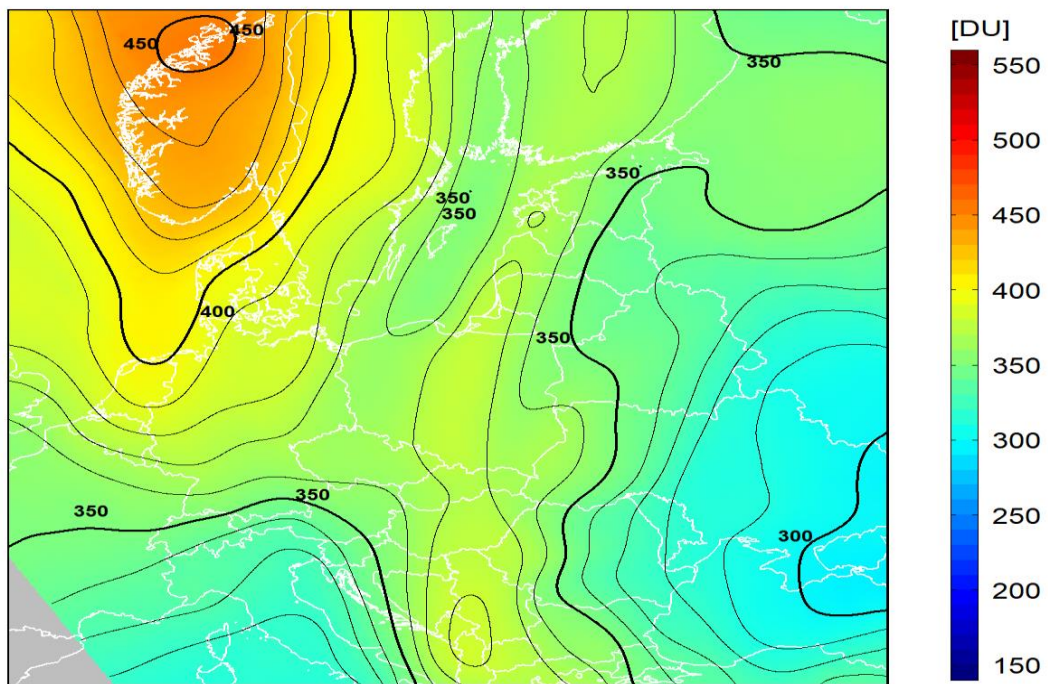
dane satelitarne: Suomi-NPP/OMPS

Legionowo 27-Jan-2021 12UTC
 Dobson daily / Sonde = -1.005



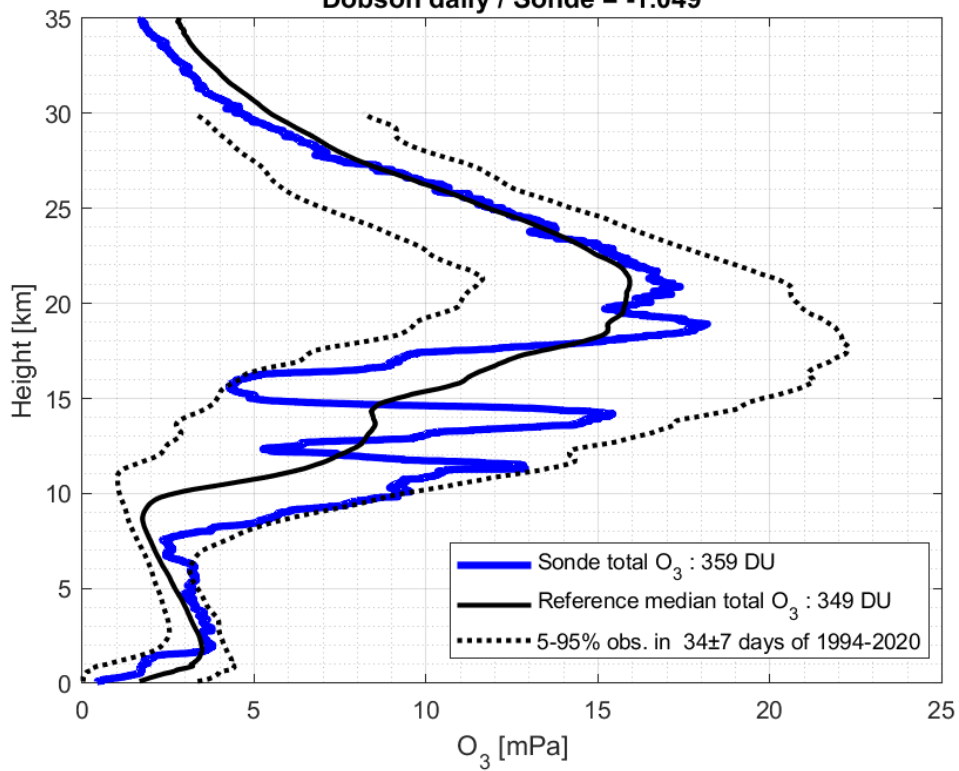
2021-01-27 godz. 11:14:59 - 11:22:35 UTC

Całkowita zawartość ozonu (O₃) w kolumnie atmosfery



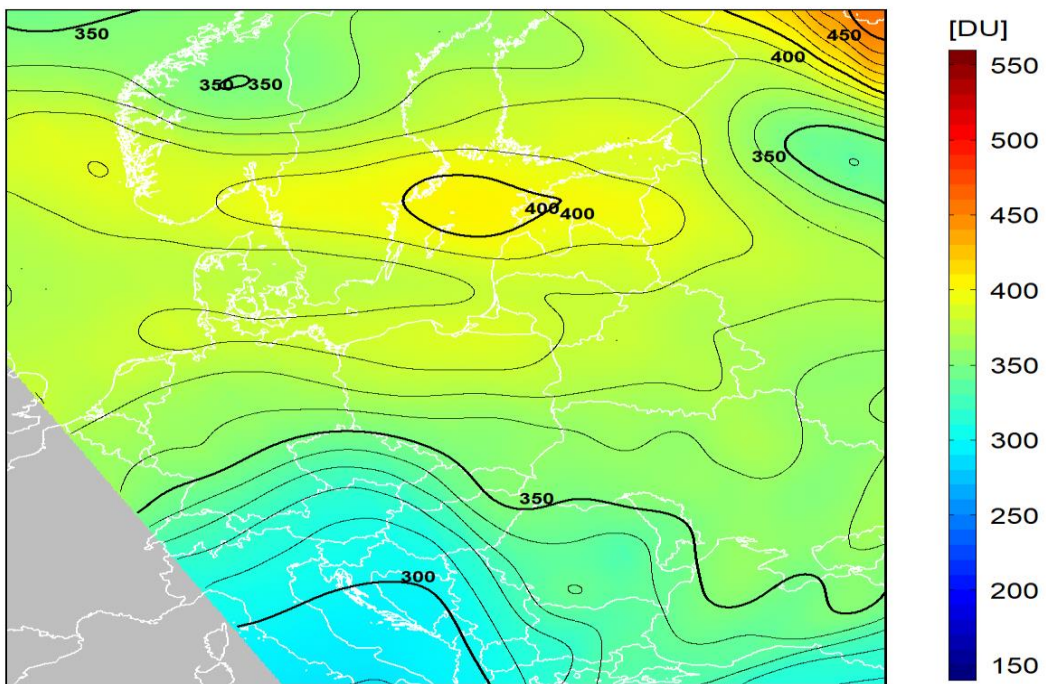
dane satelitarne: Suomi-NPP/OMPS

Legionowo 03-Feb-2021 12UTC
Dobson daily / Sonde = -1.049



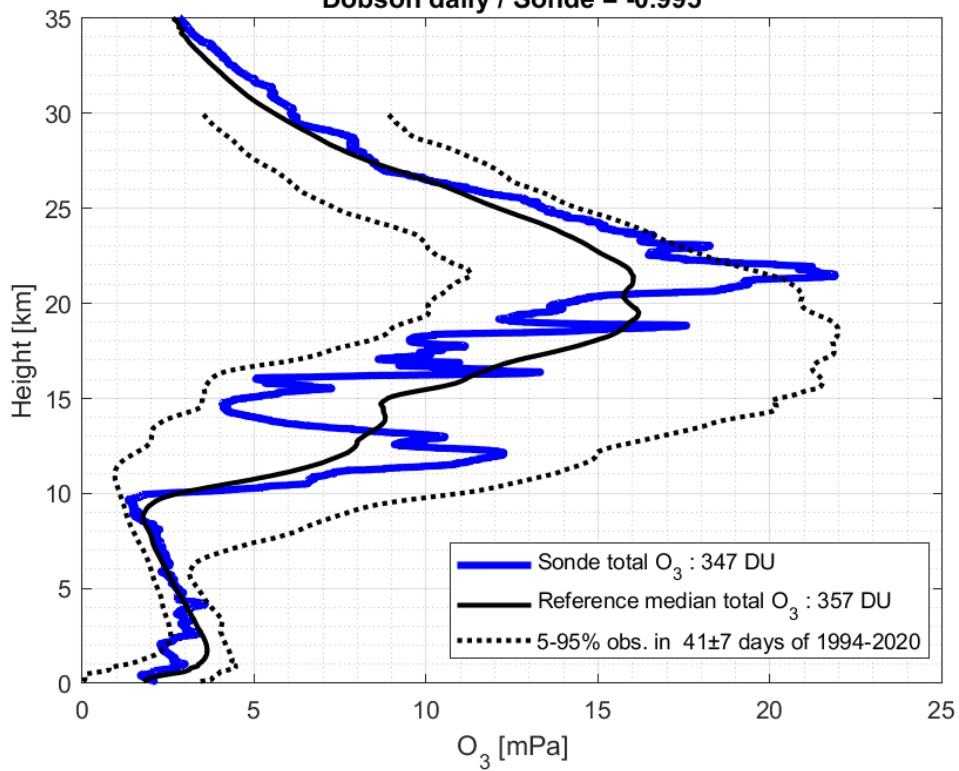
2021-02-03 godz. 10:43:13 - 10:51:35 UTC

Całkowita zawartość ozonu (O₃) w kolumnie atmosfery



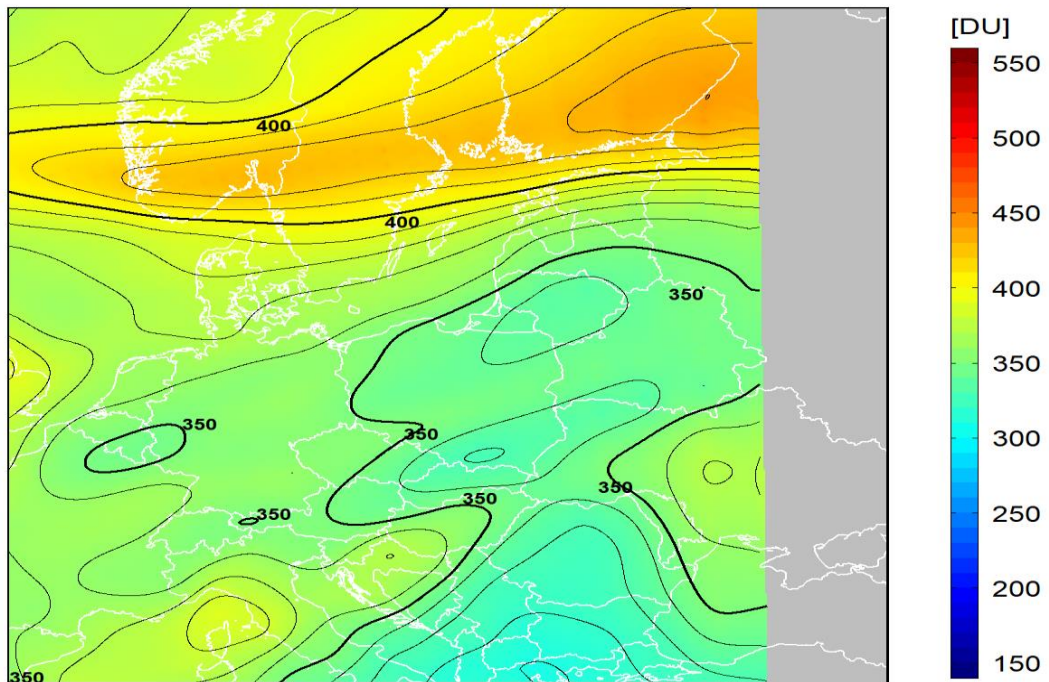
dane satelitarne: Suomi-NPP/OMPS

Legionowo 10-Feb-2021 12UTC
 Dobson daily / Sonde = -0.995



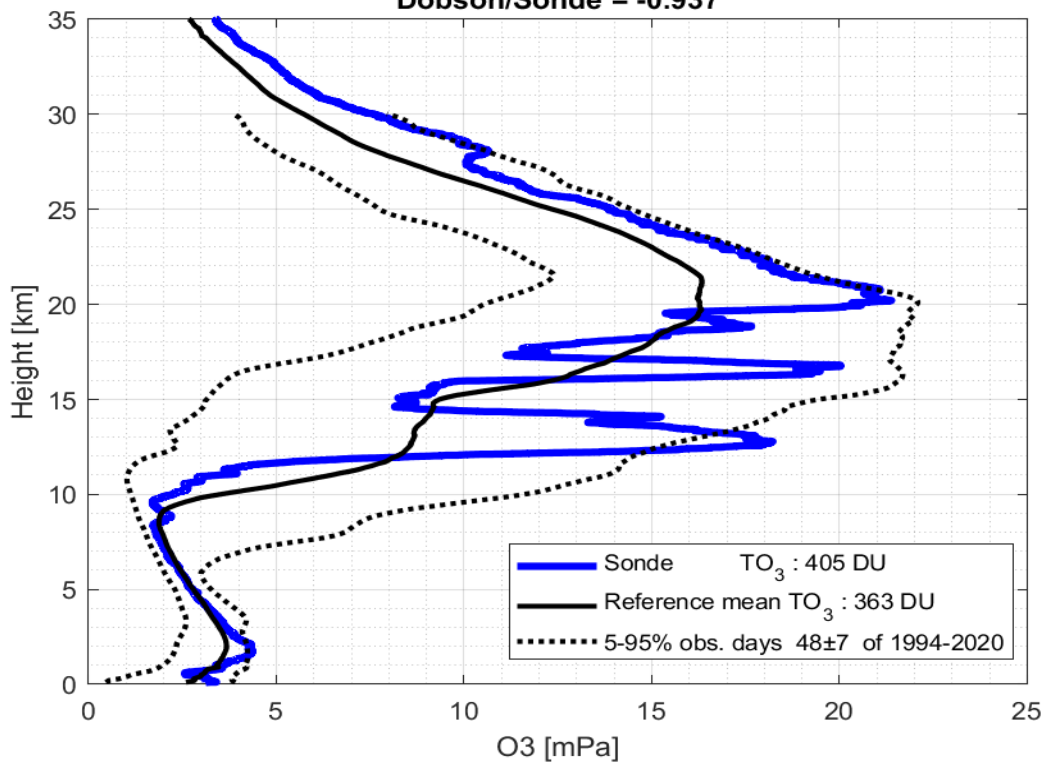
2021-02-10 godz. 11:53:01 - 12:00:08 UTC

Całkowita zawartość ozonu (O₃) w kolumnie atmosfery



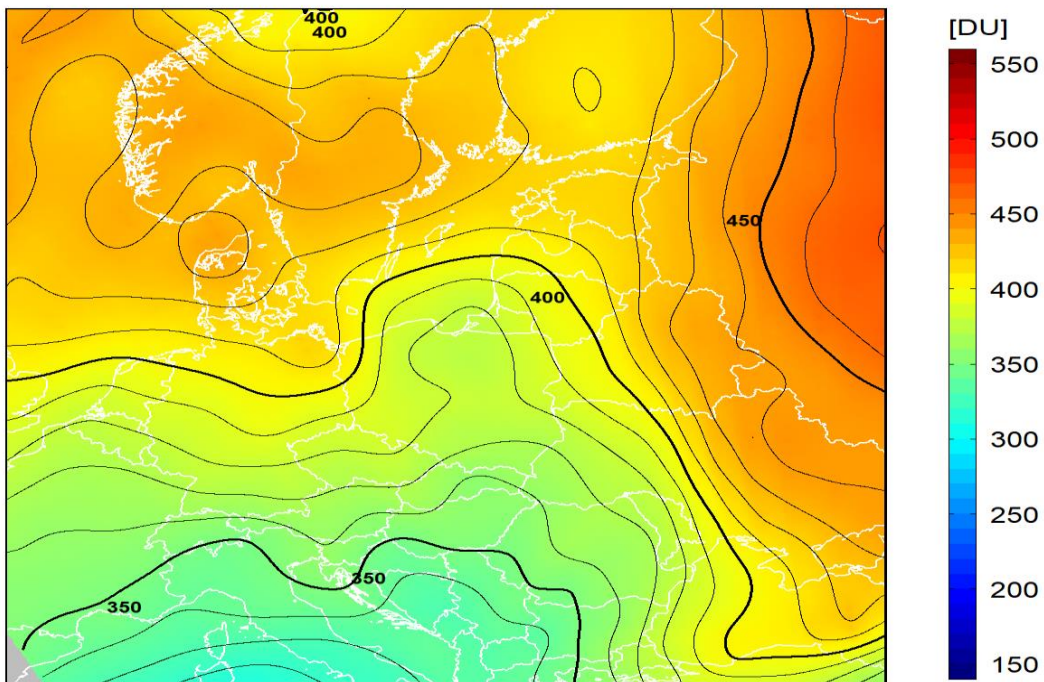
dane satelitarne: Suomi-NPP/OMPS

Legionowo, 17-Feb-2021 12UTC
 Dobson/Sonde = -0.937



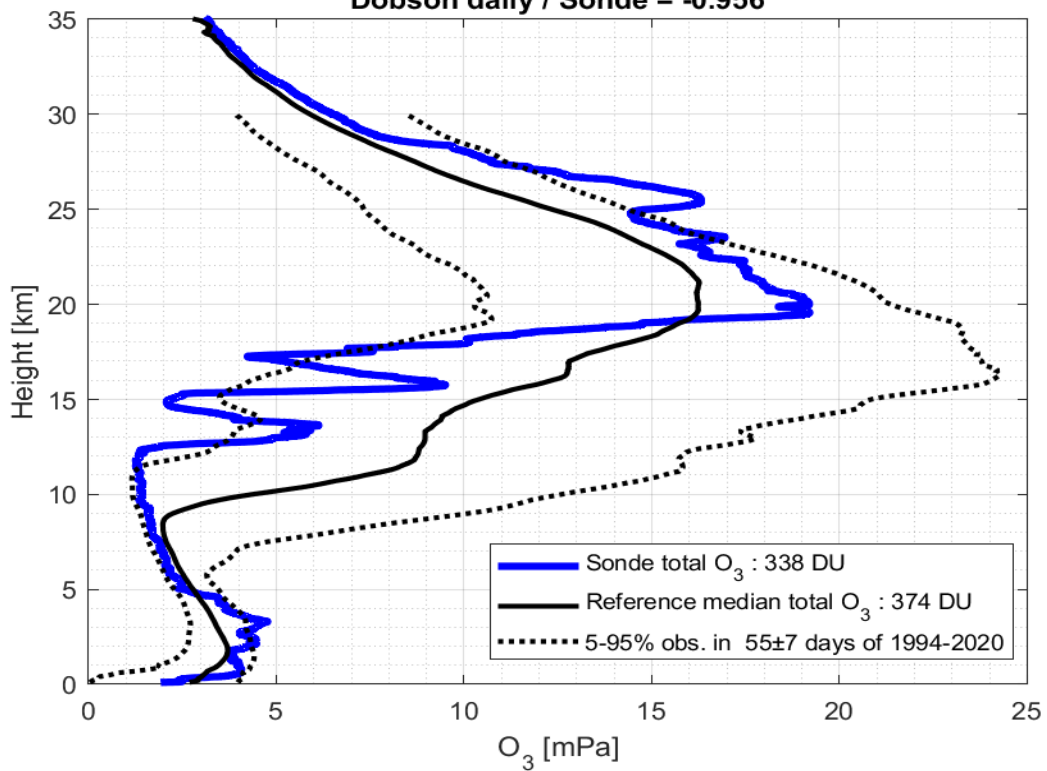
2021-02-17 godz. 11:21:15 - 11:28:52 UTC

Całkowita zawartość ozonu (O₃) w kolumnie atmosfery



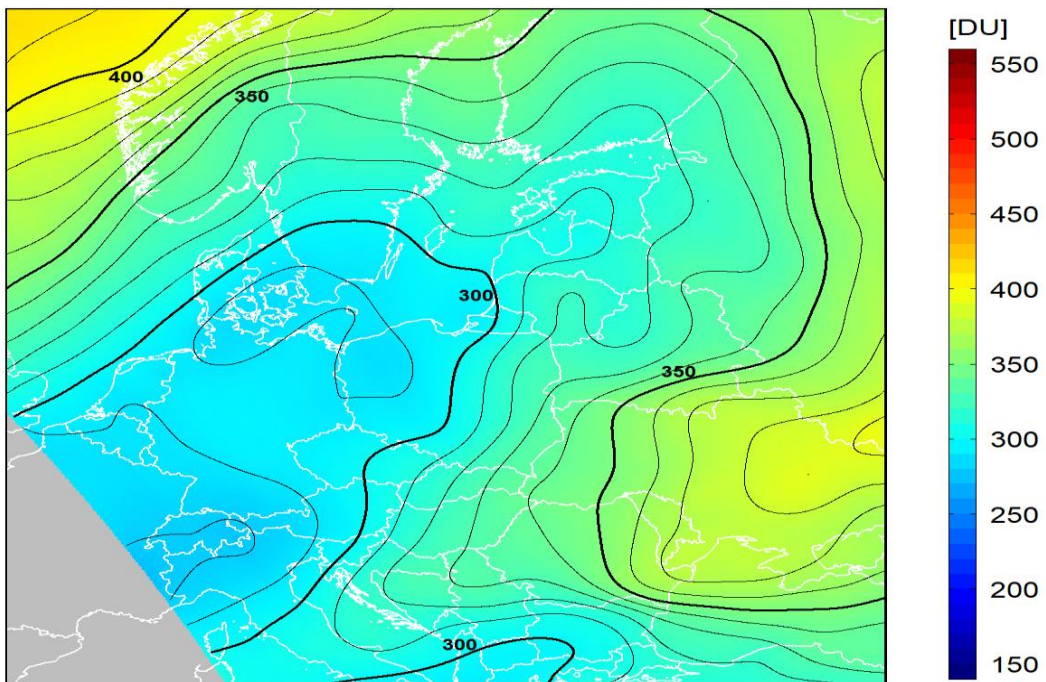
dane satelitarne: Suomi-NPP/OMPS

Legionowo 24-Feb-2021 12UTC
Dobson daily / Sonde = -0.956



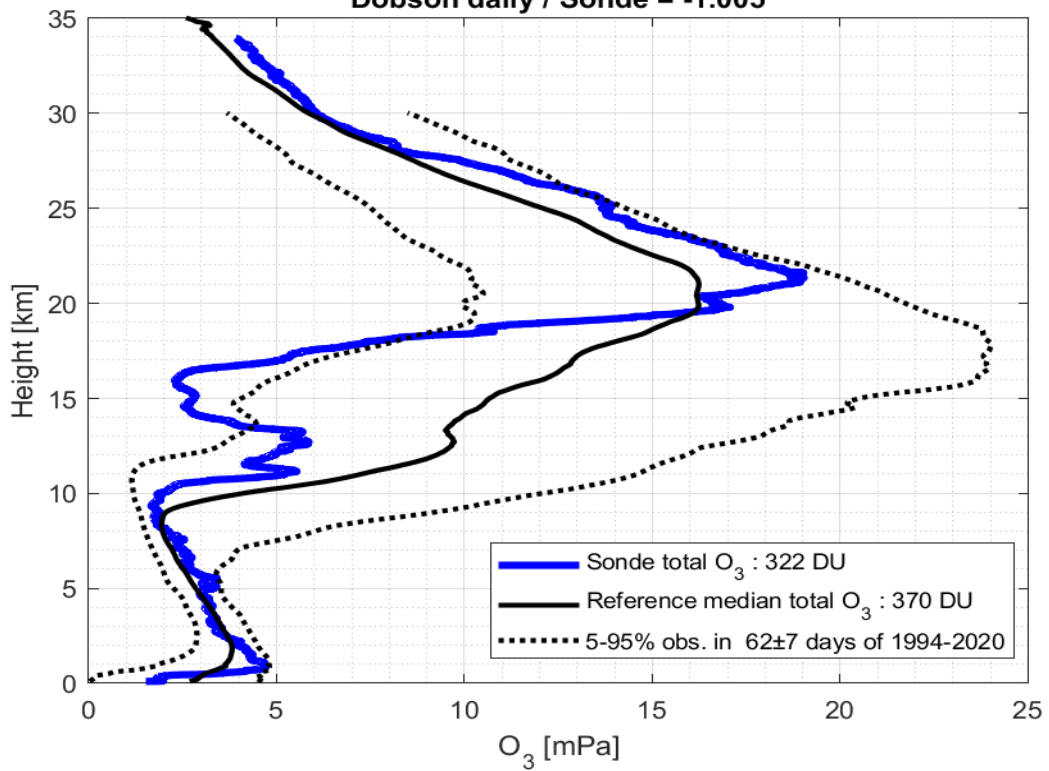
2021-02-24 godz. 10:49:31 - 10:57:45 UTC

Całkowita zawartość ozonu (O_3) w kolumnie atmosfery



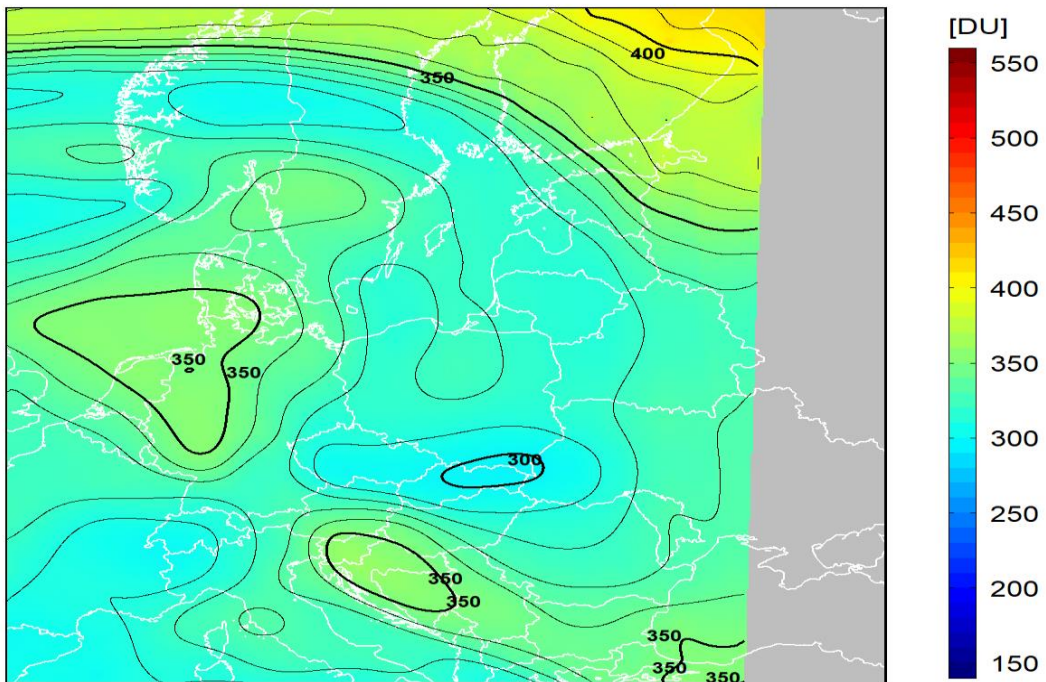
dane satelitarne: Suomi-NPP/OMPS

Legionowo 03-Mar-2021 12UTC
Dobson daily / Sonde = -1.005



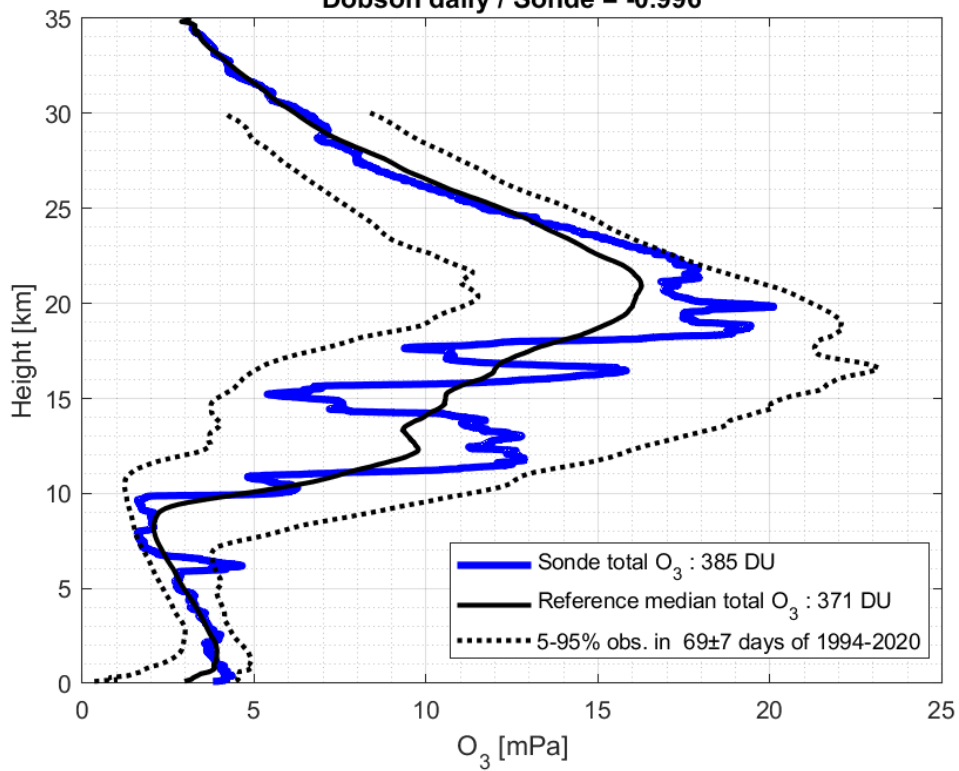
2021-03-03 godz. 11:59:20 - 12:06:27 UTC

