PRZEGLĄD GEOFIZYCZNY
Rocznik LXV 2020 Zeszyt 3-4

Janusz KRZYŚCIN, Bonawentura RAJEWSKA-WIĘCH, Janusz BORKOWSKI
INSTYTUT GEOFIZYKI, POLSKIEJ AKADEMII NAUK

# STAN WARSTWY OZONOWEJ NAD POLSKĄ W OKRESIE 1979-2018

OZONE LAYER OVER POLAND IN THE PERIOD 1979-2018

## Wstęp

Warstwa ozonowa, czyli obszar atmosfery charakteryzujący się stosunkowo dużą koncentracją cząsteczek ozonu, odgrywa szczególną rolę, ponieważ prawie całkowicie pochłania szkodliwe promieniowanie ultrafioletowe emitowane przez Słońce, o długości fali mniejszej od 290 nm. Regularne pomiary zawartości ozonu w atmosferze prowadzone na wielu stacjach, w tym również w Centralnym Obserwatorium Geofizycznym Instytutu Geofizyki Polskiej Akademii Nauk w Belsku k. Grójca, pozwoliły stwierdzić, że począwszy od lat 70. ubiegłego wieku systematycznie zmniejsza się koncentracja ozonu w atmosferze. Fakt ten wzbudził poważne zaniepokojenie i stał się inspiracją do podjęcia intensywnych badań. Prace Crutzena (1970) oraz Moliny i Rowlanda (1974) wskazały na antropogeniczne chlorofluorowęglowodory jako substancje niszczące warstwę ozonową. Chubachi (1984) zauważył szczególnie duże ubytki w warstwie ozonowej wokół bieguna południowego, podobne zjawisko zaobserwowano na brytyjskiej stacji Halley Bay na Antarktydzie (Farman i in. 1985).

Późniejsze badania wykazały, że obszar wokół bieguna południowego objęty znacznym zmniejszeniem koncentracji ozonu w stratosferze może zajmować nawet 29 milionów kilometrów kwadratowych i pojawia się regularnie w czasie wiosny na półkuli południowej. Zawartość ozonu w całej pionowej kolumnie atmosfery, czyli tzw. całkowita zawartość ozonu ($CZO_3$), może wtedy wynosić 50%, a na niektórych poziomach (dolna stratosfera) tylko 10% normalnej zawartości. Ze względu na wielkość tych ubytków w warstwie ozonowej przyjęto nazywać ten obszar dziurą ozonową i ustalono graniczną wartość $CZO_3$, poniżej której występuje dziura ozonowa, na 220 dobsonów, tj. wartość $CZO_3$ nie występującą nad Antarktydą przed rokiem 1980. Jednostką $CZO_3$ jest miliatmocentymetr (m atm-cm). $CZO_3$ wynosi 1 m atm-cm, czyli 1 dobson (D), jeśli warstwa ozonu ma grubość 0,01 mm w standardowych warunkach ciśnienia i temperatury.

Informacje o dziurze ozonowej były tak alarmujące, że podjęto działania, których celem było ograniczenie emisji do atmosfery substancji niszczących ozon. W 1987 roku

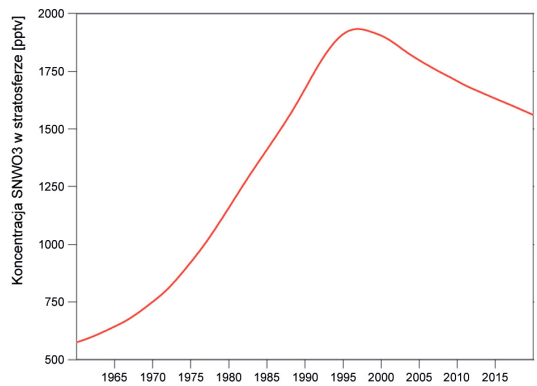
 DOI: 10.32045/PG-2020-011

został uchwalony Protokół Montrealski, który zobowiązywał państwa przystępujące do tego międzynarodowego układu do stopniowej eliminacji substancji niszczących warstwę ozonową. Protokół Montrealski wraz z jego późniejszymi poprawkami do chwili obecnej podpisało 198 państw, w tym i Polska w 1990 roku.

Podjęte działania chroniące warstwę ozonową spowodowały w połowie lat 90. ubiegłego wieku zahamowanie wzrostu, a następnie zmniejszenie koncentracji takich substancji w stratosferze (rys. 1). Oczekiwano w związku z tym regeneracji ozonu w atmosferze, o czym miałoby świadczyć odwrócenie kierunku trendu (z ujemnego na dodatni) w seriach czasowych zmian ozonu. Występowanie naturalnych oscylacji w warstwie ozonowej indukowanych przez globalne i lokalne procesy transportu w stratosferze związane ze zmianami klimatu utrudniało jednoznaczne stwierdzenie odwrócenia kierunku trendu (Harris i in. 2008).

Wydawało się, że regenerację warstwy ozonowej najłatwiej można będzie stwierdzić w wysokiej stratosferze (na wysokości ~40-50 km), gdzie dominują procesy chemiczne w zmianach ozonu. Steinbrecht i in. (2017) analizując pomiary satelitarne ozonu, stwierdzili istnienie statystycznie istotnego dodatniego trendu w warstwie 35-48 km w przeważającej części obszaru między równoleżnikami 75°S i 85°N. Jednak analiza zmian koncentracji ozonu w wysokiej stratosferze prowadziła do dużego rozrzutu estymowanych wartości trendu w porównaniach wielu źródeł danych i metod wyznaczania koncentracji ozonu na tych wysokościach w atmosferze (Petropavlovskikh i in. 2019).

W zależności od długości analizowanej serii czasowej $CZO_3$ i zastosowanego statystycznego modelu sygnalizowano zarówno dodatnie, jak i nieistotne statystycznie trendy w okresie zmniejszania koncentracji substancji niszczących warstwę ozonową (Harris i in. 2008; Krzyścin 2012; Weber i in. 2018, Krzyścin, Baranowski 2019). Dopiero w ostatnich




Rys. 1. Zawartość substancji niszczących warstwę ozonową w stratosferze w średnich szerokościach geograficznych według obliczeń modelowych Amerykańskiej Narodowej Służby Oceanicznej i Atmosferycznej (NOAA): https://www.esrl.noaa.gov/gmd/odgi/

Fig. 1. Concentration of substances in the stratosphere that deplete the ozone layer in the middle latitudes according to model calculations by US National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA): https://www.esrl.noaa.gov/gmd/odgi/

latach stwierdzono pierwsze symptomy zaniku „dziury ozonowej" nad Antarktydą (Solomon i in. 2016; Kuttippurath i in. 2018; Krzyścin 2020).

Celem niniejszego opracowania jest przedstawienie długookresowej zmienności $CZO_3$ i w rozkładzie pionowym ozonu nad Belskiem, na podstawie wyników pomiarów spektrofotometrem Dobsona w Belsku w latach 1963-2018. Stosując regresję wieloskładnikową, porównano trendy z naziemnych pomiarów $CZO_3$ w Belsku w okresie 1979-2018 z trendami wyznaczonymi z obserwacji satelitarnych w różnych rejonach na półkuli północnej. Dyskusja wyników w aspekcie regeneracji warstwy ozonowej i podsumowanie znajdują się w końcowej części pracy.

## Analizowane dane

Pomiary ozonu w Centralnym Obserwatorium Geofizycznym, Instytutu Geofizyki PAN w Belsku spektrofotometrem Dobsona nr 84 rozpoczęto w 23 marca 1963 r. i trwają nieprzerwanie do chwili obecnej. Szczególną uwagę zwracano na wysoką jakość pomiarów. Przyrząd regularnie uczestniczył w międzynarodowych kampaniach kalibracyjnych i porównawczych (Krzyścin i in. 2014). Dane z Belska wykorzystano też w kalibracji pomiarów satelitarnych ozonu (Krzyścin i in. 2008). Wyniki wszystkich pomiarów uzyskanych przed 1992 r. przeliczono, stosując nowo wprowadzone współczynniki absorpcji ozonu Bassa i Poura (Degórska i in. 1995). Dzięki tym staraniom uzyskano jedną z najdłuższych na świecie jednorodną serię pomiarową. Wyniki pomiarów (średnie dzienne) są na bieżąco przekazywane do światowego centrum danych ozonowych i promieniowania ultrafioletowego (*WOUDC* z ang. World Ozone and Ultraviolet Data Centre) w Toronto (Kanada) (https://woudc.org/home.php).

