

# Ozono sluoksnio nykimas, atsikūrimas ir poveikis klimatui

**Akad. Arūnas Bukantis**

**O**zonas – stipriai kvepianti, tris deguonies atomus turinti deguonies atmaina ( $O_3$ ). Tai ypač svarbus žemės atmosferos dujinis elementas, nors ir sudaro tik milijoninę jos dalį. Ozono pavadinimas kilo nuo senovės graikų kalbos žodžio „ozōn“ – „kvepėti“. Ozono terminą 1839 m. pirmasis pavartojo vokiečių chemikas Kristianas Fridrichas Šionbainas (Christian Friedrich Schönbein). Ozono yra visoje atmosferoje iki 80 km aukščio, tačiau didžiausias jo tankis – stratosferoje, 20–30 km aukštyje. Čia esantis ozonas sugeria trumpabangę ultravioletinę (UV) Saulės spinduliuotę, apsaugodamas gyvąjį pasaulį nuo pražūtingo jos spindulių poveikio. Praretėjus ozono sluoksniui, Žemės paviršių pasiekia daugiau ultravioletinių Saulės spindulių, kurie žmonėms gali sukelti odos vėžį, kataraktą. Vandenyne UV spinduliai naikina fito- ir zooplanktoną, taip pažeisdami gyvybiškai svarbias maitinimosi grandines. Nykstant ozonui, krinta stratosferos temperatūra, keičiasi atmosferos cirkuliacija.

Visas ozonas skirstomas į priežeminį (troposferinį) ir stratosferinį. Priežeminių troposferos sluoksnių ozonas (dar vadinamas „bloguoju ozonu“) yra pavojingas teršalas, nes didelės jo koncentracijos kenkia žmogaus kvėpavimo ir regos organams, ardo kraujyje hemoglobino ir t. t. Dideliuose miestuose, kur intensyvus eismas ir didelė oro tarša, vykstant fotocheminėms reakcijoms susidaro pavojingai didelės priežeminio ozono koncentracijos. Nustatyta, kad nedidelė dalis priežeminio ozono gali būti pernešama ir į aukštesnius atmosferos sluoksnius. Šiame straipsnyje apžvelgiamas stratosferinis ozonas, jo sluoksnio nykimo priežastys ir atsikūrimo perspektyvos.

Aukštuosiuose atmosferos sluoksniuose, stratosferoje, ozonas susidaro, kai UV spinduliai skaido deguonies ( $O_2$ ) molekules: atominis deguonis jungiasi su deguonies molekule ir susidaro ozonas ( $O_3$ ).

Ozonas sugeria apie 4 % visos Žemę pasiekiančios Saulės energijos. Daugiausia tai UV ir infraraudonoji spinduliuotė. Dėl jos sugėrimo stratosferoje, kur daugiausia ozono (apie 20–30 km aukštyje), pakyla oro temperatūra, pasikeičia atmosferos cirkuliacija. Todėl ozonas labai svarbus ir Žemės klimatui.

## Ozono kiekio kintamumas stratosferoje

Jei surinktume visą atmosferos ozoną ir jį suspaustume, vidutinis ozono sluoksnio storis sudarytų tik 3 mm (kinta nuo 1,5 iki 4,5 mm). Kad būtų tikslesni duomenys, ozono kiekį priimta matuoti Dobsono vienetais (DU). 1 DU = 0,01 mm suspausto ozono sluoksnio esant 0 °C temperatūrai ir 1 013,25 hPa slėgiui. Taigi, ozono atmosferoje yra vidutiniškai apie 300 DU. Šie vienetai pavadinti anglų meteorologo Džordžo Milerio Borno Dobsono (George Miller Bourne Dobson, 1889–1976) vardu.



ARŪNAS  
BUKANTIS

OZONO  
SLUOKSNIO  
NYKIMAS,  
ATSIKŪRIMAS  
IR POVEIKIS  
KLIMATUI

Ozonas įvairiose geografinėse platumose pasiskirstęs nevienodai. Mažiausiai jo yra apie pusiaują. Judant ašigalių link ozono daugėja ir daugiausiai jo aptinkama poliarinėse srityse.

