

А.П. Уманець

ORCID: 0009-0008-4867-4430
umanets@uhmi.org.ua

С.В. Крайник

ORCID: 0009-0004-6299-0983
krajnik@uhmi.org.ua

М.В. Савенець

ORCID: 0000-0001-9429-6209
savenets@uhmi.org.ua

Український гідрометеоро-
логічний інститут
ДСНС України та НАН України,
Київ, Україна

УДК 551.510.413

DOI: <https://doi.org/10.15407/Meteorology2024.05.089>

ДИНАМІЧНІ УМОВИ ФОРМУВАННЯ ПРОСТОРОВИХ ЕКСТРЕМУМІВ ОЗОНОВОГО ШАРУ НАД ТЕРИТОРІЄЮ УКРАЇНИ

У статті розглядаються умови формування просторових екстремумів загального вмісту озону (ЗВО) над територією України спричинених динамічними умовами. На основі використання даних супутникових спостережень за ЗВО та параметрів вітру й геопотенційної висоти із реаналізу ERA5 у північній півкулі здійснено дослідження адвекції повітря зі значними відхиленнями ЗВО та класифіковано основні типи процесів, що до цього призводять. Встановлено 70 випадків формування просторових екстремумів, із яких 86% спостерігаються за умов адвекції повітря із західною складовою. Виявлено, що додатні відхилення ЗВО поширюються на територію України за умови зміщення стратосферного полярного вихору до східної півкулі, сприяючи наближенню зовнішньої межі вихору із високими концентраціями озону ближче до помірних широт. Від цілісності полярного вихору залежать варіативність процесів формування просторових екстремумів. На відміну від виключно західної і північно-західної адвекції за добре розвиненого стратосферного полярного вихору, порушення його цілісності може формувати як перенесення високого ЗВО із півночі, так і його локальне формування. Від'ємні відхилення ЗВО спостерігалися тільки восени — на початку зимового сезону в умовах сезонного мінімуму ЗВО при адвекції повітря у нижній стратосфері із західною складовою. Встановлені та описані динамічні умови формування екстремумів озонного шару є важливим для збільшення періоду завчасності прогнозування появи озонних аномалій над територією України.

Ключові слова: загальний вміст озону, стратосфера, адвекція, стратосферний полярний вихор.

ВСТУП

Озоновий шар відіграє ключову роль у поглинанні жорсткого ультрафіолетового (УФ) випромінювання, забезпечуючи життя живих організмів на суходолі (Barnes et al., 2019). Ця здатність озону є основною причиною прискіпливої уваги світової спільноти до постійного вивчення і моніторингу змін озонного шару. Поряд із цим, озон є важливим чинником формування температурного режиму стратосфери, що має наслідки і для метеорологічних умов тропосфери (Li et al., 2024; Shangguan et al., 2019). Як результат, активне дослідження озонного шару і спостереження за його станом й формуванням аномалій триває вже понад сторіччя (Rolf, 2009). Незважаючи на короткий час існування молекул озону, озоновий шар є достатньо стабільним утворенням, що забезпечується хімічною рівновагою його утворення й розкладу (Karadan et al., 2022). Варіативність стратосферного озону формується під впливом фотохімічного (Dütsch, 1968), хімічно-

го (Karadan et al., 2022), та динамічного (Hong and Reichler, 2021) чинників, та характеризується добре вираженою сезонною мінливістю над будь-якою територією планети.

Флуктуації озонного шару у помірних широтах характеризуються значною варіативністю умов у зв'язку із розташуванням між тропіками (із найінтенсивнішим утворенням озону в стратосфері) та полярними широтами (із особливостями надходження сонячного випромінювання протягом року через зміну полярного дня й ночі та формуванням стратосферного полярного вихору), що обумовлює накладання динамічних та фотохімічних факторів (Staehelin et al., 2002). У той час як фотохімічний чинник є переважаючим у північній півкулі влітку (Shin et al., 2020), в інші сезони року короткострокові варіації озону забезпечуються взаємною конфігурацією циркуляції Брюера-Добсона (меридіональне перенесення озону у напрямку до полюса) та стратосферного полярного вихору (Hu et al., 2023; Salby,

2008; Weber et al., 2011). Стратосферний полярний вихор є причиною низького вмісту загального вмісту озону (ЗВО) над Арктикою (Hu et al., 2023; Yu et al., 2024), при цьому ці ж самі процеси в Україні є причиною позитивних озонових аномалій (Дворецька та ін., 2021). Різкі стратосферні потепління значно впливають на циркуляцію Брюера-Добсона (Veenus et al., 2023), як наслідок активно досліджуються відгук ЗВО на варіації планетарних хвиль (Liu et al., 2021; Zhang et al., 2024). Від конфігурації циркуляційних умов залежить і максимуми розташування озону (за інтенсивного полярного вихору максимум озону формується одразу над тропопаузою (Harzer et al., 2023)), що у свою чергу визначає як зміни умов стабільності озонового шару, так і термічний режим стратосфери й стратосферно-тропосферну взаємодію.

Над територією України мінливість озонового шару є добре дослідженою, у тому числі й причини та умови формування сезонних максимумів і мінімумів (Дворецька, 2012; Дворецька та ін., 2021; Грицай та Міліневський, 2018; Могильчак та Міліневський, 2017). У той же час не так багато досліджень проводилося для визначення причин появи тих чи інших аномалій ЗВО, хоча їх формування не є однотипним та залежить від конкретних циркуляційних умов. Найвні дослідження для окремих сезонів (напр., Shi et al., 2022) та встановлення характерних закономірностей при здійсненні щодобового контролю стану озонового шару (напр., Савенець та ін., 2019). І хоча ми розуміємо загальні причини формування озонових аномалій над територією України, у нас залишається мало вивченими повторюваність тих чи інших динамічних процесів, що сприяють появі аномалій над територією України. Розуміння цих динамічних процесів дозволить прогнозувати появу екстремальних відхилень ЗВО над територією України із завчасністю кілька діб, а відповідно і завчасно виявити можливі аномальні відхилення УФ опромінення або потенційно сприятливі умови до визначення більш точного періоду настання інтенсифікації стратосферно-тропосферної взаємодії.

Тому, метою даних досліджень є встановлення динамічних умов, що сприяють появі екстремумів озонового шару над територією України і їх класифікація за типовими ознаками. Стаття складається із чотирьох складових частин. На першому етапі описано вхідні дані для аналізу та використані методи досліджень. На другому етапі проаналізовано діапазони відхилення ЗВО за кліматичний період для встановлення величини відхилень, що формують просторові екстремуми. На їх основі встановлено загальну повторюваність адвекції повітряних мас, що формують просторові екстремуми. Останнім

етапом є визначення типових динамічних умов, що спостерігаються за тієї чи іншої адвекції повітряних мас.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Проведені дослідження здійснено із використанням двох періодів спостережень, з різною метою. Перший період, кліматичний, із 1991 по 2020 рр., — охоплював ряди щоденних супутникових спостережень за ЗВО, обраний для аналізу відхилень і визначення вмісту, який застосовувався для ідентифікації просторових екстремумів. Другий період — сучасний, із січня 2022 р. по серпень 2024 р., — використовувався для детального аналізу ЗВО над територією північної півкулі та дослідження процесів, що зумовлюють формування просторових екстремумів озонового шару.

