

УДК: 551.510.534;551.520.17

СТАН ОЗОНОВОГО ШАРУ ТА РІВНЯ УЛЬТРАФІОЛЕТОВОГО ОПРОМІНЕННЯ НАД ТЕРИТОРІЄЮ УКРАЇНИ У 2019 РОЦІ

М. В. Савенець¹, І. В. Дворецька¹,
А. П. Уманець¹, Н. В. Гречана²

¹ Український гідрометеорологічний інститут ДСНС
України та НАН України, пр. Науки, 37, 03028, Київ, Україна,
savenetsm@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9429-6209>

² Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
вул. Володимирська, 64/13, 01601, Київ, Україна

У статті представлено результати щодобового моніторингу стану озонного шару та рівня ультрафіолетового опромінення території України у 2019 році. Для моніторингу та аналізу використано дані загального вмісту озону, виміряні супутниковим приладом Ozone Monitoring Instrument (OMI), та розрахункові значення ультрафіолетового індексу. Дослідження проведено на регулярній сітці з просторовою роздільною здатністю 1° та окремо для географічних координат центрів адміністративних областей України. У 2019 р. ЗВО коливався в межах багаторічної норми та в середньому дорівнював 260–370 о.Д. У зимовий сезон концентрації озону були найвищими, що обумовлено інтенсивною циркуляцією Брюера-Добсона. Послаблення полярного вихору та адвекція збагаченого озоном повітря на висотах спричинила появу позитивних аномалій ЗВО над територією України. Проникнення атмосферних мас на територію України відбувалося з північного заходу, що обумовило появу аномально високих значень ЗВО в період 23–24 лютого, 2 березня, 12–14 березня та 26 березня. Під час цих періодів ЗВО збільшувався до 450–500 о.Д. Сезонне зменшення ЗВО, зумовлене послабленням циркуляції Брюера-Добсона та інтенсифікацією фотохімічних реакцій руйнування озону, спостерігалось з квітня по червень. Проте, відхилення ЗВО від норми були незначні, що сприяло відсутності дуже високих значень УФ-індексу, який не досягав 7 одиниць. Липень характеризувався вищими концентраціями озону, що найімовірніше обумовлено динамічними факторами. В результаті цього УФ-індекс коливався в межах 3–4 одиниць, що для території України характерно у квітні–травні. Результатом подібних варіацій ЗВО стала відсутність влітку 2019 р. екстремально високих рівнів ультрафіолетового опромінення. У наступні місяці спостерігалось типове сезонне зменшення ЗВО з мінімальними значеннями у жовтні в результаті формування й інтенсифікації полярного вихору. В середньому найменші значення досягли 260–270 о.Д., проте ці відхилення близькі до норми у жовтні з відносними відхиленнями близько -0.3σ. Сезонне збільшення ЗВО у 2019 р. розпочалося у середині листопада. Вже у кінці грудня почали спостерігатися перші значні позитивні відхилення, які досягли близьких до аномальних значень у 2–2.4σ.

Ключові слова: загальний вміст озону, ультрафіолетове опромінення, УФ-індекс, аномалія, відхилення

1. ВСТУП

Озоновий шар у природі відіграє дві ключові ролі. По-перше, він є важливою складовою кліматичної системи, формуючи температурний режим стратосфери [1,2]. По-друге, існування наземних екосистем можливе тільки за умови існування озонного шару, що повністю поглинає згубне для живих організмів сонячне випромінювання в спектрі 100–280 нм («жорсткий» ультрафіолет або УФ-С) [1,3]. Частково поглинається й УФ-В опромінення в спектрі 280–315

нм. Зменшення загального вмісту озону (ЗВО) призводить до збільшення інтенсивності ультрафіолетового опромінення (УФ-опромінення), великі дози якого є небезпечними для здоров'я людини, підвищуючи ризики виникнення таких захворювань як рак шкіри, катаракта, тощо [3].

Враховуючи те, що невеликі дози УФ-опромінення є корисними завдяки утворенню вітаміну D, в той же час великі дози є шкідливими [3], постійний моніторинг та прогноз ЗВО та УФ-опромінення повинен бути невід'ємною

складовою забезпечення діяльності санаторно-курортної галузі, що актуально для помірних та низьких широт. В період з травня до жовтня, коли спостерігається збільшення кількості відпочиваючих, повинні забезпечуватись обов'язкові оповіщення населення про рівні УФ-опромінення. На жаль, в Україні подібна практика не реалізовується, незважаючи на існування регулярного щодобового контролю стану озонного шару та рівнів УФ-опромінення, що забезпечується лабораторією моніторингу атмосферного повітря Українського гідрометеорологічного інституту ДСНС України та НАН України. Через відсутність повірених приладів на українській мережі спостережень, щодобовий контроль за станом озонного шару проводиться за супутниковими даними.

З метою популяризації інформації про стан озонного шару над територією України та сприяння збільшення кількості наукових досліджень, у минулому році відновлено написання щорічних оглядів у наукових виданнях [4]. Раніше існувала практика публікації подібних оглядів як частина Національних доповідей про стан навколишнього природного середовища [5].

Метою даної роботи є представлення детального аналізу стану озонного шару та рівня ультрафіолетового опромінення над територією України у 2019 році, дослідження та пояснення причин просторово-часових варіацій ЗВО та небезпечних відхилень УФ-індексу.

