

УДК: 551.510.534

## ОБНОВЛЕНІ КЛІМАТИЧНІ НОРМИ ЗАГАЛЬНОГО ВМІСТУ ОЗОНУ НАД ТЕРИТОРІЄЮ УКРАЇНИ

І. В. Дворецька, М. В. Савенець, А. П. Уманець

Український гідрометеорологічний інститут ДСНС  
України та НАН України, пр. Науки, 37, 03028, Київ, Україна,  
dvoretska@uhmi.org.ua, <https://orcid.org/0000-0002-3625-4630>  
savenetsm@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9429-6209>

У статті представлено результати аналізу просторово-часового розподілу оновлених кліматичних норм загального вмісту озону (ЗВО) для періоду 1991–2020 рр. Досліджено зміни, що відбулися з моменту останнього обрахунку кліматичних норм ЗВО для періоду 1981–2010 рр. Використовуючи дані щоденних супутникових спостережень приладів TOMS та OMI, обчислено середні багаторічні значення, кліматичні норми для кожного дня року, амплітуди, фази та коефіцієнти детермінації сезонних коливань ЗВО над територією України. Із залученням даних реаналізу NCEP/ NCAR встановлено зв'язок змін ЗВО зі змінами меридіональної складової вітру нижньої стратосфери. У дослідженнях показано наявність областей вищого/ нижчого ЗВО, які дещо порушують закономірності широтного розподілу. До їх формування призводить більша повторюваність адвекції повітря із нетиповим вмістом озону для розташування території України, переважно у період із січня до березня. Наведено типовий часовий розподіл кліматичних норм ЗВО, що варіюють від 285 одиниць Добсона (о.Д.) до 375 о.Д.; статистичні закономірності розподілу відхилень та повторюваність появи екстремально високих/ низьких значень ЗВО. У статті наголошено на малій варіативності ЗВО над територією України. Досліджено особливості просторового розподілу амплітуд сезонних коливань, що знаходяться в межах 42–46 о.Д., та періодів настання максимальних значень, що припадає на 19–30 березня залежно від регіону. Виявлено, що з моменту останнього оновлення кліматичних норм ЗВО зменшився в усі місяці року, а максимальне зменшення досягає 8 о.Д. у зимовий сезон. При цьому не спостерігається зростання повторюваності перевищення високих рівнів ультрафіолетового опромінення. Зміни ЗВО пов'язані, в першу чергу, із зсувом показників меридіональної складової вітру у бік від'ємних значень, що відображає зростання повторюваності виносу повітря із північною складовою. Наголошено на комплексності змін ЗВО у досліджуваний період та неузгодженості таких змін із циркуляційним фактором у літній сезон.

**Ключові слова:** загальний вміст озону; циркуляція Брюера-Добсона; сезонність; відхилення; адвекція; кліматична норма.

### 1. ВСТУП

Серед хімічних складових атмосферного повітря роль озону є унікальною: його підвищені концентрації у стратосфері формують озоновий шар, що забезпечує поглинання жорсткого ультрафіолетового (УФ) випромінювання [1,2]. Сформувавшись як стабільна ланка атмосфери, озоновий шар дозволяє існувати живим організмам на поверхні Землі [3,4], а також багато у чому визначає термічний режим стратосфери [5]. Як результат, стратосферний озон є хімічною складовою, за якою проводиться постійний моніторинг та дослідження.

Розуміння варіацій загального вмісту озону (ЗВО) в атмосфері та виявлення часових тенденцій потребує наявності уявлень про типовий стан

озонового шару над тією чи іншою територією, що можна описати середньостатистичними показниками. З точки зору кліматології найбільш зручним є використання середніх багаторічних значень ЗВО, що можуть вважатися кліматичною нормою. Загальноприйнятим в кліматології залишається використання 30-річного осереднення метеорологічних величин, що потребує уточнення значень кожне десятиріччя [6]. Таким чином, із закінченням 2020 року постала потреба у перерахунку кліматичних норм ЗВО за новий 30-річний період з 1991 до 2020 рр., які прийдуть на заміну середніх багаторічних значень 1981–2010 рр. Географічне розташування України робить актуальним і прогнозування ЗВО, що необхідне для визначення появи небезпечних

рівнів УФ опромінення та вчасного оповіщення громадськості [7,8], особливо під час туристичного сезону [9]. Ці завдання також вимагають наявності оновлених кліматичних норм для території України.

Пояснення змін кліматичних норм ЗВО потребує детального аналізу інших характеристик просторово-часового розподілу, так як у різні сезони озоновий шар над територією України формується під дією різних переважаючих природних процесів. У помірних широтах мінливість ЗВО залежить від двох основних факторів: фотохімічного утворення/руйнування та динамічних механізмів [1,10]. Основний внесок у стратосфері справляють сезонні процеси, що впливають на фотохімічні реакції утворення та руйнування озону [10]. На висотах вище 30 км вміст озону переважно залежить від фотохімічних реакцій; зі зменшенням висоти у стратосфері зростає роль динамічного фактору [1,11]. На відміну від хімічних реакцій, динамічний механізм не впливає прямо на руйнування озону, а лише перерозподіляє його у просторі [1,10,11].

Над територією України найбільших варіацій ЗВО зазнає у січні – березні [12-16], причинами яких є посилення меридіонального переносу через циркуляцію Брюера-Добсона [13,17] та значна повторюваність адвекції збагаченого озonom повітря на висотах із півночі, що сприяє формуванню двох максимумів вертикального розподілу ЗВО [18,19]. Подальше зменшення ЗВО у теплий період року більшою мірою залежить від дії фотохімічних процесів у зв'язку із послабленням інтенсивності циркуляції Брюера-Добсона [1,11,17]. Моніторинг у теплий період надзвичайно важливий у зв'язку із ймовірністю появи небезпечних рівнів УФ опромінення.

Метою даної роботи є встановлення закономірностей просторово-часового розподілу оновлених кліматичних норм ЗВО за період 1991–2020 рр., та дослідження змін, що відбулися з моменту їх останнього розрахунку для періоду 1981–2010 рр.

## 2. ВИХІДНІ ДАНІ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Розрахунок кліматичних норм ЗВО для території України за 1991–2020 рр. потребує наявності відповідних рядів спостережень, що характеризуватимуться повнотою, просторовим покриттям та однорідністю даних. Такі умови можуть бути забезпечені використанням супутникових спостережень за допомогою приладів Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) та Ozone

Monitoring Instrument (OMI) [20]. Дослідження на основі даних супутникових спостережень для території України показали збереження однорідності вибірок та можливість їх використання [14,15,21,22].

За період з 1991 до 2020 рр. дані супутникових приладів TOMS та OMI надходили з чотирьох різних супутників. Таким чином, загальна вибірка сформована на основі наступних послідовних рядів спостережень із щоденними даними:

1. 1991–1993 рр. – супутник NASA/NOAA Nimbus-7 з приладом TOMS на борту [23]. Просторова роздільна здатність: 1.25° довготи на 1.00° широти;

2. 1996 – 2004 рр. – супутник NASA Earth Probe з приладом TOMS на борту [24]. Просторова роздільна здатність: 1.25° довготи на 1.00° широти;

3. 2004 – 2020 рр. – супутник Aura з приладом OMI на борту [25]. Просторова роздільна здатність: 1.00° довготи на 1.00° широти.