Nuolat stebėti ozono būvį atmosferoje pradėta XX a. trečiojo dešimtmečio viduryje, kai Didžiojoje Britanijoje ir Šveicarijoje buvo įkurtos specialiosios antžeminės stotys. Vėliau pradėta leisti tiriamuosius zondus, raketas ir kosminius laivus su specialiai įrengtais prietaisais ozonui matuoti. Pirmąjį dirbtinį Žemės palydovą „Nimbus-4“ ozonui matuoti paleido JAV 1970-aisiais, o po devynerių metų – „Nimbus-7“. Dabar veikia globali bendrojo ozono kiekio matavimų sistema, susidedanti iš antžeminių stočių ir dirbtinių Žemės palydovų. Šios sistemos veiklą koordinuoja Pasaulinė meteorologijos organizacija. Lietuva į šią veiklą įsijungė 1993 m. – bendrojo ozono kiekio matavimai vyksta Kauno meteorologijos stoties bazėje.

Stratosferinio ozono kiekis natūraliai kinta, priklausomai nuo metų laikų ir vietos, tačiau prieš keturis dešimtmečius didelį nerimą sukėlė staigus bendrojo ozono kiekio mažėjimas ir atsivėrusios ozono skylės. Kad ozonas nyksta, pirmieji pastebėjo Australijos ir JAV mokslininkai XX a. aštuntajame dešimtmetyje. Nuo 1979 m. virš Antarktidos ozono sluoksnis periodiškai taip išretėja, kad susidaro net vadinamosios ozono skylės, t. y. ozono lieka mažiau kaip 220 DU. Ozono skylė atsiveria baigiantis poliarinei nakčiai, kai Pietų pusrutulyje būna pavasaris (kiekvieną rugsėjį–spalį). Iš pradžių ozono skylė būdavo „nedidelė“, vos kelių milijonų kvadratinų kilometrų. XX a. devintajame dešimtmetyje jos plotas pasiekė 10, vėliau padidėjo iki 20-ies, o nuo 1998 m. kartais viršija net 25 mln. km<sup>2</sup>. Taip buvo atsitikę 1998, 2003, 2006, 2008, 2015 metais (skaičiuojamas vidutinis plotas rugsėjo 7 d. – spalio 13 d.). Didžiausia ozono skylė susidarė 2006 m. – 26,6 mln. km<sup>2</sup>. Tai du su puse karto didesnė teritorija nei Europa! Skylės centre, virš Pietų ašigalio, ozono praktiškai beveik nebelieka (kartais mažiau kaip 90 DU). Mažiausias ozono kiekis užfiksuotas 1994 m. rugsėjo 30 d. – 73 DU. NASA (JAV Nacionalinė aeronautikos ir kosmoso administracija) duomenimis, 2022 m. ozono skylės virš Antarktidos plotas buvo 23,2 mln. km<sup>2</sup>, o mažiausias ozono kiekis buvo spalio 1–2 d. – 97 DU. Beveik tokie patys ozono skylės duomenys buvo ir 2021 bei 2020 metais. Taigi, kokių nors patikimų ozono skylės sumažėjimo tendencijų kol kas nėra.