У зв'язку із необхідністю збереження однорідності рядів спостережень ЗВО (у одиницях Добсона, далі о.Д.), у роботі використано супутникові дані двох приладів Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) та Ozone Monitoring Instrument (OMI) із серії з трьох послідовних супутникових місій. Усі дані були вивантажені із архівів NASA Ozone Watch (<https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov>, accessed on 20.09.2024). Для періоду 1991–1993 рр. використано дані супутника NASA/NOAA Nimbus-7 з приладом TOMS на борту і просторовою роздільною здатністю 1.25° довготи на 1.00° широти (<https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/data/nimbus7/>, accessed on 20.09.2024). Період з 1996 р. по 2004 р. охоплений даними супутника NASA Earth Probe з приладом TOMS на борту (<https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/data/eptoms/>, accessed on 20.09.2024), що має просторову роздільну здатність 1.25° довготи на 1.00° широти. І період з 2004 р. до 2024 р. охоплений даними супутника Aura з приладом OMI на борту (<https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/data/omi/>, accessed on 20.09.2024) з просторовою роздільною здатністю 1.00° довготи на 1.00° широти.

Метеорологічну інформацію для визначення динамічних умов формування озонових екстремумів взято із реаналізу ERA5 (Hersbach et al., 2023) представленою на порталі Climate Data Store (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>, accessed on 20.09.2024). Зокрема використано набір щогодинної інформації на ізобаричних рівнях про геопотенційну висоту та *u, v* компоненти вітру. Враховуючи висоти розташування максимальних концентрацій озону у вертикальному профілі, для аналізу динамічних умов обрано ізобаричний рівень 50 гПа, що відповідає висоті близько 21 км над рівнем моря.

Враховуючи просторову роздільну здатність обраних супутників та відносну однорідність просто-

рового розподілу ЗВО над територією України (Дворецька та ін., 2021), для аналізу щільності розподілу ймовірностей ЗВО обрано міста Київ, Львів, Одеса та Луганськ, що достатньо для охоплення можливих варіацій розподілу ЗВО над територією України. Значення ЗВО обрано за тим пікселем супутника, що покриває територію цих міст. Напрямок адвекції повітряних мас на висотах встановлювався на основі аналізу баричного поля та характеристик вітру за 24 години до моменту зондування супутником території України (близько 13:30 за місцевим часом).

РЕЗУЛЬТАТИ І ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Визначення діапазону відхилень ЗВО для дослідження умов формування просторових екстремумів. Першочерговим кроком для дослідження умов формування просторових екстремумів ЗВО над територією України є необхідність встановлення таких концентрацій озону, які формують окремі осередки високого чи низького вмісту. Це вимагає використання достатньої кількості даних для формування точних оцінок цих рівнів. З цією метою обрано оновлений 30-річний кліматичний період

1991–2020 рр. Детально описувати середньостатистичний стан озонного шару над територією України для цього періоду немає потреби, так як у дослідженнях Дворецької та ін. (2021) проаналізовано базові для цього показники. Наявність актуальних кліматичних норм ЗВО дозволяє у даній роботі сфокусувати увагу виключно на визначенні діапазону відхилень, що формують просторові екстремуми, використавши аналогічний період спостережень.

На першому етапі здійснено побудову щільності розподілу ймовірностей у точках, що відповідають обласним центрам території України за період 1991–2020 рр. На *рис. 1* зображено функції щільності ймовірностей над обласними центрами на півночі (Київ), півдні (Одеса), заході (Львів) та сході (Луганськ), яких достатньо для оцінки усього діапазону змін функцій розподілу ЗВО над територією України. Поряд із загальним розподілом, представлено його сезонні відмінності. Як було показано у Дворецька та ін. (2021), річний хід ЗВО над територією України характеризується максимальними значеннями у березні та мінімальними у жовтні, пов'язаними із особливостями перебігу циркуля-

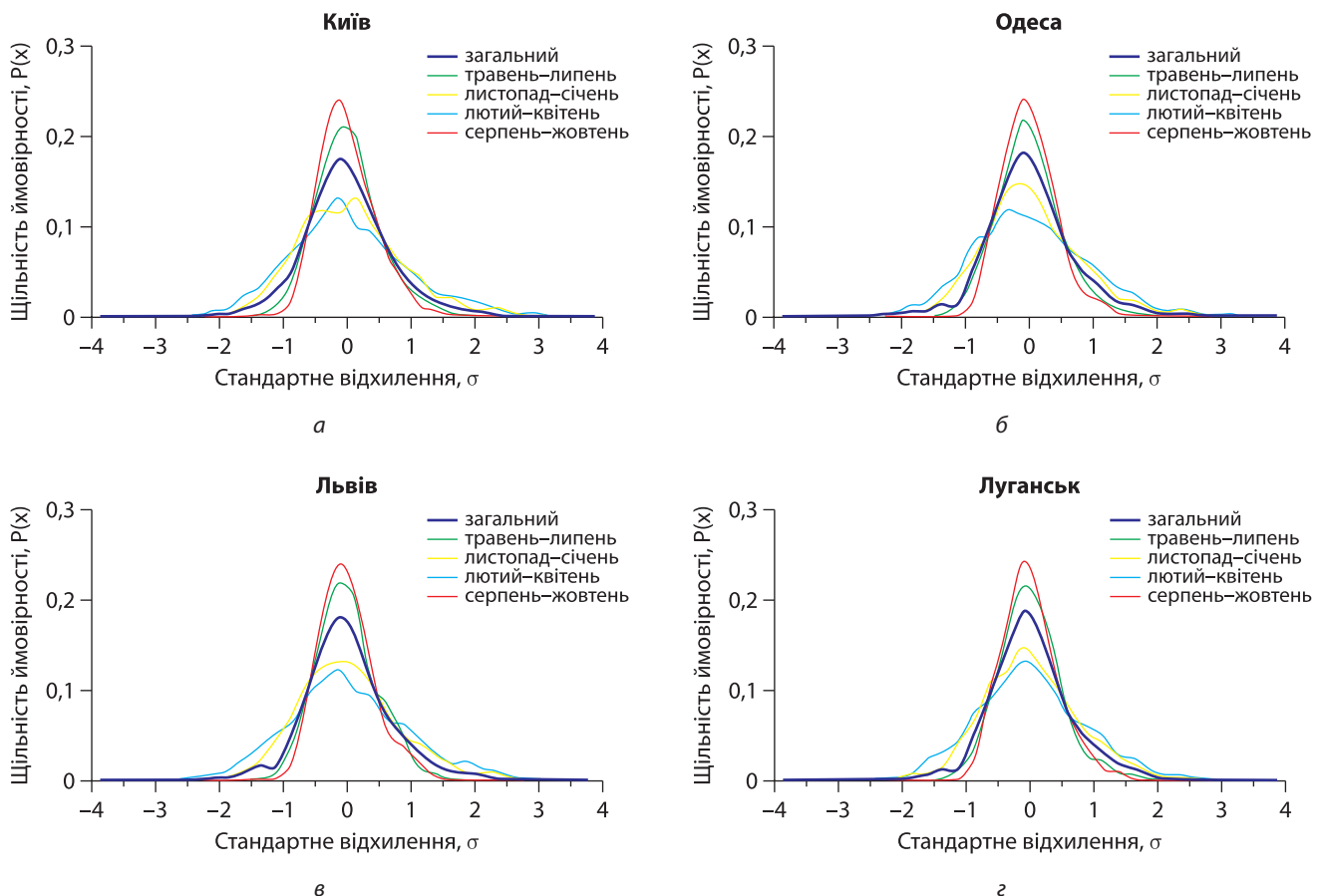


Рис. 1. Щільність розподілу ймовірностей ЗВО за тридцятирічний період (1991–2020 рр.) на прикладі Києва (а), Одеси (б), Львова (в) та Луганська (з)

ції Брюера-Добсона, формуванням і руйнуванням стратосферного полярного вихору, притоком сонячного випромінювання до північної півкулі та хімічними реакціями утворення і руйнування озону. Тобто, застосовувати звичний поділ на літній, осінній, зимовий та весняний сезони у випадку озонного шару є недоречним. Натомість, доцільним розглядати період з лютого по квітень із максимальним ЗВО, період серпень–жовтень із мінімальним ЗВО, та два перехідних сезони, які припадають на травень–липень та листопад–січень.

