

Czesława SZWED-ILNICKA, Wiesława PRZEWOŹNICZUK

Katedra Rekultywacji Środowiska Przyrodniczego SGGW

O problemach ubożenia warstwy ozonowej i jej obecnym stanie nad półkulą północną

Wstęp

Głównymi międzynarodowymi problemami środowiskowymi XX wieku są: ubożenie warstwy ozonowej w skali globalnej, efekt cieplarniany i globalne ocieplenie, deforestacja, kwaśny deszcz oraz wielkie katastrofy jądrowe, takie jak na przykład awaria elektrowni jądrowej w Czarnobylu w 1986 roku.

Warstwa ozonowa, to znaczy największa koncentracja ozonu atmosferycznego, znajduje się w stratosferze dolnej, na wysokości 15–30 km n.p.m. Maksimum koncentracji ozonu (około 10 ppm) występuje na wysokości 20–25 km. Warstwa ozonowa stanowi osłonę dla biosfery przed biologicznie aktywnym promieniowaniem słonecznym UV-B (promieniowanie ultrafioletowe w przedziale widma o długościach fali $\lambda = 280 - 320$ nm). Ozon stratosferyczny pochłania większość promieniowania UV-B, tylko mała jego ilość osiąga powierzchnię Ziemi. Intensywność UV-B jest największa w niskich szerokościach geograficznych i na dużych wysokościach nad poziomem morza. Niewielkie ilości UV-B są korzy-

stne dla organizmu ludzkiego, powodują bowiem syntetyzowanie przez skórę ludzką witaminy D. Promieniowanie UV-C, długości fali $\lambda = 200 - 280$ nm jest praktycznie w całości absorbowane w stratosferze przez ozon i tlen, nie dochodzi więc do powierzchni Ziemi.

Ubożenie warstwy ozonowej stanowi główny problem środowiskowy ze względu na to, że jest przyczyną wzrostu promieniowania UV-B dochodzącego do Ziemi. Nadmiar tego promieniowania wywiera niekorzystny wpływ na ludność wszystkich ras. Ludzie rasy białej są najbardziej podatni na różne odmiany raka skóry, ale cała ludzkość (niezależnie od barwy skóry) jest w niebezpieczeństwie choroby oczu, katarakty (zaćmy) oraz osłabienia reakcji systemu odpornościowego. Nadmiar promieniowania UV-B wywiera także niekorzystny wpływ na rośliny lądowe, ekosystemy wodne i jakość powietrza troposferycznego. (Tolba i in. 1992, Box 1).

Ubożenie ozonu w skali globalnej (z wyjątkiem szerokości geograficznych 20°S–20°N) obserwowane jest od lat siedemdziesiątych. Zjawiska tego nie wy-

jaśniają naturalne procesy rozpadu cząsteczek ozonu stratosferycznego. Wyłonił się więc problem wpływu człowieka na warstwę ozonową.

Krytycznym momentem dla zrozumienia destrukcyjnego wpływu działalności człowieka na warstwę ozonową był rok 1974, kiedy to Meksykanin Mario Molina i Amerykanin Sherwood Rowland jako pierwsi postawili hipotezę, że chlorowcowęglowodory CFCs (chlorofluorocarbons) – freony mogą powodować katalityczny rozpad ozonu stratosferycznego. Drugim krytycznym momentem był rok 1985, w którym Anglik Joseph Farman i jego współpracownicy donieśli o pojawieniu się antarktycznej dziury ozonowej (zjawisko systematycznego zanikania warstwy ozonowej nad Antarktyką w okresie południowej wiosny, tj. we wrześniu i październiku).

Te dwa wydarzenia wzbudziły w społeczności światowej świadomość potencjalnej groźby skutków antropogenicznych zanieczyszczeń stratosfery. Wówczas to nastąpił pośpiech w międzynarodowych negocjacjach dotyczących ograniczenia produkcji CFCs.

W 1985 roku zatwierdzona została konwencja wiedeńska o ochronie warstwy ozonowej, a w 1987 roku powstał protokół montrealski w sprawie substancji zubożających warstwę ozonową. Protokół ten został uzupełniony dwoma poprawkami: poprawką pierwszą wprowadzoną w Londynie (1990) i drugą – w Kopenhadze (1992), dotyczącymi strategii ograniczenia emisji CFCs oraz stopniowego zastępowania ich o wiele mniej groźnymi dla ozonu stratosferycznego substancjami.

Najczęściej stosowanymi substytutami (zamiennikami) CFCs są: HCFCs – chlorofluorowęglowodory (hydrochlorofluorocarbons) i fluorowęglowodory – HFCs (hydrofluorocarbons). Substancje te mają stosunkowo krótkie okresy życia w atmosferze (zawartość wodoru w ich składzie sprawia, że są one w znacznym stopniu utleniane w troposferze), dzięki czemu przedostają się do stratosfery w niewielkich ilościach i stanowią znacznie mniejsze zagrożenie dla warstwy ozonowej niż CFCs.