Pionowy profil ozonu w atmosferze nad Belskiem wyznacza się z pomiarów Umkehr spektrofotometrem Dobsona w Belsku. W metodzie tej wykorzystuje się pomiar stosunku natężenia światła rozproszonego z zenitu dla dwóch długości fali, silnie i słabo pochłanianej przez ozon. Stosunek ten maleje przy wzroście kąta zenitalnego, natomiast zaczyna rosnąć przy pewnej wartości tego kąta. Zawartość ozonu w 10 warstwach (od powierzchni ziemi do górnej granicy atmosfery) uzyskano, stosując algorytm UMK04 (Petropavlovskikh i in. 2005), który obecnie jest zalecany przez *WOUDC*.

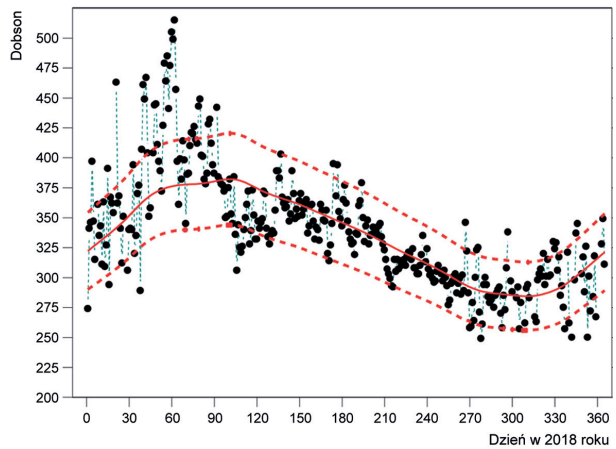
Analiza pomiarów satelitarnych ozonu w większej skali przestrzennej pozwala stwierdzić, w jakim stopniu zmiany zawartości ozonu nad Belskiem mają lokalny charakter. W przedstawionym opracowaniu wykorzystano homogenizowane dane satelitarne zamieszczone w globalnej bazie Multi-Sensor Reanalysis version 2 (*MSR-2*) (van der A i in. 2015). Baza prowadzona jest przez holenderski Królewski Instytut Meteorologiczny i zawiera globalne dane $CZO_3$ od stycznia 1979 do grudnia 2018 r. z rozdzielczością 0,5° (szerokość geograficzna) na 0,5° (długość geograficzna).

Długookresowe zmiany średnich sezonowych i średniej rocznej $CZO_3$, wyznaczone z pomiarów spektrofotometrem Dobsona w Belsku (20,78°E, 51,84°N) w latach 1979-2018, zostaną w dalszej części opracowania porównane z wynikami z danych *MSR-2* z następu-

jących obszarów: okolice Belska (20-21°E, 51-52°N), Polska (14-24°E, 49-54,5°N), Europa Środkowa (12-24°E, 45-55°N), Europa (10°W-45°E, 35-60°N), pas średnich (30-60°N) i wysokich (60-90°N) szerokości geograficznych na półkuli północnej, tropiki (0-30°N).

## Zmiany zawartości ozonu nad Belskiem

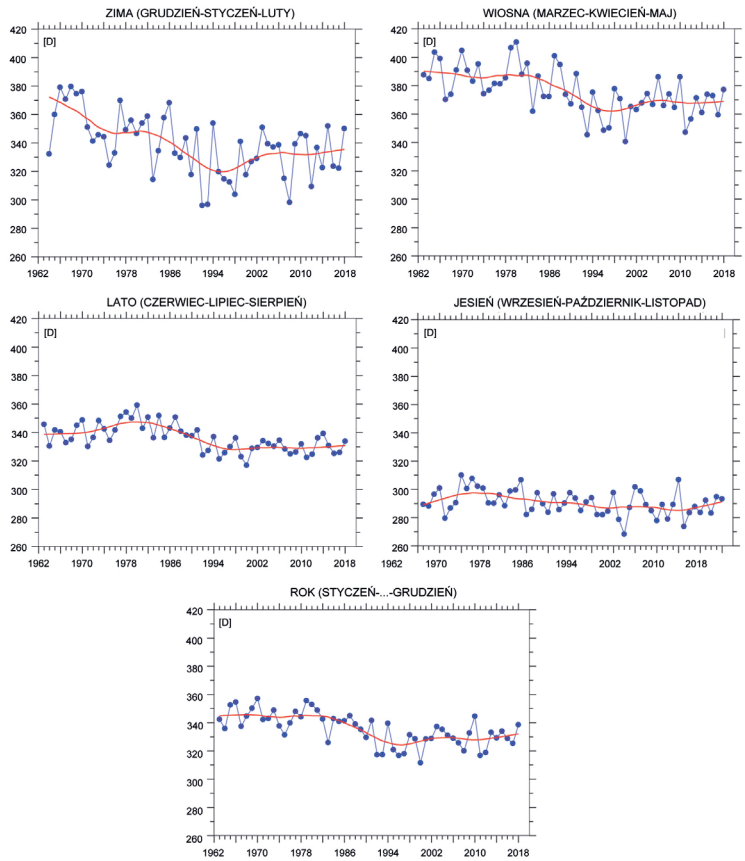
Przebieg średnich dziennych $CZO_3$ w ostatnim analizowanym roku pomiarowym (2018) przedstawiono na rys. 2. Przebieg ten jest typowy dla całego okresu pomiarowego (1963-2018) z dużymi oscylacjami w okresie grudzień-kwiecień i małą zmiennością w okresie letnim i jesiennym. Wartości odchyłek średnich dziennych od średnich wieloletnich (1963-2017) rzadko przekraczały 10% i miało to miejsce zwłaszcza w zimie. Przekroczenia powyżej 20% normy zdarzały się kilka razy w roku. Wartości średnich miesięcznych $CZO_3$ w 2018 r. były na ogół zbliżone do wieloletnich średnich miesięcznych, z wyjątkiem lutego, marca i kwietnia. W lutym średnia miesięczna wynosiła 410 D (tj. 10,5% powyżej średniej wieloletniej), w marcu 414 D (9,2% powyżej średniej wieloletniej), a w kwietniu 356 D (6,8% poniżej średniej wieloletniej). W pozostałych miesiącach średnie miesięczne wartości $CZO_3$ fluktuowały względem średniego poziomu w granicach od –3 do 3,8%. Średnia roczna $CZO_3$ w 2018 r. wyniosła 325 D i była o ok. 6% poniżej średnich rocznych przed 1980 rokiem. Przebieg $CZO_3$ w 2018 r. w odniesieniu do wieloletnich średnich sugeruje, że warstwa ozonowa nad Belskiem nie wykazuje znaczących zmian w ostatnim półwieczu.




Rys. 2. Średnie dzienne całkowitej zawartości ozonu (czarne kółka) w Belsku w 2018 r.; ciągła czerwona linia przedstawia wieloletnie (1963-2017) średnie dzienne, przerywane czerwone linie wyznaczają zakres ±10% odchyłek względem wieloletnich średnich dziennych

Fig. 2. The daily means of the total column ozone (black circles) at Belsk in 2018; full curve in red shows the long-term (1963-2017) daily means and dashed curves in red provide ±10% decline range from the long-term daily means

Analizując długookresowe zmiany średnich sezonowych $CZO_3$ w Belsku (krzywe w kolorze czerwonym na rys. 3 reprezentujące wygładzone metodą lokalnej regresji przebiegi średnich sezonowych), stwierdzono, że od połowy lat 90. XX wieku następuje zmiana kierunku trendu w średnich sezonowych i w średniej rocznej $CZO_3$. Wyraźna spadkowa tendencja, która pojawiła się z końcem lat 70. została zatrzymana około 1996 roku. Od tego momentu obserwujemy niewielką wzrostową tendencję w średnich rocznych $CZO_3$, a także w zimowych i wiosennych średnich wartościach $CZO_3$. Na początku XXI wieku tendencja ta zostaje zahamowana. W ostatnich latach wydaje się, że średnie wartości $CZO_3$ oscylują wokół pewnego ustalonego poziomu bez wyraźnego trendu.