Загалом, відносна однорідність розподілу ЗВО над територією України сприяє формуванню подібних статистичних розподілів над будь-яким районом території України (див. *рис. 1*). Більш гостровершинні розподіли формуються у період з травня по жовтень, що у річному ході ЗВО відповідає періоду зменшення концентрацій до мінімальних значень. У той же час, варіативність зростає у період з листопада до квітня, коли ЗВО починає зростати та досягає свого сезонного максимуму у березні. На *рис. 1* чітко простежуються більший розкид відхилень ЗВО у цей час. Спостерігається формування незначних просторових відмінностей між статистичними розподілами ЗВО. Зокрема, на півночі території України мода розподілу зміщується в сторону додатних відхилень протягом листопада–січня (*рис. 1а*), що не спостерігається над іншими районами. Протягом найбільш варіативного періоду з лютого по квітень, на південному-заході, півдні, та заході території України формується асиметрія розподілу зі зміщенням моди в сторону від'ємних відхилень (*рис. 1б, в*).

Аналіз розподілу відхилень ЗВО за кліматичний період показав, що 95% усіх значень спостерігаються в межах $\pm 1,5\sigma$. Цей показник є вищим, ніж у класичному варіанті нормального закону розподілу, де 95% значень розподілені в межах $\pm 2,0\sigma$ (Март, 2010, р.107), що зайвий раз підтверджує досить високу однорідність розподілу ЗВО протягом року. Значення ЗВО, що відповідають межі у $\pm 1,5\sigma$ є близько 260 о.Д. та 400 о.Д. Звичайно такі відхилення не можна вважати аномальними, проте вони є достатньо значними та, зазвичай, спостерігаються у вигляді окремих осередків, формуючи просторові екстремуми. Саме такі відхилення, повторюваність яких спостерігається у близько 5% випадків, будемо вважати у подальшому значними. Для них буде здійснюватися дослідження умов формування над територією України.

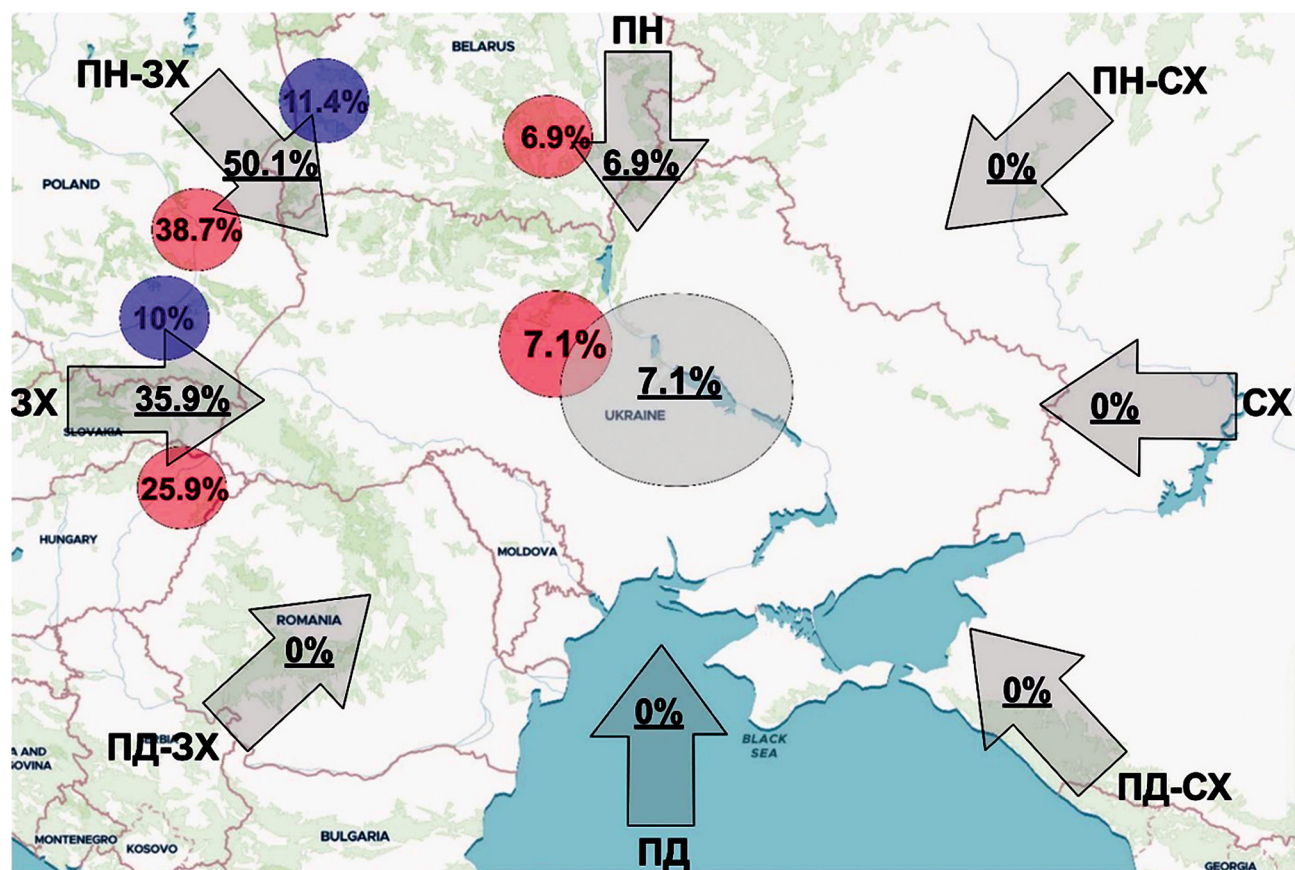
Повторюваність адвекції повітряних мас, що формують просторові екстремуми ЗВО. Дослідження напрямків адвекції повітряних мас, що призводили до формування просторових екстремумів

ЗВО над або поблизу території України з відхиленнями ЗВО поза діапазону $\pm 1,5\sigma$, проведено на основі сумісного аналізу полів ЗВО у північній півкулі, а також геопотенційної висоти та поля вітру на ізобаричному рівні 50 гПа. Загалом, за досліджуваний період із січня 2022 до серпня 2024 рр. виявлено 70 випадків формування локальних осередків високого або низького ЗВО поблизу території України. Із них ЗВО перевищував 400 о.Д. у 55 випадках та був нижчим за 260 о.Д. у 15 випадках. Відносний розподіл повторюваності появи локальних просторових екстремумів залежно від напрямків адвекції повітряних мас у нижній стратосфері представлено на *рис. 2*. При цьому, формування значних просторових екстремумів ЗВО не спостерігалось жодного разу за досліджуваний період протягом червня–серпня, тоді як їх найбільша кількість була характерна для лютого–березня у період найвищих сезонних значень ЗВО у помірних широтах північної півкулі. Відсутність значних відхилень у літні місяці є наслідком інтенсивного потоку сонячного випромінювання, що посилюють фотохімічну рівновагу озонного шару, та послаблення інтенсивності циркуляційних процесів у північній півкулі.