2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Методика досліджень подібна до методики огляду стану озонного шару та рівня УФ-опромінення за 2018 рік [4]. Щодобовий моніторинг ЗВО та аналіз стану озонного шару над територією України у 2019 році здійснено з використанням даних супутникового приладу Ozone Monitoring Instrument (ОМІ) [6], що встановлений на супутнику Aura. Значення з просторовою роздільною здатністю $1 \times 1^\circ$ виокремлено для області в межах від 21.5° сх.д. до 41.5° сх.д. та від 43.5° пн.ш. до 53.5° пн.ш. За необхідності аналізу причин появи значних відхилень від середніх багаторічних значень область досліджень розширювалася до масштабів півкулі.

Нормою у дослідженнях вважаємо середні багаторічні значення ЗВО за період 1981–2010 рр., обчислену за даними супутникових приладів ОМІ (2005–2010 рр.) та TOMS (1981–2004 рр.). Перевірка рядів на однорідність за допомогою параметричного (Стьюдента) та непараметричного (Колмогорова-Смірнова) критеріїв

однорідності із 95%-им рівнем забезпеченості результату показали однорідність та можливість об'єднання вибірок. Для території України залежно від сезону норма ЗВО змінюється в межах від 280 о.Д. до 380 о.Д.

Аналіз відхилень значень ЗВО від норми проведено за абсолютними показником у о.Д. (відхилення результатів вимірювання від багаторічної норми), та за відносним показником представлених у одиницях стандартних відхилень (σ), що являє собою відношення абсолютного відхилення до стандартного відхилення часового ряду за період 1981–2010 рр. Аномальними є значення, що відхиляються від норми більше ніж на $\pm 2.5\sigma$ [5]. За абсолютними значеннями аномальні відхилення можуть відрізнитися протягом року в зв'язку із сезонними різницями у концентраціях озону.

Щодобовий моніторинг здійснюється автоматизованими програмними модулями, написаними на мові VB.NET та включають у себе викачку даних, розшифрування файлів, виокремлення області досліджень, обчислення відхилень від норми, архівування та візуалізацію результатів.

Аналіз ультрафіолетового опромінення та показника УФ-індексу здійснено за методикою огляду 2018 року [4] з використанням моделі описаної у [7,8]. УФ-індекс виражається у безрозмірних одиницях (позначимо б.о.).

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ

У 2019 році ЗВО над територією України характеризувався значеннями, що мало відхилялися від норми 1981–2010 рр. та переважно знаходилися в межах 260–370 о.Д. (рис. 1). Візуалізацію здійснено для міст Київ та Одеса у зв'язку із розташуванням на півночі та півдні території України, що дає змогу відобразити відмінності широтного розподілу ЗВО. У порівнянні з 2018 р. [4] зменшилися розкид значень та кількість значних відхилень, що перевищували 2σ . На рис. 2 зображено часовий хід широтних перерізів ЗВО для різних довгот: 22.5° (західна частина України), 28.5° та 34.5° (центральна частина України), 40.5° (східна частина України).

Протягом січня 2019 р. ЗВО в середньому знаходився в межах від 340 о.Д. до 350 о.Д. з широтною залежністю зміни концентрацій: вищими значеннями на півночі України та меншими на півдні. Подібний просторовий розподіл та найбільше зростання концентрацій озону є характерною особливістю циркуляції Брюера-Добсона в стратосфері, що підсилюється взимку у Північній півкулі [9]. У глобальному розподілі