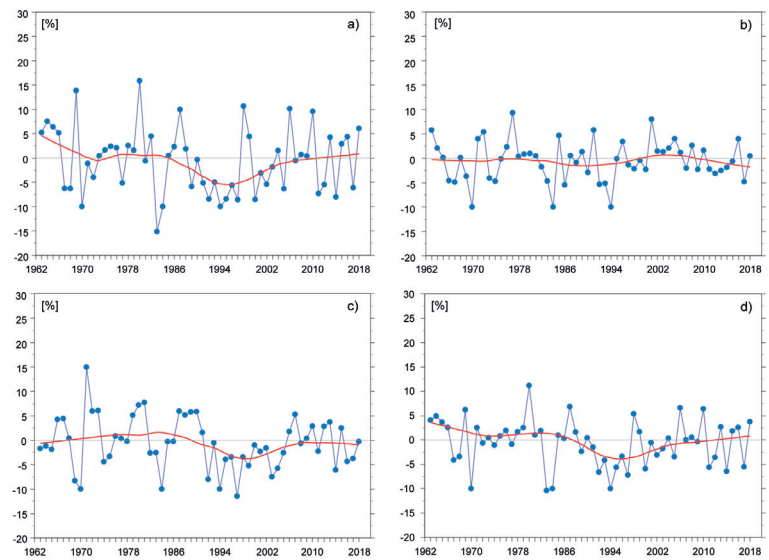

Rys. 3. Średnie sezonowe całkowitej zawartości ozonu uzyskane z pomiarów spektrofotometrem Dobsona w Belsku w okresie 1963-2018; czerwona krzywa przedstawia dane wygładzone metodą LOWES

Fig. 3 Seasonal means of the total column ozone from the Dobson's spectrophotometer measurements at Belsk in the period 1963-2018; the red curve shows the data smoothed by the LOWES method

Taka trójskładnikowa funkcja trendu w $CZO_3$ została przedstawiona w pracy Krzyścina i Baranowskiego (2019). W prezentowanej pracy została wykorzystana klasyczna dwuskładnikowa funkcja trendu (Reinsel i in. 2005), aby odnieść się do dwóch faz zmian koncentracji substancji niszczących warstwę ozonową (rys. 1).

Na rysunku 4 przedstawiono przebiegi średnich sezonowych (marzec-kwiecień-maj) zawartości ozonu w wybranych warstwach atmosfery (troposfera+dolna stratosfera, środkowa stratosfera, górna stratosfera, cała kolumna atmosfery) z pomiarów Umkehr spektrofotometrem Dobsona w Belsku. Od połowy lat 90. XX wieku przebiegi wygładzonych zmian zawartości ozonu w sezonach wiosennych (1963-2018) w wybranych warstwach atmosfery wskazują wzrostową tendencję zawartości ozonu w całej kolumnie atmosfery (rys. 4d), w warstwach 0-22 km (troposfera i dolna stratosfera, rys. 4a) i 32,5-37,5 km (górna stratosfera, rys. 4c). Taka tendencja wydaje się jednak słabnąć w ostatnich 10 latach. W średniej stratosferze (22-27 km, rys. 4b) przez cały okres pomiarowy zawartość ozonu oscyluje wokół ustalonego poziomu bez wyraźnego trendu.

Obserwowana w ostatnich latach stabilizacja poziomu zawartości ozonu w stratosferze jest pewnym zaskoczeniem, gdyż oczekiwano wyraźnej wzrostowej tendencji, zwłaszcza w górnej stratosferze, w związku z funkcjonowaniem ograniczeń w produkcji




Rys. 4. Względne odchyłki średnich wiosennych (marzec-kwiecień-maj) zawartości ozonu w okresie 1963-2018 od średniej wieloletniej (1963-2017) w wybranych warstwach atmosfery: (a) troposfera i dolna stratosfera 0-22 km, (b) średnia stratosfera 22-27 km, (c) wysoka stratosfera 32,5-37,5 km, (d) cała kolumna atmosfery; czerwona krzywa przedstawia dane wygładzone metodą LOWES

Fig. 4. Relative deviations of spring (March-April-May) means of ozone content in the period 1963-2018 from the long term (1963-2017) mean in selected atmospheric layers: troposphere and lower stratosphere 0-22 km, (b) middle stratosphere 22-27 km, (c) high stratosphere 32.5-37.5 km, (d) the entire column of the atmosphere; the red curve shows the data smoothed by the LOWES method

substancji niszczących ozon, które wprowadził Protokół Montrealski z 1987 r. i jego późniejsze poprawki.

## Wyznaczanie trendu w warstwie ozonowej

W modelach zmian długookresowych $CZO_3$ dąży się do wyznaczenia trendu w danych z odfiltrowanymi krótkookresowymi (w skali od miesięcy do kilkunastu lat) oscylacjami związanymi z naturalnymi procesami wpływającymi na zmiany ozonu, jak np. aktywność słoneczna i wulkaniczna, czy też Oscylacja Północnoatlantycka. Dalej w tekście taki trend będzie określany terminem trend antropogeniczny. Zwykle w modelach statystycznych do estymacji trendu antropogenicznego stosuje się wieloskładnikową liniową regresję z parametryzacją efektów związanych z podstawowymi naturalnymi czynnikami wpływającymi na zmienność ozonu. Trend antropogeniczny opisuje funkcja składająca się z dwóch prostych z zadanym punktem przegięcia. W średnich szerokościach geograficznych przyjmuje się 1996 za rok przegięcia trendu (np. Reinsel i in. 2005; Weber i in. 2018), gdyż wtedy zmienia się tendencja (ze wzrostowej na malejącą; rys. 1) w koncentracji substancji niszczących ozon w stratosferze. Takie podejście zastosowano i w tej pracy, jednak rok przegięcia nie był z góry zadany, ale był jedną z estymowanych wielkości wyznaczanych metodą najmniejszych kwadratów w modelu regresji wieloskładnikowej.

Odcinki określające trend antropogeniczny w latach 1979-2018 mogą być połączone lub traktowane jako segmenty rozłączne. Zwykle w modelowaniu zmian w warstwie ozonowej stosowano pierwsze podejście (np. Reinsel i in. 2005; Harris i in. 2008). Ostatnio zaczęto stosować podejście drugie, które zakłada niezależność trendów przed i po terminie odwrócenia kierunku trendu (Weber i in. 2018). Wymóg ciągłości linii trendu pociąga za sobą dopasowanie trendu w drugim okresie do trendu istniejącego w pierwszym okresie i powoduje wzmocnienie dodatniego trendu w drugim okresie, jeśli w pierwszym okresie występuje wyraźne zmniejszenie wartości $CZO_3$ na końcu serii pomiarowej (Weber i in. 2018).

Krótkookresowe zmiany $CZO_3$ związane z procesami zachodzącymi w dynamice atmosfery, które potencjalnie mogą wpływać na redystrybucję ozonu w skali globalnej, parametryzowano, stosując standardowe (takie jak w pracy Weber i in. 2018) zmienne wyjaśniające: 11-letnią aktywność słoneczną (gęstość energii dla fali o długości 10,7 cm), indeks quasi-dwuletnich oscylacji prędkości wiatru w równikowej stratosferze (Quasi Biennial Oscillations – QBO), indeks Oscylacji Południowej (El Nino Southern Oscillations – ENSO), indeks Oscylacji Arktycznej, grubość optyczną aerozolu w stratosferze dla fali 550 nm oraz intensywność cyrkulacji Brewera-Dobsona parametryzowaną przez strumień ciepła w stratosferze w kierunku bieguna północnego.

Współczynnik determinacji (tradycyjnie oznaczany jako $R^2$) określa miarę dopasowania modelu do danych obserwacyjnych. Wartość $R^2$ jest częścią całkowitej wariancji obserwowanej serii czasowej, która została wyjaśniona przez model. W tabeli 1 przedsta-

Tabela 1. Procent wariancji obserwowanej serii czasowej całkowitej zawartości ozonu wyjaśniony przez model regresji (z połączonymi lub rozłącznymi liniowymi segmentami) średnich sezonowych (zima XII-I-II, wiosna III-IV-V, lato VI-VII-VIII, jesień IX-X-XI) i średnich rocznych (I-XII) dla wybranych obszarów na półkuli północnej w okresie 1979-2018; Belsk-D. Belsk-S. oznaczają odpowiednio wyniki uzyskane z obserwacji spektrofotometrem Dobsona w Belsku i z danych satelitarnych z pixela zawierającego Belsk