Переважаюче західне перенесення на висотах близько 20 км призводить до того, що більшість виявлених просторових екстремумів ЗВО пов'язані із процесами з цього напрямку. Роль західної складової атмосферного перенесення відповідало за 86% зафіксованих випадків, при цьому половина із загальної кількості (50,1%) припадає на адвекцію повітря з північного заходу (див. *рис. 2*). Незважаючи на те, що близько 14% випадків припадає на адвекцію з півночі та локальне формування екстремумів ЗВО, західне перенесення (а точніше особливості положення стратосферного полярного вихору) залишається ключовим процесом і їх формування, про що детально розглянуто нижче. Жодного випадку подібної адвекції не зафіксовано для процесів із південною та східною складовою.

У той час як формування значних додатних відхилень ЗВО прослідковується протягом першої половини року із січня до травня, переважна кількість від'ємних відхилень спостерігається у другій половині року протягом вересня — грудня (21,4%) і пов'язані виключно із західною та північно-західною адвекцією повітря.

Типові динамічні умови формування просторових екстремумів ЗВО. Незважаючи на відносно значну кількість виявлених випадків (70 за досліджуваний період) появи просторових екстремумів озонного шару в районі території України, процеси їх формування можна узагальнити у шість основних типів. Більшість із них пов'язані, в першу чергу, зі



- ➔ напрямок адвекції повітря з позначенням повторюваності випадків формування досліджуваних відхилень ЗВО
- локальне формування просторових екстремумів та їх повторюваність
- повторюваність досліджуваних додатних відхилень під час адвекції повітря певного напрямку
- повторюваність досліджуваних від'ємних відхилень під час адвекції повітря певного напрямку

Рис. 2. Розподіл повторюваності (%) появи просторових екстремумів ЗВО над територією України залежно від напрямку адвекції повітряних мас за період 2022–2024 рр.

змінами положення та інтенсивності стратосферного полярного вихору, що накладається на загальні закономірності перенесення озону циркуляцією Брюера–Добсона на фоні сезонних варіацій радіаційного режиму північної півкулі. Лише незначна частина випадків формування високого (починаючи з квітня) та низького (серпень–листопад) ЗВО виникають за умов відсутності стратосферного полярного вихору та незначних баричних градієнтах на висотах.

Для розуміння формування локальних екстремумів ЗВО над територією України потрібно врахувати географічне положення України, яка розташована, зазвичай, на південь від полярного вихору. Так як максимальне накопичення озону у північній півкулі відбувається протягом холодного сезону на зовнішній межі стратосферного полярного вихору, відповідно і формування значних відхилень ЗВО може виникати у тому випадку, коли зовнішня межа стратосферного полярного вихору опиняється

поблизу території України. Тобто за умови просторового зміщення полярного вихору до східної частини північної півкулі або у випадку порушення цілісності вихору.

Як видно із рис. 2, найчастіше поява високих значень ЗВО над територією України відбувається при адвекції повітря із заходу чи північно-заходу. Типовий розподіл геопотенціалу та поля вітру при цьому зображено на рис. 3-А1, А2, Б1, Б2. Для адвекції із західною складовою повітря зі значними додатними відхиленнями ЗВО на територію України необхідне зміщення положення стратосферного полярного вихору до східної частини північної півкулі. Лише у такому разі територія України опиняється на зовнішній межі полярного вихору, де й спостерігається накопичення озону, спричинене блокуванням подальшого перенесення на північ за циркуляцією Брюера–Добсона, яка транспортує озон із низьких до високих широт. При цьому полярний вихор має бути добре розвинений

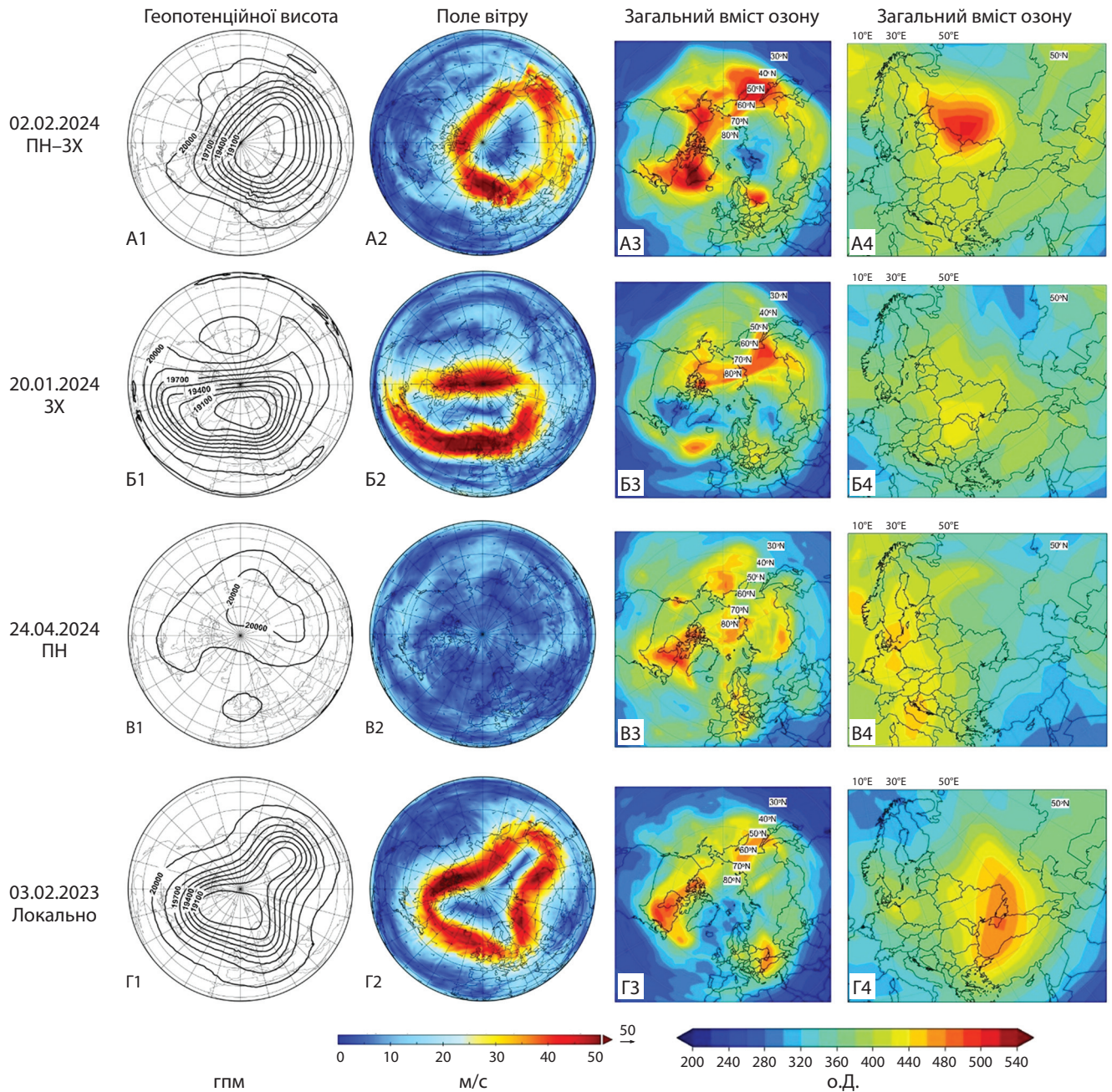


Рис. 3. Характерний просторовий розподіл значень геопотенційної висоти (A1–Г1) та поля вітру (A2–Г2) на ізобаричному рівні 50 гПа за різних напрямів адвекції повітря, що формують осередки високого ЗВО (A3–Г4) над або поблизу території України