Кліматичні норми ЗВО розраховано для обласних центрів України, як це використовувалося і раніше під час проведення щодобового контролю стану озонового шару над територією України, з метою обчислення відхилень від норми [18,19]. Відповідно, формувалися вибірки із щоденними значеннями для географічних координат кожного обласного центру, де значення ЗВО відповідало квадрату (розміром 1.25° × 1.00° або 1.00° × 1.00° залежно від приладу), куди потрапляв обласний центр.

Кліматичні норми ЗВО ( $\overline{Oz}_t$ ) розраховані для кожного дня року ( $t$ ) та відображають середнє багаторічне значення. Воно обчислено як сума значущих гармонік сезонного ходу [26]

$$\overline{Oz}_t = \overline{Oz} + \sum_{k=1}^n A_k \cos(\omega_k t - \varphi_k)$$

де  $k$  – номер значущої гармоніки ( $n$  – загальне число значущих гармонік);  $\overline{Oz}$  – середнє значення вибірки;  $A_k$  – амплітуда гармоніки;  $\omega_k$  – частота гармоніки ( $\omega_k = 2\pi/T_k$ ;  $T_k$  – період гармоніки);  $\varphi_k$  – фаза гармоніки. Амплітуда гармоніки ( $A_k$ ) відображає максимальнє відхилення  $\overline{Oz}_t$  від  $\overline{Oz}$ . Фаза гармоніки ( $\varphi_k$ ) вказує на час появи максимального відхилення. Для першої гармоніки в середньому відображає період

з найбільшими значеннями ЗВО протягом року; для інших гармонік – період максимального прояву процесу, що впливає на формування гармоніки.

Для аналізу чіткості прояву сезонних мінливості ЗВО, використано коефіцієнт детермінації ( $R^2$ ), що являє собою відношення дисперсії кліматичних норм ЗВО ( $D_{O_{ст}}$ ) до дисперсії фактичних значень ЗВО ( $D_{O_{ст}}$ )

$$R^2 = \frac{D_{O_{ст}}}{D_{O_{ст}}}$$

З використанням  $t$ -критерію Стьюдента на рівні  $\alpha=0.05$  перевірено значущість гармонік.

Аналіз змін середніх показників метеорологічних характеристик у нижній стратосфері за 1991–2020 рр. у порівнянні з 1981–2010 рр. здійснено за допомогою реаналізу National Centers for Environmental Prediction/ National Center for Atmospheric Research (NCEP/ NCAR) [27]. Репрезентативним рівнем обрано стандартну ізобаричну поверхню 30 гПа. Аналіз змін проведено для швидкості вітру, зональної складової вітру, меридіональної складової вітру, температури повітря, висоти ізобаричного рівня 30 гПа. Проте, у процесі обробки даних у нижній стратосфері виявлено зміни тільки для складових вітру, тому у подальшому використано виключно ці характеристики.

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ

Для території України середні багаторічні значення ЗВО за період 1991–2020 рр. складають 327–330 одиниць Добсона (о.Д.). Однорідність просторового розподілу ЗВО пояснюється досить малою площею України відповідно до просторового масштабу процесів, які визначають формування озонового шару. Прослідковується дещо нижчий ЗВО (327 о.Д.) над західною частиною території України та незначне збільшення концентрацій (до 329–330 о.Д.) над центром та північним-сходом (рис. 1).

Дещо нижчі/вищі середні багаторічні значення ЗВО узагальнено відображають території з більшою повторюваністю короткострокової (до кількох діб) адвекції повітряних мас у верхній тропосфері – нижній стратосфері з нижчими/вищими концентраціями озону. Так, з річного ходу кліматичних норм ЗВО (рис. 2) видно, що найбільші різниці між заходом (на прикладі м. Львів) та сходом (на прикладі м. Луганськ) спостерігаються в період найвищих

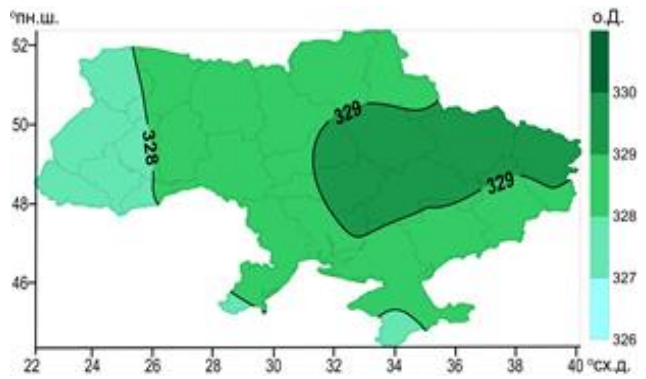
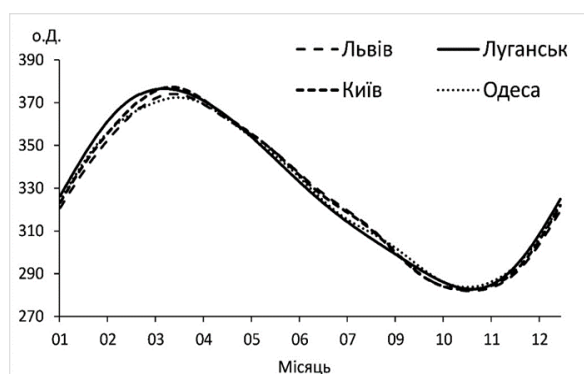


Рис. 1 – Просторовий розподіл середніх багаторічних значень ЗВО за 1991–2020 рр.

Fig.1 – The spatial distribution of total ozone multiyear average values for the period 1991–2020

концентрацій озону з січня до початку березня. У цей час високі значення ЗВО спостерігаються на північ від України, які досягають максимумів поблизу стратосферного полярного вихору. Це є результатом найбільш інтенсивної циркуляції Брюера-Добсона через т.з. «верхню» гілку (в англійській літературі «deep branch» [17]) у зимовій півкулі, яка активно транспортує озон із тропічних широт. Протягом цього періоду відмічається висока повторюваність адвекції збагачених озоном повітряних мас із північного-сходу, що впливають на формування більш високого ЗВО над східною і північно-східною частинами території України. Формування менших значень ЗВО над західними районами території України, найімовірніше пов'язано із двома факторами. Перший – менша повторюваність надходження збагачених озоном повітряних мас. Другий – деяке посилення меридіональних процесів у нижній стратосфері навесні за досліджуваній період. Так, значення меридіональної складової вітру на ізобаричному рівні 30 гПа за період 1991–2020 рр. над помірними широтами території Європи зменшились на 1–2 м/с. Причому на заході – північному-заході спостерігається зсув значень меридіональної складової вітру саме у бік від'ємних показників, що означає більшу повторюваність виносу повітряних мас із півночі, які вже у цей період року характеризуються меншим ЗВО.