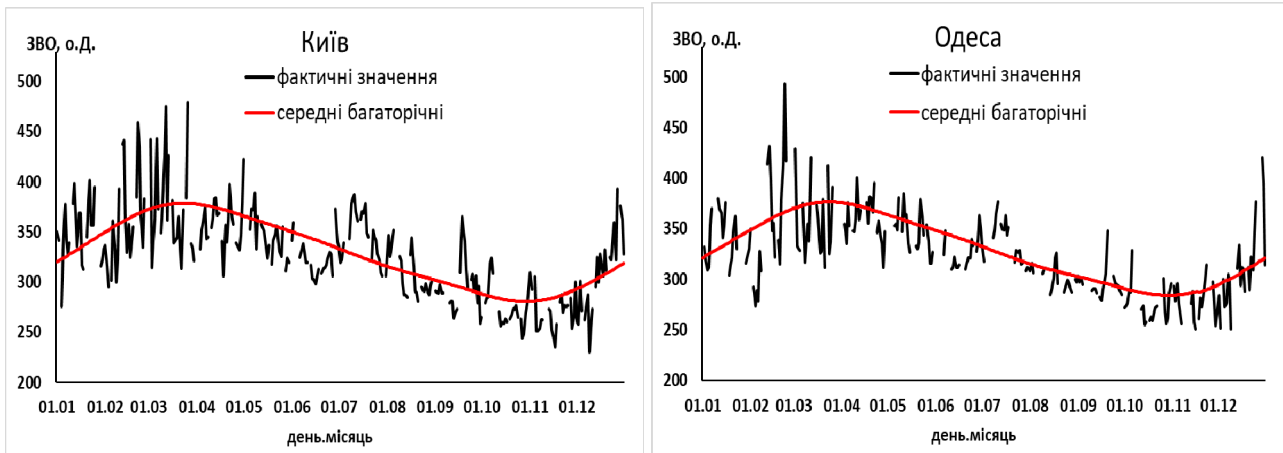


Рис. 1 – Динаміка ЗВО над Києвом та Одесою у 2019 році

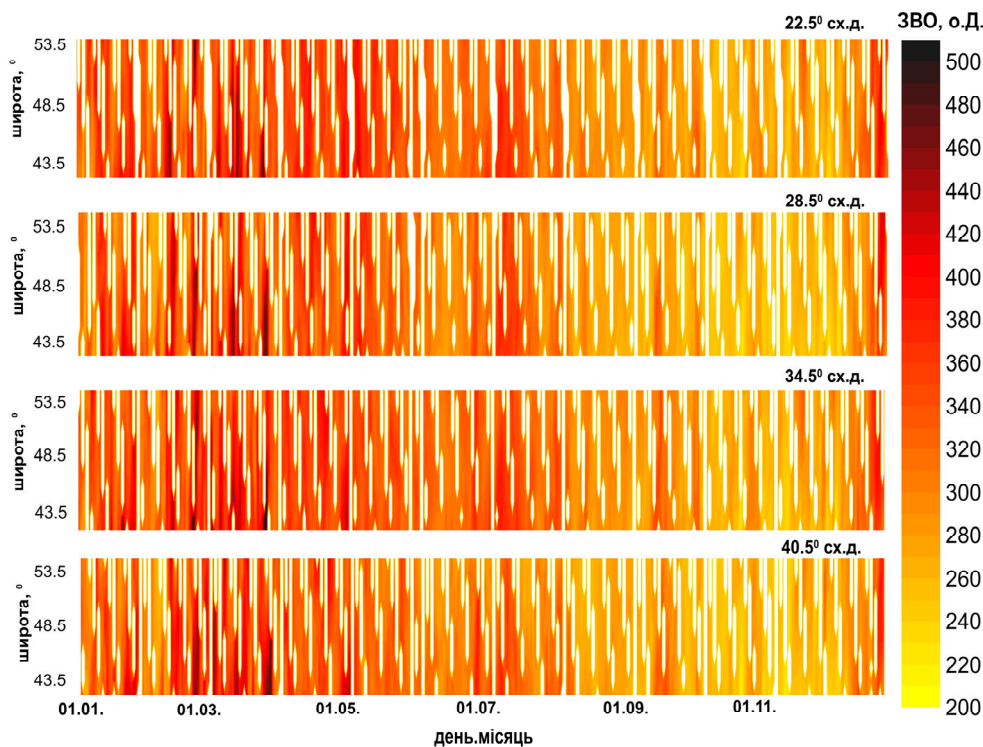


Рис. 2 – Сезонно-широтний розподіл ЗВО за 2019 рік на різних довготах (білим кольором зображено відсутні дані)

найбільша кількість озону утворюється у тропічних широтах, де кількість сонячної радіації найбільша [9]. Із тропічних широт озон переноситься циркуляцією Брюера-Добсона до полюсів, де озон накопичується. Найінтенсивніше такий процес відбувається протягом холодного періоду в Північній півкулі, що зумовлює стрімке зростання ЗВО у січні з чітким збільшенням концентрацій у напрямку на північ [1]. Кількість сонячної радіації, що сприяє утворенню і руйнуванню озону через механізм Чепмена, в цей час найменша та перешкоджає руйнуванню молекул озону, концентрації якого продовжують зростати

через надходження з тропічних широт. В результаті над територією України за січень 2019 ЗВО збільшився в середньому на 30 о.Д. Середні відхилення від норми дорівнювали 4–22 о.Д., що в січні відповідає близько 0.1–0.5σ.

У лютому та березні для ЗВО над територією України була характерна найбільша нестабільність, значний розкид значень та поява відхилень близьких до аномальних. Попри значні варіації ЗВО в цей період, сезонні особливості сприяють формуванню найвищого вмісту, що в середньому у лютому 2019 р. досягав 330–360 о.Д., у березні 355–380 о.Д. Такі значення

у лютому–березні є близькими до норми та не перевищують відхилень у $\pm 0.5\sigma$. При цьому максимальні відхилення ЗВО в окремі періоди перевищували на 2.5–2.9 σ навіть настільки високу сезонну норму, досягаючи за абсолютними значеннями 500 о.Д.

У першій половині лютого відхилення переважно були негативні, а найменші значення спостерігалися на півдні України. Протягом 4–7 лютого ЗВО дорівнював 270–280 о.Д., що на 70–80 о.Д. нижче норми, та у лютому відповідає близькому до аномального відхиленню у -2σ . В середині–кінці лютого почав спостерігатися новий процес, що сприяв підвищенню ЗВО вже до позитивних відхилень більше 2σ . Поряд із продовженням інтенсивної циркуляції Брюера-Добсона, почала спостерігатися перебудова полярного вихору, що у верхній тропосфері–нижній стратосфері високих широт призводить до появи низхідних рухів. Це призводить до того, що із вищих шарів атмосфери спостерігатися надходження додаткової кількості атомарного кисню та, в цілому, сполук O_x [2]. Подібні процеси призводять до додаткового підвищення кількості озону в атмосфері полярних широт через інтенсифікацію хімічних реакцій утворення озону. У цей же час в помірних широтах, в тому числі і над територією України, можуть спостерігатися вторгнення повітряних мас з півночі, що збагачені озоном [10, 11]. Це призводить до формування так званого типу D вертикального розподілу озону, що характеризується найвищими значеннями в межах 450–500 о.Д. пов'язаному із наявністю двох максимумів у вертикальному розподілі [10]. Перший максимум концентрацій озону, що розташовується вище, сформований процесами над помірними широтами, другий максимум формується у полярних широтах. Під час просування повітряних мас на південь, другий максимум опиняється нижче (у верхній тропосфері). Перебуваючи при цьому певний час у хімічній рівновазі, другий максимум може існувати декілька днів [10].