Całkowita zawartość ozonu (O₃) w kolumnie atmosfery



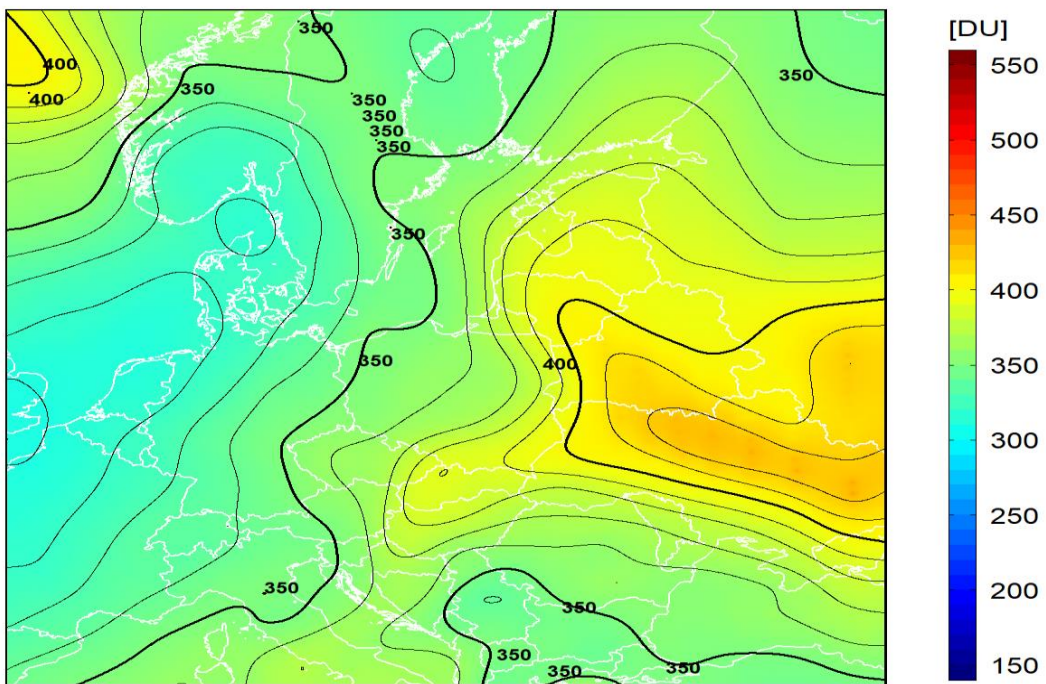
dane satelitarne: Suomi-NPP/OMPS

Legionowo 10-Mar-2021 12UTC
Dobson daily / Sonde = -0.996



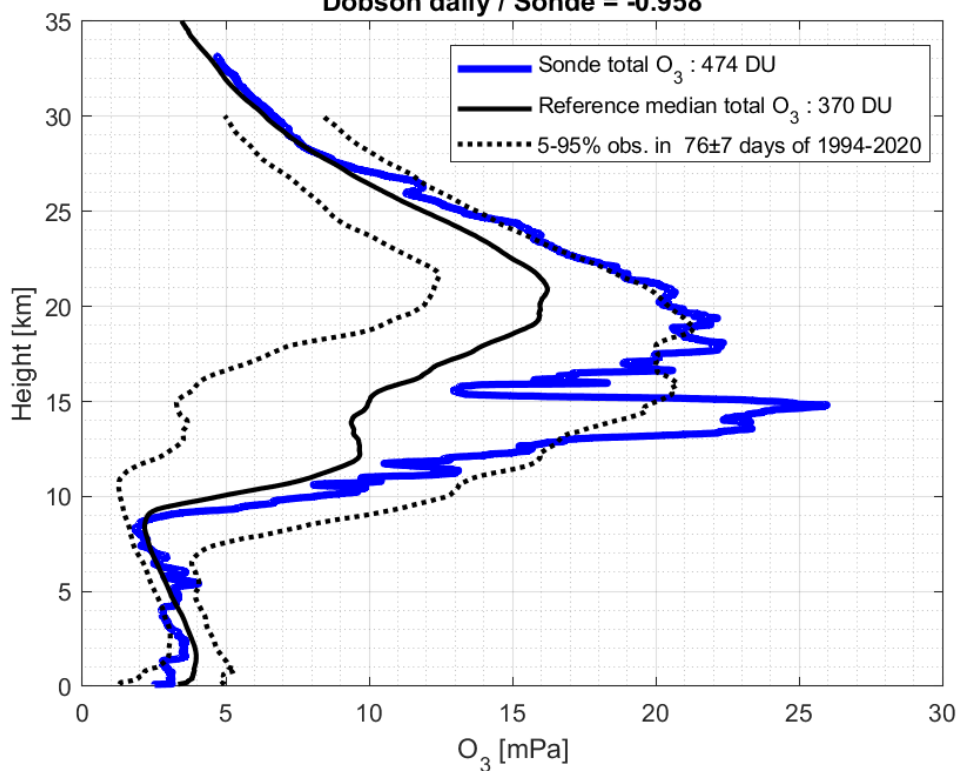
2021-03-10 godz. 11:27:32 - 11:35:02 UTC

Całkowita zawartość ozonu (O₃) w kolumnie atmosfery



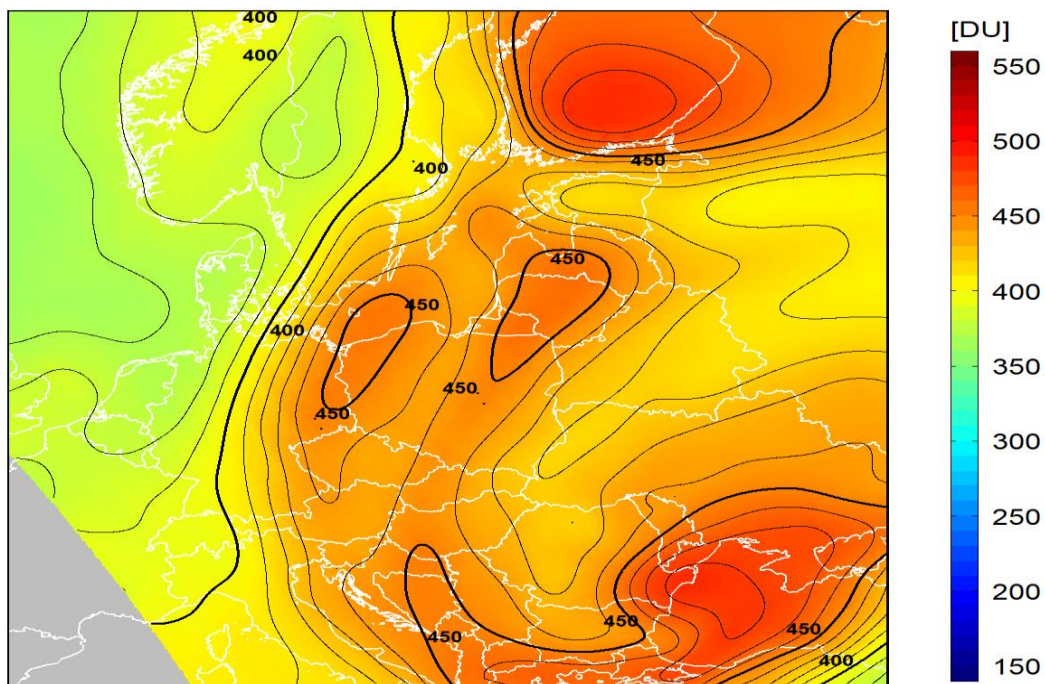
dane satelitarne: Suomi-NPP/OMPS

Legionowo 17-Mar-2021 12UTC
Dobson daily / Sonde = -0.958



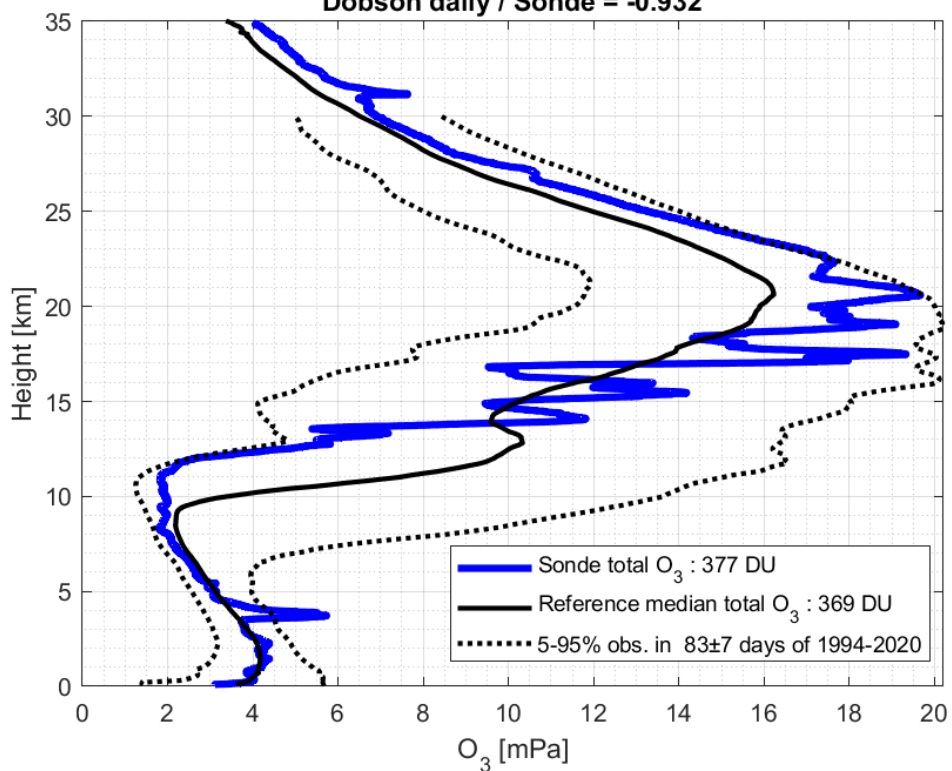
2021-03-17 godz. 10:55:45 - 11:03:52 UTC

Całkowita zawartość ozonu (O_3) w kolumnie atmosfery



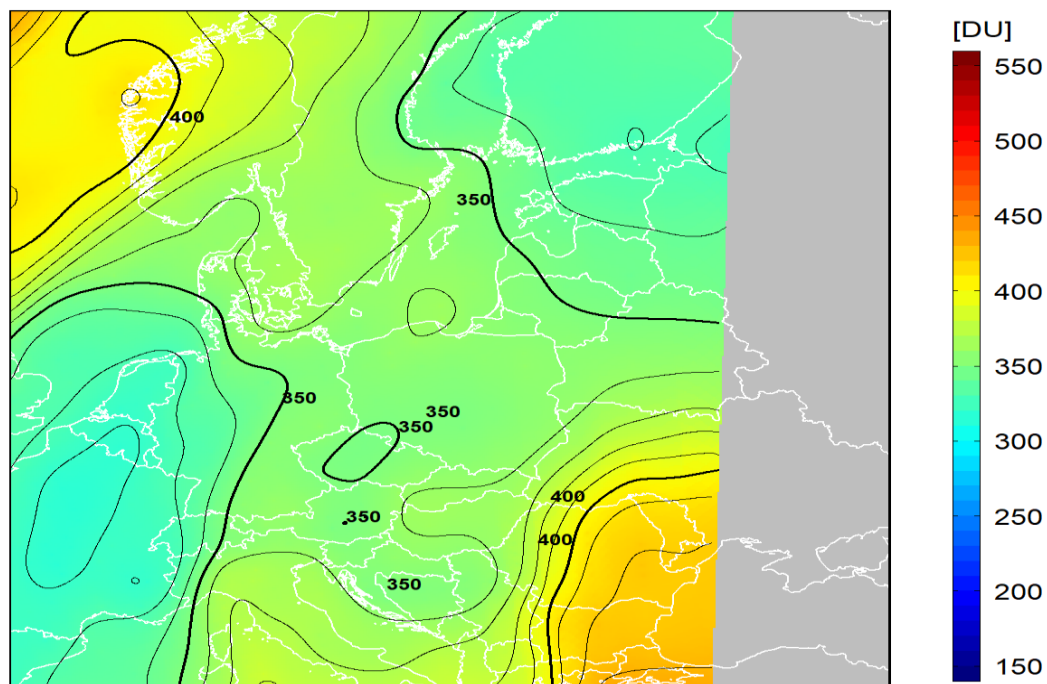
dane satelitarne: Suomi-NPP/OMPS

Legionowo 24-Mar-2021 12UTC
 Dobson daily / Sonde = -0.932



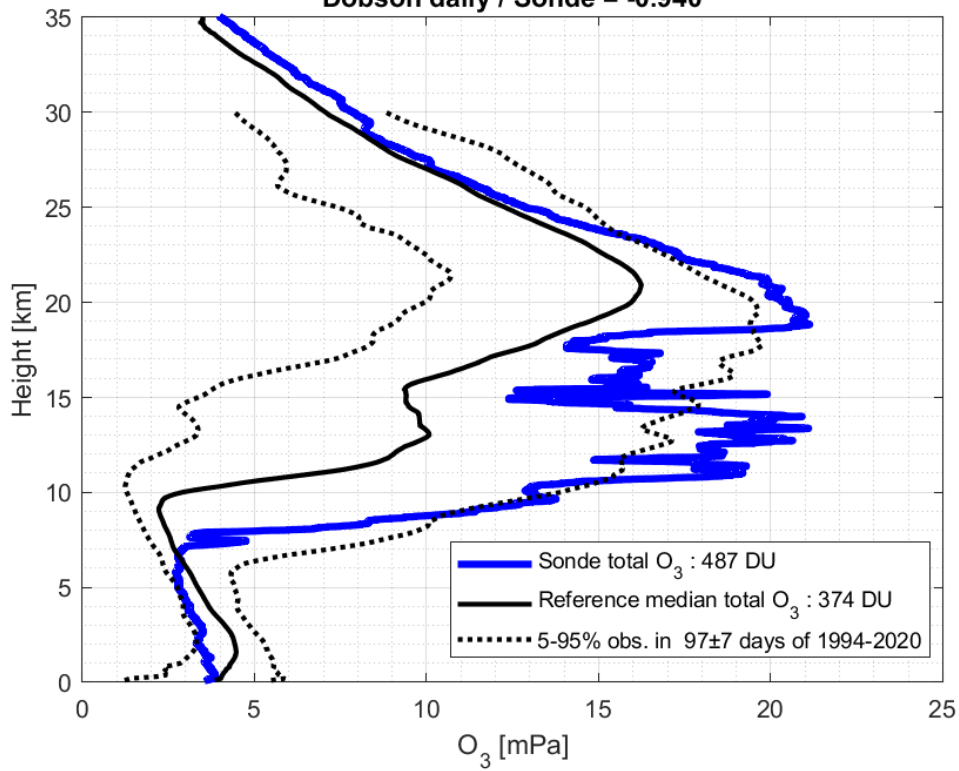
2021-03-24 godz. 12:05:35 - 12:12:42 UTC

Całkowita zawartość ozonu (O₃) w kolumnie atmosfery



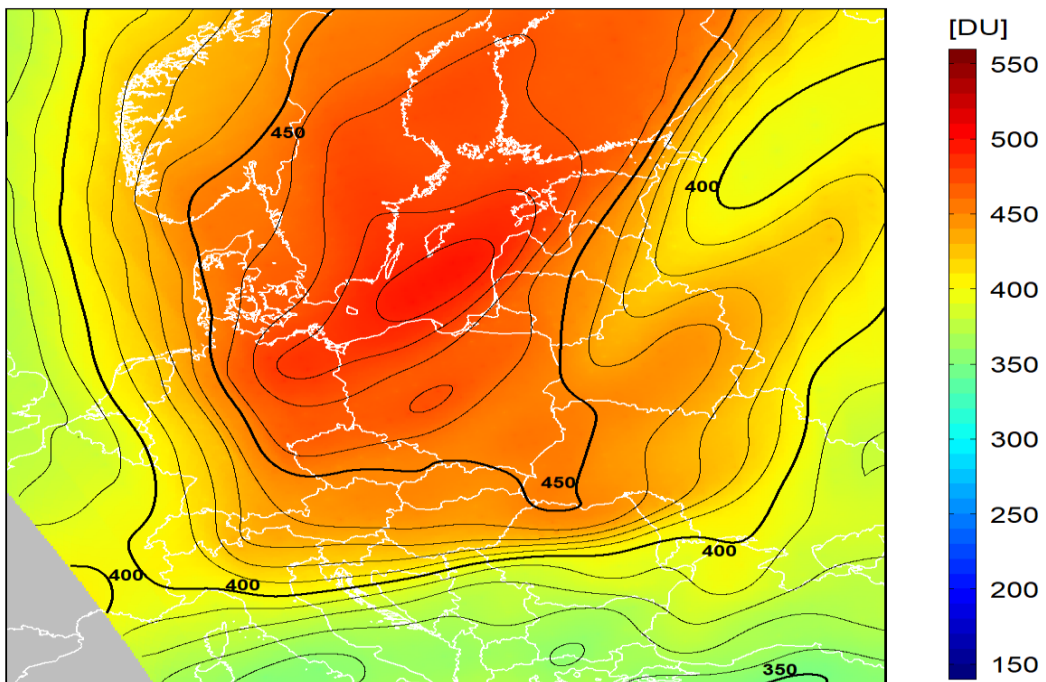
dane satelitarne: Suomi-NPP/OMPS

Legionowo 07-Apr-2021 12UTC
Dobson daily / Sonde = -0.940

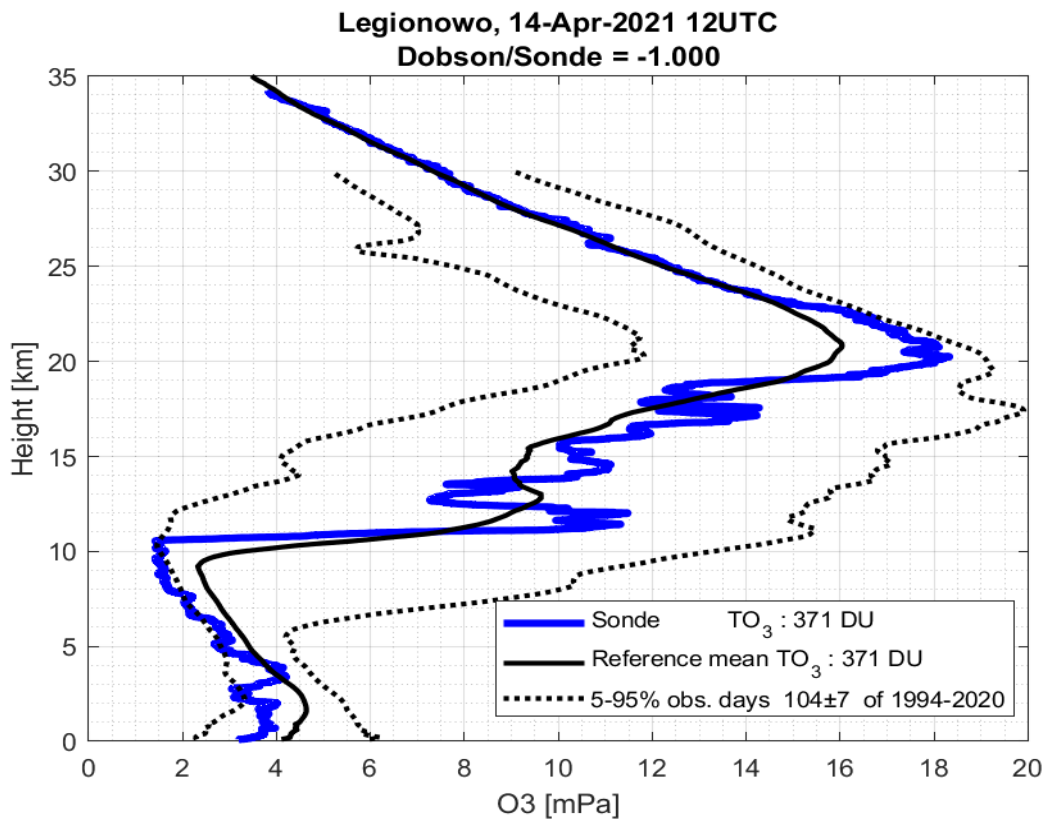


2021-04-07 godz. 11:01:57 - 11:09:57 UTC

Całkowita zawartość ozonu (O₃) w kolumnie atmosfery

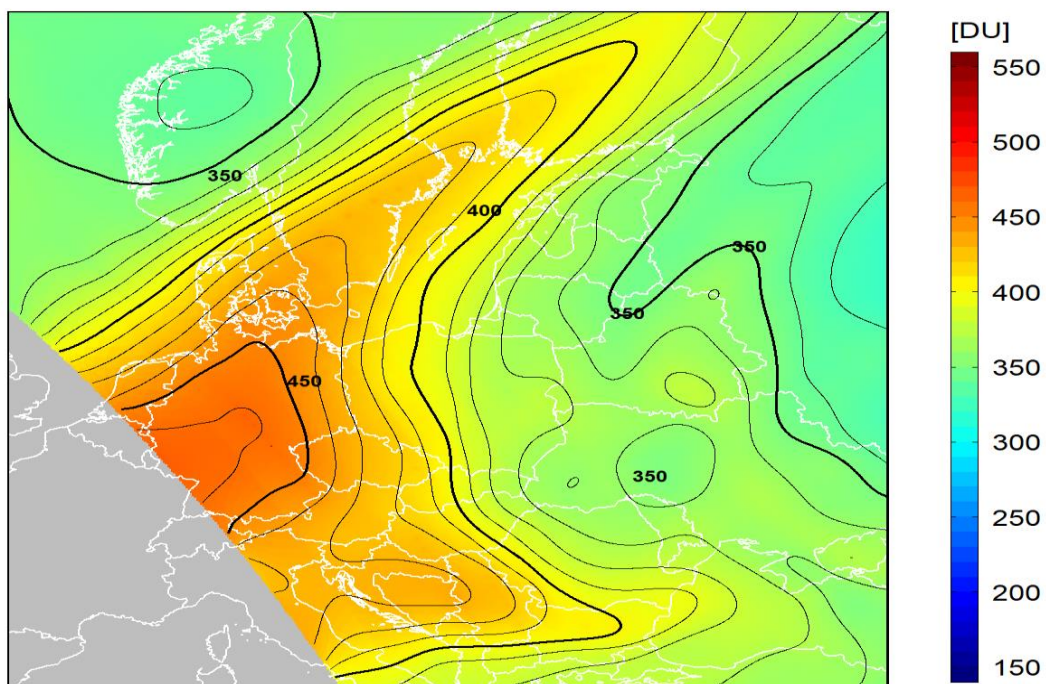


dane satelitarne: Suomi-NPP/OMPS



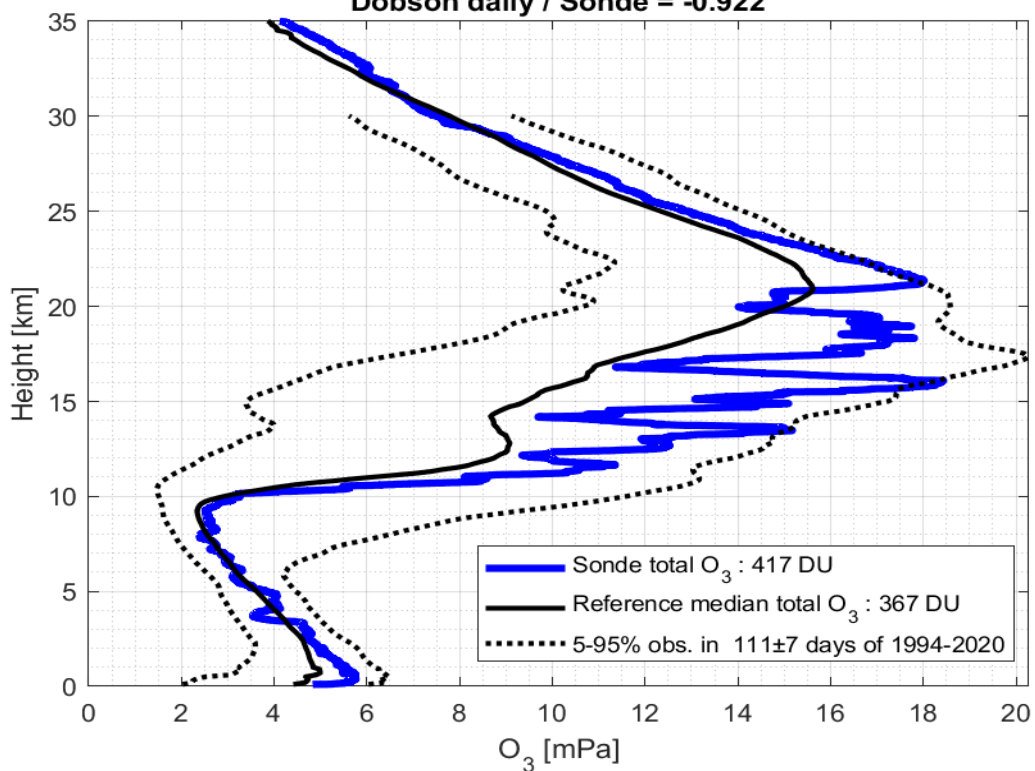
2021-04-14 godz. 10:30:21 - 10:38:50 UTC