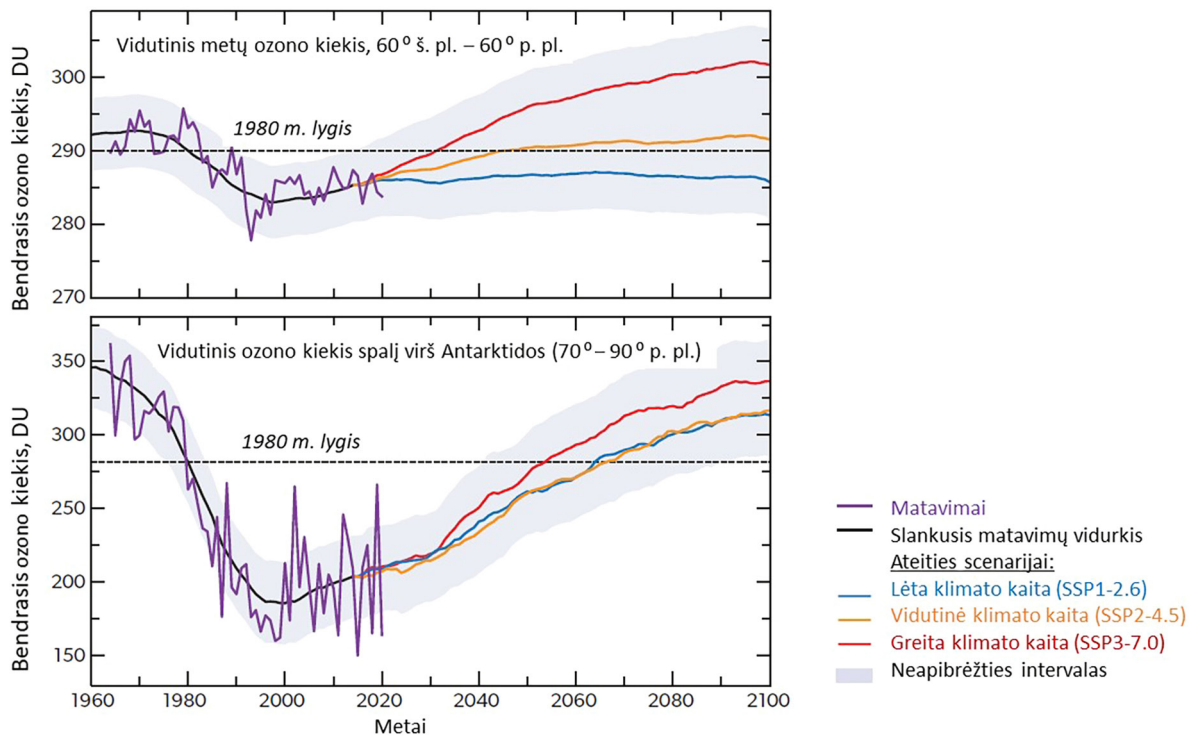
Kitas ozono sluoksnio būklės rodiklis – bendrojo ozono kiekio visame atmosferos stulpe kaita. Remiantis kosminių ir antžeminių matavimų duomenimis, nustatyta, kad 1996–2020 m. pasaulinis ozono kiekis nepoliarinėse platumose (tarp 60° p. pl. ir 60° š. pl.) didėjo po 0,3 % per dešimtmetį. Sparčiausiai, po 0,8 ± 0,7 % per dešimtmetį, ozono daugėjo Pietų pusrutulio vidutinėse platumose (35°–60° p. pl.). Šiaurės pusrutulio atitinkamose vidutinėse platumose bendrojo ozono kiekio kaitos tendencijos yra nereikšmingos, o tropinėse platumose (tarp 20° p. pl. ir 20° š. pl.) bendrojo ozono daugėjo labai iš lėto – po 0,2 ± 0,3 % per dešimtmetį. Tokios įvairių platumų bendrojo ozono kiekio kaitos tendencijos iš esmės atitinka mokslinį supratimą apie ozono irimo bei susidarymo procesus ir yra atkuriamos naujausiuose cheminių klimato modelių rinkiniuose. Vis dėlto, pastaraisiais metais (2017–2021) išmatuotas bendrasis ozono kiekis, kosminių ir antžeminių stebėjimų duomenimis, išlieka keliais procentais mažesnis nei 1964–1980 m. vidurkis: apie 2 % mažesnis teritorijoje tarp 60° p. pl. ir 60° š. pl., apie 4 % Šiaurės pusrutulio vidutinėse platumose (35°–60° š. pl.), apie 5 % Pietų pusrutulio vidutinėse platumose (35°–60° p. pl.) ir apie 1 % tropinėse platumose (20° p. pl. – 20° š. pl.).