Powszechne pytanie o zanikanie ozonu stratosferycznego

Pytanie to brzmi: dlaczego dziura ozonowa pojawia się nad Antarktyką, podczas gdy CFCs są emitowane do atmosfery głównie na półkuli północnej?

Okolo 90% emisji CFCs ma miejsce w Europie (Rosji), Azji (Japonii) i Ameryce Północnej. Dzięki długowieczności CFCs są nierozpuszczalne w wodzie i stosunkowo obojętne chemicznie w okresie rocznym lub dwuletnim mieszane w całej troposferze. W tym dobrze wymieszanym powietrzu unoszą się one do stratosfery, głównie w szerokościach tropikalnych. Z kolei w stratosferze wiatry przenoszą to powietrze (wraz z CFCs) z tropików w kierunku zarówno bieguna południowego, jak i północnego; w efekcie powietrze w całej stratosferze zawiera prawie takie same ilości chloru. Jednakże warunki meteorologiczne obu obszarów polarnych różnią się bardzo między sobą z powodu różnic w powierzchni Ziemi (różny rozkład powierzchni

lądowych i oceanicznych). Biegun południowy znajduje się na olbrzymim lądzie antarktycznym, który jest całkowicie otoczony oceanem. Warunki te są przyczyną bardzo niskiej temperatury stratosfery antarktycznej w okresie zimy polarnej, co z kolei prowadzi do tworzenia się stratosferycznych chmur polarnych – PSCs (polar stratospheric clouds).

Chmury te prowadzą do zmian chemicznych, sprzyjających szybkiej stracie ozonu we wrześniu i październiku, dając w wyniku dziurę ozonową.

Inaczej jest na północnym obszarze polarnym. Nie występuje tutaj charakterystyczna dla południowych obszarów polarnych symetria ląd-ocean (lądy przeplecione są wodami oceanicznymi). W konsekwencji stratosferyczne powietrze arktyczne jest dużo cieplejsze niż powietrze antarktyczne i tworzy się o wiele mniej chmur PSCs (WMO/UNEP 1995).

Największe straty ozonu stratosferycznego mają miejsce wewnątrz zimowych wirów polarnych: antarktycznego i arktycznego. Wir polarny jest masą zimnego powietrza, izolowaną (szczególnie w Antarktyce) od powietrza niższych szerokości geograficznych przez silne wiatry zachodnie łącznie z prądem strumieniowym (jet stream).

Pomiary satelitarne ostatecznie potwierdziły, że wir arktyczny jest o wiele mniej denitryfikowany niż wir antarktyczny, co prawdopodobnie determinuje różnice w stratach ozonu polarnego. Zmienność z roku na rok warunków fotochemicznych i dynamicznych ogranicza pewność prognoz zmian ozonu w przyszłości w obszarach polarnych, szczególnie w Arktyce.

Przyczyny ubożenia warstwy ozonowej w wysokich i średnich szerokościach geograficznych

Ostatnie odkrycia naukowe (lata dziewięćdziesiąte) potwierdziły wcześniejsze hipotezy, że główną przyczyną destrukcji ozonu stratosferycznego w obszarach polarnych i środkowych szerokościach geograficznych są antropogeniczne związki chloru i bromu. Głównym źródłem chloru stratosferycznego są chlorowcowęgłowodory – CFCs: CFC-11(CFCl_3) – freon-11 i CFC-12(CF_2Cl_2) – freon-12, natomiast brom stratosferyczny pochodzi z halonów (bromowane CFCs), które zawierają oprócz chloru i fluoru także brom. Większość chloru i połowa bromu w stratosferze są pochodzenia antropogenicznego.

Ostatnie badania wzmocniły wcześniejsze teorie i dowody na to, że głównym mechanizmem chemicznym inicjującym niszczenie ozonu stratosferycznego w obszarach polarnych są reakcje heterogeniczne (wielofazowe), zachodzące w okresie nocy polarnej na zamrożonych cząsteczkach PSCs. Reakcje te konwertują stosunkowo trwałe związki chemiczne chloru (spizarnie stratosferycznego Cl) na bardziej reaktywne substancje, które z łatwością podlegają fotolizie (nawet w warunkach słabego, wczesnowiosennego światła słonecznego), uwalniając atomy chloru niszczące ozon.

Przebiegające w chmurach PSCs reakcje chemiczne, prowadzące do denitryfikacji, wzmagają procesy niszczenia ozonu.