Table 1. Percentage of the variance of the observed time series of the total column ozone that is explained by the regression model for the seasonal means assuming joint or disjoined segments of the trend line (winter XII-I-II, spring III-IV-V, summer VI-VII-VIII, autumn IX-X-XI) and for the yearly means (I-XII) in selected the Northern Hemisphere regions for the period 1979-2018; Belsk-D and Belsk-S denote the results obtained from the observations by the Dobson spectrophotometer and the satellite data taken from the pixel containing Belsk, respectively

| Region | Sezon | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Zima | Wiosna | Lato | Jesień | Rok |
| Trend - segmenty połączone | | | | | |
| Belsk-D. | 58 | 79 | 76 | 43 | 76 |
| Belsk-S. | 73 | 78 | 76 | 45 | 75 |
| Polska | 74 | 80 | 76 | 45 | 75 |
| Europa Środkowa | 76 | 81 | 74 | 46 | 75 |
| Europa | 76 | 80 | 71 | 54 | 73 |
| 30ºN-60ºN | 83 | 85 | 67 | 71 | 79 |
| 60ºN-90ºN | - | 77 | 62 | 44 | - |
| 00ºN-30ºN | 77 | 78 | 69 | 62 | 70 |
| Trend - segmenty rozłączne | | | | | |
| Belsk-D. | 61 | 80 | 79 | 49 | 79 |
| Belsk-S. | 74 | 80 | 77 | 47 | 75 |
| Polska | 74 | 81 | 78 | 48 | 75 |
| Europa Środkowa | 77 | 83 | 76 | 50 | 76 |
| Europa | 78 | 83 | 73 | 57 | 74 |
| 30ºN-60ºN | 84 | 85 | 69 | 75 | 80 |
| 60ºN-90ºN | - | 77 | 64 | 51 | - |
| 00ºN-30ºN | 78 | 79 | 70 | 65 | 72 |

wiono wartości $R^2 \cdot 100\%$ w analizowanych strefach na półkuli północnej dla sezonowych i rocznej serii czasowej $CZO_3$. Najlepsze dopasowanie modelu do obserwacji znaleziono w sezonie wiosennym ($R^2 \sim 0.8$), a najsłabsze w sezonie jesiennym nad Polską ($R^2 \sim 0.4$). Model dla całorocznych danych $CZO_3$ wyjaśnia 70-80% zmienności obserwowanych serii czasowych.

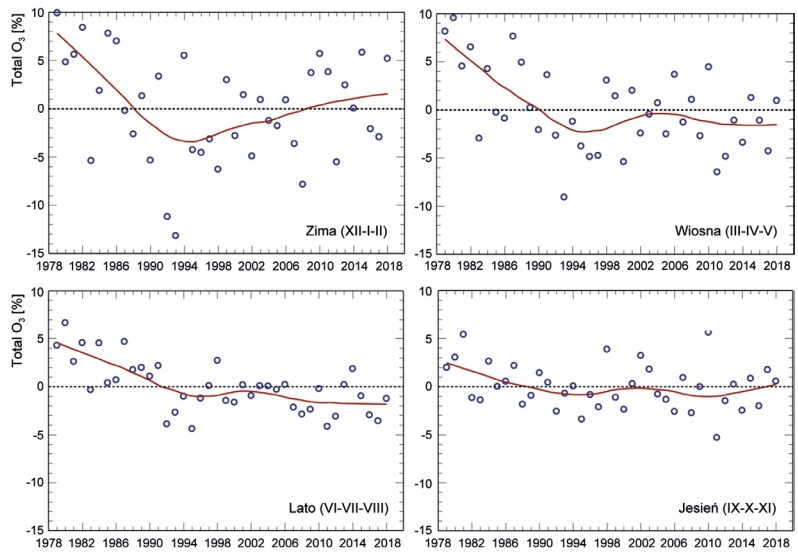
W szacowaniu niepewności trendu uwzględniono zmniejszenie liczby stopni swobody modelu regresyjnego ze względu na istnienie autokorelacji rzędu pierwszego w serii czasowej wartości resztkowych modelu. Niepewność oszacowań statystycznych wyznaczono, stosując metodę bootstrap, czyli wyznaczono medianę i 95% przedział ufności

szacowanych wielkości z zespołu wielkości pochodzących z wielokrotnego (10000 razy) zastosowania modelu regresji do syntetycznych serii czasowych $CZO_3$, w których losowo zmieniano część reprezentującą przypadkowy szum.

## Wyniki – trendy całkowitej zawartości ozonu na półkuli północnej

Rysunek 5 przedstawia odchyłki średnich sezonowych $CZO_3$ nad terytorium Polski (osobno w okresie zimy, wiosny, lata i jesieni) od wieloletniej (1979-2017) średniej jako procent tej średniej. Średnią wyznaczono z wartości $CZO_3$ z danych *MSR-2* dla węzłów siatki obejmujących obszar Polski i część krajów sąsiednich. Odpowiadające sezonowe trendy $CZO_3$ w Polsce, które wyznaczono, stosując model z połączonymi i rozłącznymi segmentami trendu antropogenicznego, są przedstawione na rysunku 6. Przebiegi trendów w sezonie wiosennym wskazują, że kierunki zmian $CZO_3$ wyznaczone dwoma metodami mogą być odmienne. Wartości trendów, także w innych obszarach na półkuli południowej, przedstawiono w tabeli 2 (trendy sezonowe) i tabeli 3 (trend całoroczny).

Od końca lat 90. XX wieku zawartość w stratosferze substancji niszczących warstwę ozonową zaczyna stopniowo zmniejszać się i w konsekwencji od tego momentu oczekuje się pojawienia dodatniego trendu $CZO_3$ po okresie spadkowej tendencji, którą obserwo-



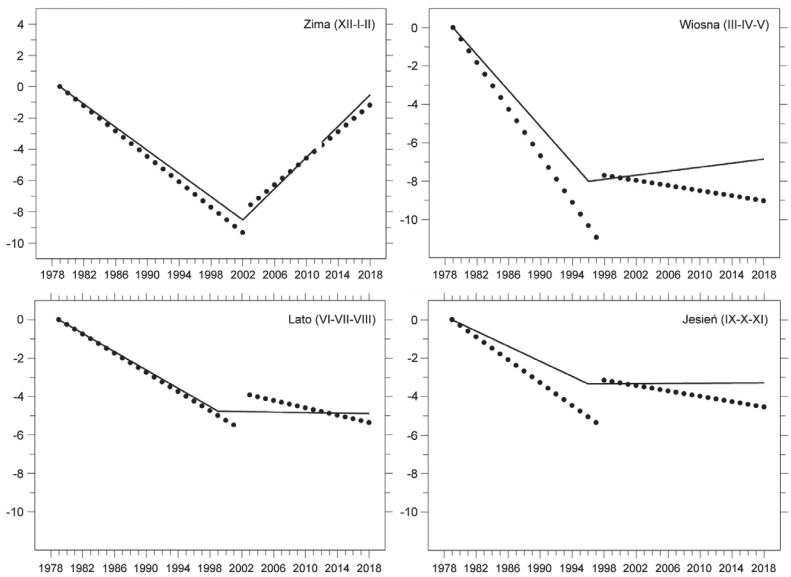

Rys. 5. Względne odchyłki średnich sezonowych całkowitej zawartości ozonu (kółka) nad Polską w okresie 1979-2018 na podstawie danych satelitarnych MSR-2; czerwona krzywa reprezentuje dane wygładzone metodą LOWES

Fig. 5. Relative deviations of the seasonal means of the total column ozone (circles) over Poland in the period 1979-2018 based on MSR-2 satellite data; the red curve represents data smoothed by the LOWES method

wano w latach 80. i pierwszej połowie lat 90. ubiegłego wieku. Wtedy najmniejsze ubytki ozonu (~1% na 10 lat) zanotowano w tropikach (0°N-30°N) i w jesieni w pozostałych rejonach (~2-3% na 10 lat). Natomiast największe ubytki ozonu, ~4-5% na 10 lat, miały miejsce w strefie pozarównikowej na wiosnę. Trendy wyznaczone dla Belska okazały się reprezentatywne dla Polski i Europy Środkowej i poza sezonem jesiennym były ok. 1-2 punkty procentowe mniejsze (tj. większe co do wartości bezwzględnej) od odpowiadających sezonowych trendów w średnich szerokościach geograficznych (tab. 2).

W danych całorocznych $CZO_3$ największe ubytki, 4-5% na 10 lat, wystąpiły w Polsce i były one prawie dwa razy większe niż w strefie średnich szerokości geograficznych. Najmniejszy ubytek $CZO_3$ (~0,5% na 10 lat) stwierdzono w tropikach (tab. 3). Zbliżone tempo regeneracji warstwy ozonowej (1-2% na 10 lat) znaleziono po 1996 r. we wszystkich obszarach, stosując model z połączonymi segmentami trendu. Natomiast wyniki uzyskane przy założeniu nieciągłości trendu (rozłączne segmenty trendu) były o ~0,5-1% mniejsze, ale istotnie statystyczne tylko w tropikach.