Całkowita zawartość ozonu (O_3) w kolumnie atmosfery



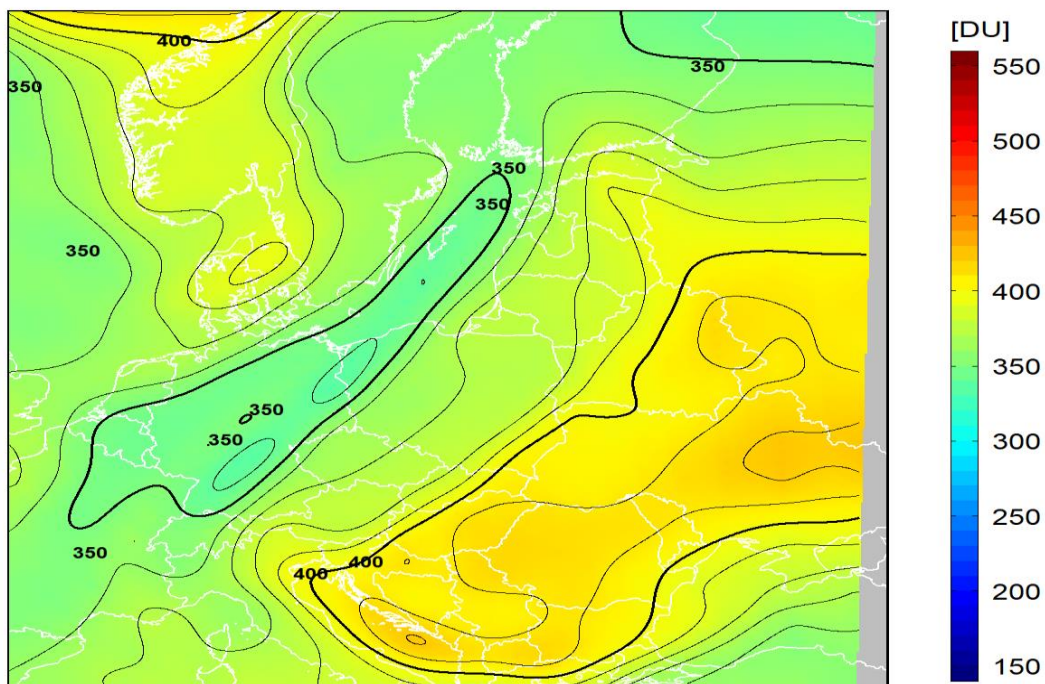
dane satelitarne: Suomi-NPP/OMPS

Legionowo 21-Apr-2021 12UTC
Dobson daily / Sonde = -0.922

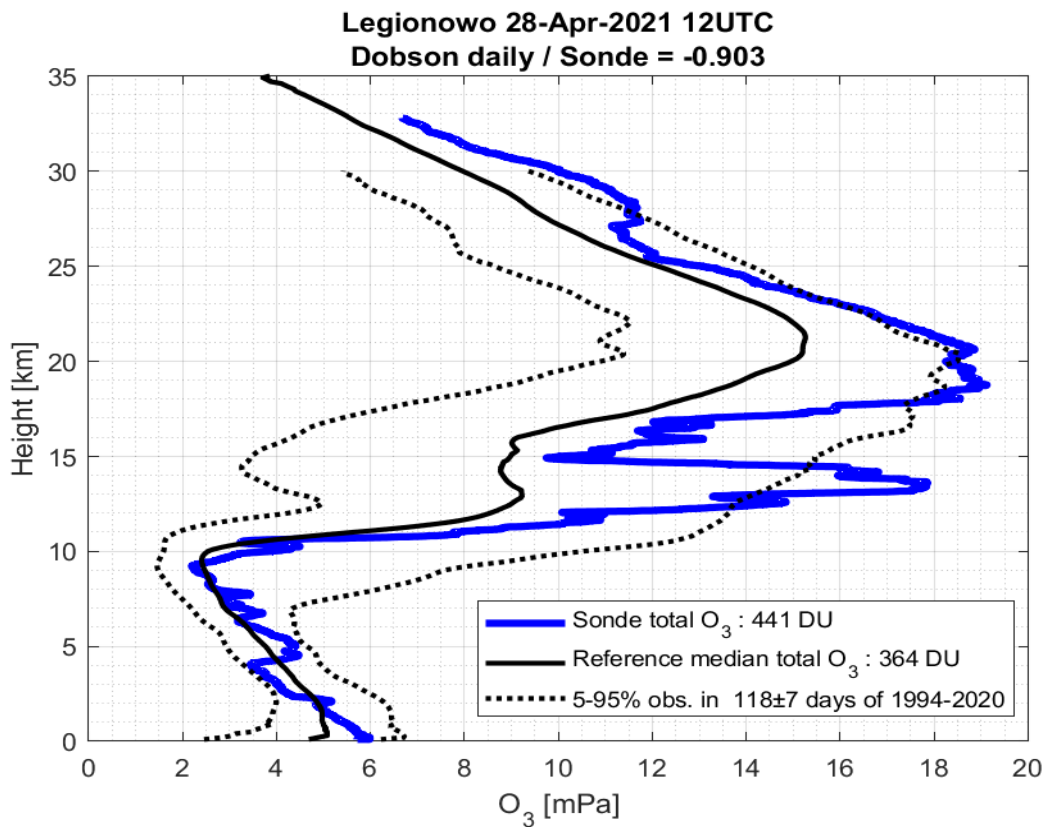


2021-04-21 godz. 11:39:56 - 11:47:18 UTC

Całkowita zawartość ozonu (O_3) w kolumnie atmosfery

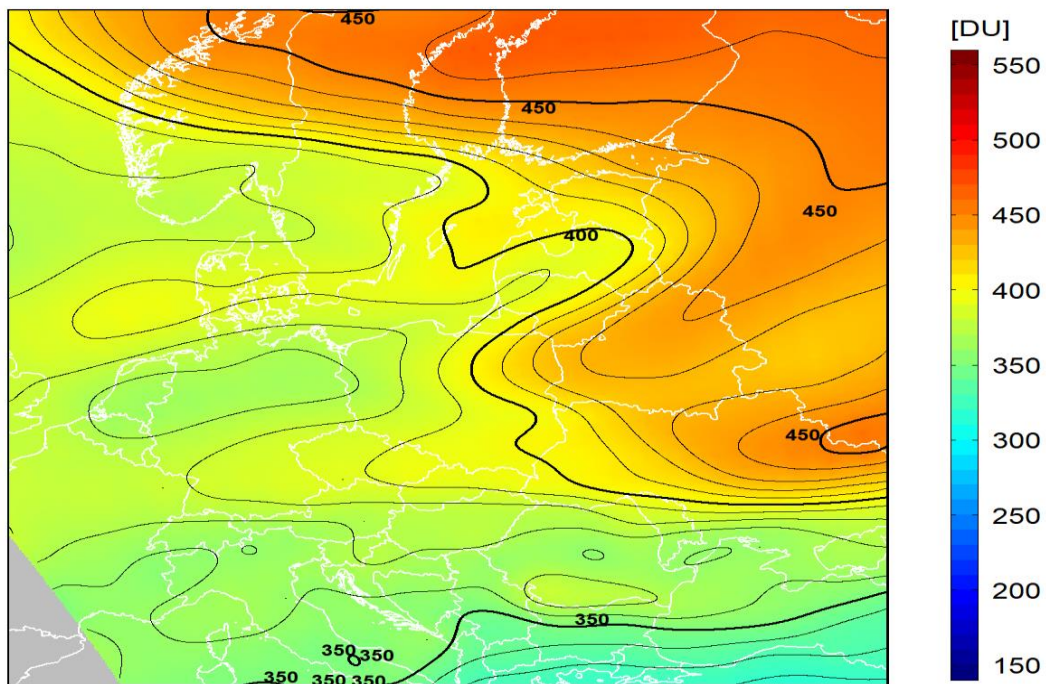


dane satelitarne: Suomi-NPP/OMPS

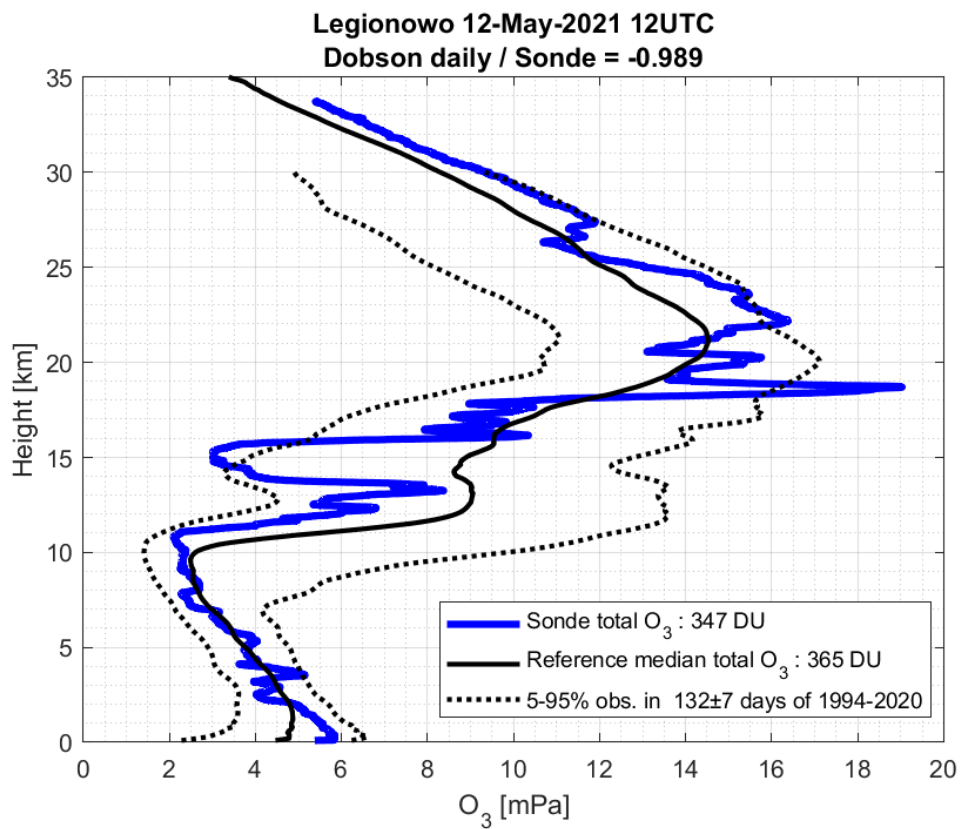


2021-04-28 godz. 11:08:08 - 11:16:00 UTC

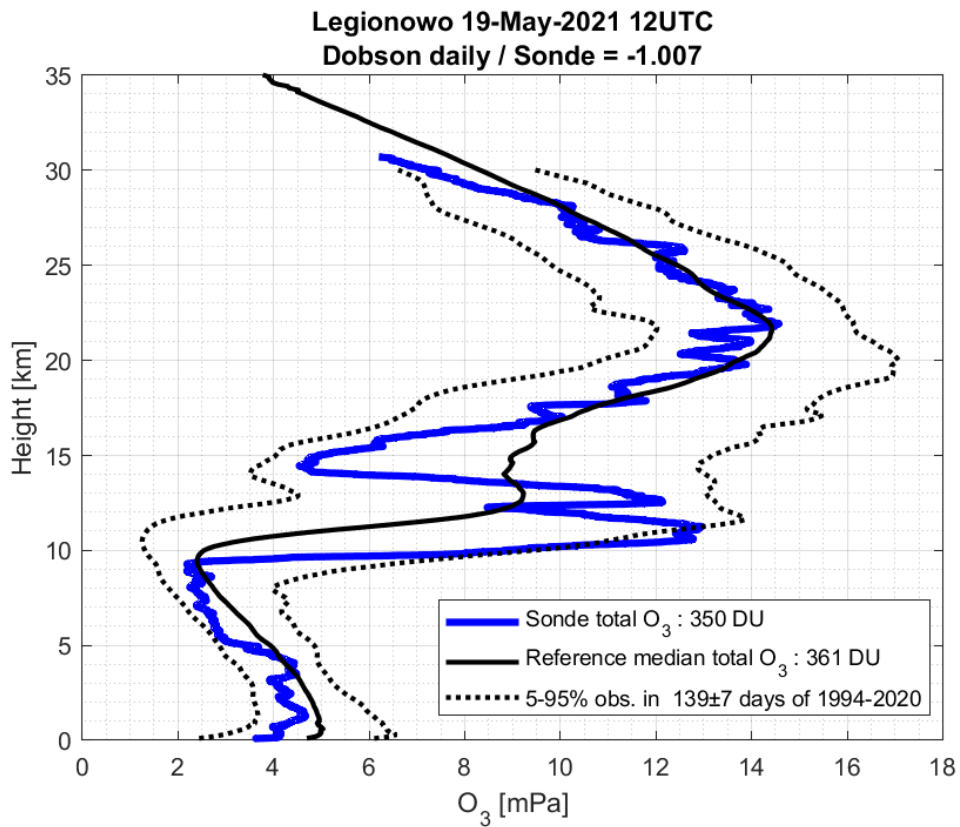
Całkowita zawartość ozonu (O_3) w kolumnie atmosfery



dane satelitarne: Suomi-NPP/OMPS

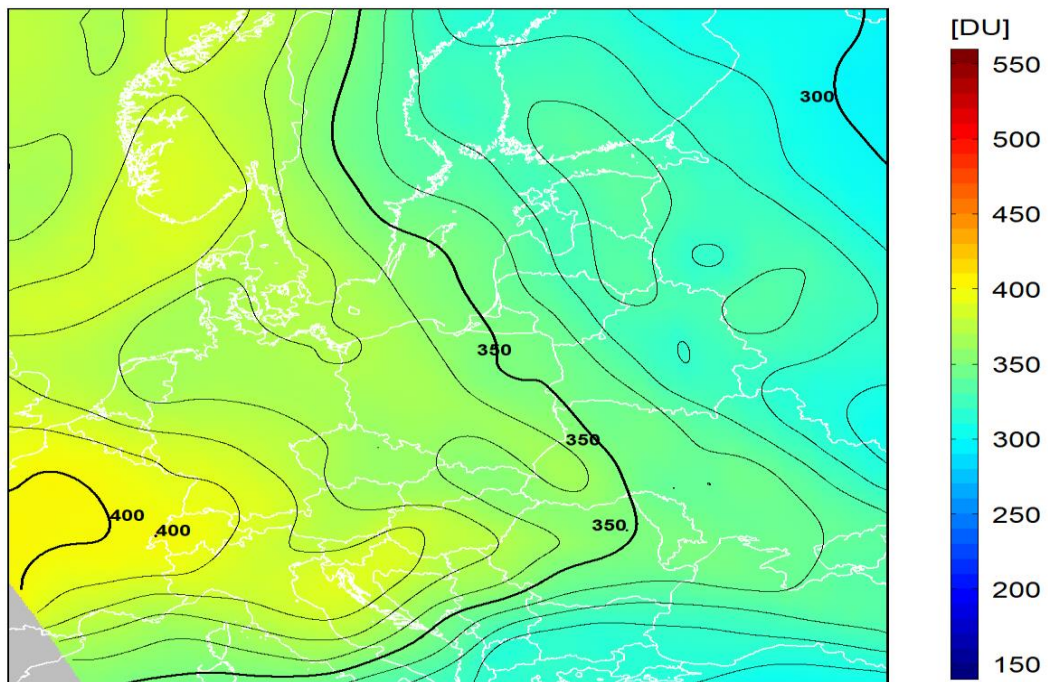


Brak stalitarnej mapy całkowitej zawartości ozonu z dnia 12.05.2021 r.