Wiosenne światło słoneczne napędza następujące cykle katalityczne:

Cykl I	Cykl II
$\text{ClO} + \text{ClO} + \text{M} \rightarrow \text{Cl}_2\text{O}_2 + \text{M}$	$\text{ClO} + \text{BrO} \rightarrow \text{Br} + \text{Cl} + \text{O}_2$
$\text{Cl}_2\text{O}_2 + h\nu \rightarrow \text{Cl} + \text{ClO}_2$	$\text{Cl} + \text{O}_3 \rightarrow \text{ClO} + \text{O}_2$
$\text{ClO}_2 + \text{M} \rightarrow \text{Cl} + \text{O}_2 + \text{M}$	$\text{Br} + \text{O}_3 \rightarrow \text{BrO} + \text{O}_2$
$2(\text{Cl} + \text{O}_3 \rightarrow \text{ClO} + \text{O}_2)$	
netto: $2\text{O}_3 \rightarrow 3\text{O}_2$	netto: $2\text{O}_3 \rightarrow 3\text{O}_2$

Dimer (Cl_2O_2) rodnika tlenku chloru (ClO), występujący w cyklu I jest termicznie nietrwały, zatem cykl ten jest najefektywniejszy w niskiej temperaturze (ale w obecności światła słonecznego). Uważa się, że jest on odpowiedzialny za większość (około 70%) straty ozonu w Antarktyce. W cieplejszej Arktyce duża część strat ozonu może być powodowana przez cykl II. (SESAME Press Release 21/2/95, 30/3/95).

Koncentracje bromu w stratosferze są 150 razy mniejsze niż koncentracje chloru. Jednakże brom (w przeliczeniu atom na atom) jest około 50 razy efektywniejszy w niszczeniu ozonu niż chlor. Przyczyna ta tkwi w tym, że nie istnieją w stratosferze trwałe (jak w przypadku chloru) związki bromu; związki HBr i BrONO_2 łatwo fotolizowane i dlatego prawie cały brom występuje w postaciach aktywnych (Br i BrO), które mogą łatwo reagować z ozonem. Należy zauważyć, że mechanizm niszczenia ozonu przez brom zawiera także chlor.

Ostatnie badania laboratoryjne przyczyniły się do doskonalszego zrozumienia wagi chemii na powierzchniach cząsteczek lodu, azotanu i siarczanu w zwiększaniu koncentracji niszczących ozon postaci chloru w stratosferze polarnej obu półkul. Konkluduje się, że przyczyną

zaniku polarnego ozonu są antropogeniczne związki chloru i bromu w połączeniu z chemią na naturalnych polarnych cząsteczkach (aerozolach) stratosferycznych.

Równoczesne pomiary in situ kilku reaktywnych chemicznie substancji dostarczyły silnych dowodów na to, że chemia aerozolu siarczanowego odgrywa kluczową rolę w determinacji wielkości strat ozonu w szerokościach środkowych obu półkul, czego nie wykazały dotychczasowe badania chemii fazy gazowej.

Ostatnie obserwacje satelitarne i badania modelowe potwierdzają dotychczasowe poglądy naukowe, że na wysokościach powyżej 16 km, powietrze w pobliżu centrum wiru polarnego jest dobrze izolowane od powietrza niższych szerokości geograficznych, zwłaszcza w Antarktyce. Jednakże erozja wiru przez fale planetarne transportuje powietrze z obszaru brzeżnego wiru do niższych szerokości.

Prawie wszystkie badania oparte na obserwacjach i modelowaniu wykazują, że przemieszczanie dużej masy powietrza z wiru antarktycznego na obszary szerokości środkowych zachodzi w okresie 3–4 miesięcy; waga tego transportu dla chemicznej straty ozonu in situ w szerokościach środkowych jest słabo poznana.

Powietrze łatwo jest transportowane pomiędzy obszarami polarnymi i obszarami szerokości środkowych na wysokości poniżej 16 km. Jednakże wpływ tego transportu na stratę ozonu w szerokościach środkowych nie jest jeszcze określony ilościowo (WMO/UNEP, 1995).

Trendy w ozonie całkowitym

Analiza danych obserwacyjnych ozonu całkowitego do 1994 roku wykazuje istotne spadki ozonu w szerokościach środkowych (30° – 60°) na obu półkulach, przy czym są one dwukrotnie większe w okresie zima-wiosna niż w okresie lato-jesień. W szerokościach środkowych półkuli północnej trendy spadkowe dla zimy i wiosny w okresie 1979–1994 wynosiły około 6% na 10 lat, a latem i jesienią – 3% na 10 lat. (WMO/UNEP, 1995).

Na półkuli południowej sezonowe różnice były nieco mniejsze, ale w szerokościach środkowych uśrednione trendy wynosiły około 4–5% na 10 lat.