Matavimai rodo aiškias ir patikimas ozono kiekio didėjimo 2000–2020 m. tendencijas viršutinėje stratosferoje (aukščiau 30 km) už poliarinių zonų ribų, t. y. tarp 60° p. pl. ir 60° š. pl.: teigiamos tendencijos svyruoja nuo 1,5 iki 2,2 % per dešimtmetį abiejų pusrutulių vidutinėse platumose ir po 1,1–1,6 % per dešimtmetį – tropikuose. Viršutinės stratosferos ozono padidėjimą lemia dviejų veiksmų derinys: ozono sluoksnį ardančių medžiagų kiekio



ARŪNAS  
BUKANTIS

OZONO  
SLUOKSNIO  
NYKIMAS,  
ATSIKŪRIMAS  
IR POVEIKIS  
KLIMATUI



**Pav.** Bendrojo ozono kiekio kaita ir jos prognozės 1960–2100 m. Ozono kaitos ateities scenarijai sumodeliuoti atsižvelgiant į bendruosius socialinius ir ekonominius scenarijus bei šiltnamio dujų emisijos prognozes (SSPx-y – angl. *Shared Socio-economic Pathway*). Raide „x“ pažymėtas scenarijaus numeris, o „y“ – prognozuojamas šiltnamio dujų energinis poveikis 2100 m. ( $W/m^2$ ) pagal atitinkamą SSP scenarijų (*Pasaulinės meteorologijos organizacijos ir Tarpvyriausybinių klimato kaitos komisijos 2021–2022 m. duomenys*).

mažėjimas ir stratosferos temperatūros sumažėjimas dėl didėjančios anglies dioksido koncentracijos troposferoje. Šią išvadą patvirtina naujausių modelių rezultatai.

Tačiau žemutinėje stratosferoje (iki 30 km aukščio), kur didžiausia ozono koncentracija, teigiamų tendencijų kol kas neišryškėjo. Tropinėse platumose 2000–2020 m. ozono mažėjo 1–2 % per dešimtmetį, vidutinėse platumose taip pat pastebimas neryškus ozono kiekio mažėjimas, bet dėl labai didelio kasmetinio kintamumo tendencijos čia lieka statistiškai nepatikimos. Kad ir kaip būtų, pastaruoju metu daugėja įrodymų, kad stratosferinio ozono kiekio kaitą gali lemti ne tik ozoną ardančių cheminių medžiagų koncentracija atmosferoje, bet ir sudėtingi troposferinio ozono pernešimo į žemutinę stratosferą mechanizmai.

Ozono sluoksnis **virš Lietuvos** per pastaruosius 30 metų nebuvo nė karto suplonėjęs iki sveikatai pavojingos ribos. Bendrasis vidutinis metinis ozono kiekis nuo 1993 m. yra apie 340 DU. Bet minimalios ozono kiekio reikšmės kai kuriomis dienomis buvo nukritusios net iki 211–220 DU. Ozono kiekiui virš Lietuvos būdingi ir sezoniniai svyravimai: daugiausiai ozono būna kovą–balandį (vidutiniškai apie 380 DU), o mažiausiai – spalį–lapkritį (apie 291 DU), tačiau tuomet Saulėje jau nesikaitiname. Ozono mažėjimo tendencijų virš Lietuvos nuo 1993 m. nenustatyta.

## Ozono skylės susidarymas

Ozono skylės susidarymą virš Antarktidos ir ozono irimą apskritai lemia keturios priežastys.

1) Ozoną ardančios antropogeninės kilmės teršalai: chlorfluorangliavandeniliai, dar vadinami freonais, (ypač CFC-11, -12 ir -113 (juose), metilo chloroformas  $CH_3CCl_3$ , halonai (juose