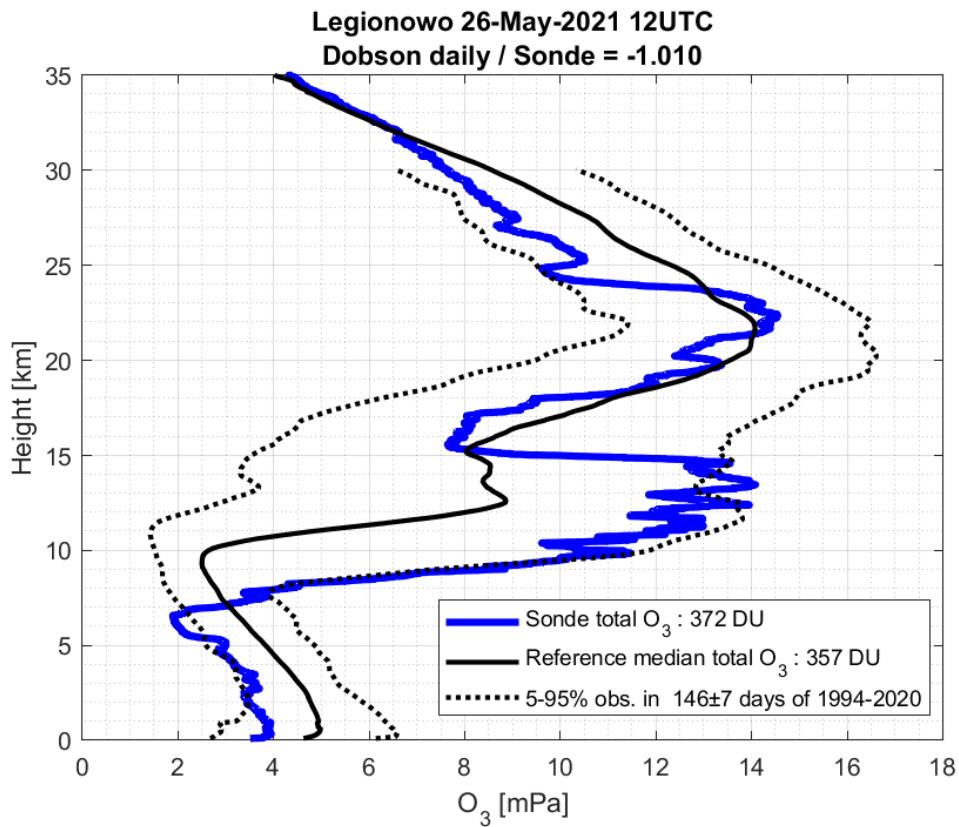


2021-05-19 godz. 11:14:48 - 11:22:24 UTC

Całkowita zawartość ozonu (O₃) w kolumnie atmosfery

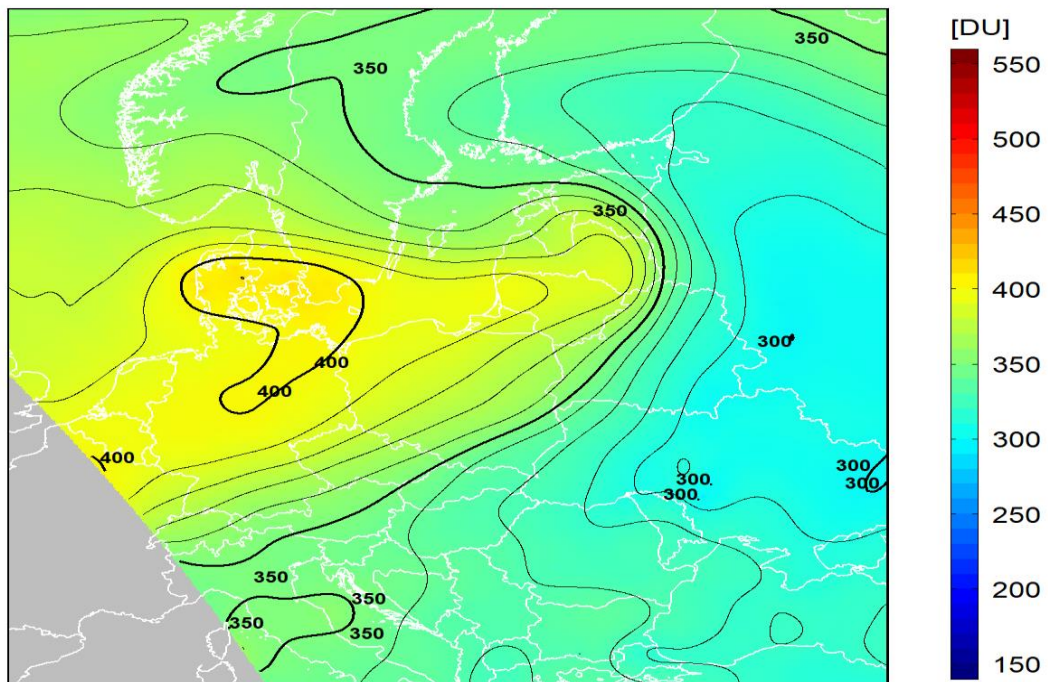


dane satelitarne: Suomi-NPP/OMPS

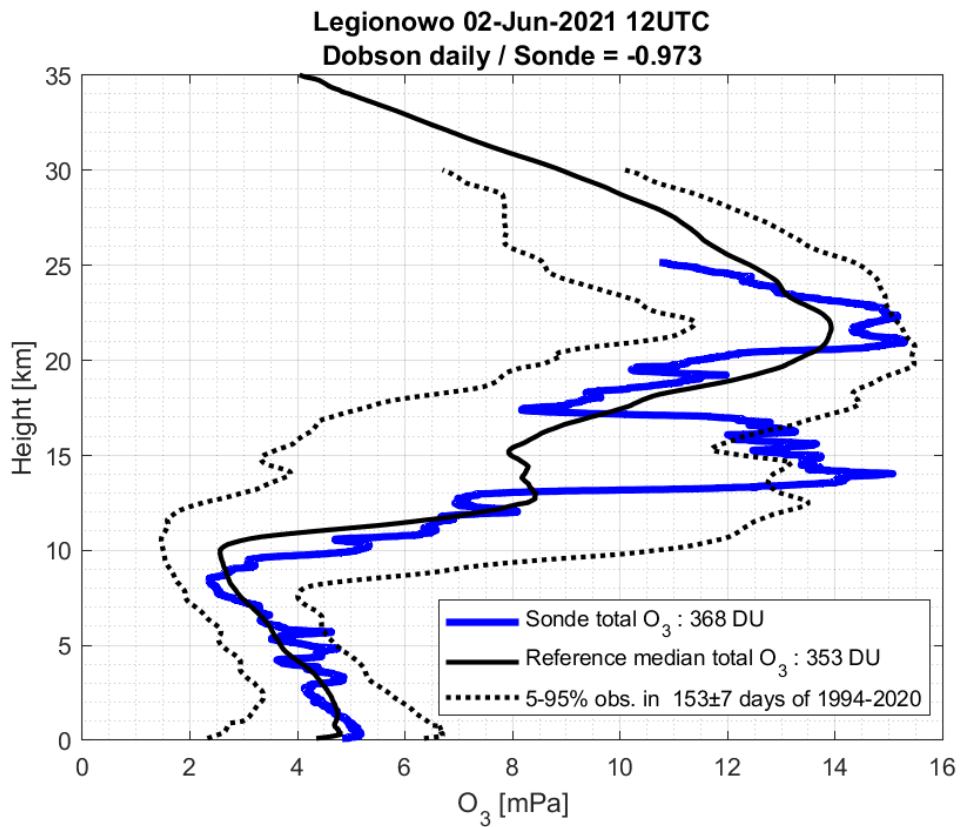


2021-05-26 godz. 10:43:10 - 10:51:32 UTC

Całkowita zawartość ozonu (O_3) w kolumnie atmosfery

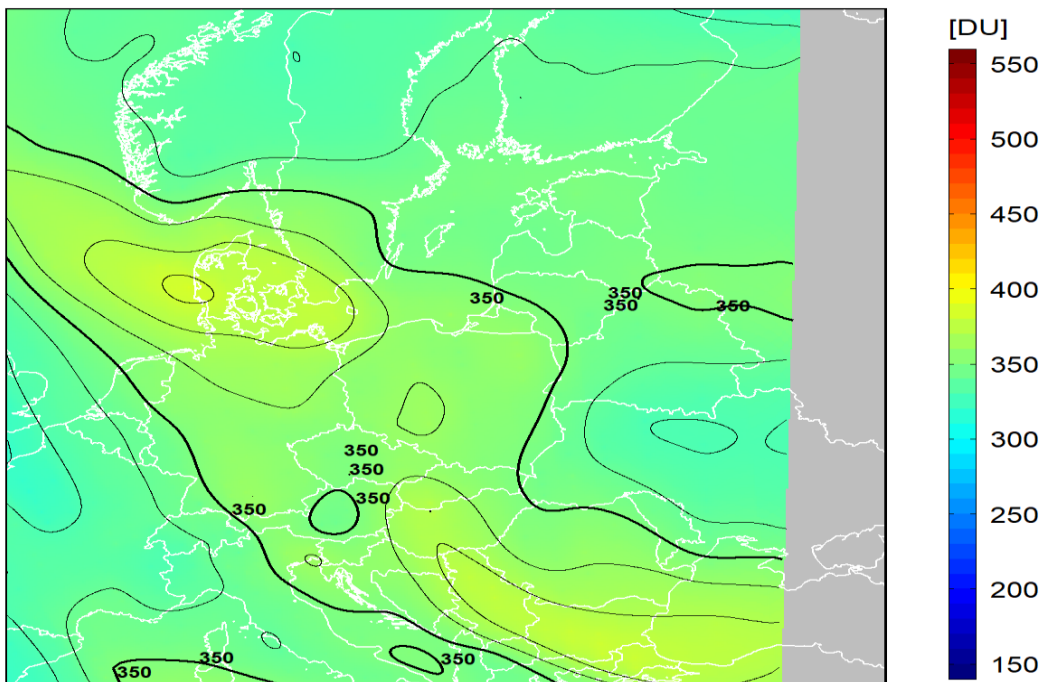


dane satelitarne: Suomi-NPP/OMPS

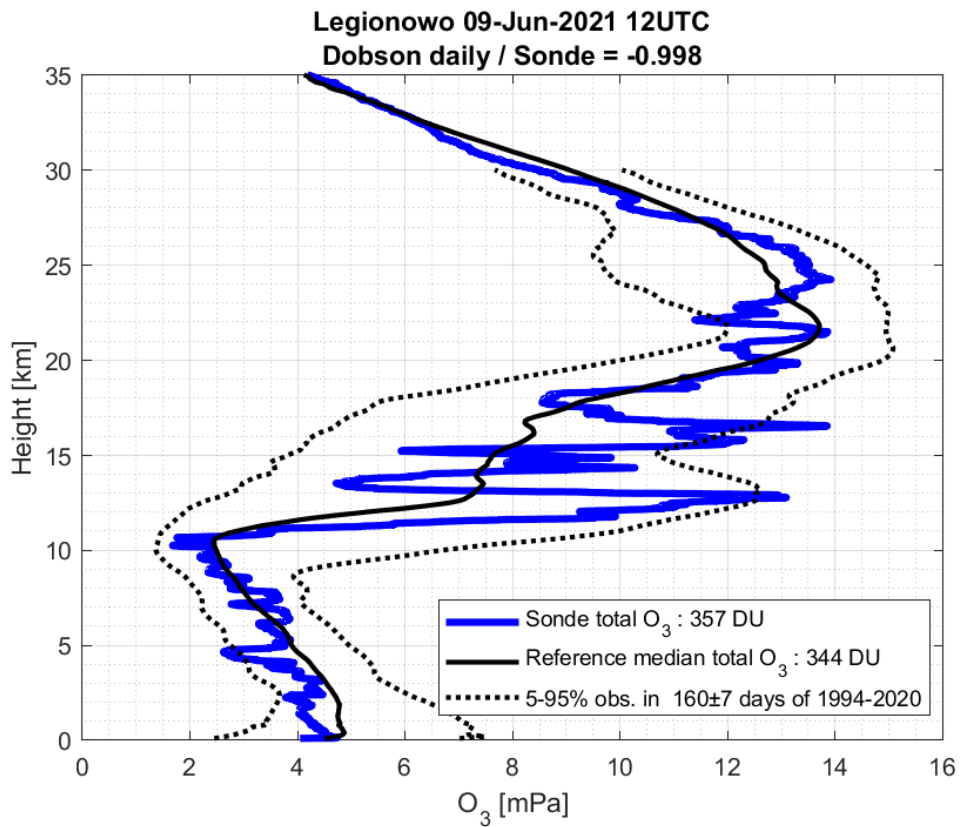


2021-06-02 godz. 11:53:03 - 12:00:10 UTC

Całkowita zawartość ozonu (O_3) w kolumnie atmosfery

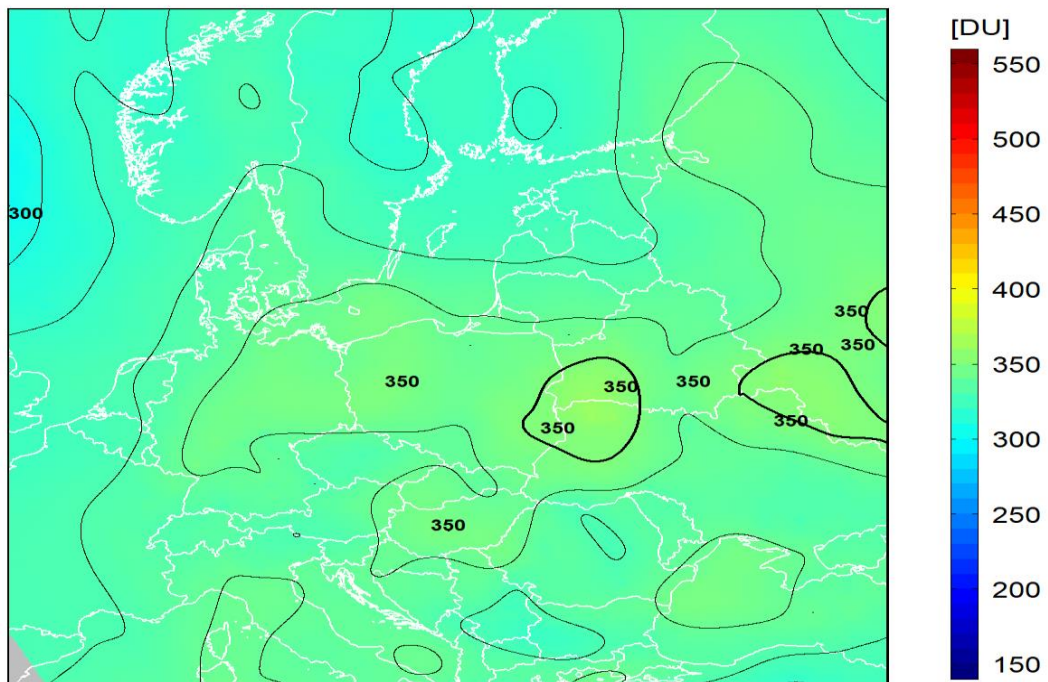


dane satelitarne: Suomi-NPP/OMPS

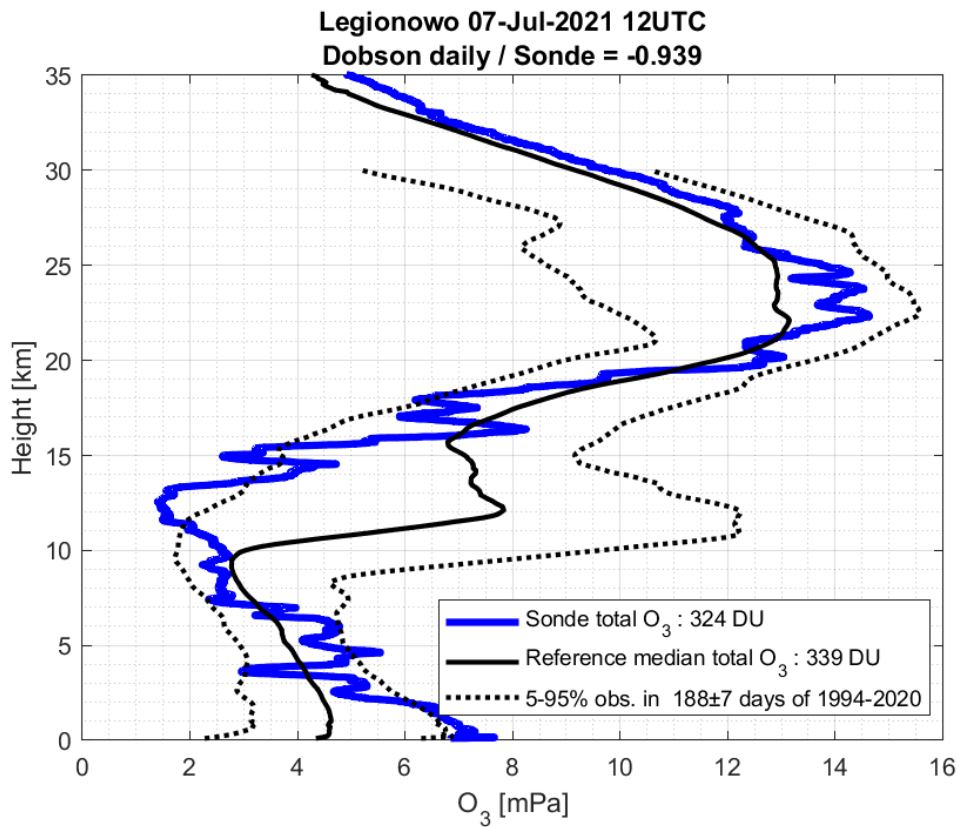


2021-06-09 godz. 11:21:21 - 11:28:58 UTC

Całkowita zawartość ozonu (O₃) w kolumnie atmosfery

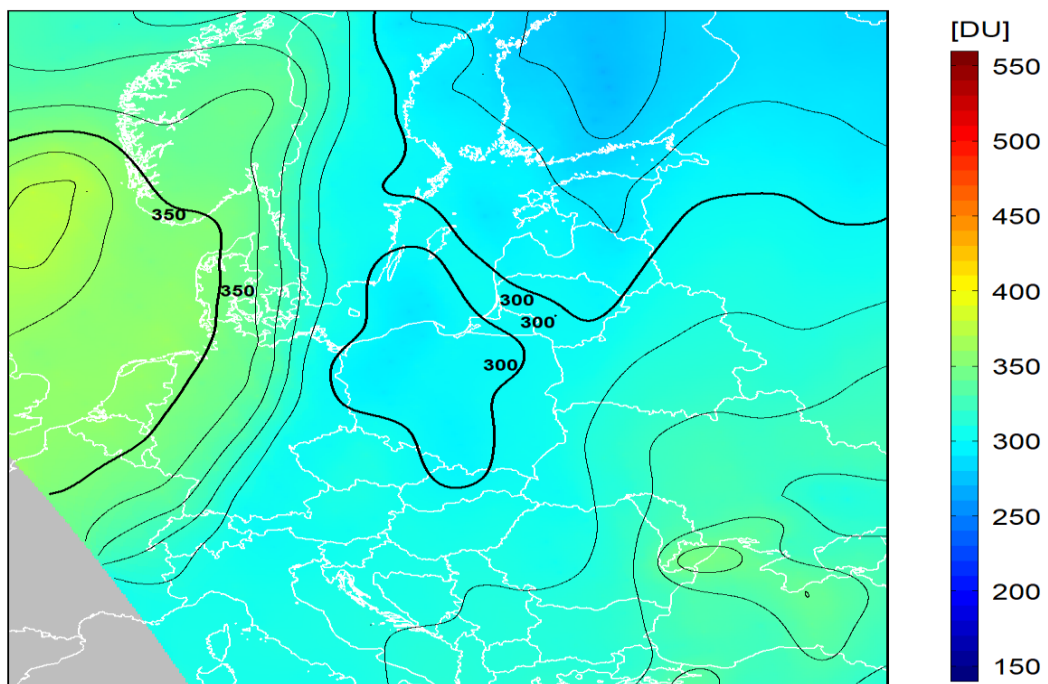


dane satelitarne: Suomi-NPP/OMPS

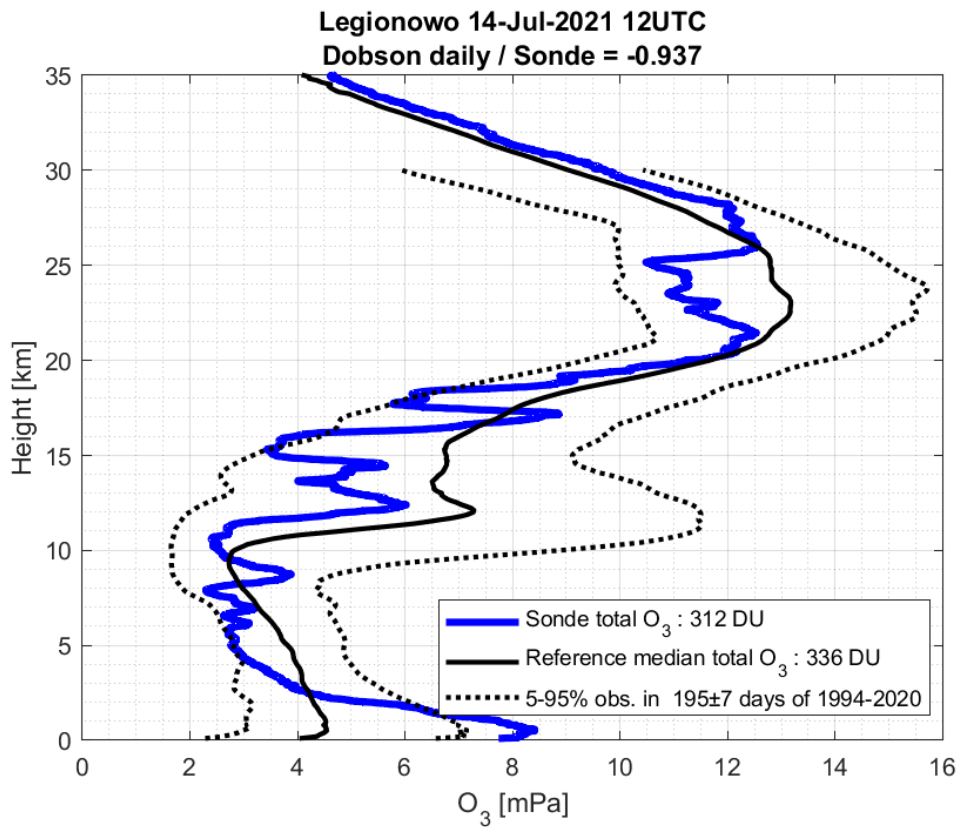


2021-07-07 godz. 10:56:22 - 11:04:29 UTC

Całkowita zawartość ozonu (O_3) w kolumnie atmosfery

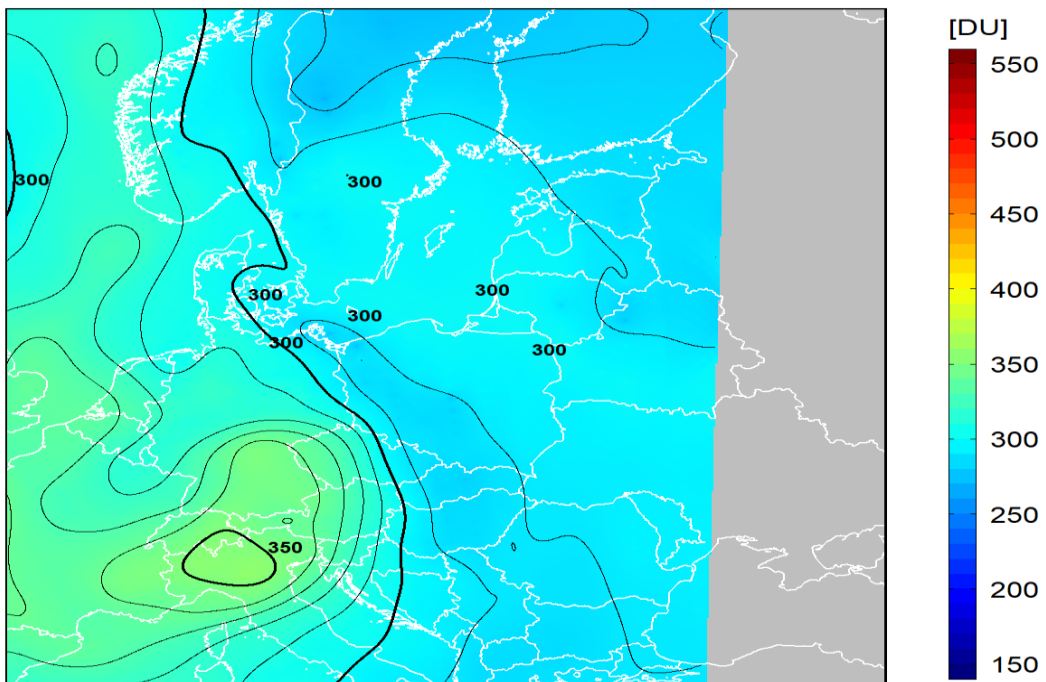


dane satelitarne: Suomi-NPP/OMPS

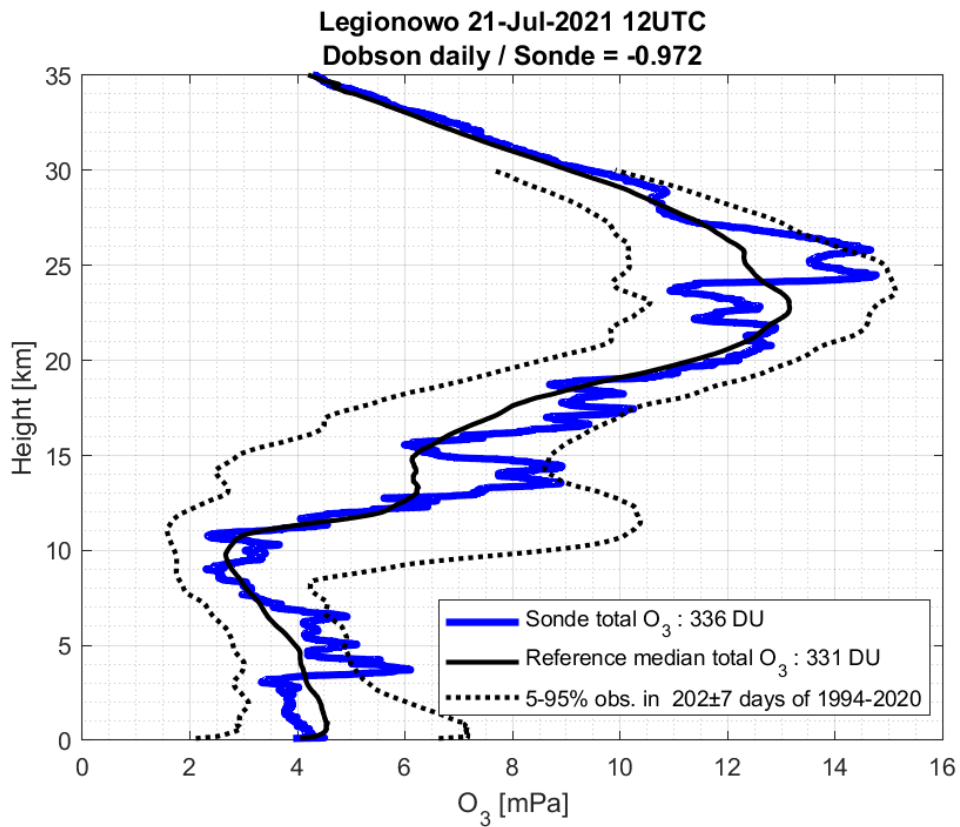


2021-07-14 godz. 12:06:13 - 12:13:20 UTC

Całkowita zawartość ozonu (O₃) w kolumnie atmosfery

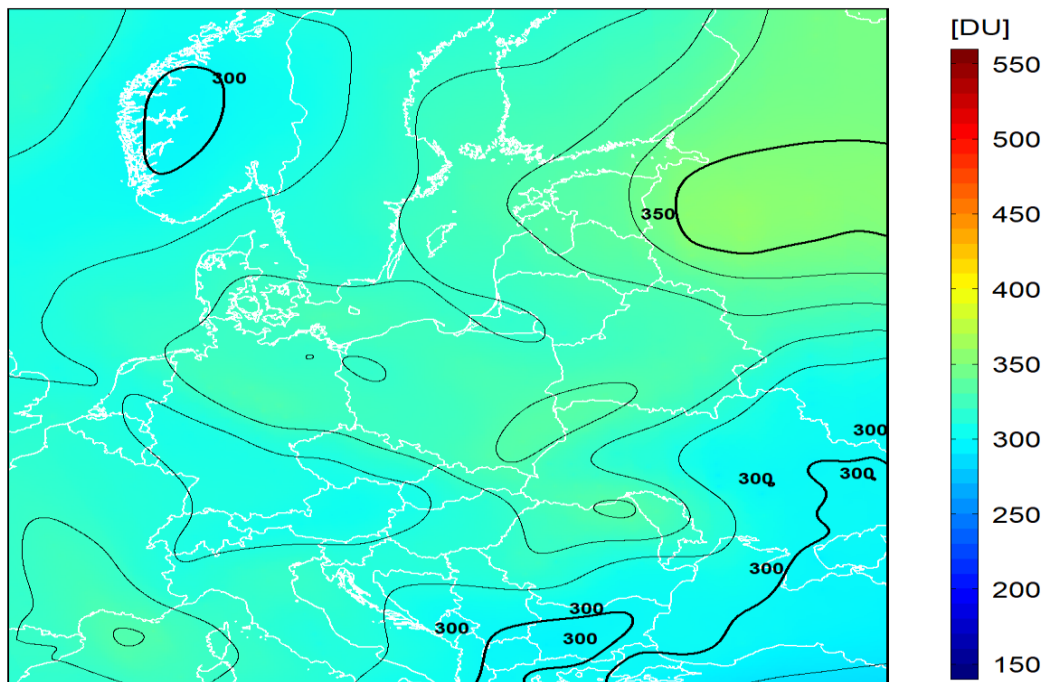


dane satelitarne: Suomi-NPP/OMPS



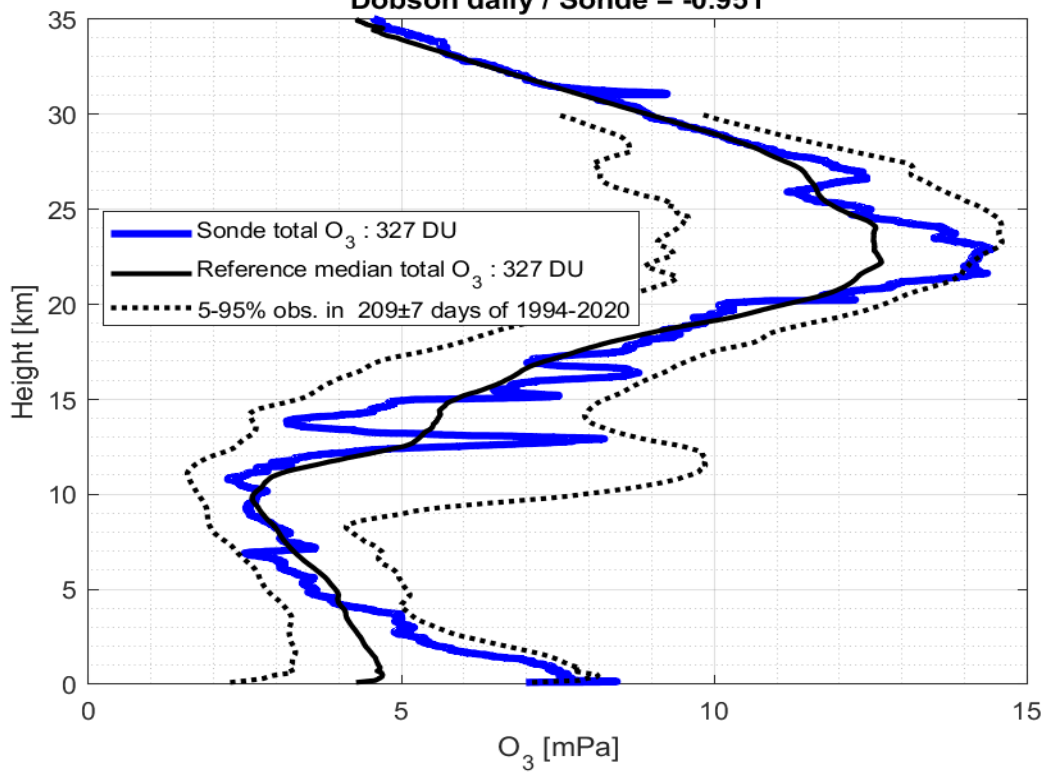
2021-07-21 godz. 11:34:36 - 11:41:57 UTC