Odbudowę warstwy ozonowej na półkuli północnej wyraźnie widać w sezonie zimowym (tab. 2). W ostatnim okresie istotne statystycznie wzrostowe trendy wyznaczone z zastosowaniem obu modeli znaleziono w sezonie zimowym we wszystkich analizowanych obszarach. Największe wzrosty, ~4-5% na 10 lat, zanotowano w Polsce i Europie Środkowej, a znacznie mniejsze w średnich szerokościach geograficznych




Rys. 6. Sezonowe trendy całkowitej zawartości ozonu nad Polską w okresie 1979-2018 na podstawie danych satelitarnych MSR-2 w przypadku linii trendu złożonej modelu z segmentów połączonych (linia prosta) i rozłącznych (linia kropkowana)

Fig. 6. Seasonal trend of the total column ozone over Poland in the period 1979-2018 based on MSR-2 satellite data in the case of joint (full line) and disjoint (dotted line) trend segments

Tabela 2. Trendy w średnich sezonowych całkowitej zawartości ozonu (% na 10 lat) w wybranych obszarach na półkuli północnej na podstawie modelu z połączonymi i rozłączonymi liniowymi segmentami; wyniki istotne statystycznie zaznaczono pogrubiona czcionką; w nawiasach przedstawiono przedziały 5. i 95. percentyla dla szacowanych wartości trendu; Belsk-D, Belsk-S oznaczają odpowiednio wyniki uzyskane z obserwacji spektrofotometrem Dobsona w Belsku i z danych satelitarnych z pixela zawierającego Belsk

Table 2. Trend in the seasonal means of the total column ozone (% per 10 yr.) in selected the Northern Hemisphere regions based on the trend models with joint and disjoint lines; the 9$^{th}$-95$^{th}$ percentile ranges are in the parentheses; Belsk-D and Belsk-S denote the results obtained from the observations by the Dobson spectrophotometer and the satellite data taken from the pixel containing Belsk, respectively

| Region | Trend (%/10 lat) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 1979-1996/2001 | | 1997/2002-2018 | |
| | Segmenty połączone | Segmenty rozłączne | Segmenty połączone | Segmenty rozłączne |
| Zima (XII-I-II) | | | | |
| Belsk-D. | **–4.7** (–7.6, –2.3) | –2.2 (–6.4, 1.5) | **2.7** (0.6, 5.3) | **4.1** ( 0.2, 6.9) |
| Belsk-S. | **–4.1** (–6.2, –2.6) | **–3.9** (–7.0, –1.4) | **4.5** (2.4, 6.7) | **4.3** (1.4, 7.1) |
| Polska | **–4.1** (–6.2, –2.6) | **–3.9** (–6.9, –1.4) | **4.6** (2.4, 6.7) | **4.3** (1.5, 7.0) |
| Europa Środkowa | **–4.1** (–6.2, –2.6) | **–4.2** (–6.8, –1.8) | **4.3** (2.4, 6.4) | **3.7** (1.2, 6.3) |
| Europa | **–3.6** (–5.4, –2.4) | **–3.7** (–5.8, –1.9) | **3.2** (1.8, 4.8) | **2.7** (0.8, 4.7 |
| 30ºN-60ºN | **–3.1** (–4.2, –2.0) | **–2.6** (–3.9, –1.5) | **1.8** (1.1, 2.8) | **1.6** (0.4, 3.0) |
| 60ºN-90ºN | Brak danych | Brak danych | Brak danych | Brak danych |
| 00ºN-30ºN | **–0.8** (–1.4, –0.3) | **–1.3** (–2.1, –0.4) | **0.8** (0.4, 1.3) | 0.3 (–0.2, 1.0) |
| Wiosna (III-IV-V) | | | | |
| Belsk-D. | **–5.9** (–7.6, –4.2) | **–5.7** (–7.5, –4.3) | **1.4** (0.3, 2.9) | 0.0 (–1.6, 1.9) |
| Belsk-S. | **–4.2** (–5.8, –2.7) | **–5.9** (–8.0, –3.6) | 0.6 (–0.4, 2.0) | –1.0 (–2.5, 0.4) |
| Polska | **–4.4** (–5.9, –2.9) | **–6.1** (–8.0, –3.8) | 0.8 (–0.2, 2.1) | –0.8 (–2.2, 0.6) |
| Europa Środkowa | **–4.2** (–5.7, –2.8) | **–5.8** (–7.6, –3.7) | 0.8 (–0.1, 2.0) | –0.7 (–2.0, 0.6) |
| Europa | **–3.6** (–4.8, –2.3) | **–5.2** (–6.6, –3.5) | **1.2** (0.4, 2.3) | –0.2 (–1.3, 0.8) |
| 30ºN-60ºN | **–3.0** (–4.0, –2.0) | **–3.9** (–5.1, –2.4) | **1.2** (0.6, 2.1) | 0.5 (–0.3, 1.3) |
| 60ºN-90ºN | **–4.8** (–7.0, –2.8) | **–6.1** (–8.8, –3.2) | **3.6** (2.2, 5.6) | **2.2** (0.3, 4.5) |
| 00ºN-30ºN | –0.3 (–0.8, 0.1) | –0.6 (–1.3, 0.1) | **0.7** (0.3, 1.1) | 0.3 (–0.1, 1.0) |
| Lato (VI-VII-VIII) | | | | |
| Belsk-D. | **–3.9** (–5.1, –3.0) | **–4.2** (–5.3, –3.1) | 0.8 (–0.1, 2.0) | –0.3 (–1.6, 1.1) |
| Belsk-S. | **–2.6** (–3.6, –1.8) | **–2.7** (–3.9, –1.4) | –0.3 (–1.0, 0.6) | –1.1 (–2.5, 0.6) |
| Polska | **–2.4** (–3.4, –1.7) | **–2.6** (–3.8, –1.3) | –0.1 (–0.8, 0.9) | –0.9 (–2.2, 0.8) |
| Europa Środkowa | **–2.4** (–3.4, –1.6) | **–2.5** (–3.6, –1.3) | –0.0 (–0.8, 0.9) | –1.0 (–2.3, 0.6) |
| Europa | **–1.7** (–2.5, –1.0) | **–1.9** (–3.0, –0.9) | 0.5 (–0.1, 1.2) | –0.3 (–1.2, 0.9) |
| 30ºN-60ºN | **–1.5** (–2.3, –0.8) | **–1.6** (–2.5, –0.7) | 0.1 (–0.7, 1.4) | –0.1 (–1.0, 1.0) |
| 60ºN-90ºN | **–1.4** (–2.3, –0.6) | **–2.5** (–3.9, –0.9) | 0.4 (–0.4, 1.2) | –0.7 (–1.7, 0.6) |
| 00ºN-30ºN | –0.3 (–0.9, 0.2) | -0.3 (–1.1, 0.6) | **1.1** (0.7, 1.7) | **0.9** (0.1, 1.9) |

| Region | Trend (%/10 lat) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 1979-1996/2001 | | 1997/2002-2018 | |
| | Segmenty połączone | Segmenty rozłączne | Segmenty połączone | Segmenty rozłączne |
| Jesień (IX-X-XI) | | | | |
| Belsk-D. | **–2.7** (–4.2, –1.4) | **–3.7** (–5.5, –1.9) | 0.8 (–0.5, 2.2) | –0.8 (–2.6, 1.1) |
| Belsk-S. | **–1.7** (–3.0, –0.6) | **–2.7** (–4.6, –0.9) | 0.1 (–1.0, 1.2) | –1.1 (–2.3, 0.5) |
| Polska | **–1.8** (–3.0, –0.7) | **–2.9** (–4.7, –1.1) | 0.2 (–0.8, 1.3) | –0.9 (–2.1, 0.5) |
| Europa Środkowa | **–1.4** (–2.5, –0.4) | **–2.5** (–4.1, –0.8) | 0.0 (–0.9, 1.0) | –1.0 (–2.1, 0.3) |
| Europa | **–1.5** (–2.3, –0.8) | **–2.3** (–3.3, –1.2) | 0.2 (–0.3, 0.9) | –0.5 (–1.2, 0.2) |
| 30°N-60°N | **–1.6** (–2.2, –1.0) | **–2.3** (–3.0, –1.5) | 0.4 (0.0, 0.9) | –0.1 (–0.6, 0.3) |
| 60°N-90°N | **–1.1** (–2.3, –0.0) | **–2.8** (–4.5, –1.0) | –0.6 (–1.8, 0.4) | **–2.0** (–3.0, –0.9) |
| 00°N-30°N | –0.4 (–0.9, 0.1) | 0.2 (–0.5, 0.9) | **0.8** (0.3, 2.1) | **1.2** (0.5, 1.9) |

Tabela 3. Trendy w średnich rocznych całkowitej zawartości ozonu (% na 10 lat) w różnych obszarach na półkuli północnej wyznaczone z modeli regresji z połączonymi lub rozłączonymi liniowymi segmentami; oznaczenia takie jak w tabeli 2