W ostatnich 13 latach spadek ozonu globalnego wynosił około 5%; w obszarach pozatropikalnych spadek ozonu w tym okresie zawierał się w granicach od 6,5% na półkuli północnej do 9,5% na półkuli południowej. Zintegrowana globalna strata ozonu w ostatnim 25-leciu wynosiła około 10%. (Review of the state of the ozone layer, 4 December 1995).

Trendy w pionowym rozkładzie ozonu w szerokościach środkowych i tropikalnych

Dane satelitarne i z sond ozonowych dla szerokości środkowych i tropików wskazują na duży trend spadkowy ozonu na wysokościach poniżej 25 km, tj. w stratosferze dolnej (warstwa ozonowa). Dla tych wysokości jest dobra zgodność pomiędzy trendami z danych satelitar-

nych SAGE I/II (Stratospheric Aerosol and Gas Experiment) i z sond ozonowych.

W szerokościach środkowych półkuli północnej (30° – 50° N) w latach 1979–1991, średni roczny spadek ozonu wynosił $7 \pm 4\%$ na 10 lat, co jest zgodne z obserwowanym spadkiem ozonu całkowitego. Natomiast dla stratosfery poniżej 20 km – na wysokości 16–17 km – duże spadki ozonu, wynoszące $20 \pm 8\%$ na 10 lat podaje SAGE, podczas gdy uzyskane z uśrednionych danych z sond ozonowych ujemne trendy dla szerokości środkowych są znacznie mniejsze i wynoszą $7 \pm 13\%$ na 10 lat. Zintegrowane dane ozonosondowe dają trendy ozonu zgodne z wynikami pomiarów.

W latach osiemdziesiątych, według danych pomiarowych uzyskanych różnymi metodami, w północnych szerokościach środkowych w stratosferze górnej (35–45 km), zawartość ozonu zmniejszyła się o 5–10% na 10 lat, nieznacznie mniejszy spadek ozonu miał miejsce w południowych szerokościach środkowych.

W tropikach, na wysokości 35–45 km, trendy spadkowe ozonu według SAGE I/II i SBUV (Solar Backscatter Ultraviolet Satellite Spectrometer) wynoszą odpowiednio 10% i 5% na 10 lat.

Pomiary wykazują, że ilość ozonu troposferycznego na półkuli północnej, nad niektórymi obszarami szerokości środkowych, w minionym dwudziestoleciu wzrastała o około 10% na 10 lat. Jednakże w latach osiemdziesiątych trendy były zmienne: małe lub nieistotne. Dla półkuli południowej nie ma wystarczających danych do wyciągnięcia wiarygod-

nych wniosków. Wiadomo jednak, że nad biegunem południowym zaznacza się spadek ozonu troposferycznego od lat osiemdziesiątych (WMO/UNEP, 1995).

Zmiany ozonu stratosferycznego w latach dziewięćdziesiątych

Lata 1992 i 1993 oraz 1995 i 1996 charakteryzują się anomalnie dużymi spadkami ozonu stratosferycznego. Rekordowo duże (do 1995 roku) deficyty ozonu miały miejsce w szerokościach środkowych obu półkul kuli ziemskiej w okresie 1992–1993, przy czym były one większe na półkuli północnej niż na południowej. Średnie globalne poziomy ozonu całkowitego na początku 1993 roku były (tylko) o 1–2% niższe od tych, których spodziewano się z ekstrapolacji trendu wieloletniego sprzed 1991 roku, podczas gdy w północnych szerokościach środkowych (45°–60°N), maksymalne spadki ozonu przewyższały o 6–8% spadki wynikające z trendu wieloletniego.

W wysokich i średnich szerokościach geograficznych półkuli północnej, zimą 1992/93 notowano wartości ozonu całkowitego o 9–20% mniejsze od wartości normalnej.

Antarktyczne dziury ozonowe 1992 i 1993 zaliczają się do tych największych pod względem zajmowanego obszaru i najgłębszych (minimum ozonu całkowitego kształtowało się poniżej 100 DU), z lokalną, ponad 99% stratą ozonu na wysokościach 14–19 km w październiku.

W zimowej stratosferze arktycznej 1991/92 i 1992/93 straty ozonu były o wiele mniejsze (wynosiły 15–20%) niż straty ozonu antarktycznego.

W 1992 roku w tropikach (10°S–10°N), na wysokości 21 km n.p.m. notowano aż 50-procentowe ubytki ozonu.

Duże spadki ozonu w latach 1992 i 1993 najprawdopodobniej wiążą się, co najmniej częściowo, z zaburzeniem stratosfery przez wielką erupcję wulkanu Mt Pinatubo (Filipiny) w czerwcu 1991 roku – była to największa erupcja wulkaniczna XX wieku (WMO/UNEP, 1995).