зі значними міжширотними баричними градієнтами. Як бачимо із рис. 3-A1 та B1 різниця геопотенційної висоти на рівні 50 гПа між полюсом та помірними широтами у таких випадках сягає 1400–1500 гпм (від близько 18700 гпм поблизу полюсу до 20100 гпм в помірних широтах), а швидкість вітру місцями перевищує 50 м/с (рис. 3-A2, B2). Кількість озону, що накопичується за таких умов на зовнішній межі стратосферного полярного вихору залежить від місяця та може досягати 450–500 о.Д. і пере-

вищувати 550 о.Д. у лютому (див. приклад випадків на рис. 3-B1, B2). У цей час поблизу території України можуть переноситися повітряні маси збагачені озonom, що формують відокремлені локальні екстремуми у просторовому розподілі досягаючи 400–500 о.Д. залежно від місяця (напр., рис. 3-Г1, Г2). Як правило, за добре розвинуеного стратосферного полярного вихору, адвекції повітря із півночі та локальне формування високих значень ЗВО не спостерігається.

У випадку, коли порушується цілісність стратосферного полярного вихору, центр низького тиску над полярними районами може розбиватися на кілька осередків, а форма самого полярного вихору набуває хвилеподібної структури, внаслідок якої повітря із північних районів здатне поширюватися на південь. Це єдині сприятливі динамічні умови, за яких локальний максимум ЗВО може формуватися безпосередньо над територією України, а не бути наслідком адвекції. Основною умовою є розташування зовнішньої межі полярного вихору безпосередньо над територією України (див. *рис. 3, ряд Г1–Г4*), внаслідок чого тут починає спостерігатися накопичення озону перенесеного циркуляцією Брюера–Добсона. У випадку формування локальних максимумів ЗВО безпосередньо над територією України, абсолютні значення ЗВО, швидкості вітру та геопотенційної висоти подібні до випадків адвекції із заходу та північного заходу. Відмінність спостерігається саме у циркуляційних умовах. Теоретично, порушення цілісності стратосферного полярного вихору може сприяти адвекцію високих рівнів ЗВО із південного-заходу (розташування території України перед зоною затоку повітря із полярних широт в помірні) або з півночі (розташування території України в тилу зони затоку полярного повітря), проте таких випадків за досліджуваний період не спостерігалось.

Найсприятливіші умови для адвекції повітря із півночі із відхиленнями ЗВО вищими за $1,5\sigma$ виникають в кінці холодного сезону при частковому або повному руйнуванні стратосферного полярного вихору (напр., *рис. 3-В1, В2*). Значні просторові баричні градієнти зникають, а тому над різними частинами північної півкулі у будь-який момент часто спостерігаються різнонаправлена адвекція. ЗВО у цей час починає стрімко зменшуватися до середніх багаторічних рівнів, а максимальні значення, зазвичай, не перевищують 440 о.Д.

Процеси, що призводять до виникнення просторових мінімумів ЗВО над територією України менш різноманітні, і за досліджуваний період спостерігалися лише дві можливі конфігурації, зображені на *рис. 4*; завжди за умов адвекції повітря із західною складовою. Виникнення значних від'ємних відхилень ЗВО переважно спостерігається за їх сезонного мінімуму в період з вересня до грудня. До середини жовтня, доки просторові баричні градієнти незначні і, як наслідок, швидкості вітру у стратосфері відносно малі (*рис. 4-А1, А2*), адвекція повітряних мас із низьким ЗВО відбувається із північного заходу, зтягаючи повітря із полярних районів. Загалом, локальні просторові мінімуми озону не є небезпечними і складають близько 240–260 о.Д. (*рис. 4-А3, А4*).

Із початком розвитку стратосферного полярного вихору у грудні, посилюється західне перенесення у

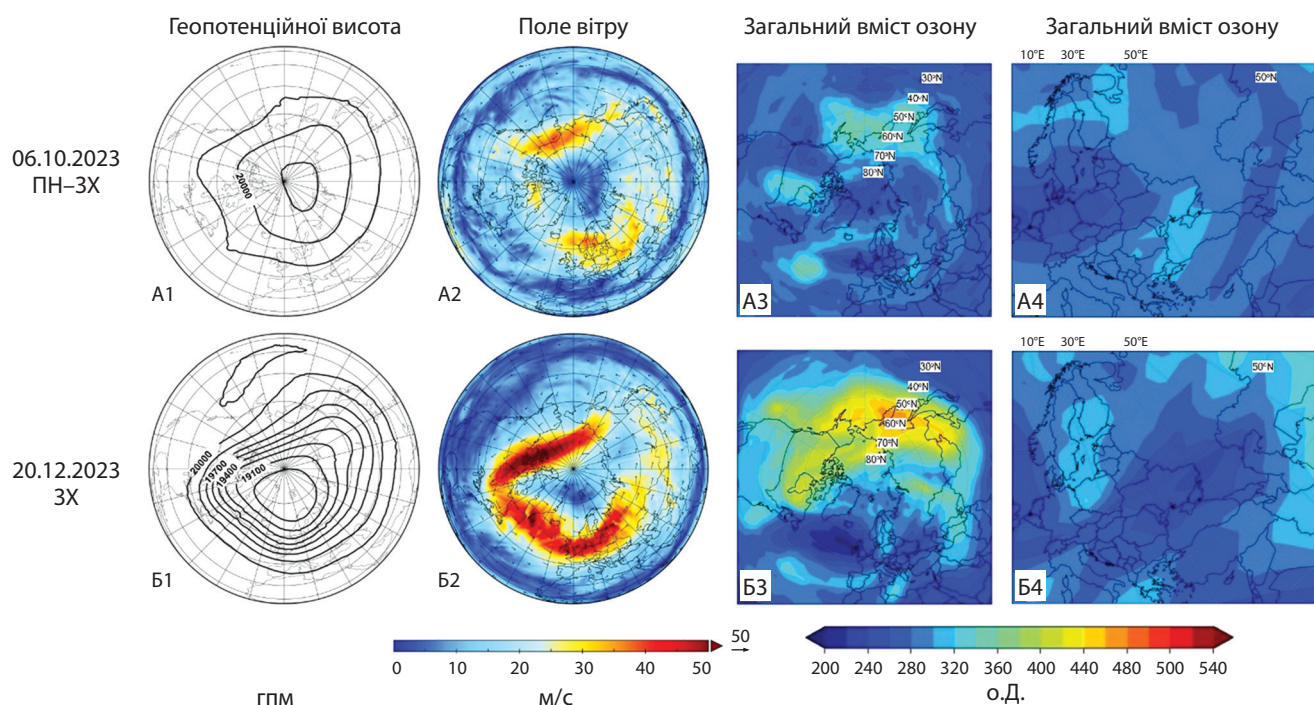


Рис. 4. Характерний просторовий розподіл значень геопотенційної висоти (А–В1) та поля вітру (А–В2) на ізобаричному рівні 50 гПа за різних напрямів адвекції повітря, що формують осередки низького ЗВО (А3–Б4) над або поблизу території України

нижній стратосфері. Абсолютні значення геопотенційної висоти та швидкості вітру стають типовими для усього зимового сезону (напр., рис. 4-Б1, Б2). ЗВО, характеризуючись ще наявністю осередків сезонного низького вмісту, не пов'язаними із утворенням в межах вихору над полярними широтами, починає переноситися на зовнішній межі стратосферного полярного вихору. Як наслідок, територія України опиняється під впливом адвекції повітряних мас із низьким ЗВО, що може бути нижчим за 240 о.Д. (рис. 4-Б3, Б4). У кінці грудня – початку січня ЗВО починає різко зростати внаслідок акумуляції озону, перенесеного із низьких широт циркуляцією Брюера–Добсона, і територія України знову опиняється під впливом процесів, що формують локальні просторові максимуми ЗВО.