В результаті подібних процесів над територією України спостерігалися високі (більше 2σ) та аномальні (більше 2.5σ) значення ЗВО: 23–24 лютого над усією територією України, 2 березня над східними, північно-східними та центральними районами України, 12–14 березня над західними районами та 26 березня над північними. У вказані дати на висотах формувався затік повітря на територію України із північного-заходу, де ЗВО був вищим.

За період з січня до березня рівень УФ-опромінення був низьким у зв'язку із незначним

надходженням сонячного випромінювання (сезонні мінімуми та висока повторюваність хмарного неба) та високими значеннями ЗВО, що абсорбує УФ-опромінення. Максимальні значення УФ-індексу не перевищували 3 б.о. (рис. 3), що за наявною класифікацією та рекомендаціями [3] відповідає низькому рівню УФ-опромінення.

ЗВО у квітні та травні в середньому знаходився у межах від 345 о.Д. до 365 о.Д. Такі значення у квітні були на 9–25 о.Д. (відхилення близько $-0.2\dots-0.5\sigma$) нижчими за багаторічну норму, проте у травні вирівнюються із нормою. У порівнянні з початком весни розкид значень ЗВО зменшився. Послаблення циркуляції Брюера-Добсона з переходом до теплого періоду року призводить до поступового сезонного зменшення ЗВО.

УФ-індекс у першій половині квітня встановився на межі 3–4 б.о. Подальше збільшення кількості сонячної радіації у поєднанні з нижчими рівнями ЗВО могло б призвести до підвищення УФ-індексу до градації середніх значень близько 5 б.о. Це чітко видно із розрахунку теоретично можливих значень УФ-індексу, що відповідають умовам безхмарного неба (рис. 3). Проте, наявність хмарності у цей час сприяла коливанню значень УФ-індексу в межах 3–4 б.о.

Поступове сезонне зменшення ЗВО та збільшення кількості сонячної радіації у травні призводить до збільшення повторюваності УФ-індексу близько 5 б.о., що за класифікацією є останнім значенням із області середніх.

Для курортно-санаторних цілей подібні значення вже передбачають застосування елементарних методів захисту та профілактики у поуденні години: перебування в тіні з метою уникнення сонячних опіків, носіння головного убору та сонцезахисних окулярів, заборону проводити оздоровчі процедури під відкритим сонцем або перенесення на більш ранні/пізні години дня [3].

У червні–липні 2019 р. ЗВО в середньому коливався в межах 320–350 о.Д. з меншими значеннями у червні та вищими у липні. Загалом для літнього сезону характерне підвищення інтенсивності фотохімічних реакцій руйнування озону, що разом із послабленням меридіонального обміну через більш однорідне прогрівання над тропічними та полярними широтами призводить до зменшення ЗВО [12].

Подібна динаміка ЗВО спостерігалася у червні, проте у липні, замість очікуваного зменшення концентрацій, почалося підвищення ЗВО. Це спостерігалася більшу частину липня із середніми значеннями на 6–25 о.Д. вище норми (пози-