Erupcja Mt Pinatubo doprowadziła do wielkiego, aczkolwiek przejściowego wzrostu aerozolu siarczanowego (H₂SO₄/H₂O) w dolnej stratosferze, tj. na wysokościach poniżej 25 km, na całym globie. W szerokościach środkowych półkuli północnej obszar powierzchni stratosferycznego aerozolu siarczanowego, w rok po erupcji zwiększył się 30–40-krotnie, następnie aerozole te stopniowo zniknęły ze stratosfery.

Na uwagę zasługuje fakt, iż w pierwszej połowie 1994 roku globalne poziomy ozonu powróciły już do wartości zgodnych z długookresowym trendem spadkowym, obserwowanym przed erupcją Mt Pinatubo.

Absorpcja promieniowania zarówno ziemskiego, jak i słonecznego przez wulkaniczne aerozole siarczanowe (Pinatubo 1991), spowodowała wzrost, aczkolwiek przejściowy, 1°C średniej globalnej temperatury stratosfery dolnej, wpłynęła także na rozkład ozonu przez zmiany cyrkulacji.

Ta zaobserwowana odbudowa ozonu globalnego w 1994 roku jest jakościowo

zgodna ze stopniowymi redukcjami zasobności wulkanicznych aerozoli siarczanowych w stratosferze. Mogłoby to oznaczać, że zubożenie warstwy ozonowej w latach 1992 i 1993 – aczkolwiek znaczne – było przejściowe.

Należy zdawać sobie jasno sprawę z tego, że głównym mechanizmem wpływu dużych erupcji wulkanicznych (takich jak: Agung – Indonezja 1963, El Chichon – Meksyk 1982 i Pinatubo – Filipiny 1991) na ozon stratosferyczny nie jest iniekcja chloru (HCl) do stratosfery, ale iniekcja aerozoli siarczanowych, które przez rozpraszanie i pochłanianie światła słonecznego zmieniają bilans radiacyjny, i które konwertują nieaktywne związki chloru na niszczące ozon postacie aktywne. Jednakże w skali globalnej są to efekty małe (co najwyżej kilka procent) i trwają krótko – kilka lat. Wulkany odpowiadają za co najwyżej kilka procent chloru w stratosferze.

Nowe badania laboratoryjne i badania atmosfery wzmocniły pogląd, że zachodzące na aerozolach siarczanowych reakcje heterogeniczne mogą w warunkach niskiej temperatury – aktywować chlor, zwłaszcza w obszarach polarnych. W warunkach wulkanicznie zaburzonej stratosfery, kiedy zwiększona jest ilość aerozolu, procesy te prawdopodobnie przyczyniają się do strat ozonu na zewnątrz wirów polarnych (antarktycznego i arktycznego), tam gdzie występują chmury PSCs.

Rekordowo duże straty ozonu arktycznego nad północną Europą zarejestrowano po raz pierwszy (do 1996 roku) podczas zimy 1994/95. Wyniki badań SESAME 1994–1995 wykazują, że stra-

ta ozonu wewnątrz arktycznego wiru polarnego na wysokości około 18 km, podczas dwóch dziesięciodniowych okresów (jednego w końcu stycznia, drugiego w środku marca) osiągnęła 1,5% na dzień. W sumie, dla całej zimy i marca, koncentracja ozonu na wysokości 16–18 km była o 50% niższa od wartości obserwowanych w poprzednich latach.

Dane ze stacji WMO/GO₃OS (Global Ozone Observing System) wykazują, że całkowita zawartość ozonu była o 20–30% niższa od wartości normalnej, a w pojedynczych dniach, kiedy wir przemieścił się nad Syberię, straty ozonu stanowiły ponad 35% wartości normalnej (są to rekordowo niskie wartości ozonu dla tego terenu).

Przyczyną tych anomalnych spadków ozonu była wyjątkowo niska temperatura dolnej stratosfery przez większość dni grudnia 1994 roku i stycznia 1995 roku (stratosfera nad Europą i Arktyką Europejską była w tych miesiącach najzimniejsza w ostatnich 29 latach).

W takiej sytuacji wir arktyczny przesunął się nad europejski obszar polarny. Warunki meteorologiczne w arktycznym wirze polarnym były podobne do tych w wirze antarktycznym; temperatura wnętrza wiru była wystarczająco niska ($< -80^{\circ}\text{C}$), by mogły tworzyć się bardziej gęste i dłużej trwające niż w poprzednich latach chmury PSCs. W konsekwencji poziomy koncentracji niszczących ozon substancji chloru i bromu kształtowały się powyżej poziomów tłowych; potwierdziły to wyniki badań SESAME. W obecności światła słonecznego zachodziła więc szybka destrukcja ozonu stratosferycznego (SESAME

Press Release, 21 February 1995; Press Release Brussels, September 15, 1995).