З рис. 2 чітко видно збереження типового річного ходу ЗВО над територією України, з найвищим ЗВО у лютому–березні, поступовим зменшенням вмісту, що досягає мінімальних значень у жовтні. Формування подібної сезонної мінливості виникає через поєднання циркуляційних процесів у стратосфері та фактору фотохімічного утворення/руйнування озону.



**Рис. 2** – Річний хід кліматичних норм ЗВО за 1991–2020 рр.  
**Fig. 2** – Annual cycle of total ozone climate normal for the period 1991–2020

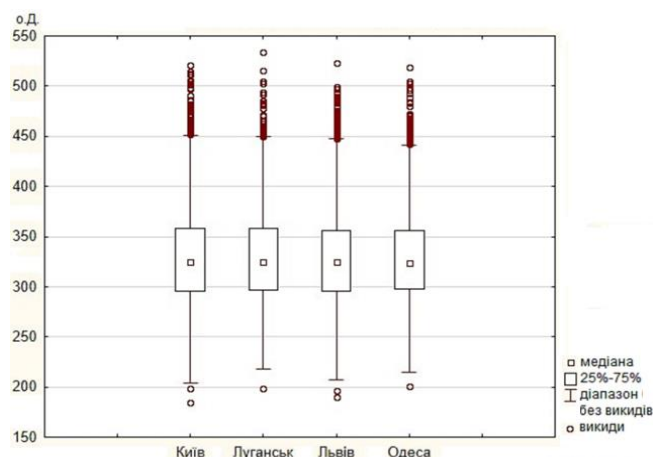
Вищі значення ЗВО спостерігаються протягом холодного сезону року у зв'язку із найбільш інтенсивною циркуляцією Брюера-Добсона, що призводить до формування максимального ЗВО у кінці лютого – на початку березня. Мінімуми ж вмісту формуються у період різкого зменшення фотохімічного утворення озону через зменшення надходження сонячної радіації та при слабкому перенесенні озону із тропічних широт з циркуляцією Брюера-Добсона.

Тривалість періоду поступового зменшення ЗВО в цілому охоплює 8 місяців. Найчастіше з листопада починається збільшення ЗВО, що триває 4 місяці. Період зростання вмісту озону в атмосфері характеризується більш різкими змінами значень, ніж протягом періоду поступового зменшення. Для цілей щодобового моніторингу та визначення небезпечності рівнів УФ опромінення важливим є період з травня до серпня. У цей час кліматичні норми ЗВО зменшуються з 340 о.Д. до 300 о.Д. Кількість сонячної радіації, що надходить в цей час до земної поверхні найбільша, а тому будь-які короткострокові від'ємні відхилення від норми вмісту озону за відсутності хмарності потребують особливої уваги через можливе зростання УФ-індексу до небезпечних для здоров'я рівнів.

Незважаючи на те, що протягом лютого–березня кліматичні норми ЗВО перевищують 360 о.Д., недовготривалість такого періоду призводить до того, що ці значення не потрапляють в межі 25–75% центилів (рис. 3). Кліматичні норми ЗВО у жовтні – на початку листопада також виходять за вказані межі. Це свідчить про достатню високу роль сезонних факторів формування озону в порівнянні з більш короткостроковими процесами, що впливають на флуктуації ЗВО. Для території України типовими значення

ми, що потрапляють в межі 25–75% є 295–355 о.Д. Медіанні значення знаходяться близько 325 о.Д.

Значення ЗВО, що перевищують 450 о.Д. та є нижчими за 210 о.Д. можна вважати викидами (значення, що суттєво відмінне від загальної вибірки), проте за досліджуваний період подібні відхилення не були помилковими та дійсно мали місце. Усі вони стали результатом адвекції повітряних мас з екстремально високим/низьким ЗВО, що, зазвичай, тривали не більше 2–3 діб.



**Рис. 3** – Діаграма розмаху ЗВО для Києва (північ), Луганська (схід), Львова (захід) та Одеси (південь)

**Fig. 3** – Box-Whisker plot for total ozone over Kyiv (north), Luhansk (east), Lviv (west) and Odesa (south)

У статистичному розподілі подібні екстремальні відхилення знаходяться за межею  $2.75\sigma$  для додатних та  $-2.25\sigma$  для від'ємних відхилень. В цілому, для розподілу ЗВО над територією України характерна незначна права (додатна) асиметрія (рис. 4), тобто переважає повторюваність додатних відхилень.

Близько 50% усіх значень ЗВО над територією України не виходять за межі  $\pm 0.5\sigma$ ; а в інтервал  $\pm 1.0\sigma$  потрапляє близько 85% значень. Така кількість значень в межах  $\pm 1.0\sigma$  значно більше, ніж це є характерним для переважної більшості величин у природі, для яких можливо апроксимувати закономірності розподілу Гаусса. Тобто, озоновий шар у помірних широтах можна вважати досить маловаріативним у порівнянні з іншими компонентами атмосфери. Більш того, відхилення, що перевищують  $\pm 1.5\sigma$  (частка яких лише близько 5%) переважно спостерігаються лише протягом січня – березня, коли динамічний фактор формування озонового шару набуває максимального впливу у північній півкулі.



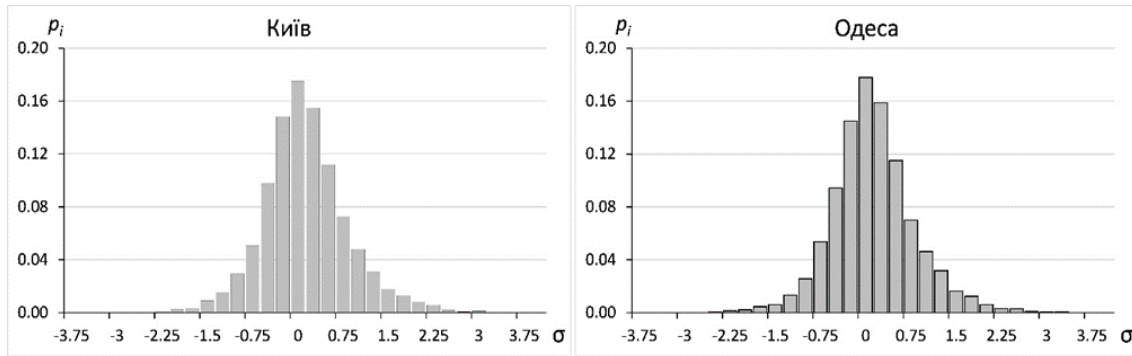


Рис. 4 – Статистичний розподіл відхилень ЗВО

Fig.4 – The statistical distribution of total ozone deviations

Кліматичні норми ЗВО за період 1991–2020 рр. зменшилися у порівнянні з попереднім оновленням за 1981–2010 рр. (рис. 5а). В залежності від регіону, ЗВО зменшився від -4.8 о.Д. до -5.4 о.Д. з найсуттєвішими змінами на сході України. За часовим розподілом зміни кліматичних норм ЗВО (рис. 6) видно, що зменшення спостерігається в усі місяці року. Враховуючи сезонність дії переважаючих факторів формування озонового шару у помірних широтах, що проявляються у різні місяці, причинами подібного зменшення не може бути дія лише одного визначеного фактору. Неузгодженість зменшення просторового розподілу кліматичних норм ЗВО зі зменшенням амплітуди першої (визначальної для формування сезонної мінливості) гармоніки (рис. 5б) також свідчить про комплексність та складність змін, що відбулися.