ARŪNAS  
BUKANTIS

OZONO  
SLUOKSNIO  
NYKIMAS,  
ATSIKŪRIMAS  
IR POVEIKIS  
KLIMATUI

dalys arba visi chloro atomai pakeisti bromu, pvz.,  $CF_2ClBr$ ,  $CF_3Br$  ir kt.), bromo junginiai ( $BrO$ , metilo bromidas  $CH_3Br$ ),  $N_2O$ ,  $NO_x$  ir kitos cheminės medžiagos. Didžioji dalis antropogeninės kilmės chlorfluorangliavandenilių ir bromo junginių yra išskiriami Šiaurės pusrutulio pramonės rajonuose – Europoje, Rusijoje, Japonijoje, Šiaurės Amerikoje. Šie junginiai netirpūs vandenyje, sąlyginai neaktyvūs, turi ilgą – nuo kelių dešimčių iki kelių šimtų metų – gyvavimo trukmę, todėl ilgai jie patenka į tropines sritis ir čia dėl oro masių kilimo pakliūva į stratosferą. Stratosferoje toliau vyksta judėjimas polių link ir tokiu būdu beveik visoje stratosferoje susidaro daugmaž vienodas freonų ir halonų kiekis. Ilga gyvavimo trukmė, galima fotolizė stratosferoje sudaro sąlygas didėti chloro radikalų koncentracijai, aktyvėja ozoną ardantys katalitiniai halogenų ciklai. Net visiškai sustabdžius freonų ir halonų emisiją, jie dar ilgus dešimtmečius egzistuos atmosferoje. Tyrimai rodo, kad antropogeninės kilmės chloro ir bromo junginių emisija yra pagrindinis ozono sluoksnio nykimą lemiantis veiksnys. Freonai nuo XX a. ketvirtą dešimtmečio buvo naudojami šaldymo įrenginiuose ir kondicionieriuose, aerozolio balionuose, putplasčių gamyboje, įėjo į tirpiklių sudėtį, o septintajame dešimtmetyje buvo pradėti naudoti analogiški freonams junginiai – halonai (užpildomieji gesintuvai ir kt.).

2) Vulkaninės kilmės chloro ir azoto junginiai: ugnikalnių išsiveržimai yra natūralus ozono kiekio stratosferoje reguliatorius. Galingi išsiveržimai gali išmesti milžiniškus chloro ir HCl kiekius tiesiai į stratosferą. Pavyzdžiui, 1991 m. Filipinuose išsiveržus Pinatubo ugnikalniui, globalūs ozono kiekiai mažėjo 2–3 metus iš eilės. Tačiau dauguma ugnikalnių išsiveržimų būna per silpni, kad jų išmetamos medžiagos pasiektų stratosferą. Taigi, visas Cl ir HCl kiekis lieka troposferoje, greitai ištirpsta ir būna išplaunamas lietaus. Gamtiniai šaltiniai stratosferinio chloro kiekius papildo tik apie 15 % metilchlorido ir apie 3 % HCl. Visi kiti chloro šaltiniai yra susiję su žmogaus veikla.

3) Cikliška Saulės aktyvumo kaita. Stratosferinis ozonas susidaro veikiant UV Saulės spinduliams. Dėl cikliškos Saulės aktyvumo kaitos Žemę pasiekia nevienodas UV spinduliuotės kiekis (padidėjus Saulės aktyvumui – padidėja UV spinduliuotės intensyvumas ir atvirkščiai), taigi, kinta ir ozono susidarymas. Poliariniuose rajonuose UV spinduliuotės generuojamas ozono kiekio svyravimo diapazonas gali siekti iki +/-4 %, bet paskirsčius tolygiai visam Žemės rutuliui ozono svyravimai sieks tik apie +/-2 %.

4) Poliarinis stratosferinis sūkurys, kuris izoluoja antarktinės oro mases nuo vidutinių platumų. Klimatiniu požiūriu, ozono koncentracijos mažėjimas lemia žemutinės stratosferos temperatūros kritimą šaltuoju metų laikotarpiu poliarinėse srityse (nuo XX a. vidurio oro temperatūra čia krito po 0,3–0,6 °C per dešimtmetį), o tai yra pagrindinė stratosferos cikloninio poliarinio sūkurio (SCPS) stiprėjimo priežastis. Stiprus SCPS skatina labai intensyvią poliarinę sraujymę, kurioje oras ties tropopauze, maždaug 60° pietų platumoje, juda iš vakarų į rytus daugiau kaip 100 km/val. greičiu ir izoluoja Antarktidos žemyną nuo šiltų vidutinių platumų oro masių įsiveržimo ir ozono prietakos iš šiaurės. Dėl to Antarktidoje per pastaruosius 40 metų laikosi stabili temperatūra, šis žemynas vis dar pristabdo ir globaliosios temperatūros kilimą. Be to, šiame poliariniame sūkuryje, esant labai žemai temperatūrai (žemiau –78 °C), stratosferoje susidaro poliariniai debesys. Jų ledo kristaluose gausu azoto ir sieros rūgščių, chloro ir bromo junginių, todėl visoje Antarktidoje vyksta vadinamoji chloro ir bromo aktyvacija heterogeninių cheminių reakcijų metu ant poliarinių stratosferinių debesų dalelių. Atėjus pavasariui ir pasirodžius Saulei, nepatvarūs chloro ir bromo junginiai pradeda fotochemiškai skilti, atsiradę chloro ir bromo radikalai atakuoja ozono molekules ir jas suardo. Šie katalitiniai ozono ardymo ciklai tęsiasi, kol oras pavasario pabaigoje sušyla ir stratosferinių debesų aerozolio dalelės virsta dujomis, o heterogeninės chloro ir bromo