Całkowita zawartość ozonu (O₃) w kolumnie atmosfery



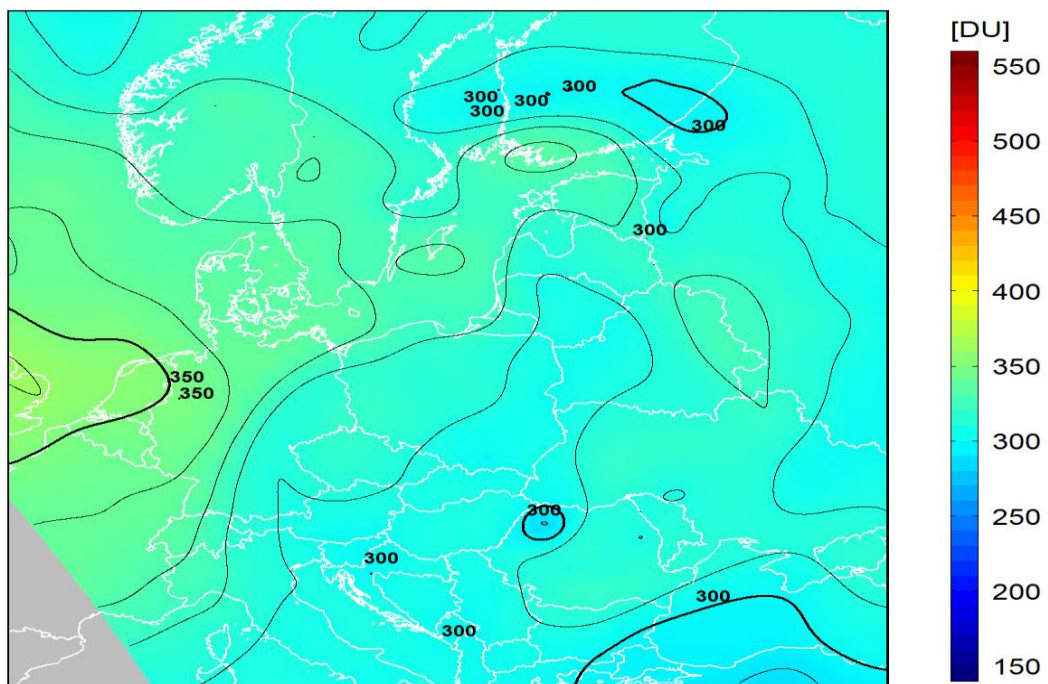
dane satelitarne: Suomi-NPP/OMPS

Legionowo 28-Jul-2021 12UTC
Dobson daily / Sonde = -0.951

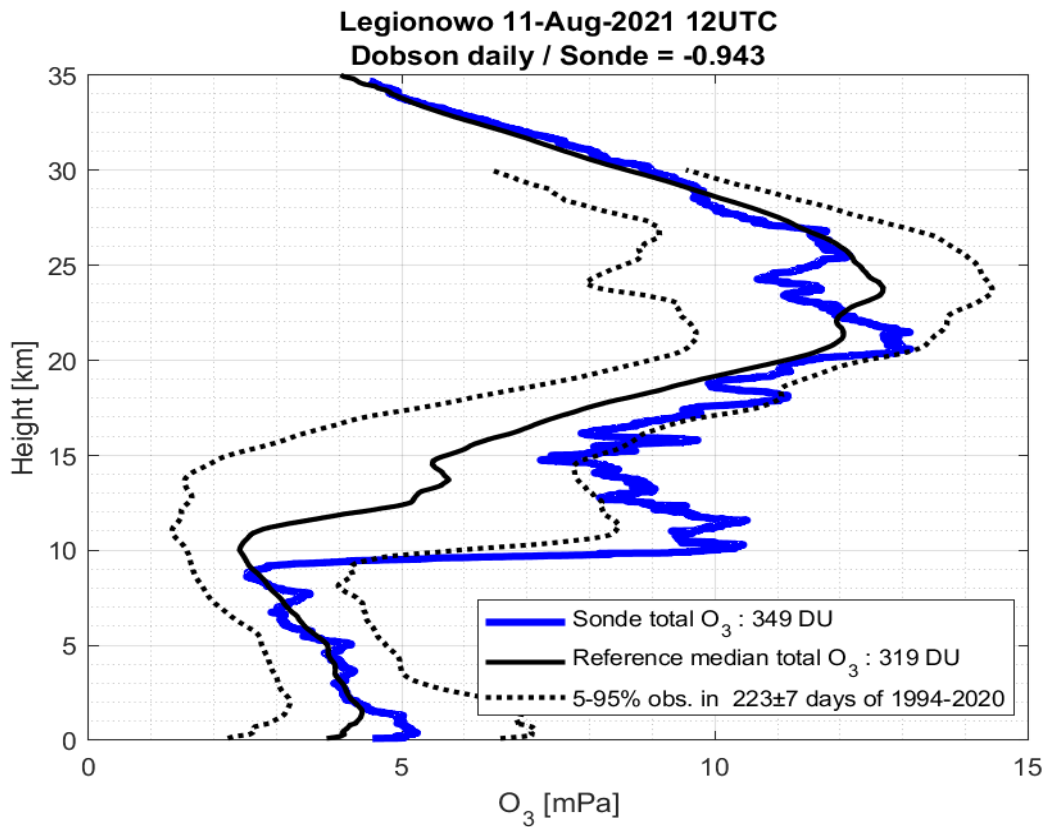


2021-07-28 godz. 11:03:02 - 11:10:53 UTC

Całkowita zawartość ozonu (O₃) w kolumnie atmosfery

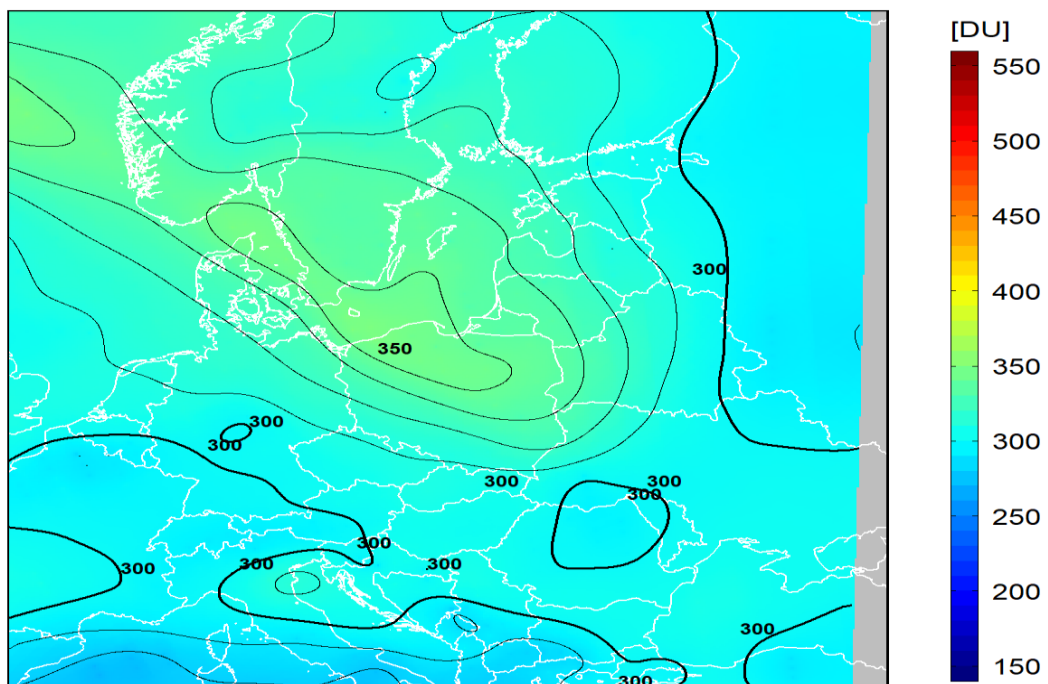


dane satelitarne: Suomi-NPP/OMPS

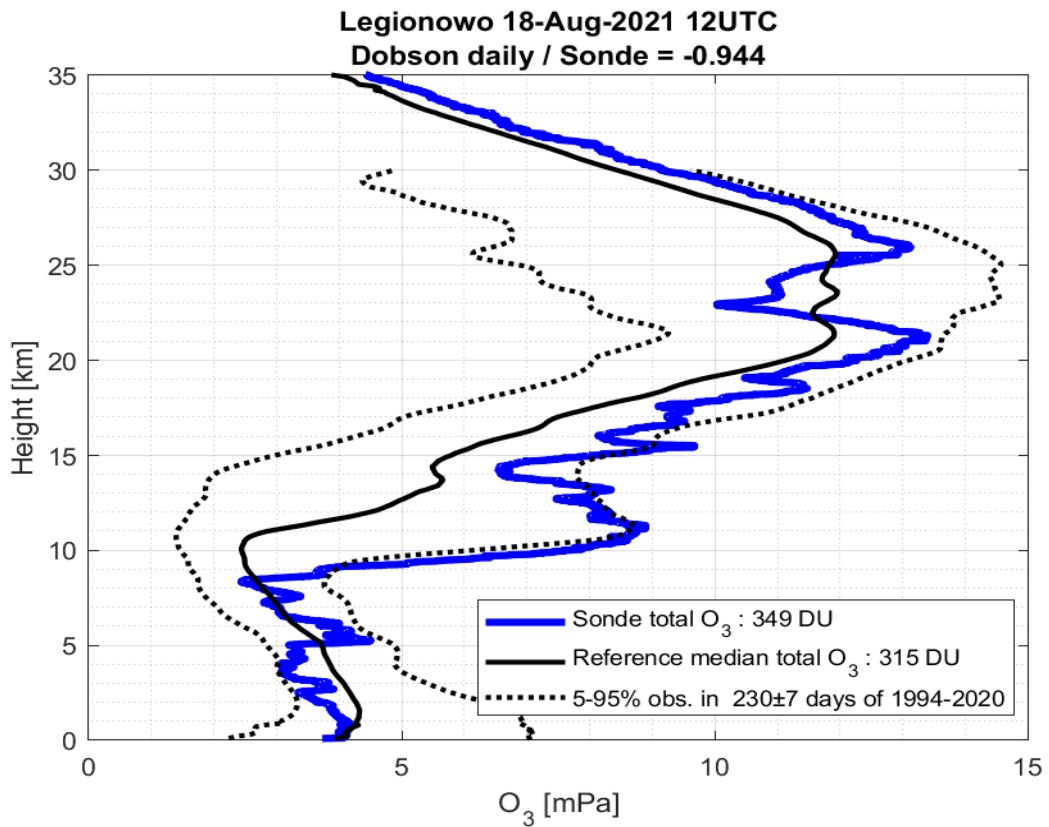


2021-08-11 godz. 11:41:11 - 11:48:26 UTC

Całkowita zawartość ozonu (O₃) w kolumnie atmosfery

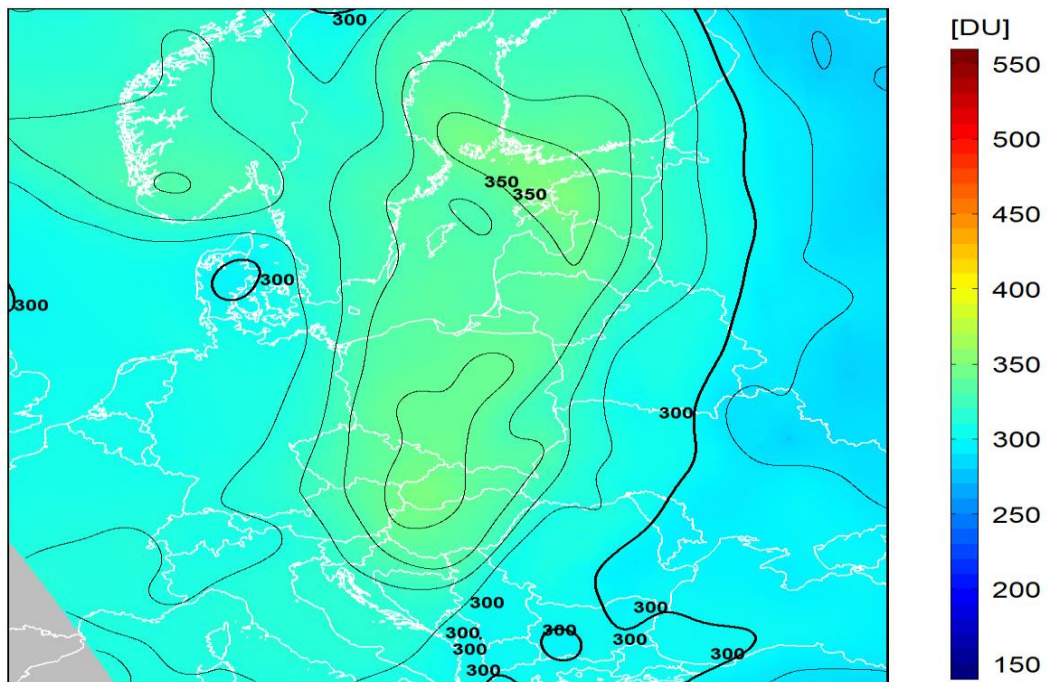


dane satelitarne: Suomi-NPP/OMPS

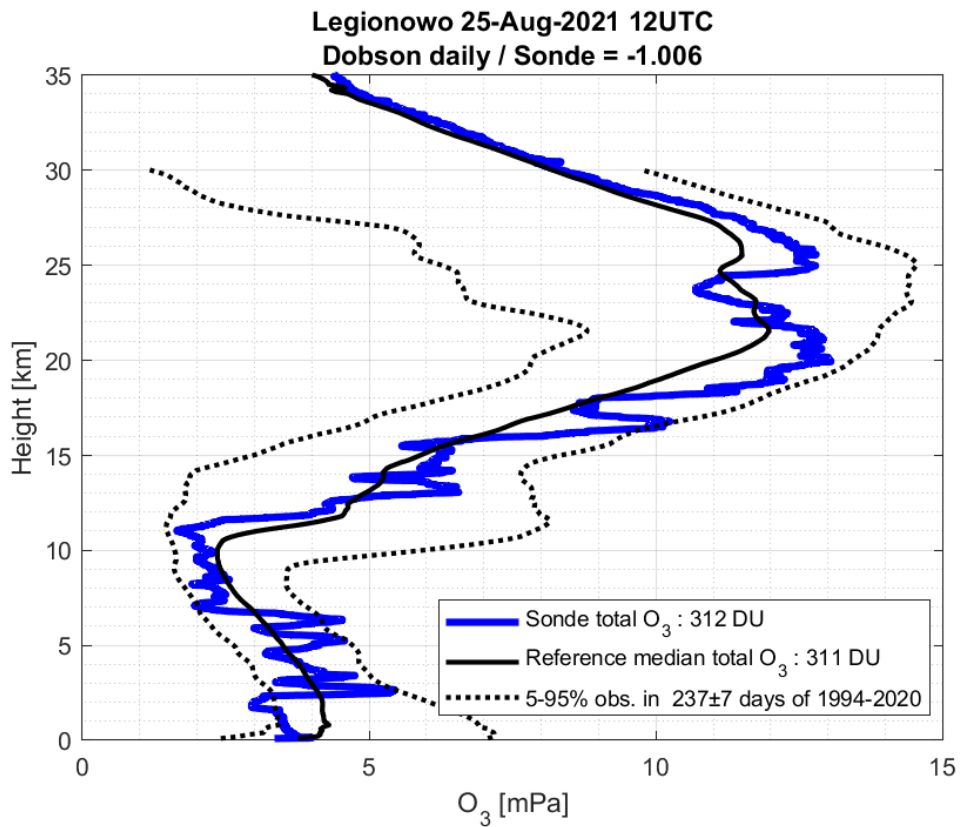


2021-08-18 godz. 11:09:34 - 11:17:18 UTC

Całkowita zawartość ozonu (O₃) w kolumnie atmosfery

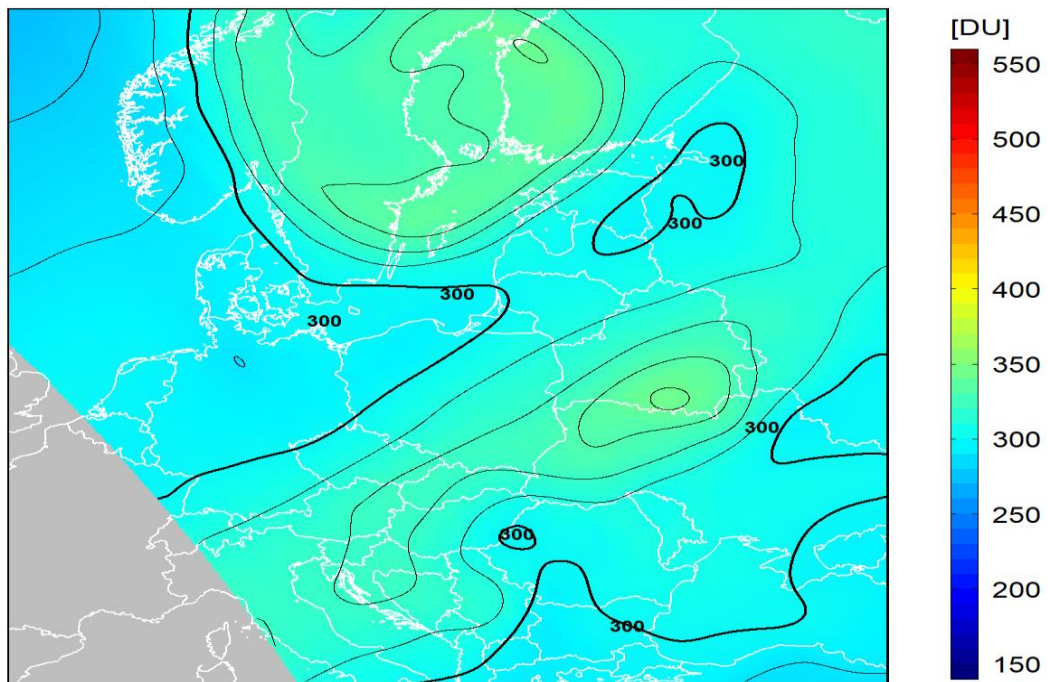


dane satelitarne: Suomi-NPP/OMPS

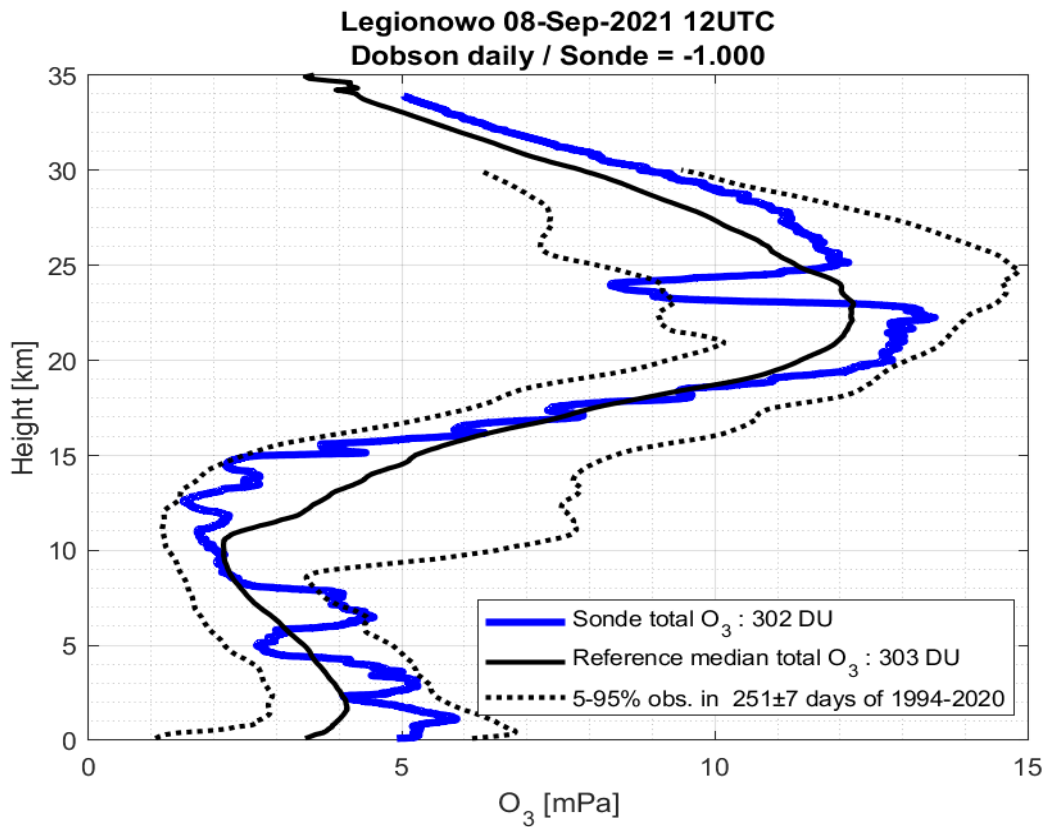


2021-08-25 godz. 10:37:53 - 10:46:30 UTC

Całkowita zawartość ozonu (O_3) w kolumnie atmosfery

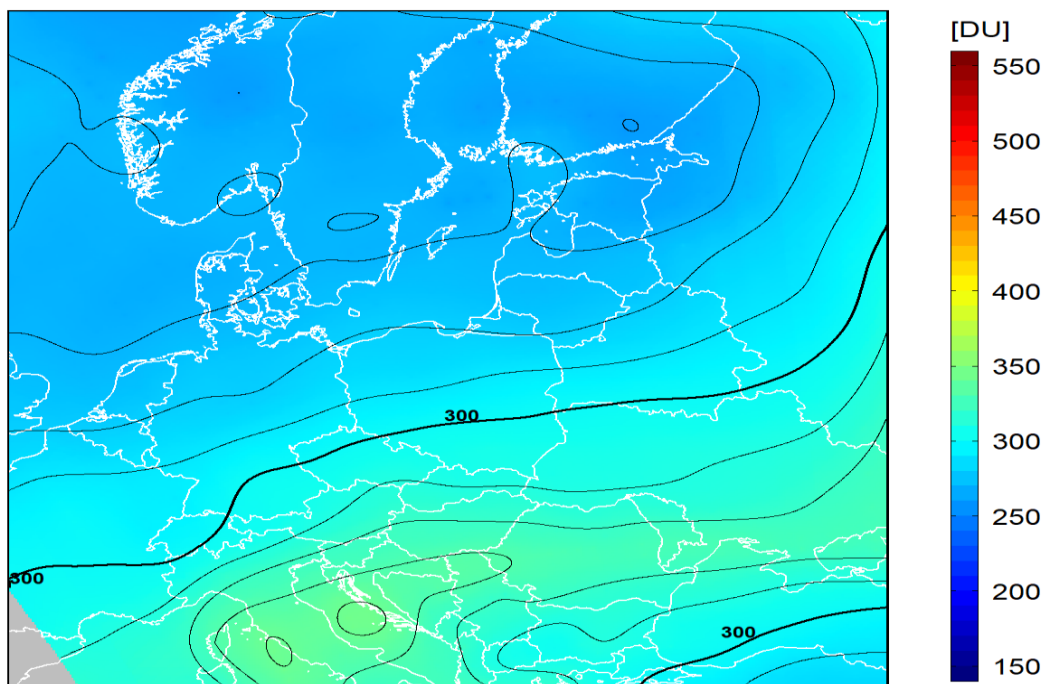


dane satelitarne: Suomi-NPP/OMPS

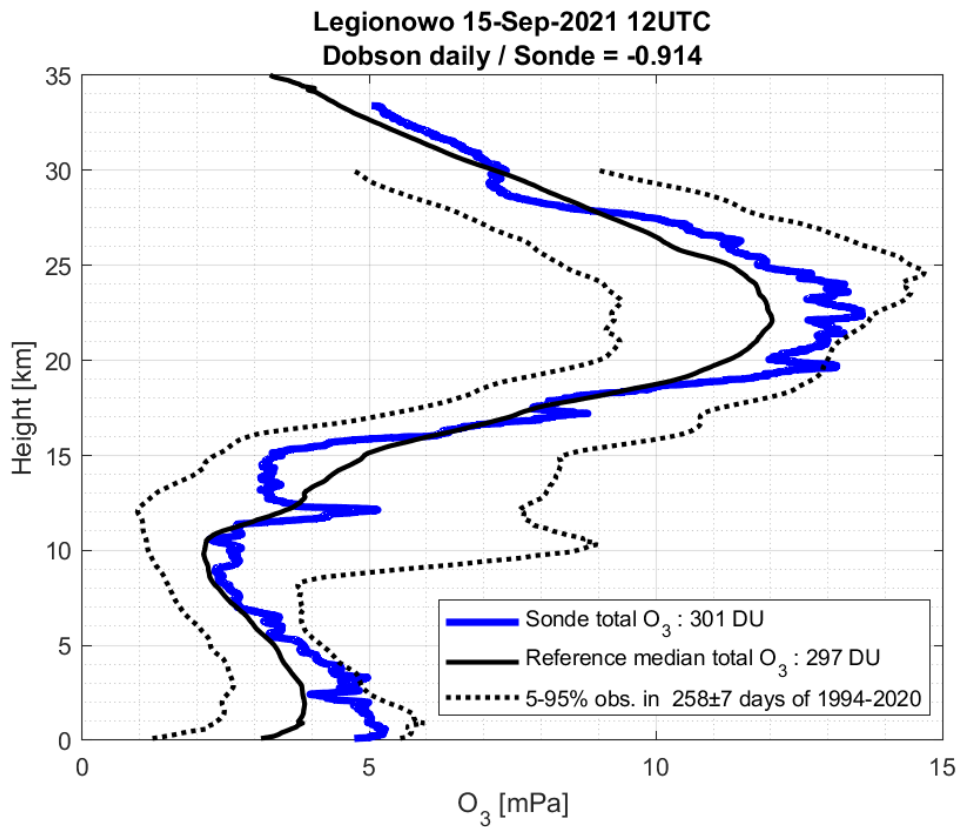


2021-09-08 godz. 11:16:01 - 11:23:45 UTC

Całkowita zawartość ozonu (O₃) w kolumnie atmosfery

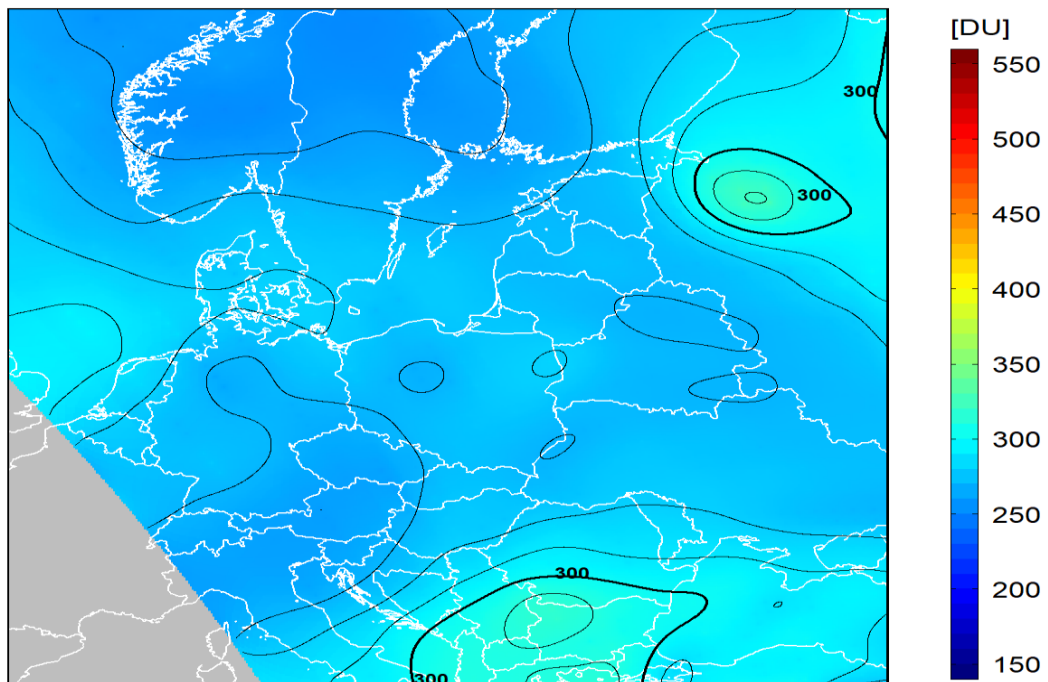


dane satelitarne: Suomi-NPP/OMPS

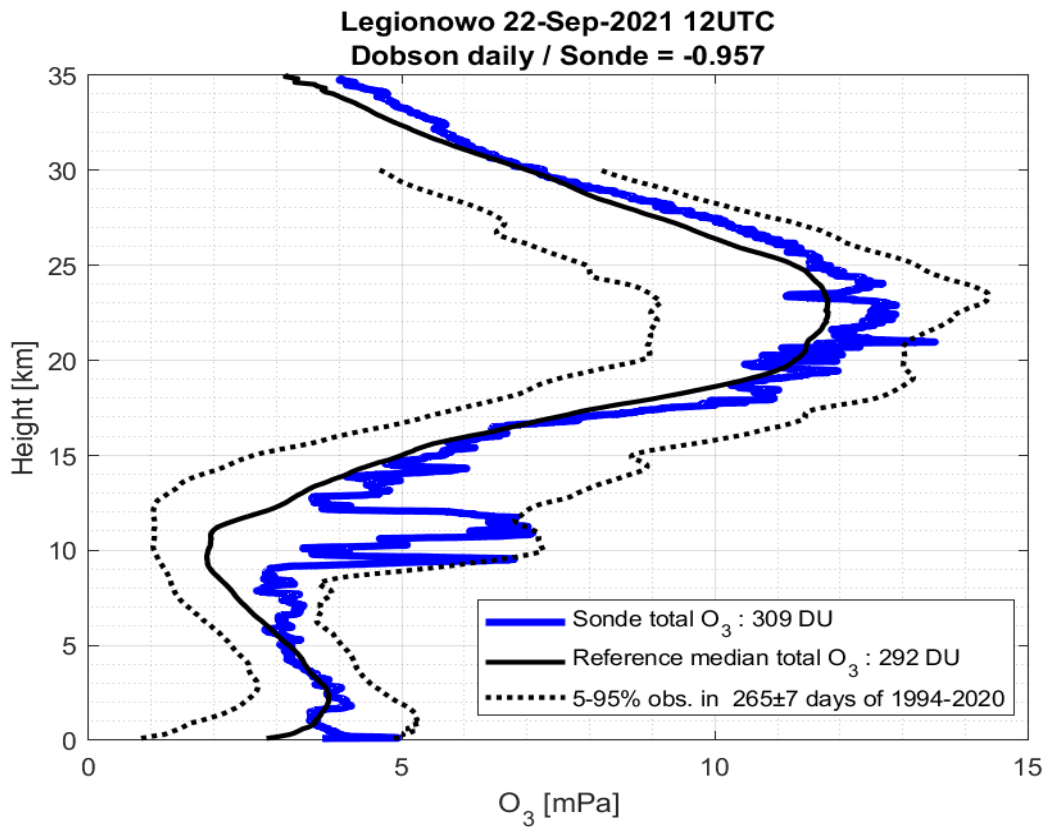


2021-09-15 godz. 10:44:20 - 10:52:41 UTC

Całkowita zawartość ozonu (O_3) w kolumnie atmosfery

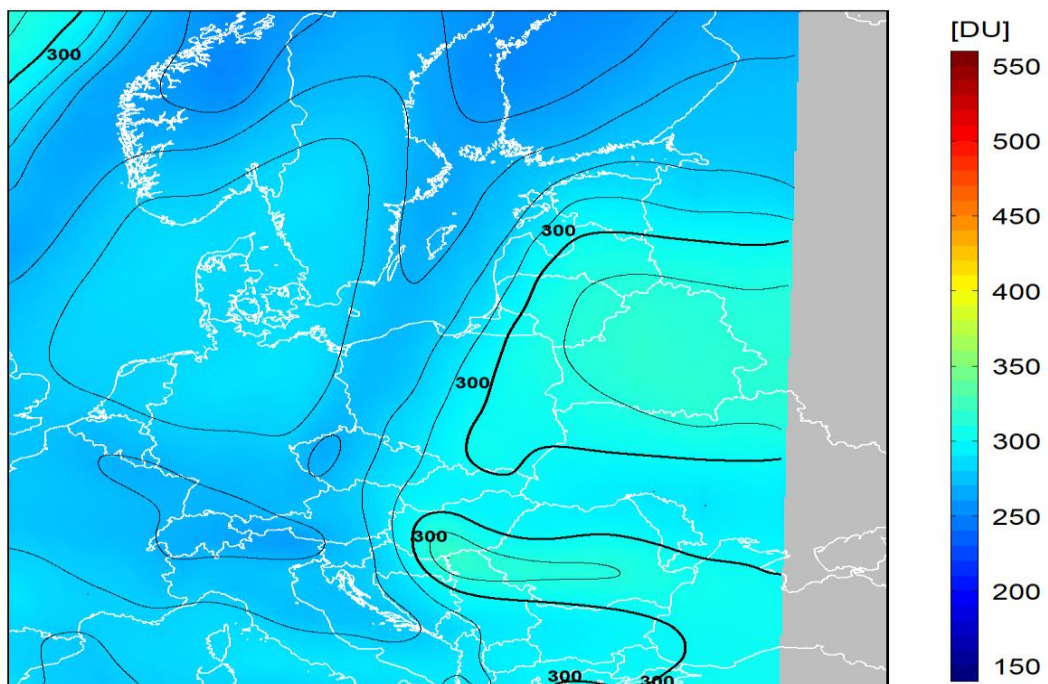


dane satelitarne: Suomi-NPP/OMPS

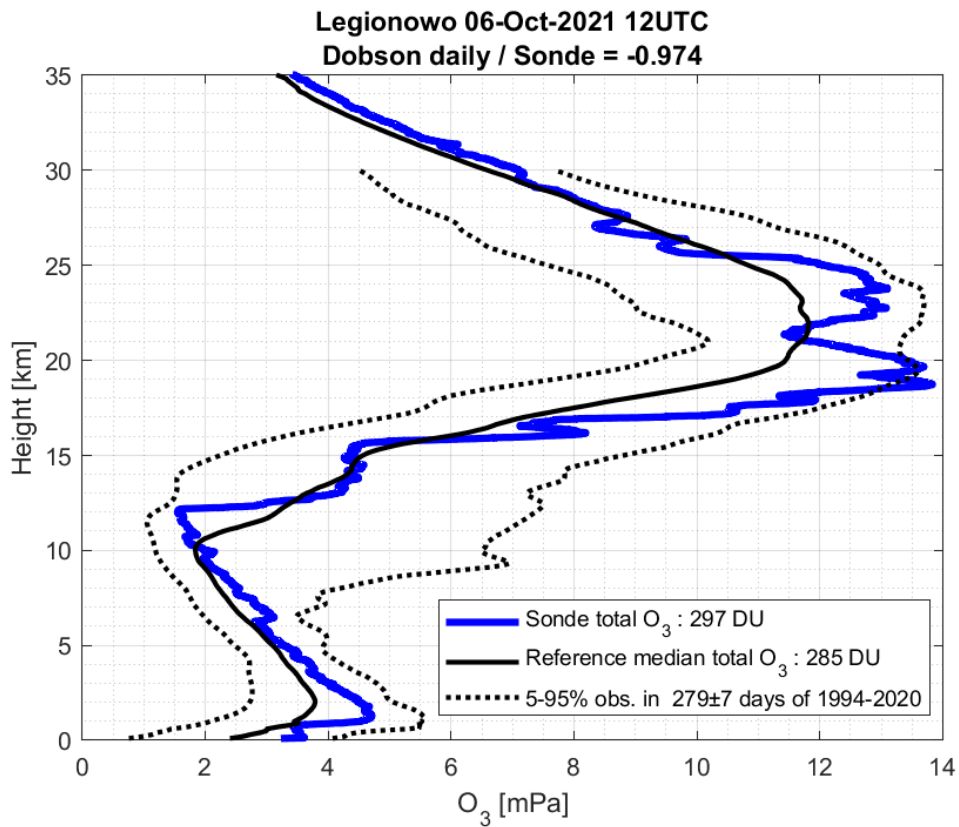


2021-09-22 godz. 11:54:14 - 12:01:21 UTC

Całkowita zawartość ozonu (O_3) w kolumnie atmosfery

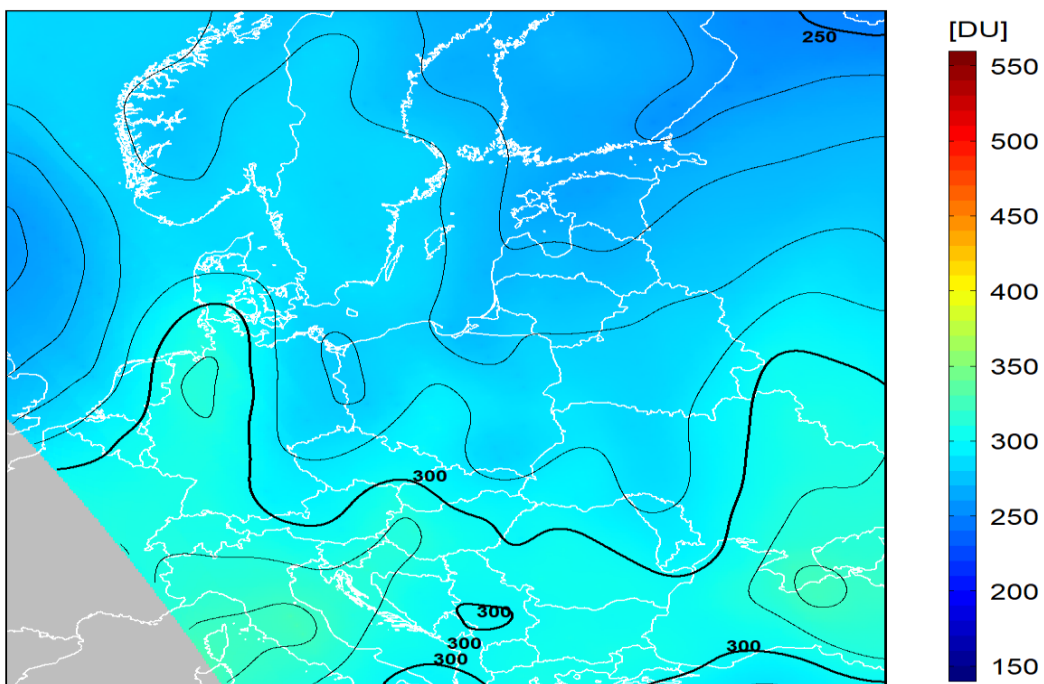


dane satelitarne: Suomi-NPP/OMPS



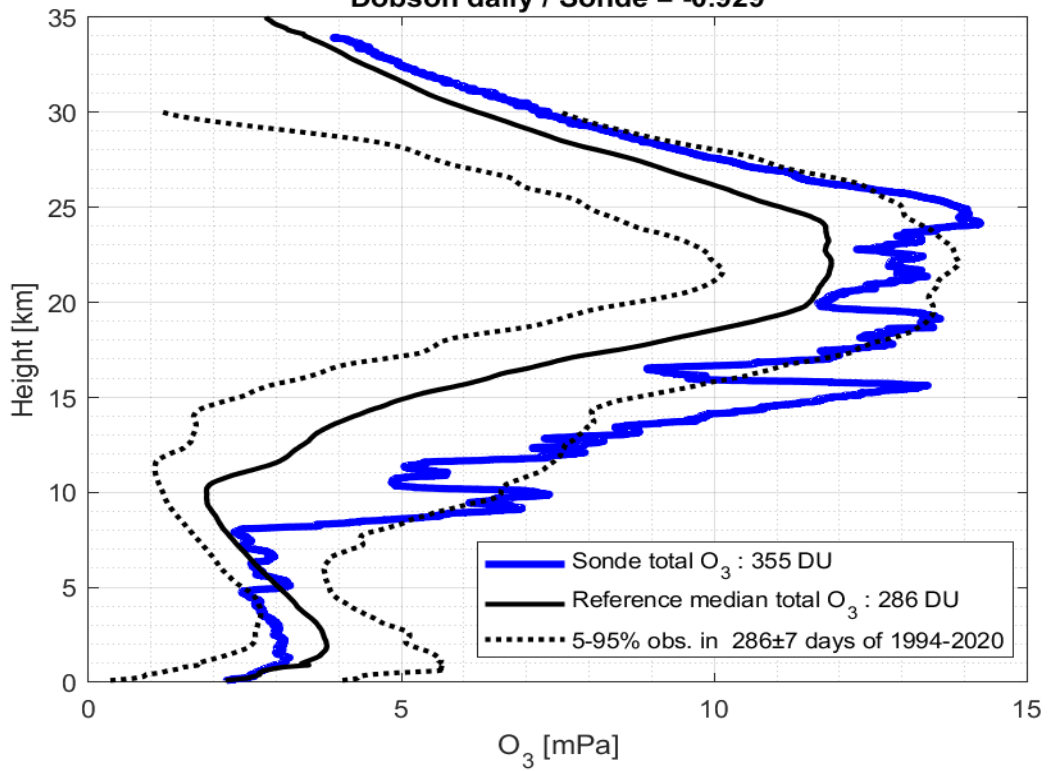
2021-10-06 godz. 10:50:46 - 10:59:00 UTC