W środkowych szerokościach geograficznych, wartości ozonu całkowitego zimą 1994/95 generalnie były zbliżone do tych w poprzednich latach (tj. o kilka procent niższe od średniej wieloletniej), zgodnie z długookresowym trendem ozonu. Zatem duży spadek ozonu wewnątrz wiru nie znalazł odbicia w warunkach na zewnątrz wiru.

Sądzi się, że rekordowo niska temperatura stratosfery, zaobserwowana zimą 1994/95, jest wynikiem naturalnych zmian klimatycznych (Press Release Brussels, September 15, 1995). W stratosferze dolnej jest obserwowany długookresowy trend ochładzania, ale wielkość tego trendu jest mała w porównaniu ze zmiennością z roku na rok. Globalnie uśredniona temperatura stratosfery dolnej w ostatnim trzystoletciu wykazuje tendencję malejącą, wynoszącą 0,3–0,4°C na 10 lat. Można byłoby zatem sądzić, że nie ma powodu, by taka niska temperatura pojawiała się każdego roku.

Jednakże silne ubożenie ozonu stratosferycznego nad półkulą północną w okresie zimowo-wiosennym zachodzi nadal. W 1996 roku WMO (WMO No 586) podała, że nad obszarami subpolarnymi (podbiegunowymi) półkuli północnej deficyty ozonu podczas ostatniej zimy (1995/96) były jeszcze większe niż zimą 1994/95. Obszar dużych strat ozonu rozciągał się od Grenlandii, przez północny Atlantyk i Skandynawię, aż do Zachodniej Syberii (rosyjska Arktyka). Wartości ozonu całkowitego na tym obszarze kształtowały się poniżej 250 DU, co odpowiada 20–30% średniego miesię-

cznego deficytu ozonu. Godny uwagi i zarazem niepokojący jest fakt, że po raz pierwszy wystąpiły tutaj najniższe z dotychczas zarejestrowanych przez stacje WMO/GO₃OS wartości ozonu całkowitego, wynoszące kilka jednostek poniżej 200 DU (!), co stanowi bezprecedensowy, ponad 45-procentowy deficyt ozonu dla północnych terenów półkuli północnej.

Należy w tym miejscu przytoczyć definicję zjawiska antarktycznej dziury ozonowej i w tym momencie świadomość groźby zanikania ozonu stratosferycznego w obszarach subarktycznych wzrasta. Antarktyczna dziura ozonowa jest regionem, gdzie całkowita zawartość ozonu atmosferycznego jest mniejsza niż 200 DU, tj. gdy ozon całkowity spada poniżej 2/3 wartości normalnej. Pojęcie „dziura ozonowa” odnosi się tylko do antarktycznej stratosfery dolnej (12–22 km n.p.m.), gdzie występują polarne chmury stratosferyczne – PSCs.

Podczas pierwszych trzech miesięcy okresu zimowego 1995/96 (grudzień–styczeń–luty), średnia wartość ozonu całkowitego w środkowych i polarnych szerokościach geograficznych była o około 10% niższa od średniej wieloletniej (1957–1979). Jest to zgodne z prognozowanym na podstawie wielkości produkcji CFCs, średnim spadkiem ozonu, obserwowanym od początku lat siedemdziesiątych.

Nad Ameryką Północną i Pacyfikiem północnym średnie wartości ozonu całkowitego były (tylko) o kilka procent mniejsze od wartości normalnej. W tym samym czasie nad subarktycznymi terenami Kanady i wschodnią Syberią, gdzie

stratosfera była cieplejsza, wartości ozonu całkowitego były bliskie wartości normalnej, wynoszącej dla tej pory roku 460–500 DU.

Zgodnie z opinią Rumena Bojkova (specjalny doradca sekretarza generalnego WMO ds. ozonu) w najbliższych latach – wraz ze wzrostem koncentracji chloru i bromu – można spodziewać się jeszcze silniejszych deficytów ozonu. Jednakże, w odróżnieniu od Antarktyki zjawiska dużego spadku ozonu nad Arktyką trwają przez kilka tygodni, a nie miesięcy.

Należy zauważyć, że spadek ozonu nad polarnymi szerokościami półkuli północnej w okresie wiosenno-zimowym 1995/1996 nastąpił po antarktycznej wiośnie 1995, kiedy to antarktyczna dziura ozonowa trwała najdłużej (77 dni) i w ciągu 39 dni zajmowała obszar ponad dwa razy większy od obszaru Europy (ponad 20 mln km²) (WMO Antarctic Ozone Bulletin 10/95, 6 December 1995).

Zjawisko dziury ozonowej nad Arktyką jak dotychczas nie zaistniało, aczkolwiek ma miejsce duże ubożenie ozonu w okresach zimowo-wiosennych, które można określić jako rozrzedzenie warstwy ozonowej lub jako arktyczny „dołek” ozonowy.