Для пояснення можливих причин зменшення ЗВО та амплітуди сезонних коливань, необхідно зауважити дві важливі деталі. Перша з них – це відсутність значущих змін  $R^2$  сезонної мінливості, навіть за умови значущого, хоча і незначного,

зменшення амплітуди. Друга – це відсутність зсуву фаз, тобто збереження періоду настання найвищих значень ЗВО у році. Ці закономірності вказують на те, що зменшення ЗВО, найімовірніше, не пов'язане зі змінами сезонної мінливості, тобто зі змінами інтенсивності циркуляції Брюера-Добсона та балансу між фотохімічних утворенням/ руйнуванням озону (так як саме ці два фактори визначають чіткість прояву сезонних коливань та настання максимумів ЗВО).

Серед змін метеорологічних величин, що зазнали найбільшого впливу у нижній стратосфері у 1991–2020 рр. в порівнянні з 1981–2010 рр. стали зміни компонент вітру, зокрема зсув у бік від'ємних значень меридіональної складової вітру приблизно на 1–2 м/с. Найбільшого прояву вони набули над Північною Європою та захопили західну й північно-західну частини території України. У сезонному ході, найбільшу роль у вказаних змінах відіграють весняні місяці. Зсув меридіональної складової вітру у бік від'ємних значень означає зростання повторюваності адвекції повітря із північною складовою у нижній стратосфері.

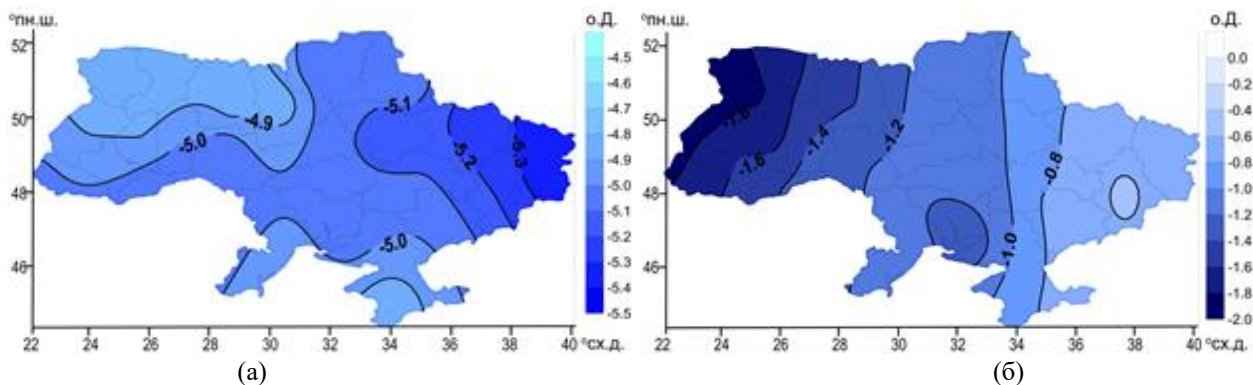
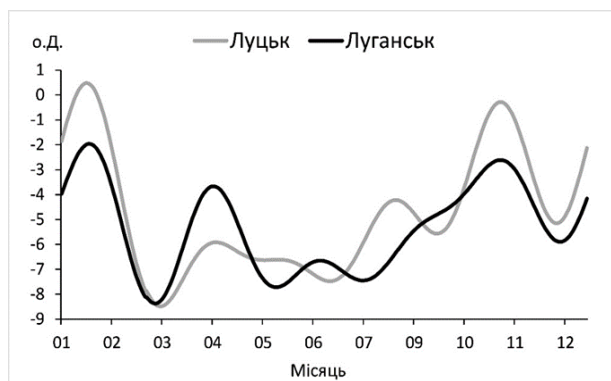


Рис. 5 – Просторовий розподіл зміни кліматичних норм ЗВО (а) та амплітуди першої гармоніки (б) у 1991-2020 рр. відносно 1981-2010 рр.

Fig. 5 – Spatial distribution of total ozone climate normal changes (a) and the first harmonic amplitude (b) in 1991-2020 relatively 1981-2010



**Рис. 6** – Часовий розподіл зміни кліматичних норм ЗВО у 1991-2020 рр. відносно 1981-2010 рр.

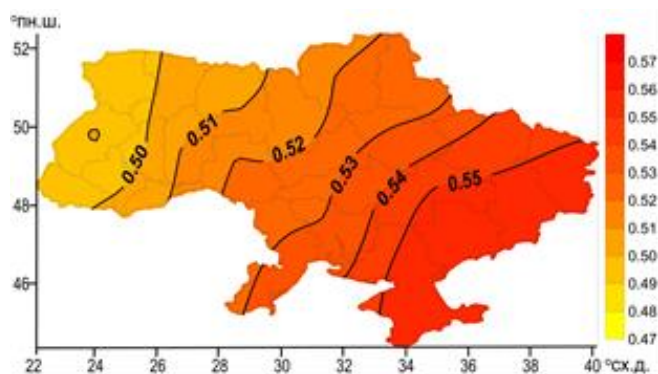
**Fig. 6** – Temporal distribution of total ozone climate normal changes in 1991-2020 relatively 1981-2020

Подібні зміни циркуляції, враховуючи період їх найбільш значного прояву (березень – травень), потенційно можуть бути причиною зменшення амплітуд ЗВО. Зміни амплітуд, у свою чергу, сильніше проявляються на північному-заході території України, та послаблюються у напрямку на схід та південний схід (рис. 5б). На відміну від адвекції повітря із північного-сходу, де ЗВО залишається високим значно довший час, надходження повітря із північного-заходу, зазвичай, приносить нижчі концентрації озону. Збільшення повторюваності меридіональних потоків і надходження повітря з нижчим ЗВО із північного-заходу, що надалі поширюється зональними потоками, може нівелювати надходження озону із півдня з циркуляцією Брюера-Добсона (яка, до того ж, починає поступово слабшати). Ці процеси можуть призвести як до деякого зменшення ЗВО над західною частиною території України, так і до зменшення амплітуди річних коливань, так як типові високі значення ЗВО частіше стають ближчими до медіанних значень.

Проте, наведені зміни меридіональної складової вітру та їх вплив не можуть пояснити літнє зменшення ЗВО до 8 о.Д. (рис. 6), а також зменшення кліматичних норм на сході території України (рис. 5а). За досліджуваний період не виявлено значних циркуляційних змін у нижній стратосфері, що могли вплинути на східні регіони України, тобто, найімовірніше, повторюваність виходу збагачених озоном повітряних мас не змінилася. Проте, область найбільшого зменшення ЗВО на території України (рис. 5а) співпадає з областю найвищих значень кліматичних норм (рис. 1). Цілком можливим є прояв загального зменшення ЗВО, що у свою чергу, призводить до надходження повітряним мас з північно-

го сходу з нижчим ЗВО. Влітку провідна роль у варіаціях ЗВО в помірних широтах належить процесам фотохімічного утворення/руйнування озону. Виявлення причин літнього зменшення ЗВО потребує окремого розширеного дослідження, що повинне базуватися на аналізі вмісту аерозольних складових, нітрогено-, хлоро-, та водневомісних сполук у стратосфері, наявності достатньої кількості вільного атомарного кисню, та моделювання хімічних процесів з урахуванням тропосферно-стратосферного обміну.