ARŪNAS  
BUKANTIS

OZONO  
SLUOKSNIO  
NYKIMAS,  
ATSIKŪRIMAS  
IR POVEIKIS  
KLIMATUI

aktyvacijos reakcijos sustoja. Spalio pabaigoje jau prasideda cheminė stratosferos ozono regeneracija, SCPS silpsta, intensyvėja ozono pernaša iš šiauresnių platumų – taip lapkritį antarktinė ozono skylė išnyksta iki kito pavasario.

Ozono skylė virš Antarktidos yra periodiškai kasmetinis reiškinys, kurį lemia ypatingos meteorologinės sąlygos ir dėl žmogaus veiklos padidėjusi freonų ir halonų koncentracija. Stratosferoje iki XX a. vidurio egzistavo pusiausvyra tarp ozono susidarymo ir skaidymo procesų. Tačiau šią gamtinę pusiausvyrą suardė antropogeninės kilmės chloro ir bromo junginiai.

Kodėl nesusidaro ozono skylės Šiaurės poliarinėje srityje? Šiaurės pusrutulyje stratosferinis cikloninis sukūrys dėl aukštesnės temperatūros nėra toks didelis ir stiprus kaip virš Antarktidos, balandžio–rugsėjo mėnesiais jis virsta anticikloniniu sukūriu, žiemą susidaro mažiau stratosferinių debesų, jie egzistuoja trumpiau, todėl neturi tokios reikšmingos įtakos cheminiams procesams. Be to, vyksta intensyvesnė horizontali oro masių apytaka tarp poliarinių ir tropinių platumų, kuri ir užtikrina didesnius ozono kiekius Arktyje.