Обговорення. Отримані результати показують, що формування будь-яких екстремумів над територією України характеризуються динамічним фактором. При цьому, у часових масштабах від кількох діб до моменту початку фіксації екстремумів ЗВО, зміна стратосферного полярного вихору є визначальним фактором. Саме розташування та інтенсивність стратосферного полярного вихору вже визначає напрямок адвекції повітряних мас із тим чи іншим ЗВО, просторовий розподіл якого вже сформувався циркуляцією Брюера–Добсона (напр., накопичення озону на зовнішній межі полярного вихору вже відбулося). Аналіз напрямків адвекції для досліджуваного періоду показав, що переміщення екстремумів озонного шару в район розташування території України переважно має західну складову. Умови локального формування екстремумів або адвекції із півночі є лише регіональною тимчасовою особливістю загального західного перенесення у північній півкулі в холодний сезон року. Потрібно розуміти, що обмежений період для проведених досліджень адвекції повітряних мас міг не врахувати усього можливого діапазону процесів, який би ми мали змогу спостерігати за кліматичний період. Зокрема, при щодобовому контролі у попередні роки спостерігалися випадки формування озонних екстремумів при адвекції зі східною складовою (Дворецька та ін., 2021). Проте детальне дослідження усього кліматичного періоду вимагає значного часу та ресурсів, і може бути поступово реалізоване у майбутньому.

Представлені результати покликані дослідити виключно регіональні особливості формування аномалій, розглядаючи результуючу циркуляцію у стратосфері як початкову точку відліку досліджування процесів. У подальших роботах виникатиме потреба встановлення закономірностей перебігу динамічних процесів різних часових масштабів,

у тому числі і випадків різких стратосферних потеплень, які визначають зміни циркуляції Брюера–Добсона ще у тропічних широтах (Veenus et al., 2023). Окремим популярним напрямком досліджень зараз є фокусування уваги на планетарних хвилях та тропосферно-стратосферній взаємодії у північній півкулі (напр., Liu et al., 2021), до чого активно долучаються й українські науковці (напр. Shi et al., 2022; Zhang et al., 2024). Такі дослідження охоплюють процеси більших часових масштабів та покликані виявити більш загальні закономірності, що передують тим процесам, які досліджувалися у даній роботі.

Загалом, усі процеси, що формують екстремуми озонного шару мають важливе значення не тільки з точки зору озонних дір чи потоку УФ опромінення. Аномальне зростання чи зменшення озону, зумовлене динамічними факторами, може мати і значні зворотні ефекти на циркуляцію, у тому числі через посилення низхідних рухів на тропосферу (Salby et al., 2008). А останні дослідження навіть вказують на вплив і на загальну циркуляцію атмосфери (Hufnagl et al., 2023).

ВИСНОВКИ

Формування озонних екстремумів у просторовому розподілі над територією України носить виключно динамічний характер, пов'язаний із взаємодією меридіональної циркуляції Брюера–Добсона та зонального стратосферного полярного вихору. Як наслідок, протягом червня–серпня, коли обидві циркуляції не розвинені у північній півкулі, значних відхилень ЗВО за досліджуваний період не спостерігалося. Натомість, найбільшу кількість екстремумів ідентифіковано протягом лютого–березня за найвищого ЗВО та ще досить добре розвиненого стратосферного полярного вихору.

Інтенсивний західний потік у нижній стратосфері є причиною, як адвекції повітря із високим ЗВО, так і його локального формування. За добре розвиненого полярного вихору більшість екстремумів озону переноситься за основним потоком і надходить до території України із заходу та північного заходу, формуючи значні додатні відхилення. При цьому сам полярний вихор має бути зміщеним у східну півкулю, щоб територія України опинилася ближче до його зовнішньої межі. За умов порушення цілісності полярний вихор набуває хвилеподібної структури, що сприяє виникненню більшої різноманітності процесів формування озонних екстремумів над територією України, у тому числі адвекція ЗВО із півночі й локальна поява. Із руйнуванням полярного вихору та початком стрімкого зменшення ЗВО в кінці березня–квітні зростає ймовірність надходження позитивних озонних відхилень із півночі, проте

їх повторюваність не перевищує 7% від загальної кількості екстремумів.

Значні від'ємні відхилення ЗВО поширюються на територію України протягом періоду із сезонними мінімумами за двох умов: адвекція з північного заходу протягом періоду із відсутнім стратосферним полярним вихором (до листопада); та адвекція із заходу на початкових стадіях формування вихору (у грудні).

Проведені дослідження розширюють уявлення про причинно-наслідковий зв'язок формування просторових екстремумів озонного шару над територією України в масштабі кількох діб. Врахування динамічного фактору може дозволити збільшити завчасність прогнозування озонних аномалій на кілька діб та деталізувати умови, за яких відбуваються зміни термічних умов нижньої стратосфери спричинені різкими варіаціями озону.