Przedsięwzięcia podejmowane przez państwa – sygnatariuszy konwencji wiedeńskiej i jej protokołu montrealskiego służą powrotowi warstwy ozonowej do normalnego stanu. Jednakże zaniknięcia antarktycznej dziury ozonowej można spodziewać się nie wcześniej niż w połowie XXI wieku (WMO No 586, 1996).

Trendy gazów powodujących ubożenie ozonu stratosferycznego i prognoza odbudowy warstwy ozonowej

Jednym z głównych osiągnięć naukowych w zakresie chemii atmosfery jest odkrycie, że w ostatnich latach, w niektórych regionach, zmniejszyły się przyrosty w atmosferze kilku głównych antropogenicznych gazów źródłowych dla chloru i bromu.

Głównymi antropogenicznymi gazami źródłowymi dla stratosferycznego chloru i bromu, a więc dla destrukcji warstwy ozonowej są: CFCs (freony 11 i 12), czterochlorek węgla (CCl₄), chloroform metylu (CH₃CCl₃) oraz halony: halon-1301 (CBr₂F₃) i halon-1211 (CBrClF₂). Związki te są monitorowane od 1978 roku. Przez większość tego okresu szybkość ich przyrostu zwiększała się. Ostatnio rysuje się tendencja odwrotna.

Całkowity chlor organiczny w troposferze i troposferyczny brom w halonach wzrosły w 1992 roku, odpowiednio, tylko o 60 ppt/rok (1,6%) i o 0,25 ppt/rok, podczas gdy w 1989 roku przyrosty tych gazów wynosiły odpowiednio: około 110 ppt/rok (2,9%) i 0,85 ppt/rok. Stężenie czterochloru węgla obecnie również zmniejsza się. Obserwowane trendy w organicznym chlorze troposferycznym i dane dotyczące produkcji jego źródłowych związków sugerują mniejsze ich emisje niż maksimum emisji, uwzględnione w protokole montrealskim i jego poprawkach i uzupełnieniach.

Ponadto obserwacje ujawniły przyspieszenie przyrostu substytutów CFCs, tj. chlorofluorowęglowodorów –

HCFCs: HCFC-22, HCFC-141b i HCFC-142b, czego należało się spodziewać ze zwiększonego ich użytkowania. Chlor troposferyczny w HCFCs wzrósł o 5ppt/rok w 1989 roku i o około 10ppt/rok w 1982 roku.

Zgodnie z przewidywaniami, maksimum całkowitego obciążenia chlorem i bromem przypada na rok 1994, natomiast maksimum w stratosferze będzie opóźnione o 3–5 lat.

Przewiduje się, przy założeniu ścisłego przestrzegania poprawionego protokołu montrealskiego (Kopenhaga 1992) przez wszystkie państwa, że stratosferyczne stężenia chloru będą nadal wzrastać od ich bieżących poziomów (3,6 ppb) do maksimum, wynoszącego około 3,8 ppb na przełomie tego wieku.

Przyszłe obciążenie bromem będzie zależało od dokonanego wyboru co do przyszłej produkcji i emisji bromku metylu (CH_3Br).

Na przełomie tego wieku zacznie się spadek poziomów stratosferycznego chloru i bromu, który będzie trwał w ciągu dwóch przyszłych stuleci: XXI i XXII. Wielkość spadku jest podyktowana przez czas rezydencji w atmosferze CFCs, czterochloru węgla i halonów.

Przewiduje się, że globalne straty ozonu i antarktyczna dziura ozonowa, które były pierwszy raz rozróżnione w późnych latach siedemdziesiątych, zostaną zregenerowane około 2045 roku (przy stałych innych warunkach). Powrót do stanu normalnego warstwy ozonowej nie byłby możliwy bez poprawek i uzupełnień pierwotnego protokołu montrealskiego (1987).

Sądzi się, że maksimum globalnych strat ozonu wystąpi w najbliższych kilku latach. Warstwa ozonowa będzie podlegała największym zaburzeniom antropogenicznym i będzie najbardziej podatna na zmiany naturalne około 1998 roku, ponieważ, jak sądzi się, wystąpią wtedy maksymalne stężenia stratosferycznego chloru i bromu.

Badania oparte na ekstrapolacji bieżących trendów sugerują, że maksymalna strata ozonu w stosunku do późnych lat sześćdziesiątych będzie wynosić około:

- 12–13% (tj. ok. 2,5% powyżej bieżących poziomów) w szerokościach środkowych półkuli północnej w okresie zimowo-wiosennym,
- 6–7% (tj. ok. 1,5% powyżej bieżących poziomów) w szerokościach środkowych półkuli północnej w okresie lato-jesień,
- 11% (z mniejszą pewnością) w szerokościach środkowych półkuli południowej w okresie całorocznym.