Table 3. Trends in the yearly means of the total column ozone (% per 10 yr.) in selected the Northern Hemisphere regions based on the trend models with joint or disjoint lines; same descriptions as in Table 2

| Region | Trend (%/10 lat) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 1979-1996/2001 | | 1997/2002-2018 | |
| | Segmenty połączone | Segmenty rozłączne | Segmenty połączone | Segmenty rozłączne |
| Rok (I-XII) | | | | |
| Belsk-D. | **–5.3** (–6.8, –3.9) | **–5.1** (–6.4, –4.0) | **1.9** (1.0, 3.2) | 0.9 (–0.4, 2.2) |
| Belsk-S. | **–4.1** (–5.4, –2.7) | **–4.5** (–6.2, –2.8) | **1.3** (0.4, 2.4) | 0.5 (–0.7, 2.0) |
| Polska | **–4.1** (–5.4, –2.7) | **–4.5** (–6.1, –2.8) | **1.4** (0.6, 2.5) | 0.7 (–0.5, 2.1) |
| Europa Środkowa | **–3.8** (–5.1, –2.5) | **–3.4** (–5.0, –2.3) | **1.4** (0.6, 2.5) | 0.5 (–0.8, 2.0) |
| Europa | **–3.2** (–4.3, –2.1) | **–2.8** (–4.2, –1.9) | **1.5** (0.8, 2.4) | 0.6 (–0.5, 1.9) |
| 30°N-60°N | **–2.5** (–3.4, –1.6) | **–2.2** (–3.3, –1.5) | **1.3** (0.8, 2.1) | 0.5 (–0.4, 1.4) |
| 00°N-30°N | **–0.7** (–1.2, –0.2) | **–0.6** (–1.2, –0.2) | **1.0** (0.7, 1.4) | **0.5** (0.0, 1.1) |

(~2%) i w tropikach (~1%). Wzrostowe trendy (~1% na 10 lat) wyznaczono w obszarach tropikalnych także w pozostałych sezonach. Model z połączonymi segmentami trendu pokazuje dodatnie trendy (~1% na 10 lat) w sezonie wiosennym w danych ze spektrofotometru Dobsona, także w Europie i w średnich szerokościach geograficznych. Natomiast w wysokich szerokościach geograficznych wiosenny trend jest najwyższy (~2-3% na 10 lat). Model z rozłącznymi odcinkami trendu wskazuje na istotny dodatni trend w tym sezonie tylko w wysokich szerokościach geograficznych. Kontynuację ubytków ozonu o 2% na 10 lat po 1995 stwierdzono tylko w strefie 60°N-90°N w okresie jesiennym.

## Dyskusja i podsumowanie

Obecnie poziom zanieczyszczenia atmosfery substancjami niszczącymi warstwę ozonową jest nadal wysoki (rys. 1) i nie wydaje się prawdopodobne, aby stosunkowe niewielkie zmniejszenie tej koncentracji w XXI w. doprowadziło do znaczącej naprawy warstwy ozonowej. W tym opracowaniu istotnie statystycznie dodatnie całoroczne trendy (rzędu 0.5-1% na 10 lat), które pojawiły się jednocześnie w dwóch trendowych modelach (tj. z rozłączonymi i połączonymi liniami trendu), znaleziono tylko w obszarze 0-30°N. Prawdopodobnie istnieją więc mechanizmy powodujące osłabienie lub wzmocnienie (w porze zimowej poza tropikami) tempa odbudowy warstwy ozonowej.

Szybszą regenerację warstwy ozonowej stwierdzono w zimie w Polsce i Europie Środkowej niż w pasie średnich szerokości geograficznych (30°N-60°N). W prezentowanym modelu regresyjnym uwzględniono tylko liniowe zależności między zmiennymi wyjaśniającymi i $CZO_3$. Wydaje się, że nieliniowe oddziaływanie między procesami dynamicznymi wpływającymi na ozon może być źródłem przestrzennego zróżnicowania trendów. Diallo i in. (2018) stwierdzili, że w sezonie zimowym fazy QBO i ENSO modulują intensywność transportu ozonu w stratosferze w komórce cyrkulacyjnej Brewera-Dobsona. ENSO kreuje strefowe asymetrie w zjawiskach transportu w atmosferze (ze względu na to, że obszarem źródłowym ENSO jest równikowy Pacyfik), w przeciwieństwie do QBO występującym równomiernie nad całym pasem równikowej stratosfery (Konopka i in. 2016). Poza sezonem zimowym odbudowa warstwy ozonowej jest widoczna w niektórych sezonach nad wybranymi obszarami poza tropikami (np. w Arktyce na wiosnę). Długookresowe zmiany $CZO_3$ wyznaczone z pomiarów naziemnych i satelitarnych w Belsku są zgodne w zakresie błędów oszacowań trendów. Trendy $CZO_3$ w Belsku są reprezentatywne dla Polski i środkowej Europy.

Modele klimatyczne długookresowych zmian w warstwie ozonowej uwzględniające współdziałanie procesów dynamicznych i chemicznych w atmosferze w sytuacji wzrostu koncentracji gazów cieplarnianych w atmosferze (w tym $CO_2$) wskazują, że zmiany ozonu w XX w. w średnich szerokościach geograficznych były przede wszystkim związane ze zmianą koncentracji substancji niszczących warstwę ozonową (WMO 2014). Steinbrecht i inni (2017) wyznaczyli znaczne zróżnicowanie trendu w pionowym rozkładzie ozonu w okresie 2000-2016 na podstawie danych satelitarnych. Między innymi stwierdzono ubytek ozonu w dolnej stratosferze w obszarze 30°N-60°N i wysokiej stratosferze (powyżej 50 km) na całym globie. Regenerację warstwy ozonowej najwyraźniej widać w dolnej stratosferze w strefie 60°S-90°S.

Krzyścin i Baranowski (2019) stosując statystyczny model, w którym antropogeniczny trend był przedstawiony jako krzywa złożona z trzech prostych, uzyskali całoroczny trend 2-4% na 10 lat po 1995 r. na całym globie i w połączonej strefie średnich i wysokich szerokości geograficznych na półkuli północnej i południowej. Tak wyraźna regeneracja warstwy ozonowej w skali globalnej była konsekwencją zmian $CZO_3$ na półkuli południowej, a zwłaszcza nad Antarktydą. Jednak w skali lokalnej zidentyfikowano liczne obszary, przeważnie na półkuli północnej, gdzie trend był nieistotny statystycznie po 1995 roku.

W ostatnich kilkunastu latach stwierdzono zaskakujące osłabienie tempa naprawy warstwy ozonowej na wiosnę w Europie Środkowej, w tym i nad Polską (Krzyścin, Rajewska-Więch 2016). Powrót do tendencji spadkowej obserwuje się po 1998 r. w serii czasowej uśrednionej zawartości ozonu w dolnej stratosferze w strefie średnich szerokościach geograficznych (60°S-60°N) (Ball i in. 2018). Chipperfield i in. (2018) stwierdzili, że trendy w tym obszarze nie są jeszcze ustabilizowane i zależą od specyfiki procesów dynamicznych, tak że dołączenie kolejnych lat obserwacji może istotnie zmienić kierunek trendu.

Mieszanie w stratosferze powietrza równikowego z natury ubogiego w ozon z powietrzem w średnich szerokościach geograficznych stanowi mechanizm różnicujący tempo naprawy warstwy ozonowej w wybranych rejonach na kuli ziemskiej (Ball i in. 2020). Stwierdzony wzrost koncentracji ozonu przyziemnego w strefie tropików sprzyja większej emisji jodu z powierzchni oceanu, przyczyniając się do zmniejszenia zawartości ozonu w dolnej stratosferze nad równikiem, a następnie w strefie średnich szerokości geograficznych (Koenig i in. 2020). Potencjał niszczenia ozonu przez jod jest porównywalny z chlorem i bromem uwalniającym się z antropogenicznych gazów przenikających do stratosfery (Koenig i in. 2020), a których stosowanie zostało zabronione przez Protokół Montrealski z 1987 roku.