Чіткість прояву сезонних коливань в межах України мало відрізняється залежно від території. Загалом, сезонна мінливість пояснює від 49% до 56% дисперсії ЗВО (рис. 7). Незважаючи на те, що амплітуди першої гармоніки (визначальної у формуванні сезонної мінливості) характеризується чіткою широтною зміною (рис. 8а),  $R^2$  у просторовому розподілі набуває довготної залежності.



**Рис. 7** – Просторовий розподіл коефіцієнту детермінації ( $R^2$ ) сезонного ходу ЗВО

**Fig.7** – Spatial distribution of the determination coefficient ( $R^2$ ) for total ozone seasonal variability

Чим південніше у помірних широтах розташований регіон, тим стабільніше над ним озоновий шар. Це виникає в результаті постійного надходження сонячної радіації протягом року та, відповідно, стабільнішого перебігу процесів фотохімічного утворення озону. У напрямку на північ посилюються сезонні контрасти надходження сонячної радіації та відмінності в інтенсивності циркуляційних процесів (Брюера-Добсона, стратосферний полярний вихор). Як результат, тривалість періоду між максимальним та мінімальним вмістом озону на півдні значно менша, ніж на півночі. Отже, амплітуди сезонної мінливості будуть зростати у напрямку з півдня на північ, що і прослідковується для території України (рис. 8а). В цілому, амплітуди першої гармоніки варіюють від 42.0 о.Д.

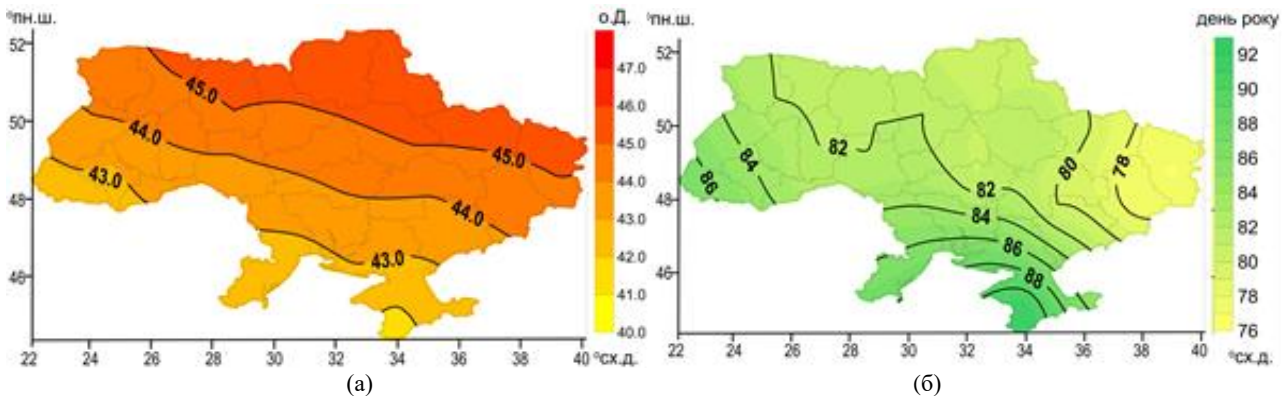


Рис. 8 – Просторовий розподіл амплітуди (а) та фази (б) першої гармоніки сезонного ходу ЗВО за 1991–2020 рр.

Fig. 8 – Spatial distribution of the first harmonic amplitude (a) and phase (b) for total ozone seasonal variability in 1991-2020

на крайньому півдні території України до 46.0 о.Д. на півночі.

Зазвичай, за однакової дисперсії у часових рядах, чим вища амплітуда гармонік сезонного ходу, тим краще проявляється сезонна мінливість, тобто вищий  $R^2$ . Значну роль відіграють флуктуації, що погіршують прояв сезонних особливостей. У випадку ЗВО, амплітуди на південь від території України нижчі, проте і відхиленя від норми значно менше. Натомість, у північніших широтах вищі амплітуди, проте сильно збільшується повторюваність короткострокових флуктуацій ЗВО, що можуть значним чином відхилятися від норми. Це і призводить до того, що  $R^2$  сезонної мінливості зменшується у напрямку на північ та не узгоджується із просторовим розподілом амплітуди. Широтна залежність розподілу  $R^2$  сезонності ЗВО порушується особливістю циркуляції у стратосфері над територією України. Західна складова вітру взимку найчастіше приносить високий ЗВО, тоді як східна складова влітку – низький ЗВО. Саме різниця у концентраціях озону в різні сезони сприяє порушенню широтного розподілу  $R^2$ . Як результат, найкраще сезонна мінливість ЗВО над територією України проявляється на південному-сході, найгірше – на заході та північному-заході (рис. 7).

Фази першої гармоніки відповідають часу настання максимальних значень ЗВО, і для території України знаходяться в межах 78–89 день року (рис. 8б). Тобто, найвищий ЗВО спостерігається в період з 19 до 30 березня. Так як накопичення озону відбувається на північ від території України (біля південної межі стратосферного полярного вихору), настання максимумів ЗВО там спостерігається раніше. Зсув фаз на більш пізній період відбувається у напрямку на південь.

#### 4. ОБГОВОРЕННЯ

Оновлення кліматичних норм для території України показало, що розглядаючи незначні просторові масштаби (відносно півкулі, зокрема), починають прослідковуватись порушення широтного розподілу кліматичних норм ЗВО та ряду узагальнених характеристик сезонної мінливості. І хоча широтна залежність розподілу ЗВО є найбільш типовою ознакою над територією України [12], усе ж висока повторюваність тих чи інших циркуляційних процесів може сформувати локальні осередки високого/низького ЗВО, що не згладжуються навіть в масштабах кліматичного періоду.

Вже було досліджено появу т.з. улоговини ЗВО на заході території України та утворення т.з. гребня на півночі та у центрі в окремі місяці [16,28]. У нашій роботі отримано підтвердження формування подібних особливостей, в основі яких лежать динамічні фактори. Значну роль при цьому відіграє саме адвекція повітряних мас із високим ЗВО. У [13] показано, що зростання амплітуди сезонної мінливості відбувається саме за рахунок максимальних рівнів ЗВО, при цьому роль надходження збагаченого озonom повітря є провідною, що відбувається за рахунок меридіональних процесів. Обчислення характеристик гармонік сезонного ходу ЗВО показало також порушення широтного залежності розподілу коефіцієнтів детермінації та фази.