ЛІТЕРАТУРА

- Дворецька, І.В. (2012). Особливості динаміки загального вмісту озону в сучасний період. *Наукові праці УкрНДГМІ*, 262, 257–271.
- Дворецька, І.В., Савенець, М.В., & Уманець, А.П. (2021). Оновлені кліматичні норми загального вмісту озону над територією України. *Український гідрометеорологічний журнал*, 28, 5–15. <https://doi.org/10.31481/uhmj.28.2021.01>
- Грицай, А.В., & Міліневський, Г.П. (2018). Загальний вміст озону над станцією Київ-Голосіїв за наземними і супутниковими вимірюваннями у 2010–2015 рр. *Космічна наука і технологія*, 24 (3), 40–54. <https://doi.org/10.15407/knit2018.03.040>
- Могильчак, В.Ю., & Міліневський, Г.П. (2017). Варіації загального вмісту озону в атмосфері над територією України. *Космічна наука і технологія*, 23 (2), 41–47. <https://doi.org/10.15407/knit2017.02.041>
- Савенець, М.В., Дворецька, І.В., Уманець, А.П., & Гречана, Н.В. (2020). Стан озонного шару та рівня ультрафіолетового опромінення над територією України у 2019 році. *Український гідрометеорологічний журнал*, 25, 53–62. <https://doi.org/10.31481/uhmj.25.2020.05>
- Barnes, P.W., Williamson, C.E., Lucas, R.M., Robinson, S.A., Madronich, S., Paul, N.D., Bornman, J.F., Bais, A.F., Sulzberger, B., Wilson, S.R., Andraday, A.L., McKenzie, R.L., Neale, P.J., Austin, A.T., Bernhard, G.H., Solomon, K.R., Neale, R.E., Young, P.J., Norval, M., Rhodes, L.E., Hylander, S., Rose, K.C., Longstreth, J., Aucamp, P.J., Ballare, C.L., Cory, R.M., Flint, S.D., de Groot, F.R., Hader, D.-P., Heikkilä, A.M., Jansen, M.A.K., Pandey, K.K., Robson, T.M., Sinclair, C.A., Wangberg, S., Worrest, R.C., Yazar, S., Young, A.R., & Zepp, R.G. (2019). Ozone depletion, ultraviolet radiation, climate change and prospects for a sustainable future. *Nature Sustainability*, 2, 569–579. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0314-2>.
- Dütsch, H.U. (1968). The photochemistry of stratospheric ozone. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, 94 (402), 483–497. <https://doi.org/10.1002/qj.49709440205>
- Harzer, F., Garny, H., Ploeger, F., Bönisch, H., Hoor, P., & Birner, T. (2023). On the pattern of interannual polar vortex–ozone co-variability during northern hemispheric winter. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23, 10661–10675. <https://doi.org/10.5194/acp-23-10661-2023>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Sossi, C., Dee, D., Thépaut, J.-N. (2023). ERA5 hourly data on pressure levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). <https://doi.org/10.24381/cds.bd0915c6> (Accessed on 20.09.2024)
- Hong, H.-J., & Reichler, T. (2021). Local and remote response of ozone to Arctic stratospheric circulation extremes. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21, 1159–1171. <https://doi.org/10.5194/acp-21-1159-2021>
- Hu, D., Shi, S., & Wang Z. (2023). Link between Arctic ozone and the stratospheric polar vortex. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 16(1), 100293. <https://doi.org/10.1016/j.aosl.2022.100293>
- Hufnagl, L., Eichinger, R., Garny, H., Birner, T., Kuchař, A., Jöckel, P., & Graf, P. (2023). Stratospheric Ozone Changes Damp the CO₂-Induced Acceleration of the Brewer–Dobson Circulation. *Journal of Climate*, 36, 3305–3320. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-22-0512.1>
- Karadan, M., Raju, P., & Devara, P. (2022). An Overview of Stratospheric Ozone and Climate Effects. *Earth and Planetary Science*, 1 (2), 19–34. <https://doi.org/10.36956/eps.v1i2.782>
- Li, Y., Xia Y., Xie, F., & Yan Y. (2024). Influence of stratosphere-troposphere exchange on long-term trends of surface ozone in CMIP6. *Atmospheric Research*, 297, 107086. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.107086>
- Liu, M., & Hu, D. (2021). Different Relationships between Arctic Oscillation and Ozone in the Stratosphere over the Arctic in January and February. *Atmosphere*, 12, 129. <https://doi.org/10.3390/atmos12020129>
- Mann, P.S. (2010). *Introductory Statistics*, Seventh Edition. John Wiley & Sons.
- Rolf, M. (2009). A brief history of stratospheric ozone research. *Meteorologische Zeitschrift*, 18 (1), 3–24. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2009/353>
- Salby, M.L. (2008). Involvement of the Brewer–Dobson circulation in changes of stratospheric temperature and ozone. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 44 (3–4), 143–164. <https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2006.11.002>
- Shangguan, M., Wang, W., & Jin, S. (2019). Variability of temperature and ozone in the upper troposphere and lower stratosphere from multi-satellite observations and reanalysis data. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19, 6659–6679. <https://doi.org/10.5194/acp-19-6659-2019>
- Shi, Y., Evtushevsky, O., Milinevsky, G., Klekociuk, A., Han, W., Ivaniha, O., Andrienko, Y., Shulga, V., & Zhang, C. (2022). Zonal Asymmetry of the Stratopause in the 2019/2020 Arctic Winter. *Remote Sensing*, 14, 1496. <https://doi.org/10.3390/rs14061496>
- Shin, D., Song, S., Ryoo, S.-B., & Lee, S.-S. (2020). Variations in Ozone Concentration over the Mid-Latitude Region Revealed by Ozone Sonde Observations in Pohang, South Korea. *Atmosphere*, 11, 746. <https://doi.org/10.3390/atmos11070746>
- Stahelin, J., Mäder, J., Weiss, A. K., & Appenzeller, C. (2002). Long-term ozone trends in Northern mid-latitudes with special emphasis on the contribution of changes in dynamics. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 27 (6–8), 461–469. [https://doi.org/10.1016/S1474-7065\(02\)00027-X](https://doi.org/10.1016/S1474-7065(02)00027-X)
- Veenus, V., Shankar Das, S., & David L.M. (2023). Ozone Changes Due To Sudden Stratospheric Warming-Induced Variations in the Intensity of Brewer-Dobson Circulation: A Composite Analysis Using Observations and Chemical-Transport Model.

- Geophysical Research Letters*, 50 (13), e2023GL103353. <https://doi.org/10.1029/2023GL103353>
- Weber, M., Dikty, S., Burrows, J.P., Garny, H., Dameris, M., Kubin, A., Abalichin, J., & Langematz, U. (2011). The Brewer-Dobson circulation and total ozone from seasonal to decadal time scales. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 11221–11235. <https://doi.org/10.5194/acp-11-11221-2011>
- Yu, Y., Wu, Y., Zhang, J., Cui, Z., Shi, C., Rao, J., Guo, D., & Xia X. (2024). Connections between low- and high-frequency variabilities of stratospheric northern annular mode and Arctic ozone depletion. *Environmental Research Letters*, 19, 044040. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad2c24>
- Zhang, C., Grytsai, A., Evtushevsky, O., Milinevsky, G., Andrienko, Y., Shulga, V., Klekociuk, A., Rapoport, Y., & Han, W. (2024). Study on the Rossby Waves Parameters in Total Ozone Over the Arctic in 2000–2021. *Research Advances in Environment, Geography and Earth Science*, 3, 72–92. <https://doi.org/10.9734/bpi/raeges/v3/7572B>