Takim zmianom (ubytkom) ozonu stratosferycznego będzie towarzyszyć wzrost promieniowania UV-B (promieniowanie rumieniotwórcze) odpowiednio o 15%, 8% i 13%, pod warunkiem że oddziaływania innych czynników (takich, jak na przykład chmury) pozostaną stałe. Ponadto, gdyby wydarzyła się duża erupcja wulkaniczna (podobna do erupcji Mt Pinatubo) lub gdyby wystąpiły anomalnie zimne i trwałe zimy arktyczne, wtedy wzrost strat ozonu i wzrost docierającego do powierzchni Ziemi promieniowania UV-B będzie większy w pojedynczych latach.

Brak skrupulatnego przestrzegania międzynarodowych umów będzie opóźniać

regenerację warstwy ozonowej. Przed potencjalnym kryzysem ekologicznym, jaki stanowi antropogeniczna degradacja warstwy ozonowej w skali globalnej, uchroniły nas odkrycia w dziedzinie chemii atmosfery Paula Crutzena (Holender, meteorolog – profesor w Instytucie Plancka w Moguncji, Niemcy), Mario Moliny (Amerykanin, chemik – profesor w Instytucie Technologii w Massachusetts, Cambridge, USA) i Sherwooda Rowlanda (Amerykanin, chemik – profesor Wydziału Chemii Uniwersytetu Kalifornijskiego w Irvine, USA) – noblistów w dziedzinie chemii 1995. Wyjaśnili oni mechanizmy chemiczne determinujące grubość warstwy ozonowej i wykazali wrażliwość tej warstwy na wpływ antropogenicznych zanieczyszczeń atmosfery.

Dzięki nim istnieje naukowa podstawa – szansa odnowy warstwy ozonowej i zablźnienia (wypełnienia) antarktycznej dziury ozonowej (WMO/UNEP 1995).

Literatura

Opracowano na podstawie informacji naukowych z sieci INTERNET:

Reinforcement of European research activities following the large Arctic ozone depletion observed during SESAME last winter. Press Release, Brussels, September 15, 1995.

Review of the state of the ozone layer. Delivered by Dr Rumen D. Bojkov of World Meteorological Organization (WMO) Austria Conference Centre, Vienna, 4 December 1995.

Scientific Assessment of Ozone Depletion 1994. WMO Global Ozone Research and Monitoring Project-Report No 37. WMO/UNEP 1995.

Scientific evidence confirms continuous depletion of the ozone layer. WMO No 580. Vienna and Geneva, 28 November 1995.

SESAME Campaign (Second European Stratospheric Arctic and Mid-latitude Experiment). Centre for Atmospheric Science. SESAME Press Release 21/2/95, 30/3/95.

Significant ozone loss in the Arctic. Second SESAME Press Release (30/3/95).

Stronger ozone decline continues. Depleted area covers Greenland - Northern Atlantic - Scandinavia and western part of Russian Arctic. WMO No 586. Geneva, 12 March 1996.

The Coordinated European Research Campaign SESAME, shows ozone loss over the Arctic region. SESAME Press Release, 21 February 1995.

Tolba M.K., O.A.El-Kholy, E.El-Hinnawi, M.W. Holdgate, D.F. Mc Michael and R.E. Munn, eds. 1992: Ozone depletion. Chapter 2 in The world environment 1972–1992. New York. Chapman and Hall. [CIRESIN, Consortium for International Earth Science Information Network].

WMO Antarctic Ozone Bulletin 10/95, 6 December 1995.

Summary

On the problems of ozone layer depletion and its actual state over the northern hemisphere. This paper has been written on the basis of the INTERNET scientific information.

The depletion of the ozone layer has been treated as one of the major environmental problems due to it is leading to an increase in the amount of UV-B radiation reaching the Earth's surface.

The following questions have been arisen:

– one of the common questions about ozone: „Why is the ozone hole observed over the Antarctica when CFCs are released mainly in the northern hemisphere”? [WMO/UNEP 1995],

- the causes of the ozone layer depletion in the middle – and – high latitudes of the both (northern and southern) hemispheres,
- trends in the total – column ozone depletion,
- trends in the vertical distribution of ozone in the midlatitudes and tropics,
- the stratospheric ozone declines in the 1990s,
- trends in gases causing the stratospheric ozone depletion and the prediction of recovery of the ozone layer.

In accordance with WMO/UNEP 1995 the global ozone losses and the antarctic ozone „hole” which were first discernible in the late 1970s may – but only under favourable conditions – be recovered not sooner as about the year 2045.

Authors' address:
C. Szwed-Ilnicka, W. Przewoźniczuk
Warsaw Agricultural University – SGGW
02-787 Warszawa
ul. Nowoursynowska 166
Poland