Варто звернути увагу на зменшення кліматичних норм ЗВО у порівнянні з попереднім оновленням. Загалом, зменшення ЗВО над територією України діагностовано і раніше [12], у тому числі з наголошенням на коливальний характер подібних змін [14,29]. Проведені дослідження показали, що зменшення ЗВО відбувається більшою мірою за рахунок зменшення повторюва-



ності аномально високих значень у період з лютого до березня. В усі місяці року розподіл ЗВО мало відхиляється від середніх багаторічних значень та не несе небезпеки у вигляді збільшення повторюваності появи високих значень УФ-індексу над територією України. Більш того, практично відсутні негативні аномальні відхилення ЗВО, що можуть нести потенційну загрозу високих значень УФ-індексу влітку. Тим не менше, аналіз тенденцій зміни ЗВО над територією України варто вважати актуальною темою для майбутніх досліджень.

Проведені дослідження вказали на ряд проблемних питань, вирішити які можливо за допомогою моделювання із залученням хіміко-метеорологічних моделей. Серед відкритих питань особливої уваги потребує пояснення причин зменшення ЗВО влітку, коли провідну роль відіграють процеси фотохімічного руйнування/утворення озону. З використанням методів моделювання вдалося дослідити причини неочікуваного зменшення ЗВО у тропічних широтах [30]. При цьому, наголошується про можливу роль  $N_2O$  у збільшенні кількості реакцій руйнування озону. Схожі механізми можуть мати місце і у помірних широтах, а тому потребують залучення до досліджень даних аерозолі у стратосфері, а також нітрогено- та хлоровмістних сполук, причому з обов'язковим урахуванням процесів їх природного надходження.

## 5. ВИСНОВКИ

Обчислено оновлені кліматичні норми ЗВО для періоду 1991–2020 рр., які стануть актуальними на найближче десятиріччя. Однорідність просторового розподілу середніх багаторічних значень ЗВО над територією України порушується наявністю області нижчих значень на заході (327 о.Д.) та області вищих значень на сході – північному-сході (330 о.Д.). Їх формування відбувається переважно за рахунок циркуляційних процесів у лютому – березні та пов'язане із більшою повторюваністю виносу повітряних мас з вищим/нижчим ЗВО у нижній стратосфері. Кліматичні норми ЗВО варіюють від 285 о.Д. до 375 о.Д. з максимальним вмістом в період з 19 до 30 березня, залежно від території. На півночі найвищі значення ЗВО формуються раніше, ніж на півдні. Амплітуди сезонної мінливості ЗВО складають 42–46 о.Д. зі збільшенням значень у напрямку на північ, що пов'язане із посиленням сезонних контрастів надходження сонячної радіації та відмінності в інтенсивності циркуляційних процесів зимового та літнього півріччя.

В межах  $\pm 0.5\sigma$  знаходиться близько 50% усіх значень ЗВО над територією України; а в межах  $\pm 1.0\sigma$  – 85% значень, що вказує на маловаріативність озонового шару над територією України. Основна частина відхилень більше  $\pm 1.5\sigma$  припадає на січень–березень, тобто в період найбільш інтенсивної циркуляції Брюера-Добсона, а також повторюваності адвекції повітря із півночі, де ЗВО суттєво відрізняється від типового для території України.

З моменту останнього оновлення кліматичних норм, ЗВО зазнав деякого зменшення в усі місяці року, максимальне з яких досягає 8 о.Д., а також зменшення амплітуд на  $-4.8\dots-5.4$  о.Д., що частково пов'язане зі зміною меридіональної складової вітру у нижній стратосфері, особливо у весняний період. Проте, відкритими питаннями залишаються причини зменшення ЗВО у літній сезон, коли роль циркуляційних факторів формування вмісту ЗВО найменша.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Dessler A. The Chemistry and Physics of Stratospheric Ozone. International Geophysics Series. Academic Press, 2005. 255 p.
2. Fabian P., Dameris M. Ozone in the Atmosphere: Basic Principles, Natural and Human Impacts. Springer, 2014. 144 p.
3. Cockell C. S., Raven J. A. Ozone and life on the Archaean Earth. *Philosophical Transactions of The Royal Society. A Mathematical Physical and Engineering Sciences*. 2007. 365 (1856). Pp. 1889-1901.
4. Tevini M. UV-B radiation and ozone depletion. Effects on humans, animals, microorganisms and materials. Lewis Publishers, 1993. 256 p.
5. An influence of solar spectral variations on radiative forcing of climate / Haigh J. D. et al. *Nature*. 2010. 467. Pp. 696–699
6. WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals. URL:[https://library.wmo.int/doc\\_num.php?explnum\\_id=4166](https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4166) (Accessed: 13 January 2021)
7. Savenets M., Dvoretzka I., Kruchenitskiy G. The method for prediction of total ozone and ultraviolet radiation over Ukraine based on satellite data. *EUMETSAT Meteorological Satellite Conference 2016*, 26–30 September. Darmstadt, Germany, 2016.
8. Дворецька І. В., Сидоренко А. В. Прогноз загального вмісту озону над територією України. *Наукові праці Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту*. 2012. Вип. 261. С. 106-116
9. Савенець М. В. Особливості використання інформації щодо загального вмісту озону для цілей розвитку санаторно-курортної галузі України. *Вплив кліматичних змін на просторовий розвиток території Землі: наслідки та шляхи вирішення*: матеріали II Міжнародної наук.-практ. конф., 13-14 червня. Херсон, 2019. С. 163-165
10. Нерушев А. Ф. Воздействие интенсивных атмосферных вихрей на озоновый слой Земли. Санкт-Петербург: Гидрометеоздат, 2003. 224 с.