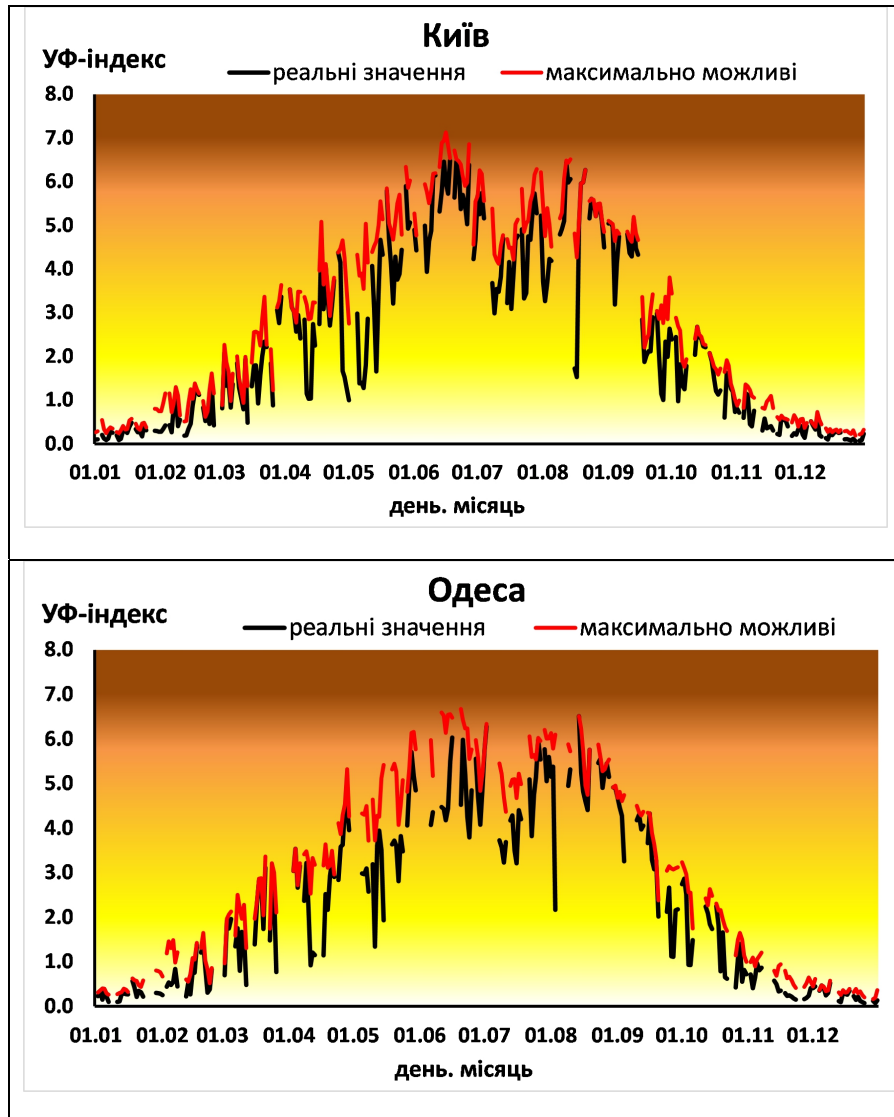


Рис. 3 – Динаміка УФ-індексу над деякими містами України у 2019 році

тивні відхилення на $0.1 \dots 0.5\sigma$). Враховуючи, що інтенсивність фотохімічного руйнування в цей час можна вважати стабільною, а підвищені значення ЗВО характеризувалися широтною залежністю, можна зробити висновок про роль циркуляційних умов. Проте, аналіз розподілу ЗВО над північною півкулею не дав можливості виявити причини підвищеного вмісту ЗВО у липні, тому виявлення конкретних механізмів потребує додаткових досліджень із залученням даних радіозондування та наземних спостережень за ЗВО над територією Європи.

В результаті УФ-індекс досягав найбільших значень у червні, тоді як у липні значення відповідали показникам квітня–травня. Максимальні значення УФ-індексу в червні не перевищили 7, тобто не досягли показників із області дуже високих значень, що вимагають уникати перебу-

вання під відкритим сонцем протягом більшої частини дня. У липні УФ-індекс коливався в межах 3–5 б.о., що навіть за умов безхмарного неба (максимально можливі значення на рис. 3) не перевищували б значення 6 б.о.

У серпні ЗВО зменшився до 298–310 о.Д. та мало відхилився від норми (відносні відхилення в межах $0 \dots -0.2\sigma$). Для цього періоду характерне продовження сезонного зменшення концентрацій озону внаслідок фотохімічних реакцій як за механізмом Чепмена, так і за участю нітрогено-, воднево- та хлоровмісних сполук. УФ-індекс збільшився у порівнянні із липнем, проте максимальні значення лише протягом одного дня перевищили 6 б.о.

Своїх мінімальних сезонних значень ЗВО досяг протягом вересня–жовтня, зменшившись до 285–301 о.Д. у вересні та до 265–280 о.Д. у жов-

тні. Подібні концентрації є типовими та не перевищують норму більше ніж 15 о.Д. за абсолютним значенням (в середньому мінімальні відхилення близько -0.3σ). Процеси формування сезонних мінімумів ЗВО у вересні–жовтні мають динамічну природу. У цей час спостерігається різке зменшення кількості сонячного випромінювання та прогрівання полярних широт північної півкулі. У зв'язку з цим починає формуватися полярний вихор, що перешкоджає меридіональному перенесенню озону із більш низьких широт [13].

УФ-індекс поступово зменшується до низьких значень на рівні 2–3 б.о. ЗВО та сезонні процеси його зменшення у вересні–жовтні вже не є визначальними для рівнів УФ-опромінення у зв'язку зі зменшенням кількості сонячного випромінювання. Навіть за середніх значень ЗВО близько 260–270 о.Д., теоретичні максимально можливі значення УФ-індексу за безхмарного неба не перевищували б 4 б.о., фактичні ж були на рівні 3 о.

Протягом листопада–грудня 2019 р. почалося збільшення ЗВО, пов'язане з інтенсифікацією циркуляції Брюера-Добсона, та наприкінці року досяг середніх значень 310–315 о.Д., що відповідали багаторічній нормі для цього періоду. 27–28 грудня почали з'являтися перші високі значення ЗВО нового зимового сезону, що були близькими до позитивних аномальних відхилень та досягали 2.0–2.4 σ .

В результаті, середньорічні значення ЗВО за 2019 рік характеризуються широтним розподілом та збільшенням значень у напрямку на північ (рис. 4А). Такий розподіл являє собою типову узагальнену картину сформовану меридіональним перенесенням озону через циркуляцію Брюера-Добсона. Деяке поширення ізоліній вглиб на південь є результатом впливу періодів зі значними позитивними відхиленнями ЗВО, сформованими в результаті виносу повітряних мас з півночі.

Просторовий розподіл максимальних значень за 2019 рік вкрай неоднорідний (рис. 4Б). Локалізації з аномальними значеннями відображають ті території, на які у лютому–березні переміщувалися на висотах збагачені озоном повітряні маси. Необхідно мати на увазі, що подібні процеси адвекції повітряних мас відбуваються швидко, і тому між сусідніми строками супутникового зондування, об'єми повітря із високими концентраціями озону встигають пройти значну

відстань. Це і зумовлює неоднорідність розподілу на карті максимальних значень. Так наприклад, максимуми ЗВО вище 490 о.Д. на півдні України отримані у момент проходження супутника. Ці ж концентрації пройшли шлях з півночі на південь від попереднього часу зондування.