Całkowita zawartość ozonu (O_3) w kolumnie atmosfery



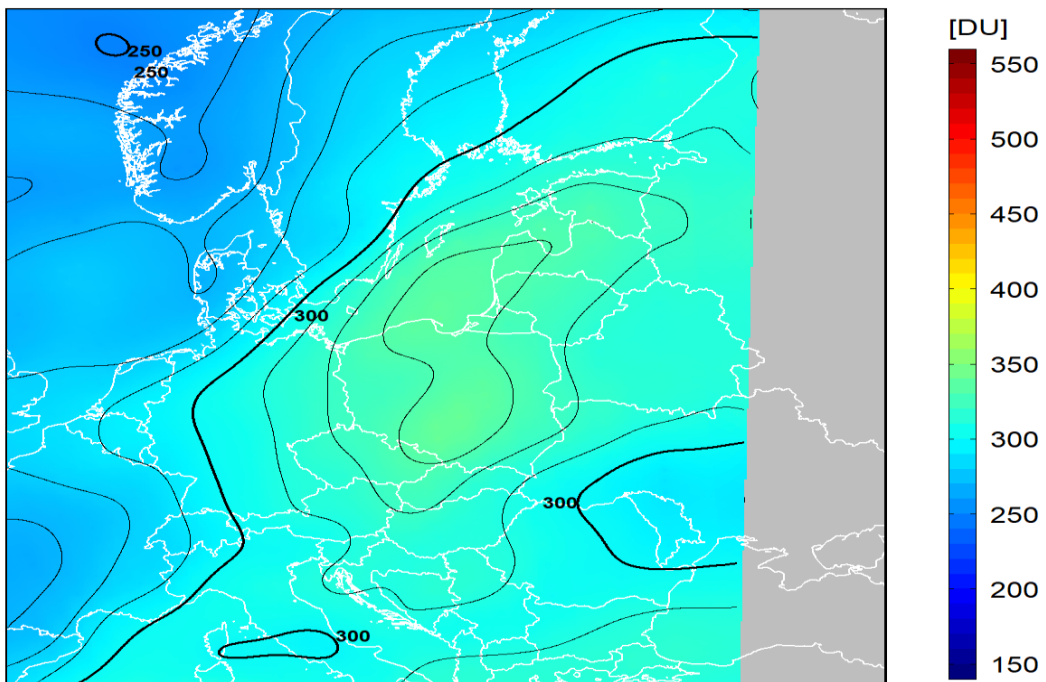
dane satelitarne: Suomi-NPP/OMPS

Legionowo 13-Oct-2021 12UTC
Dobson daily / Sonde = -0.929

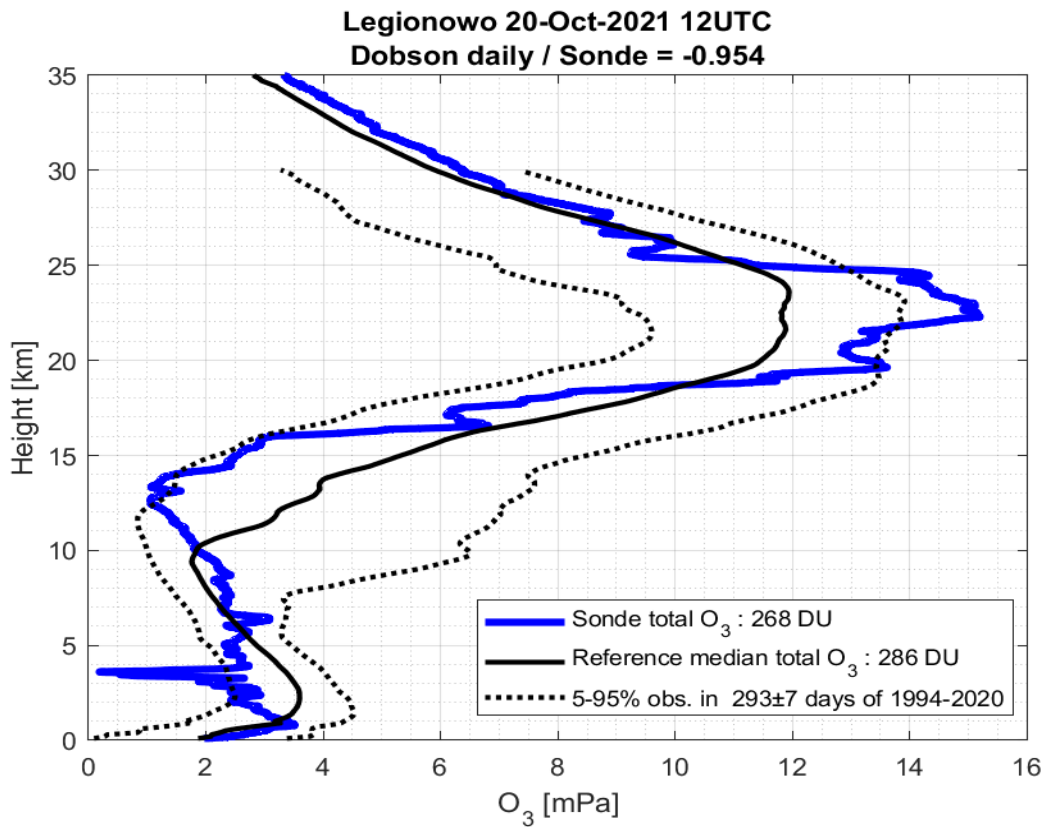


2021-10-13 godz. 12:00:37 - 12:07:44 UTC

Całkowita zawartość ozonu (O₃) w kolumnie atmosfery

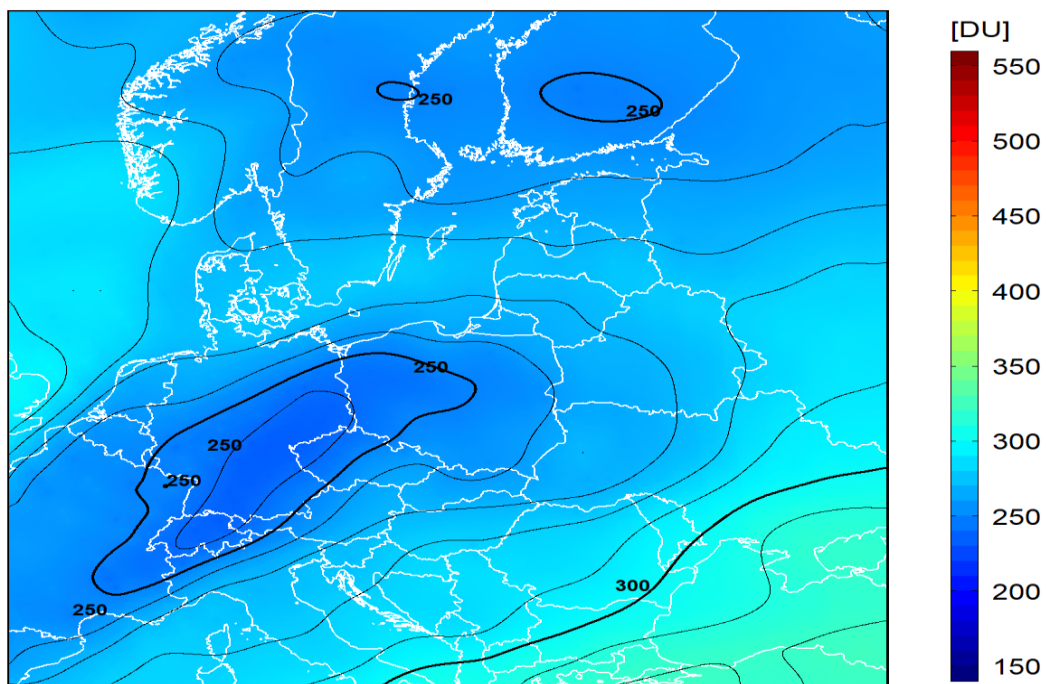


dane satelitarne: Suomi-NPP/OMPS

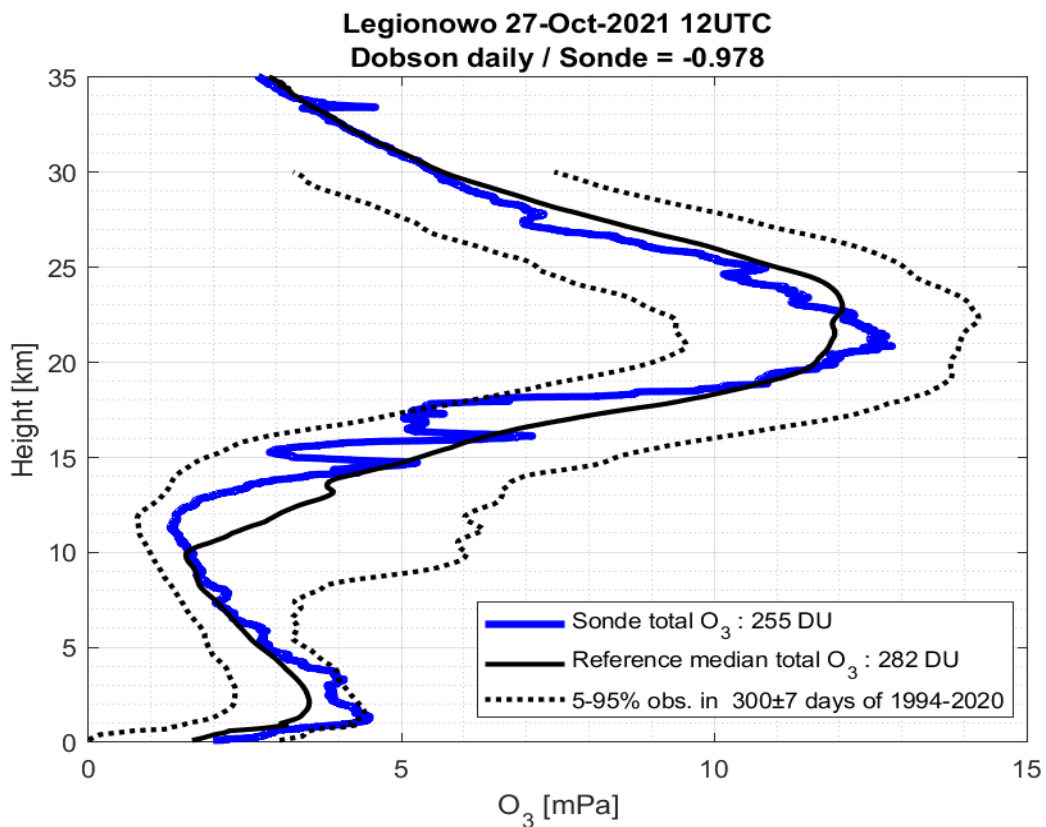


2021-10-20 godz. 11:29:01 - 11:36:30 UTC

Całkowita zawartość ozonu (O_3) w kolumnie atmosfery

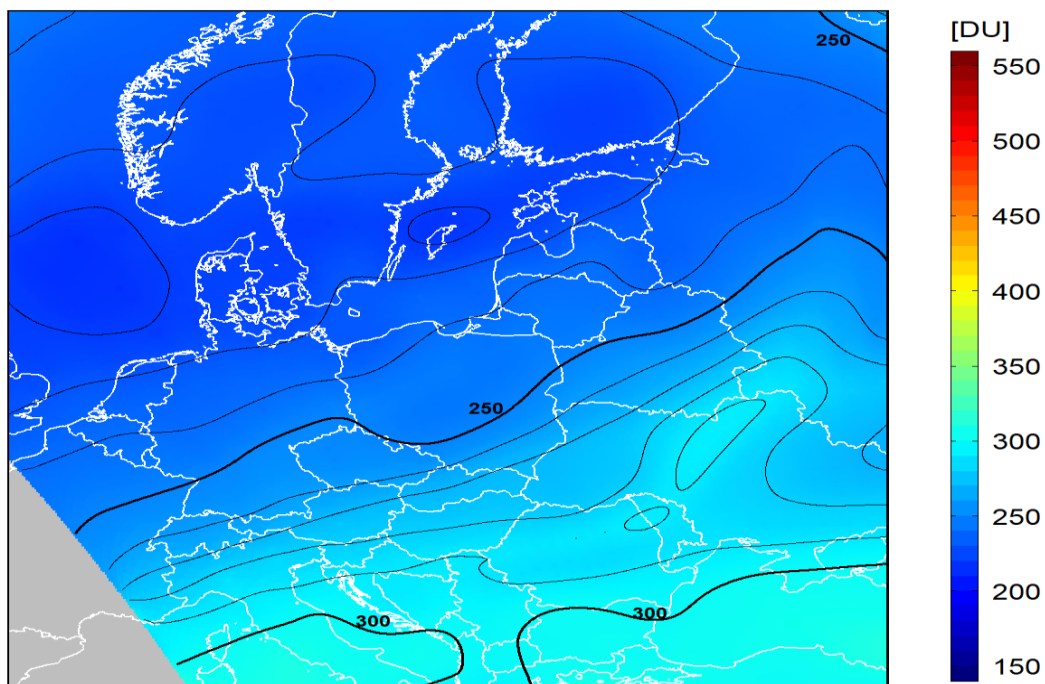


dane satelitarne: Suomi-NPP/OMPS

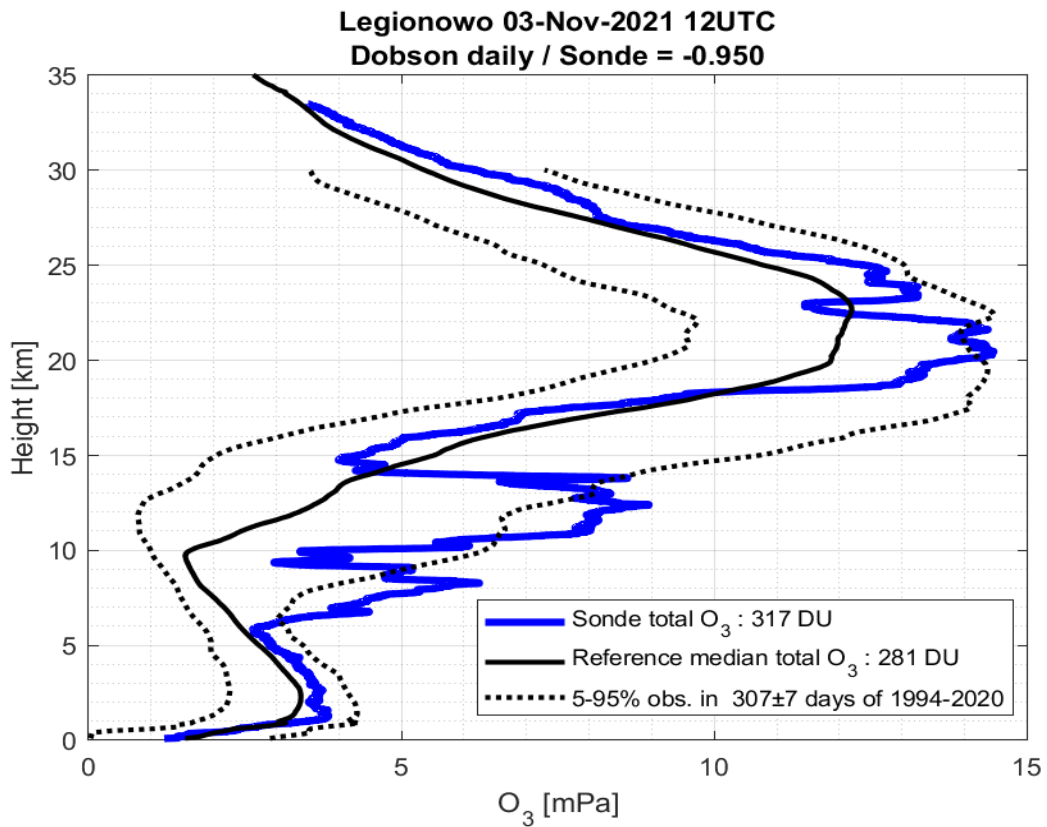


2021-10-27 godz. 10:57:28 - 11:05:35 UTC

Całkowita zawartość ozonu (O₃) w kolumnie atmosfery

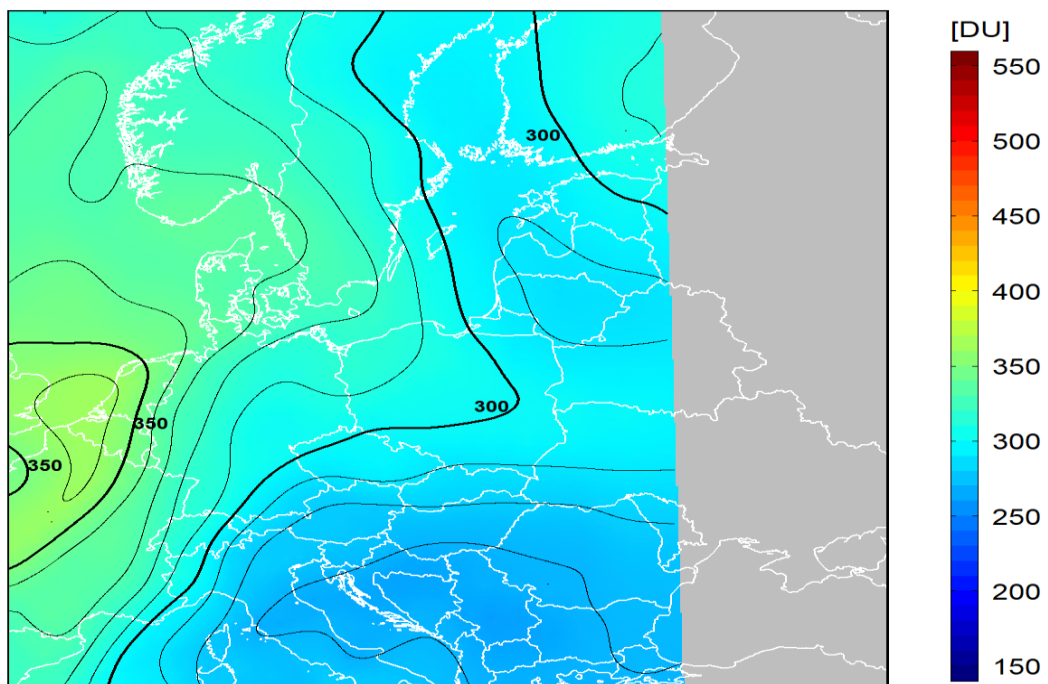


dane satelitarne: Suomi-NPP/OMPS

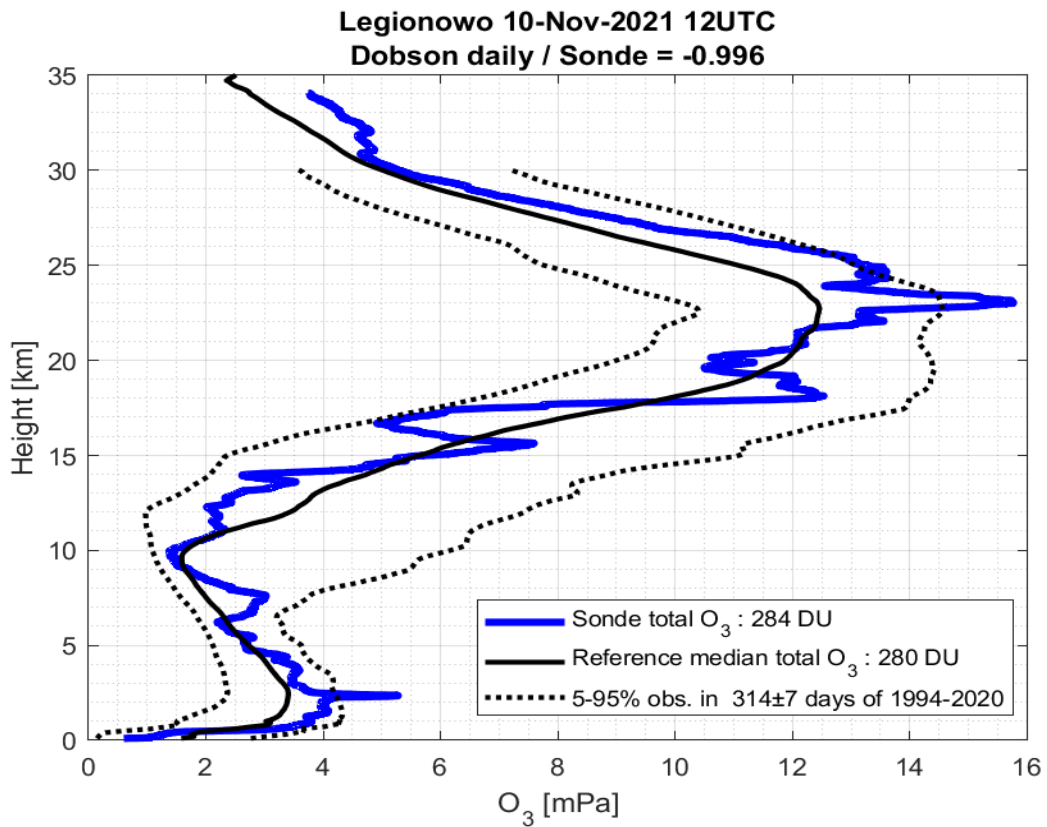


2021-11-03 godz. 12:07:27 - 12:14:34 UTC

Całkowita zawartość ozonu (O₃) w kolumnie atmosfery

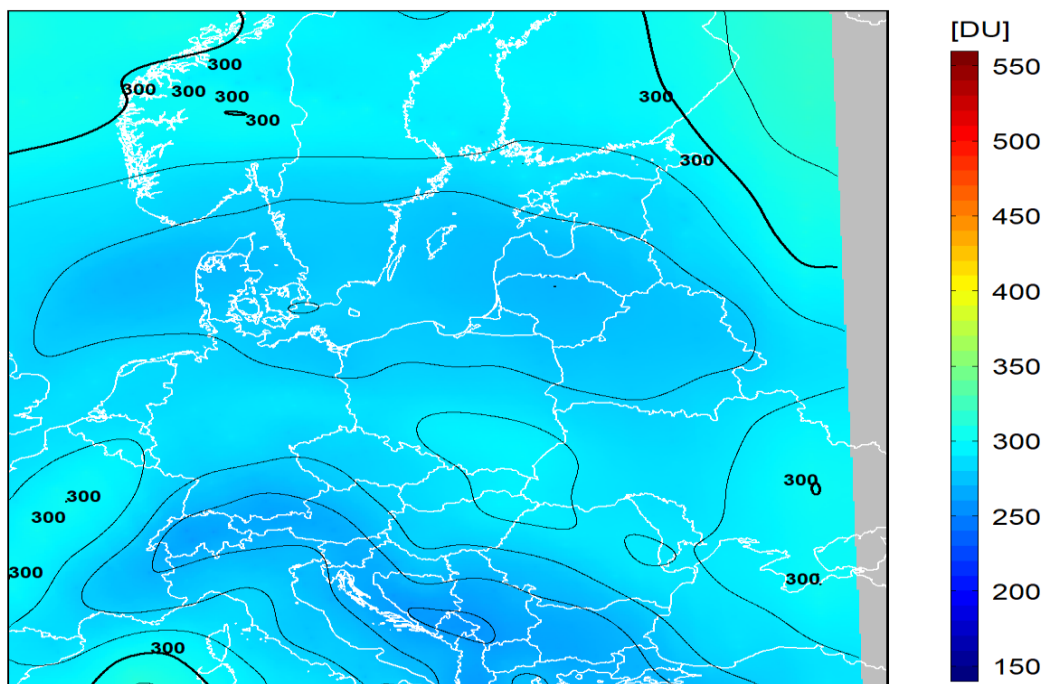


dane satelitarne: Suomi-NPP/OMPS



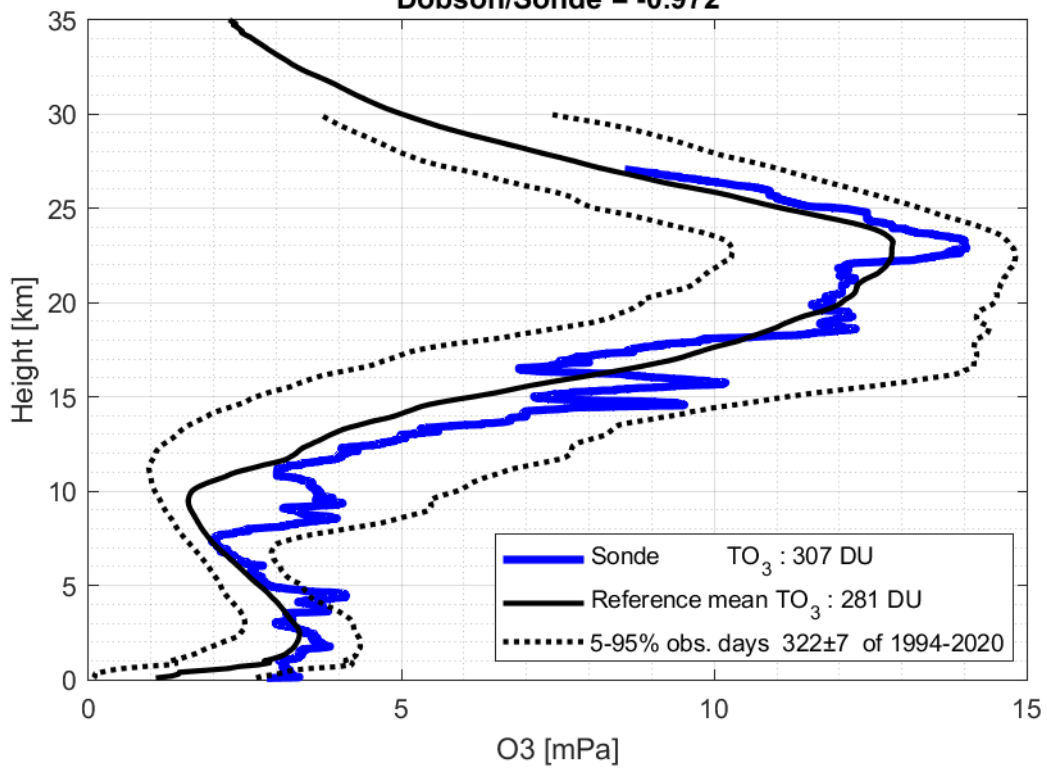
2021-11-10 godz. 11:35:52 - 11:43:13 UTC

Całkowita zawartość ozonu (O_3) w kolumnie atmosfery



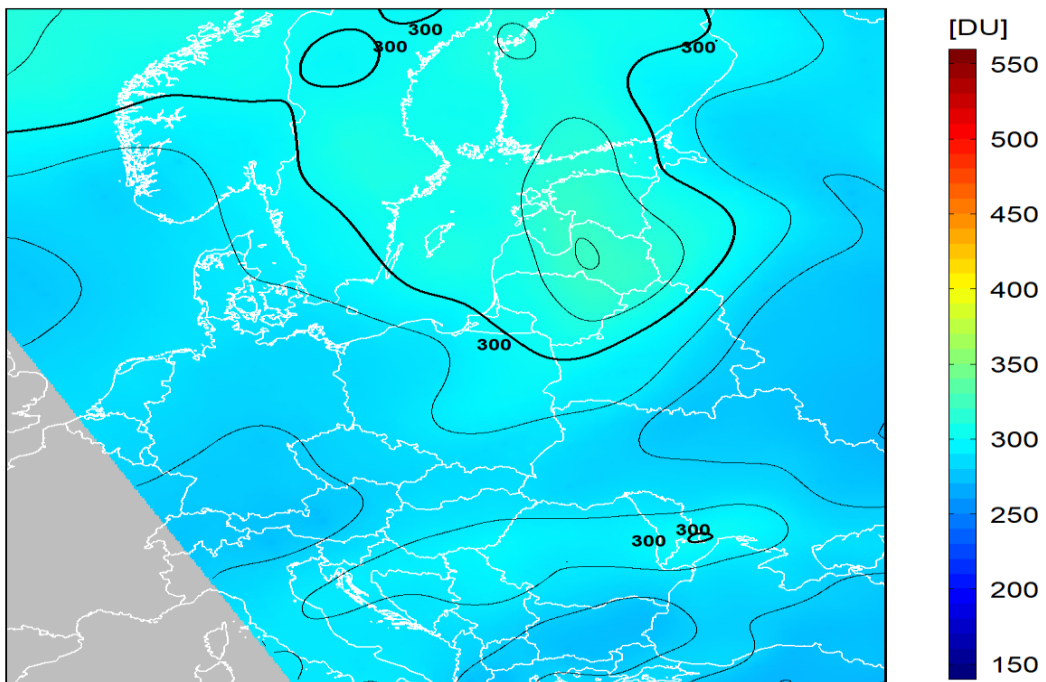
dane satelitarne: Suomi-NPP/OMPS

Legionowo, 18-Nov-2021 12UTC
Dobson/Sonde = -0.972



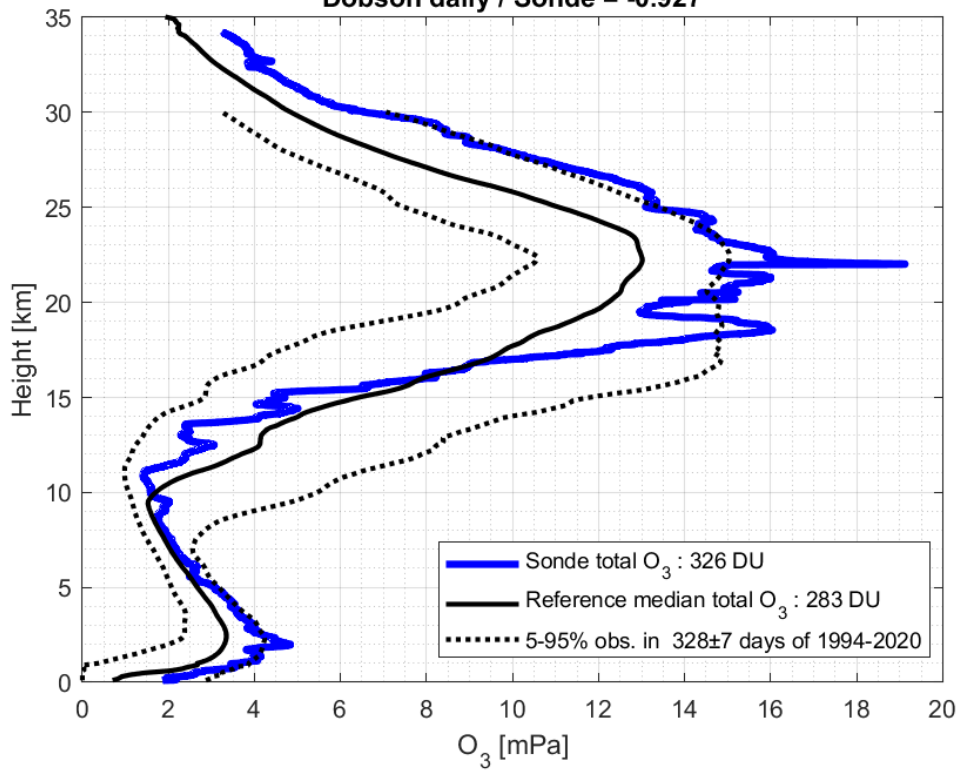
2021-11-18 godz. 10:45:23 - 10:53:37 UTC

Całkowita zawartość ozonu (O₃) w kolumnie atmosfery



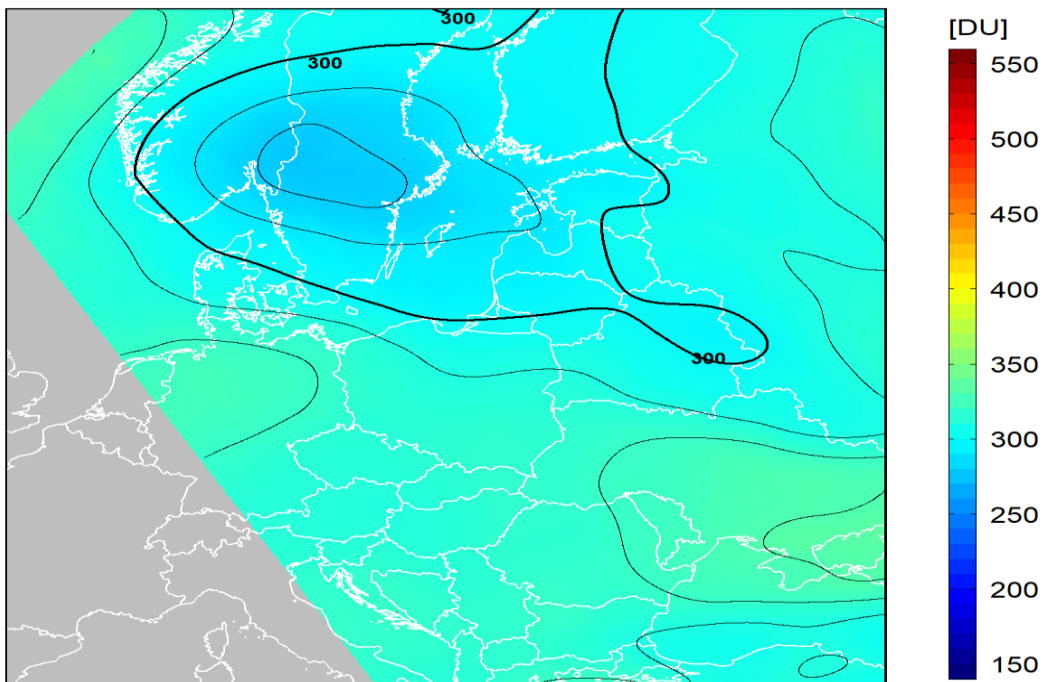
dane satelitarne: Suomi-NPP/OMPS

Legionowo 24-Nov-2021 12UTC
Dobson daily / Sonde = -0.927



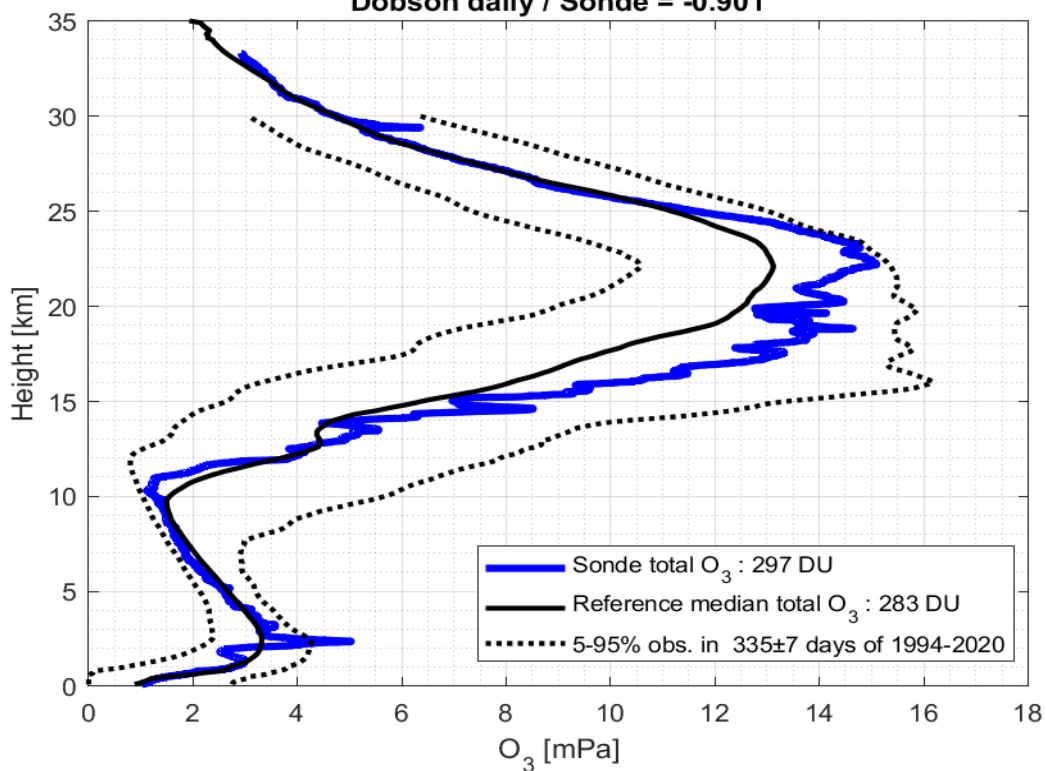
2021-11-24 godz. 10:32:40 - 10:40:47 UTC