Procesy chemiczne decydują o zmienności ilości ozonu w wysokich warstwach atmosfery, więc wzrostowy trend w tych warstwach byłby potwierdzeniem skuteczności funkcjonowania Protokołu Montrealskiego i jego późniejszych poprawek. Dodatkowo ochłodzenie górnej stratosfery (w wyniku efektu cieplarnianego powodującego mniejszy dopływ promieniowania długofalowego z troposfery do stratosfery) powinno indukować jeszcze mocniejszy wzrostowy trend w wysokiej stratosferze, gdyż destrukcja ozonu w wyniku reakcji $O+O_3 \rightarrow 2O_2$ jest mniejsza w niższej temperaturze (Haigh, Pyle 1982). Obserwacje satelitarne wskazują jednak na słabe (~1-1,5% na 10 lat) trendy w okresie 2000-2016 w wysokiej stratosferze (30-40 km) nad równoleżnikiem 50°N (Steinbrecht i in. 2017). Stabilizacja poziomu ozonu w wysokiej stratosferze nad Belskiem obserwowana jest od ok. 2005 r. (rys. 4c), co może sugerować pojawienie się w tej warstwie atmosfery substancji chemicznych niszczących warstwę ozonową.

Ostatnie prace sugerują, że tempo regeneracji warstwy ozonowej mogło ulec osłabieniu w wyniku pojawienia się niekontrolowanej emisji chlorofluorowęglowodorów (skrót z ang. *CFC*) z obszaru Chin, których stosowanie zostało zabronione przez Protokół Montrealski (Montzka i in. 2018; Dhomse i in. 2019). *CFC* przenikają do atmosfery także ze źle składowanych i utylizowanych urządzeń (lodówki, klimatyzatory, gaśnice), które wyprodukowano w latach 80. i 90. ubiegłego wieku (Lickley i in. 2020).

Zwykle ze zmianami w warstwie ozonowej wiążą się zmiany w dopływie promieniowania UV do powierzchni Ziemi. Obecnie na półkuli północnej nie ma zagrożenia nadmiernym promieniowaniem UV w wyniku zmian w warstwie ozonowej. Skala długookresowych zmian ozonu w okresie 1979-2018 była stosunkowa niewielka w porównaniu ze zmianami nad Antarktydą i związany z tym kilkuprocentowy wzrost intensywności promieniowania UV w stosunku do poziomu z początku lat 80. ubiegłego wieku nie stanowi zagrożenia dla środowiska i zdrowia ludzi. Sporadycznie (kilka razy w roku)

pojawiają się co najwyżej kilkudniowe okresy z obniżoną zawartością ozonu związane z występowaniem tzw. mini-dziur ozonowych (Krzyścin 2002), kiedy poziom $CZO_3$ jest co najmniej o 20% niższy niż norma (np. zimą w 2018 r., rys. 2). Mini-dziury ozonowe występują w chłodnej połowie roku (listopad-marzec), kiedy natężenie promieniowania UV jest z natury małe i ewentualny jego wzrost w wyniku ubytku ozonu nie stanowi poważnego zagrożenia zdrowotnego.

## Podziękowania

Praca była częściowo finansowana w ramach działalności statutowej No 3841/E-41/S/2019 Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego Rzeczpospolitej Polskiej oraz Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, zamówienie No 6/2017/F.

## L i t e r a t u r a

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., Rozanov E.V., 2018, Evidence for a continuous decline in lower stratospheric ozone offsetting ozone layer recovery, Atmospheric Chemistry and Physics, 18, 1379-1394, DOI: 10.5194/acp-18-1379-2018

Ball W.T., Chiodo G., Abalos M., Alsing J., 2020, Inconsistencies between chemistry climate model and observed lower stratospheric trends since 1998, Atmospheric Chemistry and Physics, DOI: 10.5194/acp-2019-734

Chipperfield M.P., Dhomse S., Hossaini R., Feng W., Santee M.L., Weber M., Burrows J.P., Wild J.D., Loyola D., Coldewey-Egbers M., 2018, On the cause of recent variations in lower stratospheric ozone, Geophysical Research Letters, 45, 5718-5726, DOI: 10.1029/2018GL078071

Chubachi S., 1984, Preliminary result of ozone observations at Syowa Station from February, 1982 to January, 1983, Memoirs of National Institute of Polar Research. Special Issue, 34, 13-20

Crutzen P.J., 1970, The influence of nitrogen oxides on the atmospheric ozone content, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 96 (408), 320-325, DOI: 10.1002/qj.49709640815

Degórska M., Rajewska□Więch B., Krzyścin J., 1995, Reduction of variance of total ozone and Umkehr profiles after re□evaluation of the Belsk records, Publications of the Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences, D□42 (269), 91-101

Diallo M., Riese M., Birner T., Konopka P., Müller R., Hegglin M.I., Santee M.L., Baldwin M., Legras B., Ploeger F., 2018, Response of stratospheric vapour and ozone to the unusual timing of El Niño and the QBO disruption in 2015-2016, Atmospheric Chemistry and Physics, 18 (17), 13055-13073, DOI: 10.5194/acp-18-13055-2018

Dhomse S.S., Feng W., Montzka S.A., Hossaini R., Keeble J., Pyle J.A., Daniel J.S., Chipperfield M.P., 2019, Delay in recovery of the Antarctic ozone hole from unexpected CFC-11 emissions, Nature Communications, 10, 5781, DOI: 10.1038/s41467-019-13717-x

Farman J.C., Gardiner B.G., Shanklin J.D., 1985, Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClOx/NOx interaction, Nature, 315 (6016), 207-210, DOI: 10.1038/315207a0

Haigh J.D., Pyle J.A., 1982, Ozone perturbation experiments in a two-dimensional circulation model, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 108 (457), 551-574, DOI: 10.1002/qj.49710845705

Harris N.R.P., Kyrö E., Staehelin J., Brunner D., Andersen S.-B., Godin-Beekmann S., Dhomse S., Hadjinicolaou P., Hansen G., Isaksen, I., Jrrar A., Karpetchko A., Kivi R., Knudsen B., Krizan P., Lastovicka J., Maeder J., Orsolini Y., Pyle J.A., Rex M., Vanicek K., Weber M., Wohltmann I., Zanis P., Zerefos, C., 2008, Ozone trends at northern mid- and high latitudes – a European perspective, Annales Geophysicae, 26 (5), 1207-1220, DOI: 10.5194/angeo-26-1207-2008

Koenig T.K., Baidar S., Campuzano-Jost P., Cuevas C.A., Dix B., Fernandez R.P., Guo H., Hall S.R., Kinnison D., Nault B.A., Ullmann K., Jimenez J.L., Saiz-Lopez A., Volkamer R., 2020, Quantitative detection of iodine in the stratosphere, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 117 (4), 1860-1866, DOI: 10.1073/pnas/.1916828117

Konopka P., Ploeger F., Tao M., Riese M., 2016, Zonally resolved impact of ENSO on the stratospheric circulation and water vapor entry values, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 121 (19), 11486-11501, DOI: 10.1002/2015JD024698

Krzyścin J.W., 2002, Long-term changes in ozone mini-hole event frequency over the northern hemisphere derived from ground-based measurements, International Journal of Climatology, 22, 1425-1439, DOI: 10.1002/joc.812

Krzyścin J.W., 2012, Onset of the total ozone increase based on statistical analyses of global ground-based data for the period 1964-2008, International Journal of Climatology, 32 (2), 240-246, DOI: 10.1002/joc.2264

Krzyścin J.W., 2020, Is the Antarctic ozone hole recovering faster than changing the stratospheric halogen loading, Journal of the Meteorological Society of Japan, 98 (5), DOI: 10.2151/jmsj.2020-055

Krzyścin J.W., Baranowski D.B., 2019, Signs of the ozone recovery based on multi sensor reanalysis of total ozone for the period 1977-2017, Atmospheric Environment, 199, 334-344, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2018.11.050

Krzyścin J.W., Borkowski J., Głowacka A., Jarosławski J., Podgórski J., Pietruczuk A., Rajewska-Więch B., Sawicka, A., Sobolewski, P., Wink J., Zawisza W., 2014, Half century of the ozone observation at the Central geophysical Laboratory, IGF, PAS, Belsk, Poland, [w:] Achievements, History and Challenges in Geophysics, R. Bialik, M. Majdański, M. Moskalik (red.), GeoPlanet: Earth and Planetary Sciences, Springer, Cham, Switzerland, 85-107, DOI: 10.1007/978-3-319-07599-0_5

Krzyścin J.W., Jarosławski J., Rajewska-Więch, B., Sobolewski P.S., Froidevaux L., 2008, Comparison of ozone profiles by the Umkehr measurements taken at Belsk (52°N, 21°E) with the Aura Microwave Limb Sounder overpasses: 2004-2006, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 113, D15S09, DOI: 10.1029/2007JD008586

Krzyścin J.W., Rajewska-Więch B., 2016, Specific variability of total ozone over Central Europe in the period 1979-2014, International Journal of Climatology, 36(10), 3539-3549, DOI: 10.1002/joc.4574