## Ozono sluoksnio apsauga ir atsikūrimas

Ozono sluoksnio apsauga pradėta rūpintis 1974 m. nustačius, kad veikiami UV spinduliuotės freonai gali skilti atpalaiduodami chloro radikalus. Spartus freonų koncentracijos augimas troposferoje, ilga jų gyvavimo trukmė bei galima fotolizė stratosferoje sudaro sąlygas didėti chloro radikalų koncentracijai stratosferoje. Pirmiausia, 1978 m. JAV uždraudė savo teritorijoje gaminti ir pardavinėti aerosolinius balionėlius, kuriuose aerosoliams išpurkšti buvo naudojami freonai. Netrukus, 1985 m. buvo parengtas pirmasis tarptautinis susitarimas dėl ozono sluoksnio apsaugos – Vienos konvencija, o 1987 m. pasirašytas Vienos konvencijos Monrealio protokolas (įsigaliojo 1989 m.), kuriame numatyta palaipsniui riboti freonų ir halonų gamybą bei naudojimą. Pasaulis ėmė pamažu atsisakyti ozono sluoksnį ardančių cheminių medžiagų naudojimo (freonų –  $\text{CFCl}_3$ ,  $\text{CF}_2\text{Cl}_2$ ,  $\text{C}_2\text{F}_3\text{Cl}_3$ ,  $\text{C}_2\text{F}_4\text{Cl}_2$ ,  $\text{C}_2\text{F}_5\text{Cl}$ , halonų –  $\text{CF}_2\text{BrCl}$ ,  $\text{CF}_3\text{Br}$ ,  $\text{C}_2\text{F}_4\text{Br}_2$  ir kt.). Dabar pasauliniu mastu pripažįstama, kad Monrealio protokolas – vienas sėkmingiausių tarptautinių susitarimų aplinkosaugos srityje, reguliuojančių ozono sluoksnį ardančių cheminių medžiagų (OAM) gamybos sumažinimą bei kontrolę. Įgyvendinant Monrealio protokolo nutarimus bendrojo chloro koncentraciją stratosferoje iki 2020 m. pavyko sumažinti 11,5 %, palyginti su 1993 m. pasiektu piku. Šį ilgalaikį sumažėjimą daugiausia lėmė mažėjanti  $\text{CH}_3\text{CCl}_3$  ir CFC (chlorfluorangliavandenilių) koncentracija. HCl yra pagrindinis chloro komponentas viršutinėje stratosferos dalyje. Jo kiekis 1997–2020 m. mažėjo vidutiniškai po  $0,5 \pm 0,2$  % per metus. Bendrasis bromas stratosferoje nuo piko 1999 m. iki 2020 m. sumažėjo 14,5 %. Jo sumažėjimą daugiausia lėmė mažėjantis metilo bromido ( $\text{CH}_3\text{Br}$ ) ir bromchlorodifluorometano ( $\text{CF}_2\text{ClBr}$ , vadinamojo halono-1211) kiekis. Bendrasis stratosferos bromas, bromo monoksido (BrO) stebėjimų duomenimis, nuo 2003 m. taip pat mažėja po 0,8 % per metus. Tačiau pasaulinė CFC-11 ( $\text{CFCl}_3$ ) emisija, tolygiai mažėjusi nuo 1995 m., 2013–2017 m. vėl ėmė augti – daugiausia dėl išlakų iš Rytų Kinijoje esančių šaltinių. Tik juos eliminavus, nuo 2018 m. CFC-11 emisija vėl ėmė mažėti ir dabar yra apie 45 Gg per metus (1995 m. buvo apie 95 Gg per metus). Toliau mažėja ir pasaulinė CFC-12 ( $\text{CF}_2\text{Cl}_2$ ) emisija: 2016 m. ji buvo apie 33 Gg per metus, o 2020 m. jau tik apie 25 Gg per metus. Šis sumažėjimas pasiektas nutraukus CFC-12 emisiją taip pat iš Rytų Kinijos šaltinių.

Tyrimai rodo, jog dėl šių priemonių ozono sluoksnis stabilizavosi ir ima lėtai atsikurti. Prognozuojama, kad bendrasis ozono kiekis vidutinėse abiejų pusrutulių platumose turėtų atsikurti ir pasiekti 1980 m. lygį 2035–2045 m., Arkties regione pavasariniai kiekiai atsikurs apie 2045 m., Antarktidos ozono skylė išnyks apie 2065 m. (žr. paveikslą), o tropinėse platumose iki pat 2100 m. išliks mažesnis nei 1980 metais. Šių prognozių išsipildymas priklausys



ARŪNAS  
BUKANTIS

OZONO  
SLUOKSNIO  
NYKIMAS,  
ATSIKŪRIMAS  
IR POVEIKIS  
KLIMATUI



nuo daugelio veiksnių: cheminių medžiagų koncentraciją ir dinamiką atmosferoje gali sutrikdyti tokie išskirtiniai įvykiai kaip ugnikalnio Hunga Tonga-Hunga Ha'apai išsiveržimas, tropinių platumų kvazidvimetės stratosferinių vėjų osciliacijos nepastovumas, vis dažnesni intensyvūs miškų gaisrai, kurių potencialus poveikis stratosferai dar nepakankamai kiekybiškai įvertintas, šiltnamio efektą sukeliančių dujų (ŠESD) emisija ir kt. Svarbu pabrėžti, kad ŠESD dujos sugeria nuo Žemės paviršiaus sklindančią infraraudonąją spinduliuotę ir pakelia oro temperatūrą tik priežeminėje troposferoje, tačiau didesniame aukštyje (stratosferoje) jos turi priešingą poveikį, nes neleidžia šilumai kilti.