Całkowita zawartość ozonu (O₃) w kolumnie atmosfery



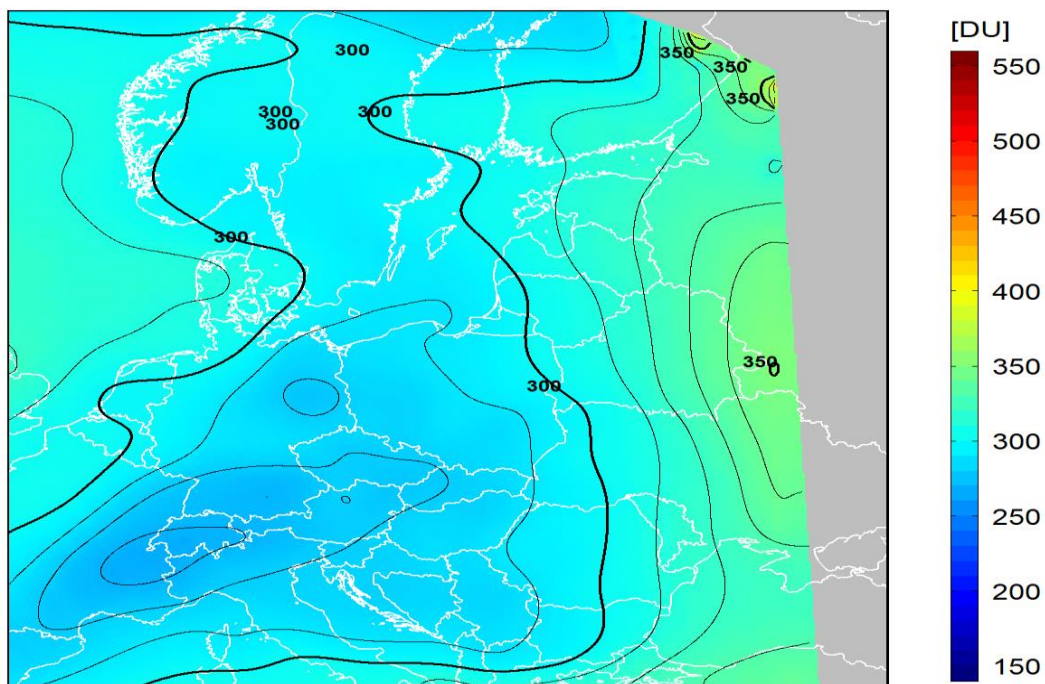
dane satelitarne: Suomi-NPP/OMPS

Legionowo 01-Dec-2021 12UTC
Dobson daily / Sonde = -0.901

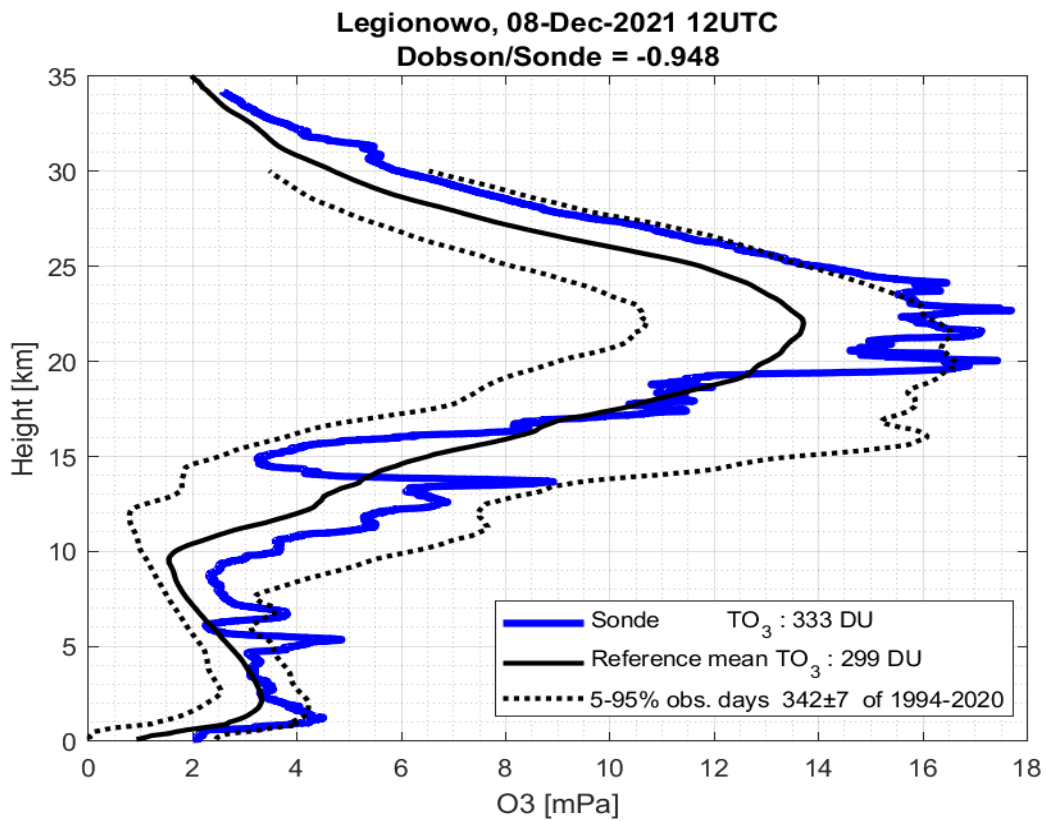


2021-12-01 godz. 11:42:10 - 11:49:32 UTC

Całkowita zawartość ozonu (O₃) w kolumnie atmosfery

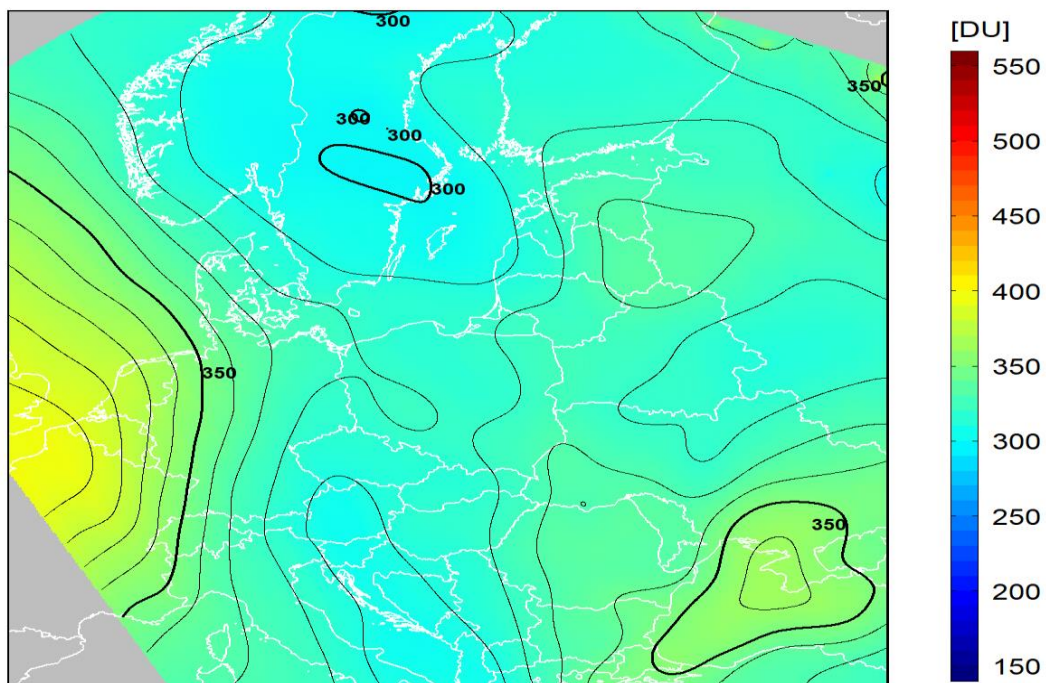


dane satelitarne: Suomi-NPP/OMPS



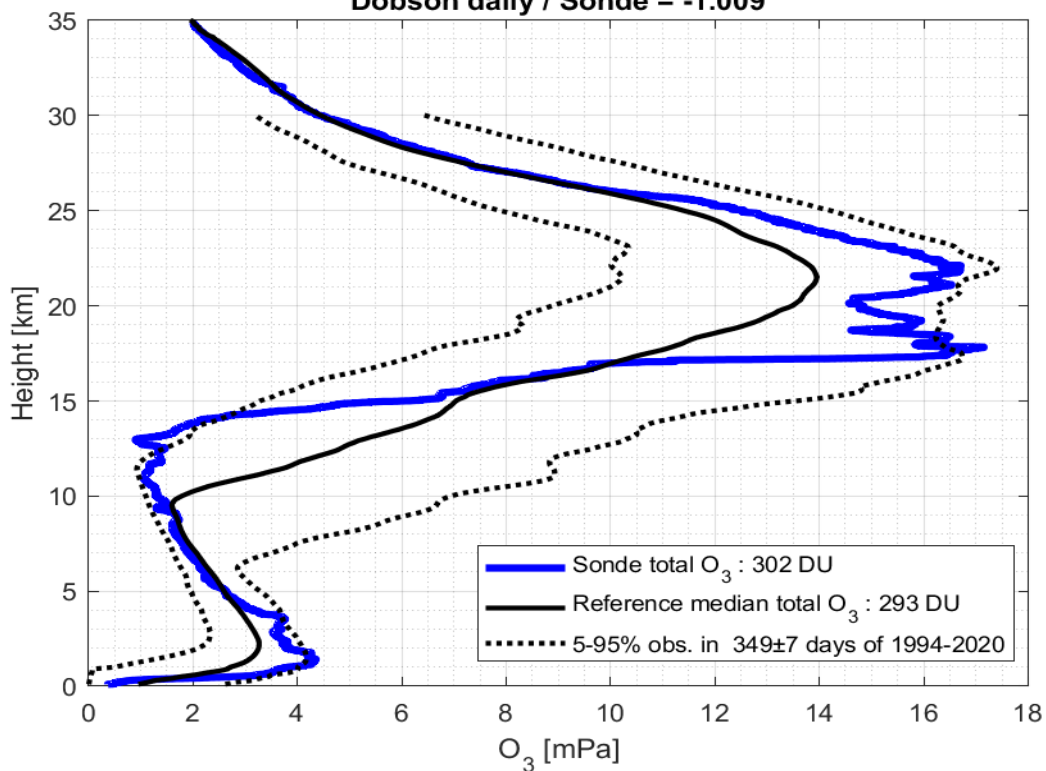
2021-12-08 godz. 11:10:20 - 11:17:57 UTC

Całkowita zawartość ozonu (O₃) w kolumnie atmosfery



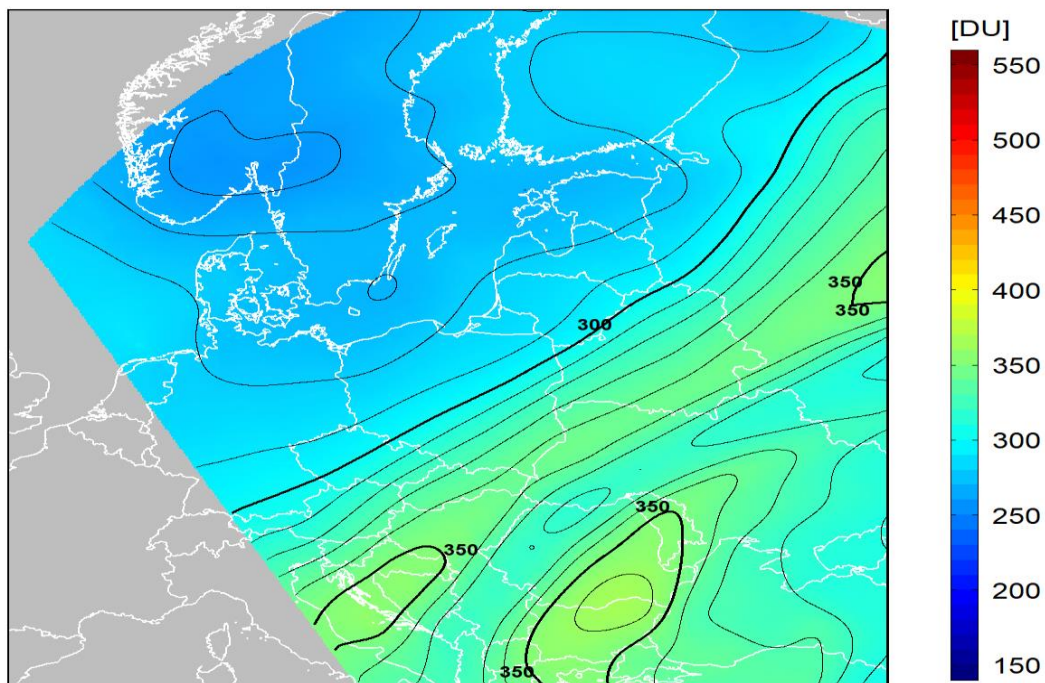
dane satelitarne: Suomi-NPP/OMPS

Legionowo 15-Dec-2021 12UTC
Dobson daily / Sonde = -1.009



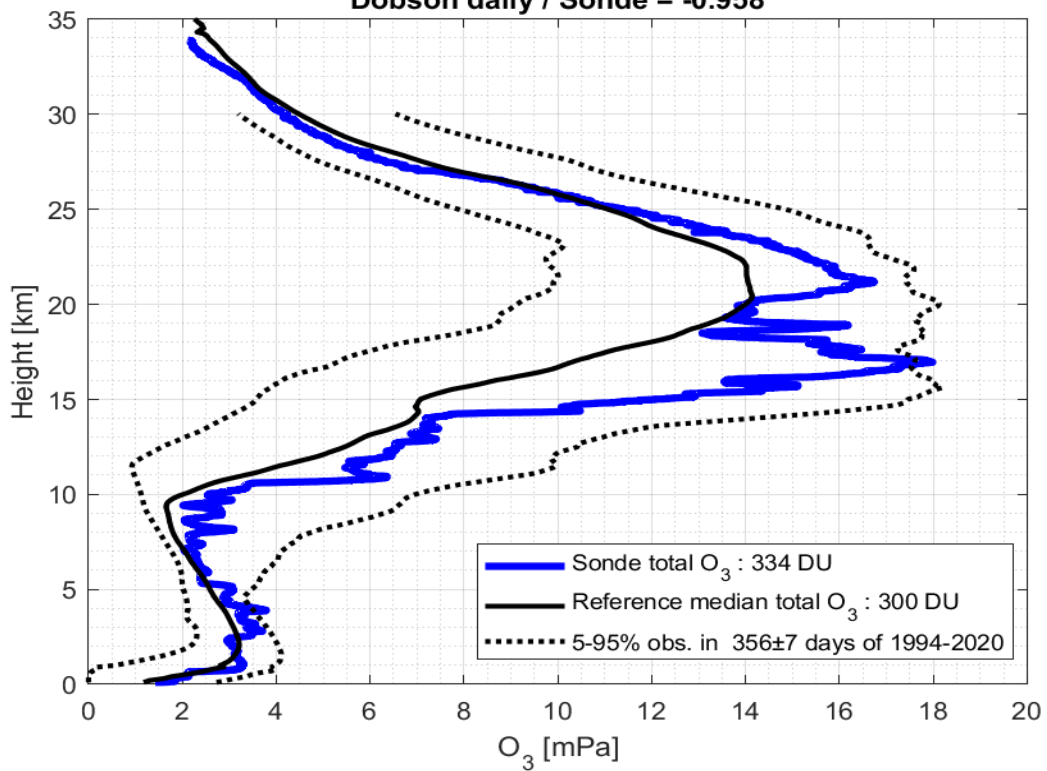
2021-12-15 godz. 10:38:34 - 10:45:56 UTC

Całkowita zawartość ozonu (O₃) w kolumnie atmosfery



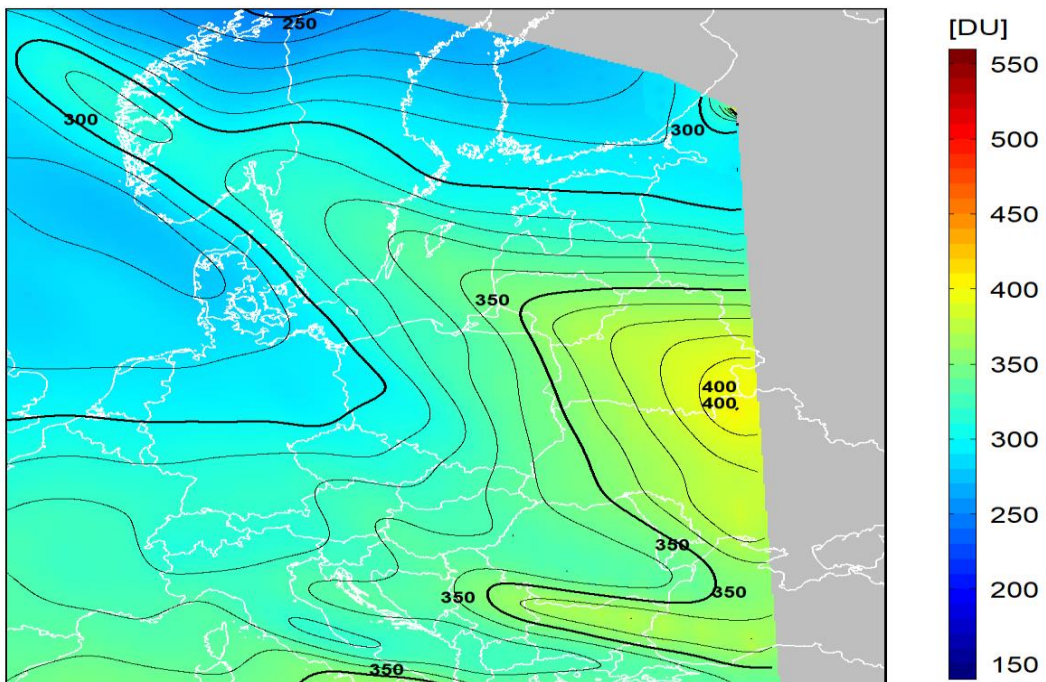
dane satelitarne: Suomi-NPP/OMPS

Legionowo 22-Dec-2021 12UTC
Dobson daily / Sonde = -0.958



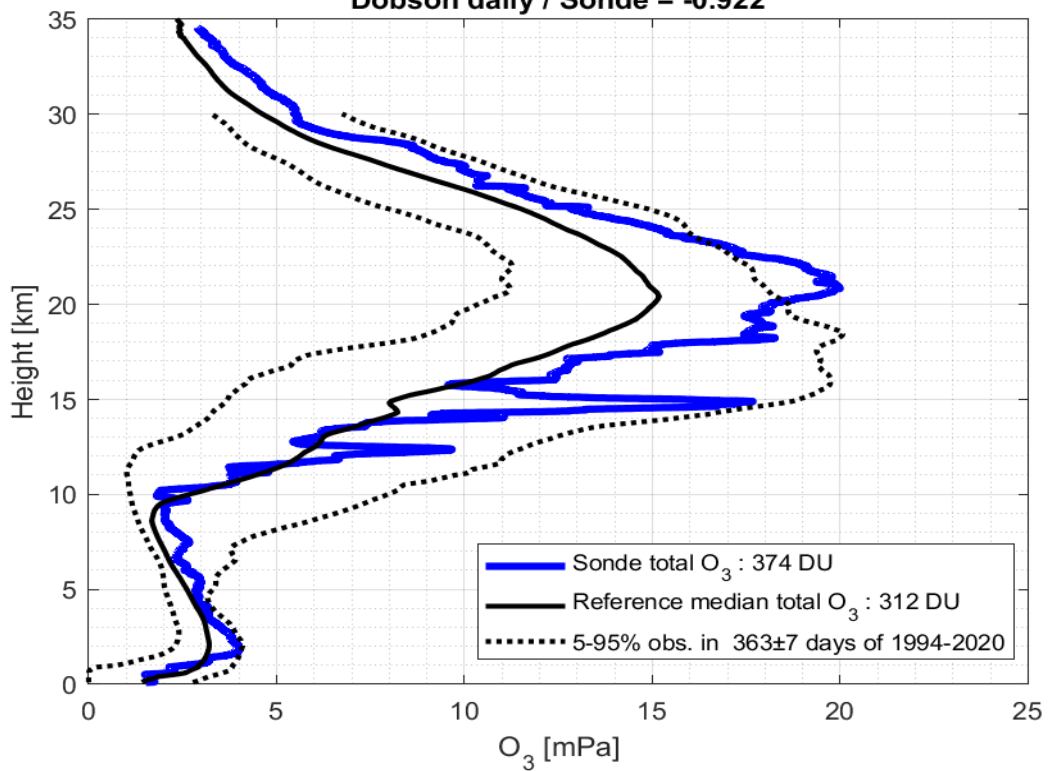
2021-12-22 godz. 11:48:09 - 11:55:16 UTC

Całkowita zawartość ozonu (O₃) w kolumnie atmosfery



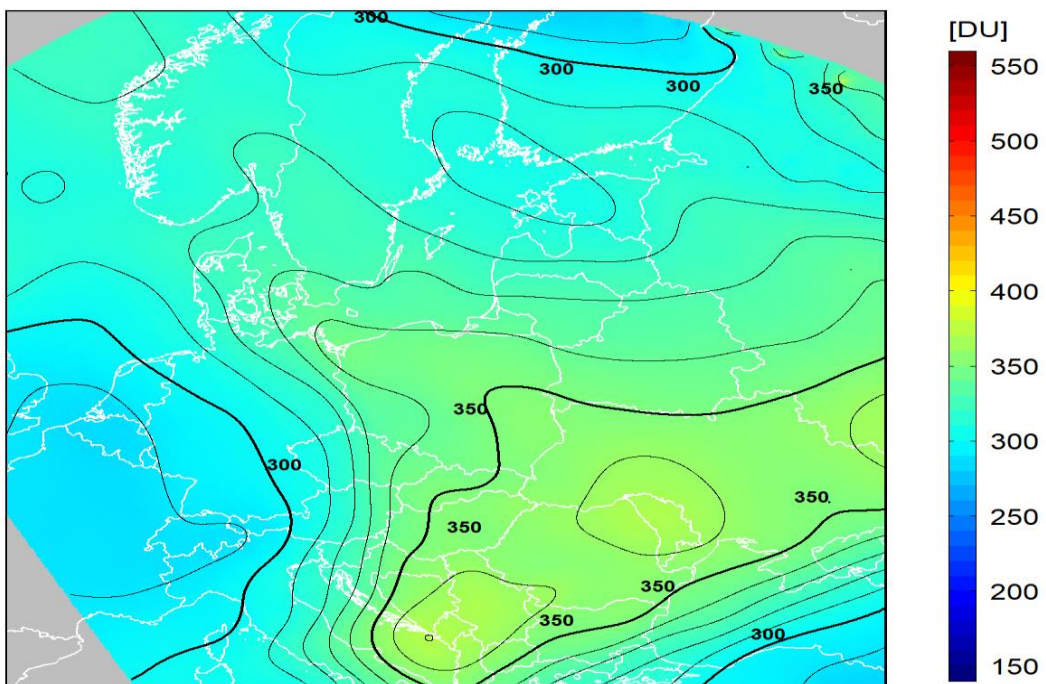
dane satelitarne: Suomi-NPP/OMPS

Legionowo 29-Dec-2021 12UTC
Dobson daily / Sonde = -0.922



2021-12-29 godz. 11:16:15 - 11:23:44 UTC

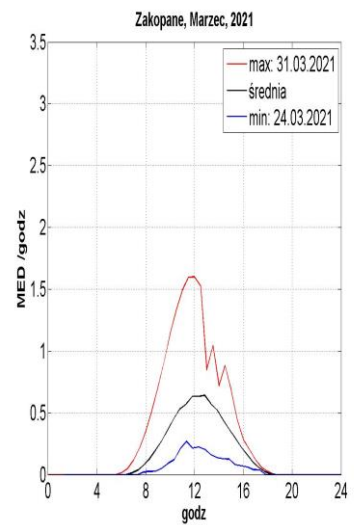
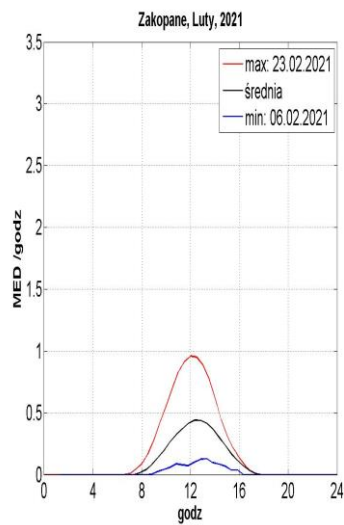
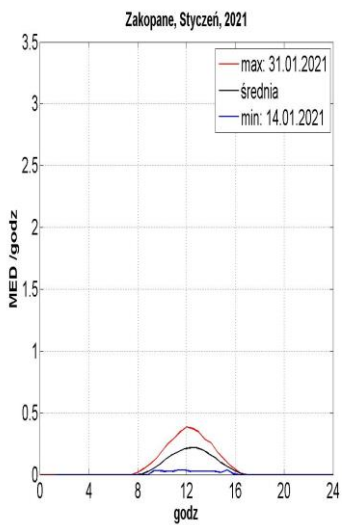
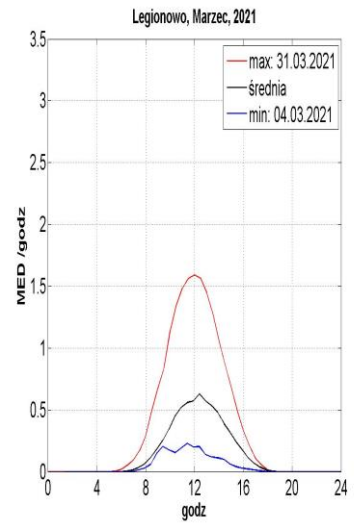
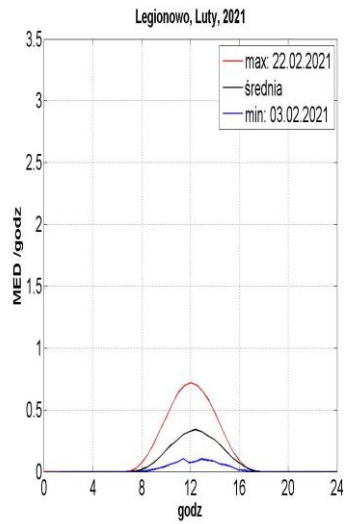
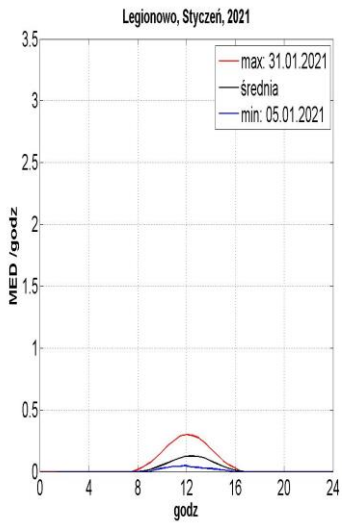
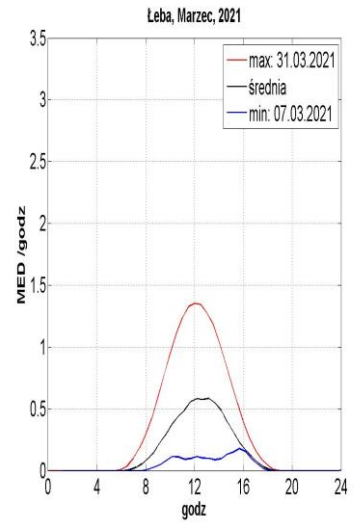
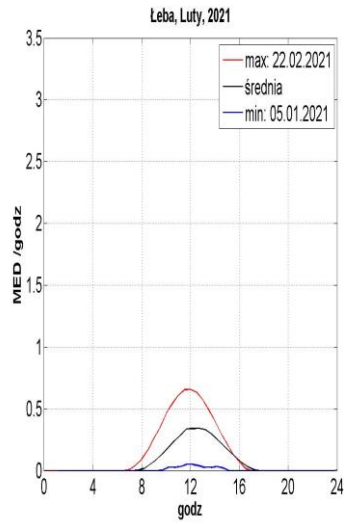
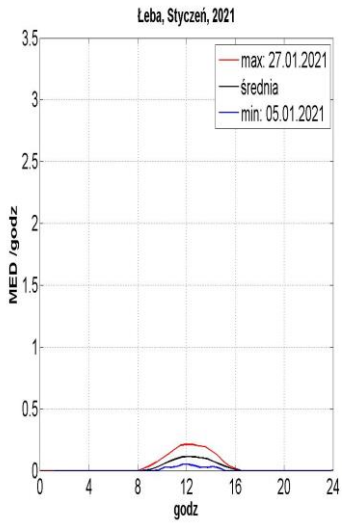
Całkowita zawartość ozonu (O₃) w kolumnie atmosfery