Kuttippurath J., Kumar P., Nair, P.J., Pandey, P.C, 2018, Emergence of ozone recovery evidenced by reduction in the occurrence of Antarctic ozone loss saturation, npj Climate and Atmospheric Science, 1 **(**42), DOI: 10.1038/s41612-018-0052-6

Lickley M., Solomon S., Fletcher S., Velders G.J.M., Daniel J., Rigby M., Montzka S.A., Kuijpers L.J.M., Stone K., 2020, Quantifying contributions of chlorofluorocarbon banks to emissions and impacts on the ozone layer and climate, Nature Communications, 11, 1380, DOI: 10.1038/s41467-020-15162-7

Molina M.J., Rowland F.S., 1974, Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: Chlorine atom catalyzed destruction of ozone, Nature, 249 (5460), 810-812, DOI: 10.1038/249810a0

Montzka S.A., Dutton G.S., Yu P., Ray E., Portmann R.W., Daniel J.S., Kuijpers L., Hall B.D., Mondeel D., Siso C., Nance J.D., Rigby M., Manning A.J., Hu L., Moore F., Miller B.R., Elkins J.W., 2018, An unexpected and persistent increase in global emissions of ozone-depleting CFC-11, Nature, 557, 413-417, DOI: 10.1038/s41586-018-0106-2

Petropavlovskikh I., Bhartia P.K., DeLuisi J., 2005, New Umkehr ozone profile retrieval algorithm optimized for climatological studies, Geophysical Research Letters, 32 (16), L16808, DOI: 10.1029/2005GL023323

Petropavlovskikh I., Godin-Beekmann S., Hubert D., Damadeo R., Hassler B., Sofieva V., 2019, SPARC/IO3C/GAW report on long-term ozone trends and uncertainties in the stratosphere, SPARC/IO3C/GAW, SPARC Report No. 9, WCRP-17/2018, GAW Report No. 241, DOI: 10.17874/f899e57a20b

Reinsel G.C., Miller A.J., Weatherhead E.C., Flynn L.E., Nagatani R.M., Tiao G.C., Wuebbles D.J., 2005, Trend analysis of total ozone data for turnaround and dynamical contributions, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 110 (D16), DOI: 10.1029/2004JD004662

Solomon S., Ivy D.J., Kinnison D., Mills M.J., Neely R.R., Schmidt A., 2016, Emergence of healing in the Antarctic ozone layer, Science, 353 (6296), 269-274, DOI: 10.1126/science.aae0061

Steinbrecht W., Froidevaux L., Fuller R., Wang R., Anderson J., Roth C., Bourassa A., Degenstein D., Damadeo R., Zawodny J., Frith S., McPeters R., Bhartia P., Wild J., Long C., Davis, S., Rosenlof, K., Sofieva, V., Walker, K., Rahpoe, N., Rozanov, A., Weber, M., Laeng, A., von Clarmann T., Stiller G., Kramarova N., Godin-Beekmann S., Leblanc T., Querel R., Swart D., Boyd I., Hocke K., Kampfer N., Maillard Barras E., Moreira L., Nedoluha G., Vigouroux C., Blumenstock T., Schneider M., Garcıa O., Jones N., Mahieu E., Smale D., Kotkamp M., Robinson J., Petropavlovskikh I., Harris N., Hassler B., Hubert D., Tummon F., 2017, An update on ozone profile trends for the period 2000 to 2016, Atmospheric Chemistry and Physics, 17 (17), 10675-10690, DOI: 10.5194/acp-17-10675-1185-2017

van der A R.J., Allaart M.A.F., Eskes H.J., 2015, Extended and refined multi sensor reanalysis of total ozone for the period 1970-2012, Atmospheric Measurement Techniques, 8 (7), 3021-3035, DOI: 10.5194/amt-8-3021-2015

Weber M., Coldewey-Egbers M., Fioletov V.E., Frith S.M., Wild J.D., Burrows J.P., Long C.S., Loyola D., 2018, Total ozone trends from 1979 to 2016 derived from five merged observational datasets–the emergence into ozone recovery, Atmospheric Chemistry and Physics, 18 (3), 2097-2117, DOI: 10.5194/acp-18-2097-2018

WMO, 2014, Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2014, World Meteorological Organization, Global Ozone Research and Monitoring Project-Report No. 55, Geneva, Switzerland, 416 s

## S t r e s z c z e n i e

W pracy analizowano zawartość ozonu w całej kolumnie atmosfery i wybranych warstwach (troposfera/dolna stratosfera, środkowa stratosfera i wysoka stratosfera) zmierzone spektrofotometrem Dobsona w Centralnym Obserwatorium Geofizycznym Instytutu Geofizyki Polskiej Akademii Nauk w Belsku (20,78°E, 51,84°N) w latach 1963-2018. Stwierdzono zatrzymanie spadkowej tendencji w połowie lat 90. ubiegłego wieku, a następnie niewielki wzrost zawartości ozonu. W ostatnich kilkunastu latach w analizowanych warstwach obserwuje się nieoczekiwane beztrendowe oscylacje ozonu w miejsce spodziewanego stopniowego wzrostu w związku ze zmniejszającą się koncentracją w stratosferze substancji niszczących warstwę ozonową w wyniku funkcjonowania Protokołu Montrealskiego z 1987 r. o ochronie warstwy ozonowej.

Wyznaczono długookresowe zmiany w kolumnowej zawartości ozonu nad wybranymi obszarami na półkuli północnej, stosując homogenizowane satelitarne dane ozonowe z bazy danych Multi-Sensor Reanalysis version 2. Przedmiotem analizy były sezonowe i całoroczne średnie w okresie 1979-2018 wyznaczone dla następujących obszarów: otoczenie Belska, Polska, Europa Środkowa, Europa, pas średnich (30-60°N) i wysokich (60-90°N) szerokości geograficznych, oraz tropiki (0°-30°N). Antropogeniczny trend obliczono, stosując model regresji wieloskładnikowej, odfiltrowując z serii czasowych oscylacje związane z naturalnymi procesami dynamicznymi w atmosferze. Do połowy lat 90. ubiegłego wieku dominowały ubytki w warstwie ozonowej w tempie kilku procent na 10 lat (największe wiosną w Polsce i Europie Środkowej ~5% na 10 lat, najmniejsze w tropikach ~0,5% na 10 lat). Naprawę warstwy ozonowej po 1996 roku, w tempie ~4-5% na 10 lat, najwyraźniej widać zimą w Polsce i w Europie Środkowej. Odpowiadające wzrostowe trendy w całej Europie i w średnich szerokościach geograficznych były mniejsze o 1-2 punkty procentowe. W pozostałych sezonach i w danych całorocznych trend był znacznie mniejszy (~1-2% na 10 lat) lub nieistotny statystycznie.


Słowa kluczowe: warstwa ozonowa, trend, odbudowa warstwy ozonowej.


## S u m m a r y

Ground-based measurements of ozone by the Dobson spectrophotometer in the Central Geophysical Observatory of the Institute of Geophysics of the Polish Academy of Sciences at Belsk (20.78°E, 51.84°N) are analysed for the period 1963-2018. Long term variability of the total column ozone and the ozone content in the selected layers (troposphere/lower stratosphere, mid- and upper stratosphere) are discussed focusing on the ozone recovery in recent years. The trend overturning is found around 1996. However, an unexpected trendless pattern of the long-term ozone variability has been found since the beginning of the 2000s instead of the envisaged continuous upward tendency due to the decreasing concentration of the ozone-depleting substances in the stratosphere as a result of the 1987 Montreal Protocol on the protection of the ozone layer.

The long-term variability of the total column ozone over selected areas in the Northern Hemisphere are assessed using homogenized satellite data from the Multi-Sensor Reanalysis version 2 database. The seasonal and the yearly means for the period 1978-2018 are considered for the following regions:

Belsk, Poland, central Europe, Europe, middle latitudes (30°N-60°N), high latitudes (60°N-90°N), and the tropics (0°-30°N). The anthropogenic trend is determined by multiple regression model after filtering out oscillations related to the known dynamic processes in the atmosphere. In all regions, a decline of the total column ozone is found in the 1980s and up to mid-1990s. The largest decline appears in spring in Poland and central Europe (~5% per 10 yr.), and the smallest over the tropics (–0.5% per 10 yr.). After 1996, the recovery is clearly seen (4-5% per 10 yr.) during winter in Poland and in central Europe. These estimates are about 1-2 percentage point higher than the corresponding increasing trends in Europe and in the middle latitudes. In the remaining seasonal and year-round time series, the trends are much smaller (1-2% per 10 yr.) or statistically insignificant.

Key words: ozone layer, trend, ozone recovery.