## Stratosferos ozono poveikis Žemės klimato sistemai

Stratosferos ozonas daro didelę įtaką Žemės klimato sistemai. Ozono sluoksnio virš Antarktidos nykimas sukėlė troposferinių poliariinių sraujymų pasislinkimą ašigalių link, išplėtė Hadlėjaus gardelę ir tropinių oro masių ekspansijos į vidutines platumas galimybes, paveikė oro temperatūrą stratosferoje ir bendrąją atmosferos cirkuliaciją. Šie pokyčiai yra ryškiausi Pietų pusrutulyje, todėl ir santykinė ozono sluoksnio atsikūrimo svarba bus ypač reikšminga būsimam Pietų pusrutulio klimatui ir priklausys nuo ŠESD koncentracijos atmosferoje kitimo masto ir greičio.

Sumažėjęs ozono kiekis labiausiai paveikė ilgalaikes stratosferos temperatūros tendencijas – vidurinėje ir viršutinėje stratosferoje tebesitęsia atvėsimas 0,6 °C per dešimtmetį, o globali temperatūra žemutinėje stratosferoje nuo XX a. pabaigos beveik nekinta. Ateityje didėjanti ŠESD koncentracija ir ozono atsikūrimas bus pagrindiniai klimato veiksniai. Atsikūrimui, temperatūra stratosferoje pradės kilti, o oro masių apykaita tarp aukštų ir žemų platumų ims stiprėti. Tačiau ilgalaikes stratosferos atšilimo tendencijas pristabdys didėjanti ŠESD emisija ir jų koncentracija atmosferoje. Modeliavimo rezultatai patvirtina skirtingas Pietų pusrutulio atmosferos cirkuliacijos tendencijas ozono nykimo ir atsikūrimo laikotarpiams. Ozoną ardančių medžiagų tiesioginis energinis poveikis nuo 2016 m. sumažėjo 0,006 W/m<sup>2</sup> ir 2020 m. sudarė 0,337 W/m<sup>2</sup>. Tai sudaro maždaug 16 % CO<sub>2</sub> sukeliama energinio poveikio. Nauji tyrimai patvirtina ankstesnius vertinimus, kad ozoną ardančių medžiagų emisijos sumažinimas įgyvendinant Monrealio protokolą padėjo sulėtinti globalųjį klimato atšilimą 0,5–1 °C, padėjo išvengti žalingo UV spinduliuotės poveikio augalijai, fotosintezei ir anglies dioksido absorbcijai iš atmosferos. Tačiau nauji įrodymai patvirtina, kad ozono nykimas padarė menką (arba mažai tikėtiną) įtaką vandens paviršiaus temperatūros ir jūrinio ledo plotų kaitai Antarktidoje bei anglies apytakos ciklui Pietų vandenyne nuo 1979 metų.

Pabaigoje – sensacingi JAV mokslininkų teiginiai. Pasak Kolorado universiteto, Nacionalinės vandenynų ir atmosferos tyrimų administracijos (NOAA) ir NASA tyrėjų, stratosferinės ozono skylės virš Antarktidos išnykimas gali paskatinti atšilimą Pietų pusrutulyje ir visoje Žemėje. Iki šiol, šylant klimatui, Antarktida atliko unikalų (sukeltą ozono nykimo) vėsavimo efektą, kuris buvo ryškiausias Pietų pusrutulyje. Šie mokslininkai, modeliuodami NASA superkompiuteriu sąveikas tarp klimato ir stratosferinio ozono, apskaičiavo, kad jeigu mažinant ozoną naikinančių dujų emisiją bus pasiekta esminių rezultatų ir ozono skylės virš Antarktidos nebeliks, šiame regione gali prasidėti spartus temperatūros kilimas. Atsikūręs ozonas sugers daugiau UV spinduliuotės ir žemutinėje stratosferoje temperatūra gali pakilti 8–9 °C.

Taigi, „belopydami“ ozono skyles, galime sulaukti stiprios klimato atšilimo bangos. Kita vertus, pasak žymaus mimų kūrėjo Publilijaus Syro (Publilijus Syro) – pavojus niekada nenugalimas be pavojaus (lot. *Numquam periculum sine periculo vincitur*).



ARŪNAS  
BUKANTIS

OZONO  
SLUOKSNIO  
NYKIMAS,  
ATSIKŪRIMAS  
IR POVEIKIS  
KLIMATUI