Мінімальні значення ЗВО за 2019 рік збільшуються у напрямку на південь (рис. 4В). Чіткий широтний розподіл зумовлений формуванням полярного вихору, під час якого у високих широтах формуються негативні відхилення ЗВО.

4. ВИСНОВКИ

Більшу частину 2019 р. ЗВО над територією України коливався в межах 260–370 о.Д. з відсутністю значних негативних відхилень. Значні позитивні відхилення спостерігалися на початку року у зв'язку із сукупністю процесів інтенсифікації циркуляції Брюера-Добсона, перебудовою полярного вихору та адвекцією повітряних мас на висотах на територію України з північного заходу. Це призвело до формування позитивних аномальних відхилень ЗВО 23–24 лютого над усією територією України, 2 березня над більшою частиною території України, 12–14 березня над західними районами та 26 березня над північними. Максимальні значення досягали 500 о.Д.

Протягом квітня–червня 2019 р. відбувалося сезонне зменшення ЗВО та поступове збільшення УФ-опромінення, що досягло найвищих значень у середині–кінці червня, коли УФ-індекс досягав 6 б.о., проте не перевищував небезпечні межі у 7 б.о. У липні рівні УФ-опромінення зменшились у зв'язку із нехарактерним для літнього сезону збільшенням ЗВО на 25 о.Д. (близько 0.5σ).

Із серпня до листопада спостерігалось сезонне зменшення концентрацій озону, пов'язаних із процесами фотохімічного руйнування у серпні та формуванням й інтенсифікацією полярного вихору у осінній сезон. Найменші значення ЗВО над територією України спостерігалися у жовтні (260–270 о.Д.), проте такий вміст є типовим для цього періоду. У середньому відносні відхилення не були нижчими за -0.3σ від норми.

Сезонне збільшення ЗВО почалося у листопаді; перші значні позитивні відхилення (в межах 2–2.4 σ) – в кінці грудня.

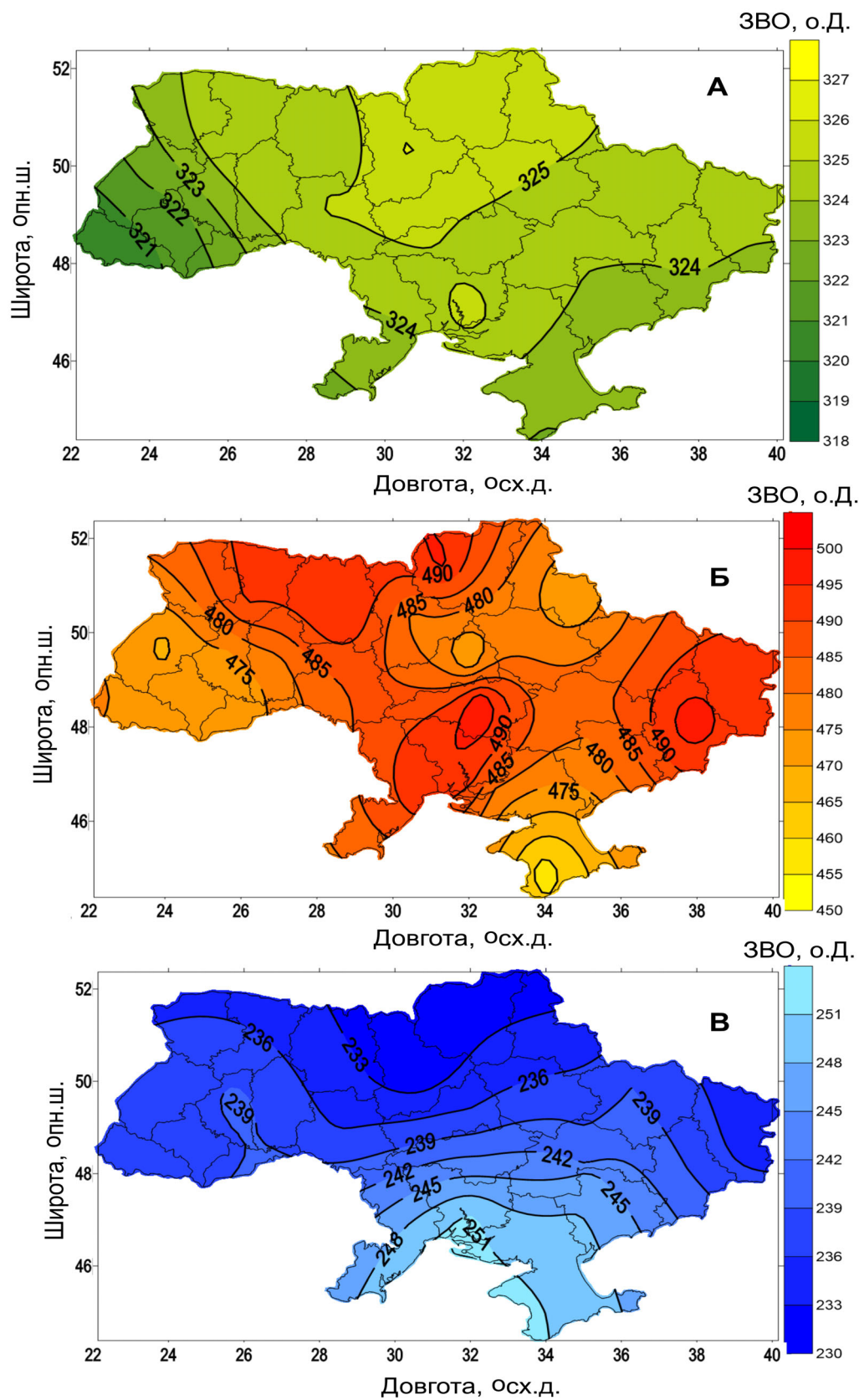


Рис. 4 – Просторовий розподіл середніх (А), максимальних (Б) та мінімальних (В) значень ЗВО за 2019 рік над територією України