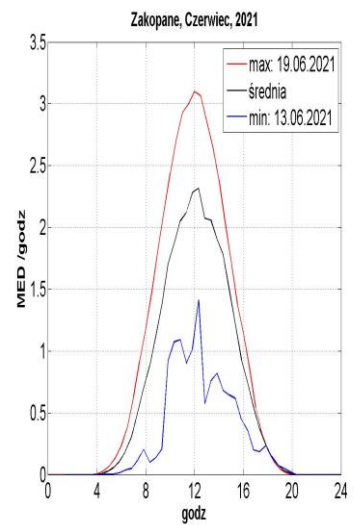
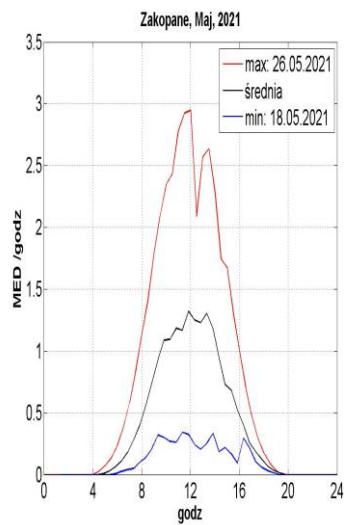
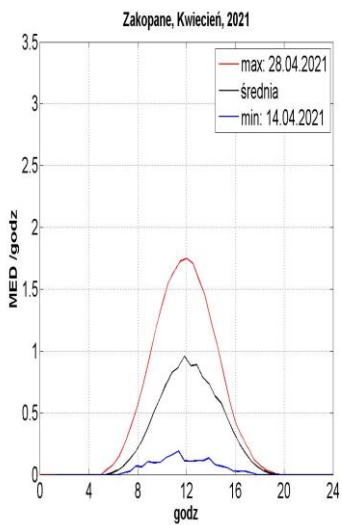
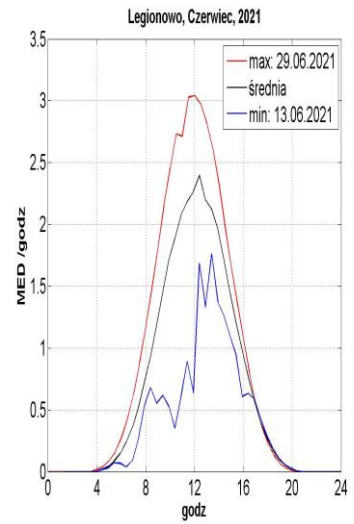
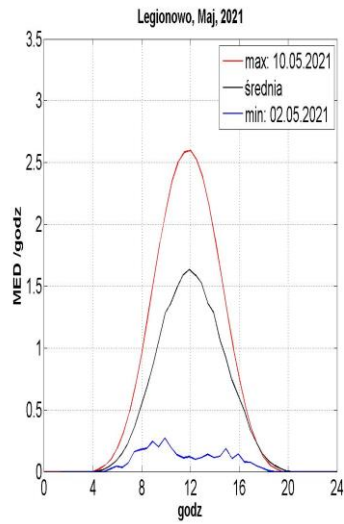
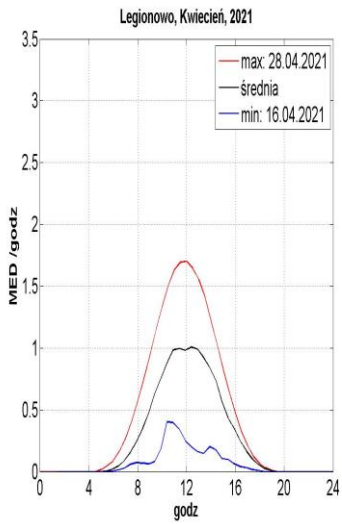
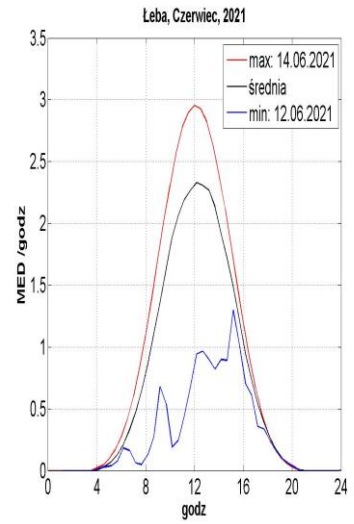
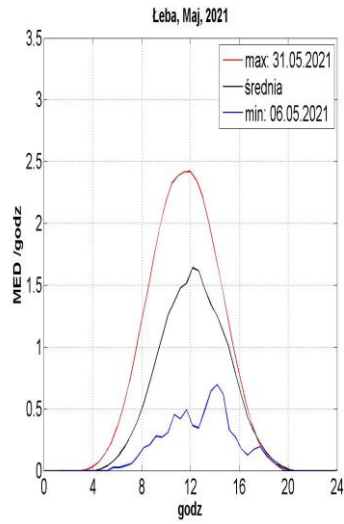
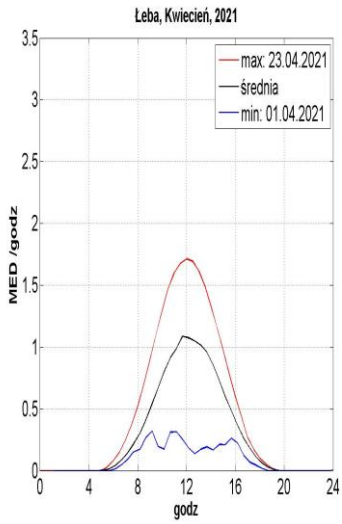


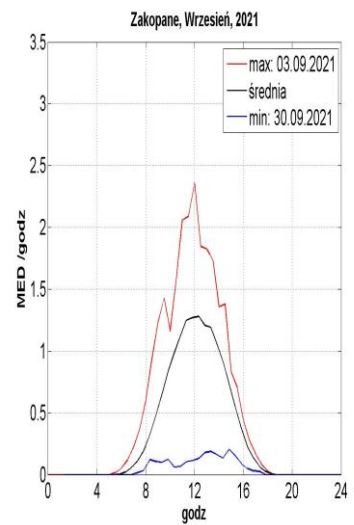
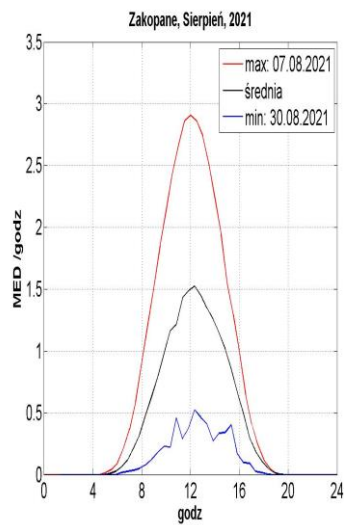
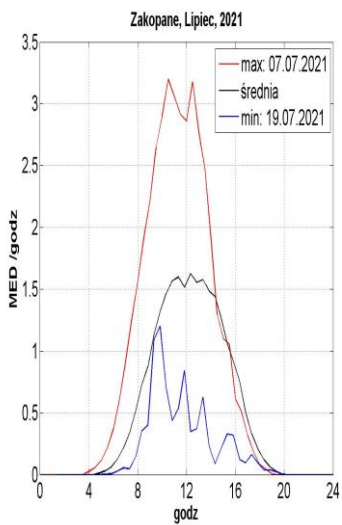
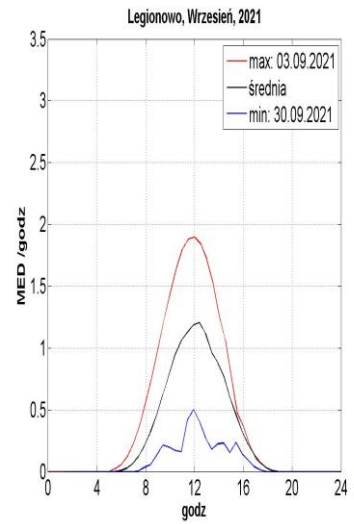
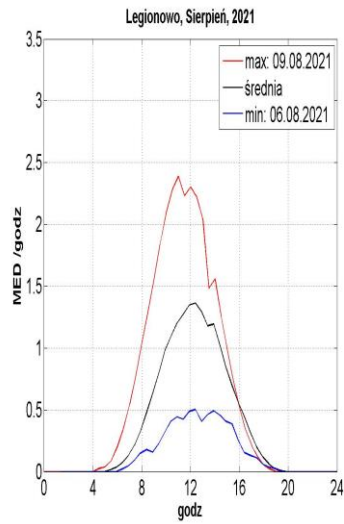
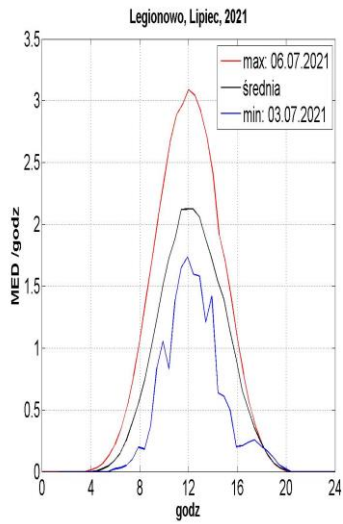
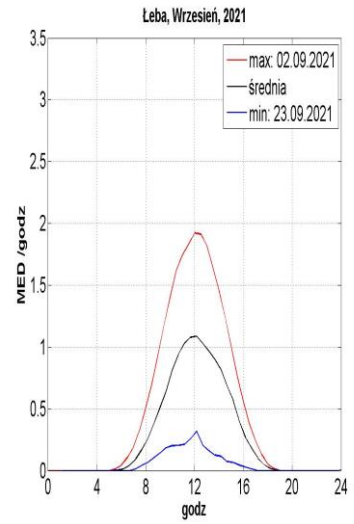
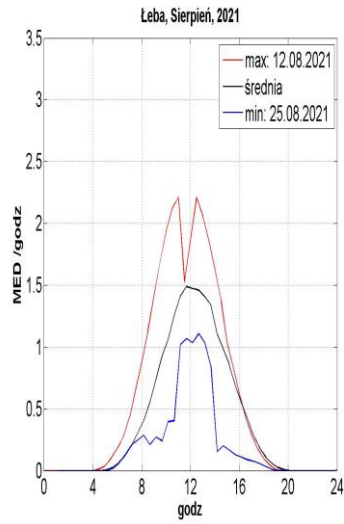
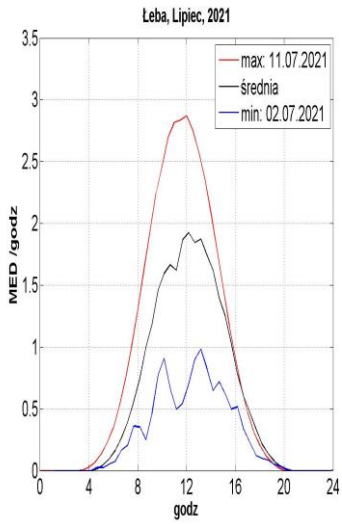
dane satelitarne: Suomi-NPP/OMPS

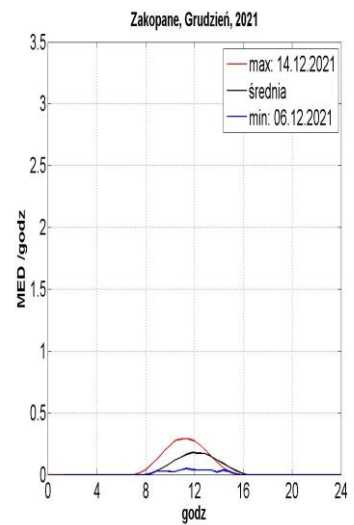
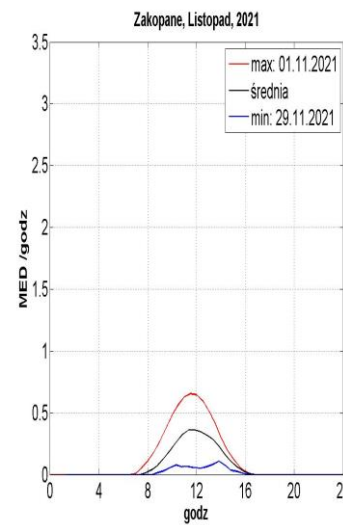
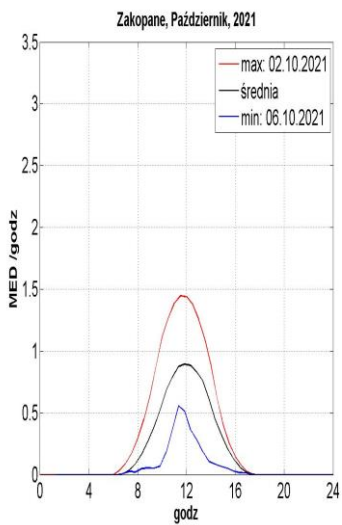
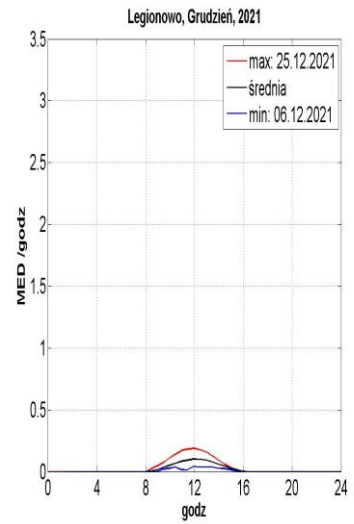
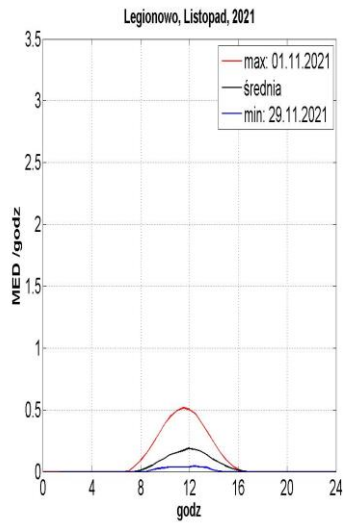
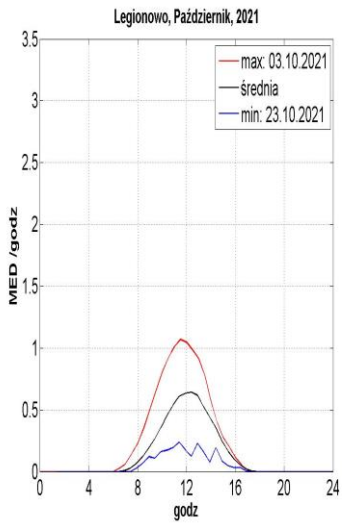
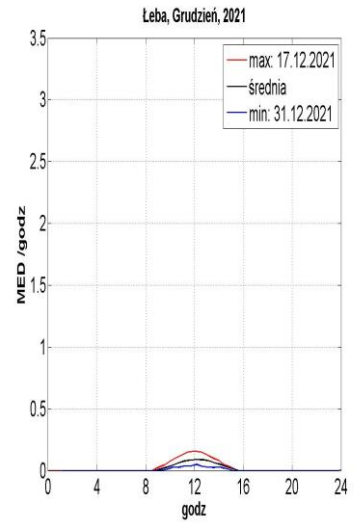
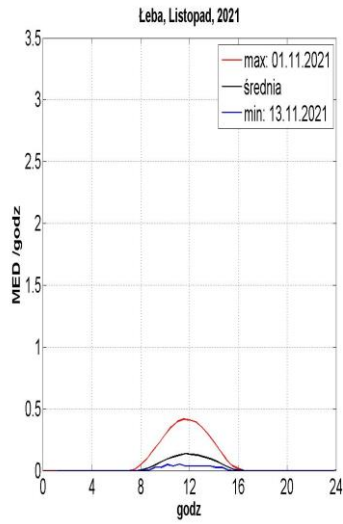
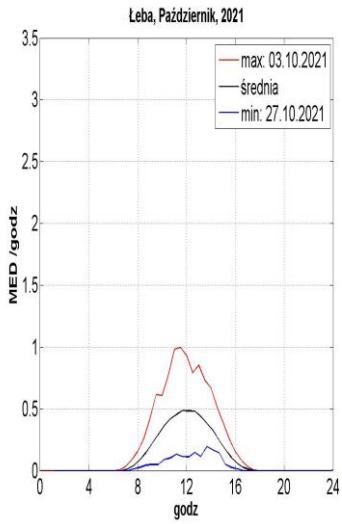
ZAŁĄCZNIK 2

DOBOWE PRZEBIEGI PROMIENIOWANIA UV-B Z MIESIĘCY
STYCZEŃ - GRUDZIEŃ 2021 R. (ŚREDNIE, MAKSYMALNE
I MINIMALNE) ZMIERZONE ZA POMOCĄ PRZYRZĄDU SOLAR LIGHT
(ŁEBA, LEGIONOWO, ZAKOPANE)









ZAŁĄCZNIK 3

DAWKI DOBOWE PROMIENIOWANIA UV-B Z MIESIĘCY
STYCZEŃ - GRUDZIEŃ 2021 R. ZMIERZONE ZA POMOCĄ
PRZYRZĄDU SOLAR LIGHT (ŁEBA, LEGIONOWO, ZAKOPANE)

	Łeba, dawki dobowe [MED]
--	--------------------------

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
01	0,33	1,05	1,62	2,15	12,06	13,82	10,66	7,76	9,85	5,13	1,99	0,34
02	0,36	0,36	1,53	5,62	3,90	13,55	6,36	10,71	11,86	4,21	0,45	0,25
03	0,32	1,00	3,23	6,53	8,35	14,55	7,78	10,36	6,77	5,15	1,07	0,56
04	0,22	1,22	1,38	7,86	5,98	11,35	18,01	13,37	4,64	2,74	0,53	0,28
05	0,16	1,60	2,95	2,48	7,50	16,78	12,83	13,58	10,65	3,54	0,29	0,41
06	0,25	1,11	3,09	5,47	3,76	17,84	17,77	8,06	9,53	2,12	0,82	0,16
07	0,37	1,06	0,92	5,61	10,51	18,89	9,48	13,95	10,03	2,09	0,45	0,54
08	0,26	1,39	3,48	7,12	10,67	17,87	17,36	9,13	10,08	4,86	0,71	0,56
09	0,45	1,23	2,62	6,33	10,90	18,20	11,60	11,03	9,54	4,69	1,20	0,39
10	0,50	1,43	3,75	7,77	16,24	18,81	10,47	11,00	9,20	4,06	1,48	0,32
11	0,35	1,22	1,44	7,03	15,69	19,40	20,41	11,57	5,69	2,67	0,50	0,38
12	0,28	1,10	2,71	2,19	14,99	7,07	15,95	14,55	5,09	1,69	1,21	0,18
13	0,53	1,66	2,59	7,93	14,27	18,60	18,02	12,34	6,13	2,54	0,21	0,41
14	0,33	2,03	1,27	7,02	12,46	21,18	17,63	12,36	5,26	1,59	0,26	0,17
15	0,55	2,03	1,84	5,56	9,05	16,73	19,19	10,06	7,60	1,24	0,36	0,26
16	0,39	2,04	3,30	5,12	5,34	21,01	17,99	9,80	2,90	3,05	0,22	0,52
17	0,80	0,89	3,13	7,09	11,39	20,56	12,32	6,42	6,19	2,17	0,24	0,61
18	0,77	2,18	3,39	7,70	7,54	19,72	14,13	4,83	3,36	2,50	0,74	0,28
19	0,43	0,73	3,55	9,99	14,23	17,36	15,63	8,76	4,19	2,12	0,36	0,37
20	0,44	2,25	4,27	8,85	15,51	19,52	17,73	8,63	6,40	2,67	0,60	0,28
21	0,95	3,22	4,31	10,18	8,58	20,15	15,80	12,70	3,32	1,26	0,69	0,36
22	0,72	3,33	6,00	4,22	8,03	12,05	11,26	12,64	5,19	1,02	0,62	0,42
23	0,26	1,87	5,12	11,27	12,09	20,38	17,07	11,49	1,29	2,14	0,82	0,38
24	0,39	3,11	2,60	10,17	13,48	8,10	15,02	10,92	6,22	2,37	0,69	0,18
25	0,58	3,22	4,22	9,16	7,34	19,69	13,55	4,80	6,85	3,05	0,36	0,54
26	0,58	1,85	5,36	9,71	9,51	18,99	8,37	6,69	6,61	0,90	0,31	0,37
27	0,99	3,24	3,27	10,76	10,86	13,38	13,31	6,80	6,37	0,79	0,39	0,51
28	0,62	1,21	4,56	8,51	12,67	19,61	11,54	7,16	3,79	1,94	0,41	0,40
29	0,81	-	2,08	5,07	15,59	19,99	9,55	6,23	5,64	2,46	0,44	0,22
30	0,88	-	7,62	5,16	17,42	13,27	15,72	6,86	5,01	2,25	0,22	0,22
31	0,58	-	8,17	-	17,78	-	11,79	7,58	-	1,93	-	0,15

	Legionowo, dawki dobowe [MED]											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII

01	0,21	1,21	1,20	6,25	4,35	11,26	12,77	7,53	8,84	4,98	2,45	0,71
02	0,37	0,76	3,90	7,70	1,61	13,94	8,80	8,74	8,76	3,21	1,49	0,78
03	0,41	0,47	2,40	5,19	7,75	16,09	8,75	13,06	11,24	5,55	1,56	0,66
04	0,24	0,61	1,11	6,99	9,61	15,16	9,67	5,20	11,02	5,34	1,00	0,42
05	0,18	1,57	2,90	4,29	5,62	9,59	15,02	6,87	10,06	5,10	0,75	0,40
06	0,25	1,70	3,31	3,52	13,66	17,16	20,81	3,42	10,41	3,76	0,73	0,17
07	0,30	0,60	1,24	3,25	3,86	17,59	18,55	14,79	9,04	5,12	1,01	0,38
08	0,39	0,63	2,90	4,26	7,23	16,49	15,34	7,86	9,89	5,05	0,72	0,52
09	0,22	1,05	3,67	8,55	15,38	15,77	17,51	15,28	9,81	5,02	0,86	0,39
10	0,38	0,97	3,14	6,30	17,25	15,70	10,85	10,09	9,86	4,37	1,73	0,26
11	0,91	1,45	2,98	9,20	16,72	13,60	19,26	11,01	9,55	3,78	1,56	0,32
12	0,61	1,93	2,33	7,05	16,71	11,21	16,80	14,19	8,11	2,88	0,77	0,31
13	0,57	1,09	2,53	3,08	15,04	9,18	12,36	14,51	7,34	2,49	0,68	0,31
14	0,39	1,25	2,88	1,81	12,15	19,06	15,09	13,50	6,57	2,91	0,23	0,42
15	0,55	1,32	2,58	1,79	11,74	17,45	17,61	13,88	8,35	2,37	0,46	0,42
16	0,53	2,10	3,30	1,60	9,00	19,33	12,04	10,86	4,02	2,19	0,37	0,22
17	0,87	1,13	1,47	3,20	12,12	20,98	16,73	8,36	2,61	1,42	1,23	0,42
18	0,93	2,55	2,36	7,51	9,53	20,68	15,46	9,71	2,26	3,00	0,67	0,22
19	0,55	1,11	2,80	8,95	8,19	20,30	14,85	7,39	2,57	1,82	0,35	0,27
20	0,53	2,18	4,81	6,97	13,06	19,68	16,71	11,75	2,89	2,74	1,27	0,46
21	1,16	3,40	1,82	8,72	13,76	20,79	13,76	9,58	5,70	1,25	0,44	0,72
22	1,13	3,56	4,96	8,45	4,83	18,23	12,51	9,92	6,59	1,55	0,75	0,39
23	0,45	2,24	5,02	7,41	13,60	16,03	11,21	3,92	3,58	1,12	0,31	0,52
24	0,40	3,03	2,94	9,97	14,45	11,77	12,17	4,94	5,27	2,51	0,45	0,37
25	0,21	3,49	5,58	6,99	8,81	11,87	15,52	8,89	2,95	3,40	0,99	0,80
26	0,49	1,51	3,81	7,18	10,36	14,41	9,64	6,07	6,39	2,62	0,33	0,56
27	0,40	2,79	5,54	8,04	14,22	17,39	12,93	4,06	7,22	2,60	0,27	0,72
28	0,76	0,95	4,27	10,91	11,36	16,96	16,02	5,51	6,02	1,49	0,80	0,39
29	0,52	-	3,50	9,76	10,02	21,04	16,44	5,63	6,36	2,85	0,17	0,32
30	0,62	-	2,77	10,73	10,42	14,61	16,75	3,96	1,93	2,81	0,42	0,35
31	1,38	-	8,92	-	15,56	-	11,53	7,22	-	2,50	-	0,25

	Zakopane, dawki dobowe [MED]											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII

01	1,08	1,85	3,21	7,46	8,19	9,69	8,32	9,56	2,49	5,58	3,11	1,08
02	0,98	1,61	4,55	1,60	9,19	17,66	7,10	11,84	8,77	7,65	0,78	1,26
03	0,45	2,14	5,34	2,26	6,76	17,74	6,70	10,52	12,43	7,42	3,00	0,84
04	1,01	0,66	2,53	4,35	11,99	15,26	12,71	10,57	11,89	7,63	2,21	1,15
05	0,74	1,63	1,44	7,76	9,46	8,86	11,45	2,82	11,11	7,35	2,45	0,92
06	0,42	0,52	2,78	5,28	10,30	19,16	16,42	5,37	11,80	1,54	2,50	0,21
07	0,77	1,15	4,75	4,70	7,04	15,23	21,16	18,69	9,32	4,99	2,58	0,32
08	0,90	1,01	1,64	3,87	6,95	18,48	15,48	12,03	10,57	6,64	2,38	0,93
09	1,12	1,85	4,32	9,50	15,44	13,46	9,78	15,54	11,66	5,73	1,26	0,47
10	1,17	1,81	4,28	9,33	15,34	13,86	15,02	17,80	10,83	4,97	2,24	0,57
11	1,38	0,56	4,00	5,52	16,07	15,63	11,90	12,08	10,73	5,49	2,19	1,11
12	1,19	1,76	3,50	7,94	13,09	15,36	6,53	14,18	10,35	2,90	2,11	0,47
13	0,73	1,41	4,93	1,94	4,90	6,54	20,10	13,77	7,58	1,69	2,07	1,21
14	0,18	1,93	2,39	0,91	4,48	12,10	13,21	16,56	9,59	4,63	1,81	1,26
15	0,61	2,65	2,11	5,89	8,30	20,81	14,58	14,77	8,84	4,16	1,95	0,81
16	0,69	1,19	1,86	2,66	4,72	20,34	12,66	15,13	6,46	4,18	1,92	0,63
17	1,12	1,01	2,25	3,30	5,08	19,63	12,33	7,01	1,90	4,70	1,63	0,35
18	1,43	1,31	2,05	4,65	2,40	17,27	5,64	9,82	2,96	1,86	1,11	0,85
19	1,04	1,51	3,82	2,92	7,24	21,24	4,46	14,72	4,77	4,67	0,43	0,52
20	1,56	3,11	1,58	4,49	6,62	20,69	5,53	7,65	2,92	4,53	1,14	0,35
21	1,60	4,34	5,67	6,09	17,34	16,21	9,46	8,71	5,02	3,99	1,57	0,36
22	1,55	4,53	3,76	6,66	7,28	16,80	10,70	12,73	2,29	4,28	0,46	0,93
23	1,27	4,69	2,54	6,01	5,41	11,56	11,61	2,71	8,28	2,48	1,51	0,94
24	0,95	3,74	1,14	8,78	13,35	18,98	15,24	3,76	6,42	4,07	1,31	0,80
25	0,22	4,51	3,67	3,04	5,69	8,28	8,27	6,37	5,77	4,00	1,50	0,35
26	0,51	4,47	7,05	9,27	18,83	14,20	18,10	3,25	8,28	3,80	0,59	1,16
27	1,02	1,09	6,41	10,30	9,98	16,65	13,77	3,99	6,38	3,66	1,06	1,12
28	1,41	4,04	5,36	11,08	8,03	18,69	17,73	7,06	7,75	3,99	0,99	1,14
29	1,17	-	4,39	9,92	4,59	16,98	13,61	3,56	7,27	3,65	0,40	0,83
30	1,00	-	1,62	5,31	4,75	11,26	19,88	2,62	1,09	3,74	1,19	0,79
31	1,73	-	8,43	-	6,84	-	9,26	4,68	-	3,31	-	0,66