REFERENCES

- Barnes, P.W., Williamson, C.E., Lucas, R.M., Robinson, S.A., Madronich, S., Paul, N.D., Bornman, J.F., Bais, A.F., Sulzberger, B., Wilson, S.R., Andradý, A.L., McKenzie, R.L., Neale, P.J., Austin, A.T., Bernhard, G.H., Solomon, K.R., Neale, R.E., Young, P.J., Norval, M., Rhodes, L.E., Hylander, S., Rose, K.C., Longstreth, J., Aucamp, P.J., Ballare, C.L., Cory, R.M., Flint, S.D., de Gruijl, F.R., Hader, D.-P., Heikkilä, A.M., Jansen, M.A.K., Pandey, K.K., Robson, T.M., Sinclair, C.A., Wangberg, S., Worrest, R.C., Yazar, S., Young, A.R., & Zepp, R.G. (2019). Ozone depletion, ultraviolet radiation, climate change and prospects for a sustainable future. *Nature Sustainability*, 2, 569–579. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0314-2>
- Dütsch, H.U. (1968). The photochemistry of stratospheric ozone. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, 94 (402), 483–497. <https://doi.org/10.1002/qj.49709440205>
- Dvoretzka, I.V. (2012). The features of total ozone dynamics during the modern period. *Naukovi pratsi UkrNDGMI*, 262, 257–271.
- Dvoretzka, I.V., Savenets, M.V., & Umanets, A.P. (2021). Updated total ozone climate normals over the territory of Ukraine. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*, 28, 5–15. <https://doi.org/10.31481/uhmj.28.2021.01>
- Grytsai, A.V., & Milinevsky, G. P. (2018). Total ozone content over KYIV-GOLOSEYEV station by ground-based and satellite measurements in 2010–2015. *Space Science and Technology*, 24 (3), 40–54. <https://doi.org/10.15407/knit2018.03.040>
- Harzer, F., Garny, H., Ploeger, F., Bönisch, H., Hoor, P., & Birner, T. (2023). On the pattern of interannual polar vortex–ozone co-variability during northern hemispheric winter. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23, 10661–10675. <https://doi.org/10.5194/acp-23-10661-2023>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., Thépaut, J.-N. (2023). ERA5 hourly data on pressure levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). <https://doi.org/10.24381/cds.bd0915c6> (Accessed on 20.09.2024)
- Hong, H.-J., & Reichler, T. (2021). Local and remote response of ozone to Arctic stratospheric circulation extremes. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21, 1159–1171. <https://doi.org/10.5194/acp-21-1159-2021>
- Hu, D., Shi, S., & Wang Z. (2023). Link between Arctic ozone and the stratospheric polar vortex. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 16 (1), 100293. <https://doi.org/10.1016/j.aosl.2022.100293>
- Hufnagl, L., Eichinger, R., Garny, H., Birner, T., Kuchař, A., Jöckel, P., & Graf, P. (2023). Stratospheric Ozone Changes Damp the CO₂-Induced Acceleration of the Brewer–Dobson Circulation. *Journal of Climate*, 36, 3305–3320. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-22-0512.1>
- Karadan, M., Raju, P., & Devara, P. (2022). An Overview of Stratospheric Ozone and Climate Effects. *Earth and Planetary Science*, 1 (2), 19–34. <https://doi.org/10.36956/eps.v1i2.782>
- Li, Y., Xia Y., Xie, F., & Yan Y. (2024). Influence of stratosphere-troposphere exchange on long-term trends of surface ozone in CMIP6. *Atmospheric Research*, 297, 107086. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.107086>
- Liu, M., & Hu, D. (2021). Different Relationships between Arctic Oscillation and Ozone in the Stratosphere over the Arctic in January and February. *Atmosphere*, 12, 129. <https://doi.org/10.3390/atmos12020129>
- Mann, P.S. (2010). *Introductory Statistics*, Seventh Edition. John Wiley & Sons.
- Mogylchak, V.Y., & Milinevsky, G.P. (2017). Variations of total ozone in the atmosphere over the territory of Ukraine. *Space Science and Technology*, 23 (2), 41–47. <https://doi.org/10.15407/knit2017.02.041>
- Rolf, M. (2009). A brief history of stratospheric ozone research. *Meteorologische Zeitschrift*, 18 (1), 3–24. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2009/353>
- Salby, M.L. (2008). Involvement of the Brewer–Dobson circulation in changes of stratospheric temperature and ozone. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 44 (3–4), 143–164. <https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2006.11.002>
- Savenets, M.V., Dvoretzka, I.V., Umanets, A.P., & Grechana, N.V. (2020). Ozone layer state and level of ultraviolet irradiance over the territory of Ukraine in 2019. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*, 25, 53–62. <https://doi.org/10.31481/uhmj.25.2020.05>
- Shangguan, M., Wang, W., & Jin, S. (2019). Variability of temperature and ozone in the upper troposphere and lower stratosphere from multi-satellite observations and reanalysis data. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19, 6659–6679. <https://doi.org/10.5194/acp-19-6659-2019>
- Shi, Y., Evtushevsky, O., Milinevsky, G., Klekociuk, A., Han, W., Ivaniha, O., Andrienko, Y., Shulga, V., & Zhang, C. (2022). Zonal Asymmetry of the Stratopause in the 2019/2020 Arctic Winter. *Remote Sensing*, 14, 1496. <https://doi.org/10.3390/rs14061496>
- Shin, D., Song, S., Ryoo, S.-B., & Lee, S.-S. (2020). Variations in Ozone Concentration over the Mid-Latitude Region Revealed by Ozone-sonde Observations in Pohang, South Korea. *Atmosphere*, 11, 746. <https://doi.org/10.3390/atmos11070746>
- Stahelin, J., Mäder, J., Weiss, A. K., & Appenzeller, C. (2002). Long-term ozone trends in Northern mid-latitudes with special emphasis on the contribution of changes in dynamics. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 27 (6–8), 461–469. [https://doi.org/10.1016/S1474-7065\(02\)00027-X](https://doi.org/10.1016/S1474-7065(02)00027-X)
- Veenus, V., Shankar Das, S., & David L.M. (2023). Ozone Changes Due To Sudden Stratospheric Warming-Induced Variations in the Intensity of Brewer-Dobson Circulation: A Composite Analysis Using Observations and Chemical-Transport Model. *Geophysical Research Letters*, 50 (13), e2023GL103353. <https://doi.org/10.1029/2023GL103353>
- Weber, M., Dikty, S., Burrows, J. P., Garny, H., Dameris, M., Kubin, A., Abalichin, J., & Langematz, U. (2011). The Brewer-Dobson circulation and total ozone from seasonal to decadal time

scales. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 11221–11235, <https://doi.org/10.5194/acp-11-11221-2011>
 Yu, Y., Wu, Y., Zhang, J., Cui, Z., Shi, C., Rao, J., Guo, D., & Xia X. (2024). Connections between low- and high- frequency variabilities of stratospheric northern annular mode and Arctic ozone depletion. *Environmental Research Letters*, 19, 044040. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad2c24>

Zhang, C., Grytsai, A., Evtushevsky, O., Milinevsky, G., Andrienko, Y., Shulga, V., Klekociuk, A., Rapoport, Y., & Han, W. (2024). Study on the Rossby Waves Parameters in Total Ozone Over the Arctic in 2000–2021. *Research Advances in Environment, Geography and Earth Science*, 3, 72–92. <https://doi.org/10.9734/bpi/raeges/v3/7572B>

Antonina Umanets

ORCID: 0009-0008-4867-4430
 umanets@uhmi.org.ua

Sofiia Krainyk

ORCID: 0009-0004-6299-0983
 krajnik@uhmi.org.ua

Mykhailo Savenets

ORCID: 0000-0001-9429-6209
 savenets@uhmi.org.ua

Ukrainian Hydrometeorological Institute
 of the State Emergency Service of Ukraine
 and the National Academy of Sciences of Ukraine,
 Kyiv, Ukraine

DYNAMICAL CONDITIONS OF THE SPATIAL EXTREMES FORMATION IN OZONE LAYER OVER THE TERRITORY OF UKRAINE

The paper examines the conditions for the formation of spatial extremes in total ozone content (TOC) over the territory of Ukraine caused by dynamic factors. The study used satellite observations of TOC and meteorological parameters (*u, v* components of wind and geopotential height) from the ERA5 re-analysis in the Northern Hemisphere. We describe the processes of air advection with significant TOC deviations and implement

its classification into the main types. Seventy cases of spatial extremes were identified, 86% of which were observed under air advection with a western component. The intense westerly flow in the lower stratosphere is responsible for both the advection of air with high TOC (total ozone content) and its local formation. Under a well-developed polar vortex, most ozone extremes are transported by the main flow and reach the territory of Ukraine from the west and northwest, forming significant positive deviations. In this case, the polar vortex itself must be displaced into the Eastern Hemisphere for Ukraine to be closer to its outer boundary. When the integrity of the polar vortex is disrupted, it takes on a wavelike structure, leading to greater variability in the processes forming ozone extremes over Ukraine, including TOC advection from the north and local formation. With the breakdown of the polar vortex and the onset of a rapid TOC decrease in late March to April, the likelihood of positive ozone deviations from the north increases, though their recurrence does not exceed 7% of the total number of extremes. Significant negative TOC deviations spread over Ukraine during the period of seasonal minima under two conditions: advection from the northwest when the stratospheric polar vortex is absent (until November), and advection from the west in the early stages of vortex formation (in December). The established and described dynamic conditions for the formation of ozone layer extremes are important for extending the lead time in forecasting ozone anomalies over Ukraine.

Keywords: total ozone content, stratosphere, advection, stratospheric polar vortex