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Fabian P., Dameris M. *Ozone in the Atmosphere: Basic Principles, Natural and Human Impacts*. Springer, 2014. 144 p.
2. Dessler A. *The Chemistry and Physics of Stratospheric Ozone*. International Geophysics Series. Vol. 74. Academic Press, 2005. 255 p.
3. Global solar UV index: a practical guide. A joint recommendation of WHO, WMO, UNEP, ICMIRP / World Health Organization. 2002. 18 p.
4. Огляд стану озонного 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>
5. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2002 році. Київ : Мінекології. 2002. 164 с.
6. NASA Ozone Watch. URL: <https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov> (Accessed: 08.01.2020)
7. Эмпирическая модель для расчета солнечной ультрафиолетовой облученности по данным измерений, выполненных в ходе Второй Украинской Антарктической экспедиции / Белявский А. В. Грищенко В. Ф., Крученицкий Г. М. и др. *Наукові праці Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту*. 1999. Вип. 247. С. 30–36
8. 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. URL: https://www.eumetsat.int/website/wcm/idc/idcplg?IdcService=GET_FILE&dDocName=ZIP_CONF_2016_S6_POSTERS&RevisionSelectionMethod=LatestReleased&Renderition=Web (Accessed: 30.12.2019)
9. How is total ozone distributed over the globe? URL: <https://www.esrl.noaa.gov/csd/assessments/ozone/2010/twentyquestions/Q4.pdf> (Accessed: 08.01.2020)
10. Хргиан А. Х. *Физика атмосферного озона*. Ленинград : Гидрометеоиздат. 1973. 293 с.
11. Євтушевський О. М. Довготна залежність сезонних змін загального вмісту озону в середньопівнічній атмосфері північної півкулі. *Український журнал дистанційного зондування Землі*. 2014. № 3. С. 49–58
12. Cordeco E. C., Kawa S. R. Ozone and tracer transport variations in the summer Northern Hemisphere stratosphere. *Journal of Geophysical Research*. 2001. 106(D11). P.12,227–12,239
13. Polar vortex emerges over the North Pole. URL: <https://www.severe-weather.eu/news/polar-vortex-emerges/> (Accessed: 08.01.2020)

REFERENCES

1. Fabian, P. & Dameris, M. (2014). *Ozone in the Atmosphere: Basic Principles, Natural and Human Impacts*. Springer.
2. Dessler, A. (2005). *The Chemistry and Physics of Stratospheric Ozone*. International Geophysics Series. Vol. 74. Academic Press.
3. World Health Organization (2002). *Global solar UV index: a practical guide. A joint recommendation of WHO, WMO, UNEP, ICMIRP*.
4. 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]. *Ukrains'kij gidrometeorologičnij žurnal [Ukrainian hydrometeorological journal]*, (23), 34-41. <https://doi.org/10.31481/uhmj.23.2019.04> (in Ukr.)
5. Ministry of Ecology of Ukraine (2002). *Natsionalna dopovid pro stan navkolysnioho pryrodnoho seredovysccha v Ukraini v 2002 rotsi [National report on the environment in Ukraine in 2003]*. Kyiv. (in Ukr.)
6. NASA Ozone Watch. Available at: <https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov> (Accessed: 08.01.2020)
7. Belyavskiy, A., Grishchenko, V., Kruchenitskiy, G. et al. (1999). Empiricheskaya model dlya rascheta ultrafioletovoy oblučennosti po dannym izmereniy, vypolnennykh v khode Vtoroy Ukrainской Antarkticheskoy ekspeditsii [Empirical model for solar UV-irradiance calculation based on Second Antarctic Expedition data]. *Naukovi pratsi UkrNDGMI. [Scientific papers of UkrSRHMI]*, 243, pp. 30–36 (in Russ.)
8. 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. Available at: https://www.eumetsat.int/website/wcm/idc/idcplg?IdcService=GET_FILE&dDocName=ZIP_CONF_2016_S6_POSTERS&RevisionSelectionMethod=LatestReleased&Renderition=Web (Accessed: 10.01.2019)
9. How is total ozone distributed over the globe? Available at: <https://www.esrl.noaa.gov/csd/assessments/ozone/2010/twentyquestions/Q4.pdf> (Accessed: 08.01.2020)
10. Khrgian, A.H. (1973). *Fizika atmosfernogo ozona [The physics of atmospheric ozone]*. Leningrad: Gidrometeoizdat. (in Russ.)
11. 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, pp. 49–58 (in Ukr.)
12. Cordeco, E.C. & Kawa, S.R. (2001). Ozone and tracer transport variations in the summer Northern Hemisphere stratosphere. *Journal of Geophysical Research*, 106(D11), 12,227–12,239.
13. Polar vortex emerges over the North Pole. Available at: <https://www.severe-weather.eu/news/polar-vortex-emerges/> (Accessed: 08.01.2020)