11. Rosenlof K. H. Seasonal cycle of the residual mean meridional circulation in the stratosphere. *Journal of Geophysical Research*. 1995. 100. Pp. 5173–5191.
12. Могильчак В. Ю., Міліневський Г. П. Варіації загального вмісту озону в атмосфері над територією України. *Космічна наука і технологія*. 2017. Т. 23(2). С. 41–47.
13. Євтушевський О. М. Довготна залежність сезонних змін загального вмісту озону в середньоширотній атмосфері північної півкулі. *Український журнал дистанційного зондування Землі*. 2014. № 3. С. 49–58
14. Калініна І. В. Кліматичні норми загального вмісту озону. *Фізична географія та геоморфологія*. 2005. № 48. С. 257–263
15. Дворецька І. В. Особливості динаміки загального вмісту озону в сучасний період. *Наукові праці Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту*. 2012. Вип. 262. С.257–271
16. Марченко С. П., Бургаз О. А. Статистична структура полів загального вмісту озону над територією України / VI Всеукраїнський з'їзд екологів: матеріали конф., 21–22 вересня. Одеса, 2017. С. 92
17. Butchart N. The Brewer-Dobson circulation. *Reviews of Geophysics*. 2014. 52. Pp. 157–184.
18. Огляд стану озонового шару та рівня ультрафіолетового опромінення над територією України у 2018 році / Дворецька І. В., Савенець М. В., Уманець А. П. та ін. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2019. №23. С.34–41. <https://doi.org/10.31481/uhmj.23.2019.04>
19. Стан озонового шару та рівня ультрафіолетового опромінення над територією України у 2019 році/ Савенець М. В., Дворецька І. В., Уманець А. П. та ін. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2020. №25. С. 53–62. <https://doi.org/10.31481/uhmj.25.2020.05>
20. NASA Ozone Watch. Images, data, and information for atmospheric ozone. URL: <https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov> (Accessed: 15 January 2021)
21. Grytsai A., Milinevsky G. SCIAMACHY/ Envisat, OMI/Aura, and ground-based total ozone measurements over Kyiv-Goloseyev station. *International Journal of Remote Sensing*. 2013. 34(15). Pp. 5611–5622
22. Комісар К. М., Кривобок О. А. Система оперативного моніторингу за станом озонового шару над територією України за супутниковими даними. *Географія та туризм*. 2014. Вип. 28. С. 255–262
23. Nimbus 7 data. URL: <https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/data/nimbus7/> (Accessed: 15 January 2021)
24. Earth Probe data. URL: <https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/data/eptoms/> (Accessed: 15 January 2021)
25. OMI data. URL: <https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/data/omi/Y2004/> (Accessed: 15 January 2021)
26. Doran H. E., Quilkey J. J. Harmonic Analysis of Seasonal Data: Some Important Properties. *American Journal of Agricultural Economics*. 1972. 54. Pp. 646–651.
27. NCEP/ NCAR Reanalysis. URL: <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html> (Accessed: 22 January 2021)
28. Бургаз О. А. Просторово-часова динаміка полів загального вмісту озону над територією України. *Молодий науковець*. 2016. №10(37). С.31–36.
29. Никифоров А. В., Никифорова М. П. Анализ современной пространственно-временной изменчивости общего содержания озона над Карпатским регионом. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія "Екологія"*. 2010. №893. С.30–40
30. Dynamically controlled ozone decline in the tropical mid-stratosphere observed by SCIAMACHY / Galytska E. et al. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2019. 19. Pp. 767–783

## REFERENCES

1. Dessler, A. (2005). *The Chemistry and Physics of Stratospheric Ozone. International Geophysics Series*. Academic Press.
2. Fabian, P. & Dameris, M. (2014). *Ozone in the Atmosphere: Basic Principles, Natural and Human Impacts*. Springer.
3. Cockell, C.S. & Raven, J.A. (2007). Ozone and life on the Archaean Earth. *Philosophical Transactions of The Royal Society. A Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 365(1856), pp. 1889–1901.
4. Tevini, M. (1993). *UV-B radiation and ozone depletion. Effects on humans, animals, microorganisms and materials*. Lewis Publishers
5. Haigh, J.D., Winning, A.R., Toumi, R. et al. (2010). An influence of solar spectral variations on radiative forcing of climate. *Nature*, 467, pp. 696–699
6. *WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals*. Available at: [https://library.wmo.int/doc\\_num.php?explnum\\_id=4166](https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4166) (Accessed: 13.01.2021)
7. Savenets, M., Dvoretzka, I. & Kruchenitskiy, G. (2016). The method for prediction of total ozone and ultraviolet radiation over Ukraine based on satellite data. *EUMETSAT Meteorological Satellite Conference 2016*, 26–30 September, Darmstadt, Germany.
8. Dvoretzka, I.V. & Sydorenko, A.V. (2012). [The forecast of total ozone over the territory of Ukraine]. *Naukovi pratsi Ukrainkoho naukovo-doslidnoho hidrometeorolohichnoho instytutu [Scientific reports of the Ukrainian Scientific-Research Hydrometeorological Institute]*, 261, pp. 106–116. (in Ukr.)
9. Savenets, M.V. (2019). [The features of total ozone information usage for the purpose of the sanatorium and resort industry in Ukraine]. *Materialy II mizhnarodnoi naukovo-practychnoi konferentsii "Vplyv klimatychnuh zmin na prostorovyi rozvytok terytoriyi Zemli : naslidky ta shliakhy vyrishennia" [Proceedings of the 2th International Science and Practical Conference "Impact of climate change on spatial development of Earth's territories: implications and solutions"]*, 13–14 June. Kherson, pp. 163–165. (in Ukr.)
10. Nerushev, A.N. (2003). *Vozdeistvie intensivnyh atmosferynyh vihrey na ozonovyi sloi Zemli [The impact of intense atmospheric perturbations on the Earths' ozone layer]*. Sankt-Peterburg: Gidrometeoizdat. (in Russ.)
11. Rosenlof, K.H. (1995). Seasonal cycle of the residual mean meridional circulation in the stratosphere. *Journal of Geophysical Research*, 100, pp. 5173–5191.
12. Mogylichak, V.Y. & Milinevskiy, G.P. (2017). [Variations of total ozone in the atmosphere over the territory of Ukraine]. *Kosmichna nauka i tehnologia [Space Science and Technology]*, 23(2), pp. 41–47. (in Ukr.)
13. Yevtushevskiy, O.M. (2014). [Longitudinal Dependence of Seasonal Changes of Total Ozone Content in the Northern Midlatitudinal Atmosphere]. *Ukrainskyi zhurnal dystantsiinoho zonduvannia Zemli [Ukrainian Journal of Remote Sensing]*, 3, 49–58 (in Ukr.)
14. Kalinina, I.V. (2005). [Climate normal of total ozone content]. *Fizychna heohrafiya ta heomorfolohia [Physical Geography and Geomorphology]*, 48, 257–263. (in Ukr.)
15. Dvoretzka, I.V. (2012). [Features of total ozone dynamics in the modern period]. *Naukovi pratsi Ukrainkoho naukovo-doslidnoho hidrometeorolohichnoho instytutu [Scientific reports of the Ukrainian Scientific-Research Hydrometeorological Institute]*, 262, 257–271 (in Ukr.)