OZONE LAYER STATE AND LEVEL OF ULTRAVIOLET IRRADIANCE OVER THE TERRITORY OF UKRAINE IN 2019

M. V. Savenets¹, I. V. Dvoretzka¹, A. P. Umanets¹, N. V. Grechana²

¹ Ukrainian Hydrometeorological Institute, 37, Nauky Pr., 03028 Kyiv, Ukraine,
savenetsm@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9429-6209>

² Taras Shevchenko National University of Kyiv, 64/13 Volodymyrska St., 01601, Kyiv, Ukraine

The paper presents main results of total ozone column (TOC) and levels of ultraviolet irradiance daily monitoring conducted for the Ukrainian territory in 2019. Monitoring and analysis were performed using TOC data measured by the satellite Ozone Monitoring Instrument (the OMI) and estimated values of ultraviolet index. The research was made on the regular grid with 1° spatial resolution and separately for geographical coordinates of centers of Ukrainian administrative regions. In 2019 the TOC ranged within a multiyear average standard with its average value was equal to 260–360 D.u. During winter ozone concentration reached its highest values due to intensification of Brewer-Dobson circulation. Weakened polar vortex and ozone-rich air masses advection at the upper atmospheric levels which transport high ozone concentrations, resulted in the TOC positive anomalies emergence over Ukraine. The air masses penetrated Ukrainian territory from the north-west and this led to emergence anomalously high TOC values during a number of periods: February 23–24, March 2, March 12–14, March 26. In these periods 450–500 D.u. was a typical ozone content. Seasonal TOC decrease, observed from April to June, was caused by a weakened Brewer-Dobson circulation and intensification of photochemical ozone loss. Nevertheless, TOC deviations from average standard were negligible and this resulted in absence of very high UV-index values. The highest UV-index values did not reach 7 units. In July the TOC was slightly higher than usual concentrations, which was probably caused by dynamic factors. Such TOC values influenced the level of ultraviolet irradiance and the UV-index varied within 3–4 units' range which is typical for Ukraine in April–May. Such ozone state in 2019 made it impossible for UV-index to reach extremely high levels, especially during the summer period. Further TOC changes were characterized by typical seasonal ozone decrease with minimum values observed in October resulted from formation and intensification of polar vortex. Average minimum values in October amounted to 260–270 D.u., however, it is a typical TOC content for this period with a relative deviation from the standard constituting about -0.3σ . Seasonal ozone increase in 2019 started in mid-November. At the end of December the first high positive deviations happened. The highest of them reached close to anomalous $2-2.4\sigma$ values.

Keywords: total ozone content, ultraviolet irradiance, UV-index, anomaly, deviation

СОСТОЯНИЕ ОЗОНОВОГО СЛОЯ И УРОВНЯ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ОБЛУЧЕНИЯ НАД ТЕРРИТОРИЕЙ УКРАИНЫ В 2019 ГОДУ

М. В. Савенец¹, И. В. Дворецкая¹, А. П. Уманец¹, Н. В. Гречаная²

¹ Украинский гидрометеорологический институт ГСЧС
Украины и НАН Украины, пр. Науки, 37, 03028, Киев, Украина,
savenetsm@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9429-6209>

² Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,
ул. Владимирская 64/13, 01601, Киев, Украина

В статье представлены результаты ежесуточного мониторинга состояния озонового слоя и уровней ультрафиолетовой облученности территории Украины в 2019 году. Для мониторинга и анализа использованы данные общего содержания озона (ОСО), измеренные спутниковым прибором Ozone Monitoring Instrument (ОМИ), а также рассчитанные значения ультрафиолетового индекса. Исследование проведено на регулярной сетке с пространственным разрешением 1° и отдельно для географических координат центров

административных областей Украины. В 2019 г. ОСО варьировался в пределах многолетней нормы и в среднем был равен 260–360 е.Д. В зимний сезон концентрации озона были наиболее высокими, что обусловлено интенсивной циркуляцией Брюера-Добсона. Ослабление полярного вихря и адвекция богатого озоном воздуха на высотах с северо-запада обусловили появление аномально высоких значений ОСО в период 23–24 февраля, 2 марта, 12–14 марта и 26 марта, во время которых ОСО увеличивался до 450–500 е.Д. Сезонное уменьшение ОСО, обусловленное ослаблением циркуляции Брюера-Добсона и интенсификацией фотохимических реакций разрушения озона, наблюдалось с апреля по июнь. Однако, отклонения ОСО от нормы были незначительными, в результате чего отсутствовали очень высокие значения УФ-индекса, который не достигал 7 единиц. Июль характеризовался более высокими концентрациями озона, что наиболее вероятно обусловлено динамическими факторами, в результате чего УФ-индекс колебался в пределах 3–4 единиц. Результатом таких вариаций ОСО стало отсутствие экстремально высоких уровней ультрафиолетовой облученности в летнее время 2019 г. В последующие месяцы наблюдалось типичное сезонное уменьшение ОСО, которое достигло минимальных значений в октябре в результате формирования и интенсификации полярного вихря. В среднем наименьшие значения достигли 260–270 е.Д., однако эти отклонения близки к норме с относительными отклонениями около -0.3σ . Сезонное увеличение ОСО в 2019 г. началось в середине ноября. Уже в конце декабря начали наблюдаться первые значительные позитивные отклонения, которые достигли близких к аномальным значений $2-2.4\sigma$.

Ключевые слова: общее содержание озона, ультрафиолетовая облученность, УФ-индекс, аномалия, отклонение

Подання до редакції: 25. 01. 2020
Надходження остаточної версії: 13. 03. 2020
Публікація статті: 03. 07. 2020