16. Marchenko, S.P. & Burgaz, O.A. (2017). [Statistical structure of total ozone fields over the territory of Ukraine]. *VI Vseukrainskyi z'izd ekologiv [6<sup>th</sup> All-Ukrainian Meeting of Ecologists]*, 21-22 September. Odesa, p. 92. (in Ukr.)
17. Butchart, N. (2014). The Brewer-Dobson circulation. *Reviews of Geophysics*, (52), 157–184.
18. Dvoretzka, I.V., Savenets, M.V., Umanets, A.P. et al. (2019). [Examination of the ozone layer condition and level of ultraviolet irradiation within the territory of Ukraine in 2018]. *Ukraïns'kij gidrometeorologičnij žurnal [Ukrainian hydrometeorological journal]*, (23), pp. 34-41. <https://doi.org/10.31481/uhmj.23.2019.04> (in Ukr.)
19. Savenets, M.V., Dvoretzka, I.V., Umanets, A.P. et al. (2020). [Ozone layer state and level of ultraviolet irradiance over the territory of Ukraine in 2019]. *Ukraïns'kij gidrometeorologičnij žurnal [Ukrainian hydrometeorological journal]*, (25), pp. 53-62. <https://doi.org/10.31481/uhmj.25.2020.05> (in Ukr.)
20. NASA Ozone Watch. Images, data, and information for atmospheric ozone. Available at: <https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov> (Accessed: 15.01.2021)
21. Grytsai, A. & Milinevsky, G. (2013). SCIAMACHY/Envisat, OMI/ Aura, and ground-based total ozone measurements over Kyiv-Goloseyev station. *International Journal of Remote Sensing*, 34(15), pp. 5611-5622
22. Komisar, K.M. & Kryvobok, O.A. (2014). [The system of operational monitoring for the ozone layer state over the territory of Ukraine using satellite data]. *Heohrafiya i turizm [Geography and Tourism]*, (28), pp. 255-262 (in Ukr.)
23. Nimbus 7 data. Available at: <https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/data/nimbus7/> (Accessed: 15.01.2021)
24. Earth Probe data. Available at: <https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/data/eptoms/> (Accessed: 15.01.2021)
25. OMI data. Available at: <https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/data/omi/Y2004/> (Accessed: 15.01.2021)
26. Doran, H.E. & Quilkey, J.J. (1972). Harmonic Analysis of Seasonal Data: Some Important Properties. *American Journal of Agricultural Economics*, (54), pp. 646-651.
27. NCEP/ NCAR Reanalysis. Available at: <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html> (Accessed: 22.01.2021)
28. Burgaz, O.A. (2016). [Spatio-temporal dynamics of total ozone fields above territory of Ukraine]. *Molodyi naukovec [Young Scientist]*, 10, pp. 31-36. (in Ukr.)
29. Nikiforov, A.V. & Nikiforova, M.P. (2010). [Analysis of the current spatio-temporal variability of the total ozone over the Carpathian region]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho universitetu imeni V.N. Karazina. Seria "Ekologia" [Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University Series "Ecology"]*, (893), pp. 30-40. (in Russ.)
30. Galytska, E. et al. (2019). Dynamically controlled ozone decline in the tropical mid-stratosphere observed by SCIAMACHY. *Atmospheric Chemistry and Physics*, (19), pp. 767–783.

## UPDATED TOTAL OZONE CLIMATE NORMALS OVER THE TERRITORY OF UKRAINE

**I. V. Dvoretzka, M. V. Savenets, A. P. Umanets**

*Ukrainian Hydrometeorological Institute, 37, Nauky Pr., 03028 Kyiv, Ukraine,  
dvoretzka@uhmi.org.ua, <https://orcid.org/0000-0002-3625-4630>  
savenetsm@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9429-6209>*

The study presents the results of analysis of spatiotemporal distribution of updated total ozone climate normals for the period of 1991–2020. It analyzes the changes since the last total ozone climate normals estimate conducted for the period of 1981–2010. The daily data retrieved using TOMS and OMI satellite instruments over the territory of Ukraine allowed calculation of multiyear average values, climate normals for each day of the year, amplitudes, phases and determination coefficients for total ozone seasonal variations. Use of the NCEP/NCAR reanalysis data allowed establishment of the relation between total ozone and meridional wind changes in the lower stratosphere. The research shows the existence of the regions with higher/lower total ozone content that are not in line with the characteristics of latitudinal distribution. They are formed due to more frequent recurrence of air advection with ozone content that is not typical for the Ukrainian territory, mostly from January to March. The study describes a typical temporal distribution of the total ozone climate normals varying from 285 to 375 Dobson units (D.u.) and analyzes the statistic patterns of deviations distribution and recurrence of extremely high/low total ozone content. The paper emphasizes a small variation of total ozone over the territory of Ukraine. The authors also researched the features of spatial distribution of seasonal variation amplitudes varying within the range of 42–46 D.u. and the specifics of maximum values periods observed from 19 to 30 of March, depending on a region. It was established that, since the previous update of the climate normals, the total ozone decreased for all months with its maximum decrease of about 8 D.u. in winter. However, no increase of recurrence of ultraviolet radiation high levels was observed. Total ozone changes are mainly associated with shifts of meridional wind values to negative ones. This process indicates the increase of recurrence of air advection from the north.

The paper also emphasizes the complexness of total ozone changes during the period of research and the lack of consistency of such changes with the circulation factor of summer months.

**Keywords:** total ozone content; Brewer-Dobson circulation; seasonality; deviation; advection; climate normal.

## ОБНОВЛЕННЫЕ КЛИМАТИЧЕСКИЕ НОРМЫ ОБЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА НАД ТЕРРИТОРИЕЙ УКРАИНЫ

**И. В. Дворецкая, М. В. Савенец, А. П. Уманец**

*Украинский гидрометеорологический институт ГСЧС  
Украины и НАН Украины, пр. Науки, 37, 03028, Киев, Украина,  
dvoretska@uhmi.org.ua, <https://orcid.org/0000-0002-3625-4630>  
savenetsm@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9429-6209>*

В статье представлены результаты анализа пространственно-временного распределения обновленных климатических норм общего содержания озона (ОСО) за 1991–2020 гг. Исследованы изменения, которые произошли с момента последнего расчета климатических норм ОСО для периода 1981–2010 гг. Используя данные ежедневных спутниковых наблюдений приборов TOMS и OMI, рассчитаны средние многолетние значения, климатические нормы для каждого дня года, амплитуды, фазы и коэффициенты детерминации сезонных колебаний ОСО над территорией Украины. С привлечением данных реанализа NCEP/ NCAR обнаружена связь изменений ОСО с изменениями меридиональной составляющей ветра нижней стратосферы. В исследованиях показано наличие областей более высокого/ низкого ОСО, которые нарушают особенности широтного распределения. К их формированию приводит большая повторяемость адвекции воздуха с нетипичным содержанием озона для расположения территории Украины, в основном в период с января до марта. Приведено типичное распределение климатических норм ОСО, которые варьируются от 285 единиц Добсона (е.Д.) до 375 е.Д.; статистические закономерности распределения отклонений и повторяемость появления экстремально высоких/ низких значений ОСО. В статье акцентировано внимание на незначительной вариативности ОСО над территорией Украины. Исследованы особенности пространственного распределения амплитуд сезонных колебаний, которые варьируют в пределах 42–46 е.Д., и периодов наступления максимальных значений, который наблюдается с 19 по 30 марта в зависимости от региона. Выявлено, что с момента последнего обновления климатических норм ОСО уменьшился во все месяцы года, а максимальное уменьшение достигает 8 е.Д. в зимний сезон. При этом не наблюдается увеличение повторяемости превышения высоких уровней ультрафиолетового облучения. Изменения ОСО связаны, в первую очередь, со сдвигом показателей меридиональной составляющей ветра в сторону отрицательных значений, что отображает рост повторяемости выноса воздуха с северной составляющей. Подчеркнута комплексность изменений ОСО в исследуемый период, и несогласованность таких изменений с циркуляционным фактором в летний сезон.

**Ключевые слова:** общее содержание озона; циркуляция Брюера-Добсона; сезонность; отклонения; адвекция; климатическая норма

*Подання до редакції: 11. 06. 2021  
Надходження остаточної версії: 26. 10. 2021  
Публікація статті: 26. 11. 2021*