

ЗАГАЛЬНИЙ ВМІСТ ОЗОНУ НАД СТАНЦІЄЮ КИЇВ-ГОЛОСІЇВ ЗА НАЗЕМНИМИ ТА СУПУТНИКОВИМИ ВИМІРЮВАННЯМИ У 2010—2015 рр.

Наземні вимірювання загального вмісту озону (ЗВО) в одиницях Добсона (ОД) проводяться за допомогою спектрофотометра Добсона на станції Київ-Голосіїв з травня 2010 р. Наземні вимірювання здійснюються за умов «прямого Сонця» (Direct Sun — DS), ясного неба в зеніті (Zenith Blue — ZB) чи хмарного неба в зеніті (Zenith Cloud — ZC) у стандартних парах довжин хвиль A, C, D у ближньому ультрафіолетовому діапазоні ($\lambda = 300...340$ нм). У цій роботі досліджуються розбіжності між супутниковими і наземними спостереженнями ЗВО в атмосфері над вказаною станцією. Крім того, розглядаються сезонні варіації ЗВО та зміни різниць між супутниковими та наземними вимірюваннями. Першим завданням роботи є дослідження головних особливостей сезонних варіацій ЗВО на станції Київ-Голосіїв. Друге завдання полягає в оцінці рівня відмінностей між супутниковими й наземними значеннями ЗВО та визначенні можливих причин цих відмінностей. Ми обробили вимірювання загального вмісту озону з допомогою спектрофотометра Добсона в двох парах довжин хвиль (AD і CD) для типів DS, ZB та ZC. Були залучені також супутникові дані приладів OMI/Aura, GOME-2/MetOpA та GOME-2/MetOpB. Для порівняння використано окремі вимірювання неподалік наземної станції та побудовані на їхній основі моделі з шестигодичним кроком. Різниця між супутниковими (моделельними) та наземними даними досліджено окремо для кожного типу вимірювань спектрофотометра Добсона. Визначено, що мінімальні річні середні значення ЗВО фіксувались у 2011 р. (319...322 ОД залежно від типу вимірювань), а максимальні — у 2013 р. (327...338 ОД). Різниця між супутниковими й наземними даними демонструє сезонний цикл із відносною недооцінкою ЗВО при наземних спостереженнях у кінці осені — на початку зими. Головною причиною бачиться деяке заниження DSAD-значень поблизу моменту зимового сонцестояння. Вказане явище у першу чергу погіршує якість AD-даних через швидкий спад інтенсивності випромінювання у короткохвильовій парі A при збільшенні зенітної відстані Сонця (збільшується вплив розсіяного світла). Типові значення розбіжності сягають 20 ОД, а іноді й більше. Розбіжності збільшуються при високому вмісті озону понад 400 ОД. Навпаки, CD значення у таких умовах виявляються завищеними порівняно з модельними. Згідно з результатами зіставлення з супутниковими вимірюваннями, для спектрофотометра Добсона № 040 станції Київ-Голосіїв високу якість демонструють ряди спостережень типів DSAD, DSCD і ZBAD (за винятком DSCD для 2015 р.). Спостереження ZBCD і ZC виявляються нестійкими стосовно середніх різниць, а подвоєні середні квадратичні відхилення, обчислені протягом календарного року, регулярно перевищують 25 ОД.

Ключові слова: загальний вміст озону, спектрофотометр Добсона, супутникові вимірювання, спостережні ряди, порівняння даних.

ВСТУП

Загальний вміст озону в атмосфері визначається за допомогою дистанційних спостережень, головним чином у ближньому ультрафіолетовому діапазоні, де озон демонструє інтенсивне поглинання зі значною залежністю від довжини хвилі [1]. Загальний вміст озону (ЗВО) є інтегральною характеристикою, яка характеризує кількість молекул у верти-

кальному стовпі атмосфери одиничного перерізу. Величина ЗВО змінюється у просторі й часі. Визначення загального вмісту озону провадиться за допомогою наземних [13] і супутникових засобів [14]. Значна увага приділяється питанню взаємної узгодженості цих даних і оцінки відповідності між рядами різного походження [8, 14, 15].

Сезонні варіації ЗВО над Україною характерні для середніх широт північної півкулі загалом [7]. Максимум ЗВО з типовими значеннями близько

400 ОД спостерігається у лютому — квітні. Для цього ж періоду властиві суттєві перепади вмісту озону протягом кількох діб, а також помітні відмінності для різних років [2]. Натомість у жовтні — листопаді спостерігається сезонний мінімум зі значеннями близько 250 ОД. Для літа і осені типовими є незначні перепади вмісту озону від одного дня до іншого, а також слабка відмінність величин для різних років [3].

Вимірювання *ЗВО* на станції Київ-Голосіїв (координати 50.36 °N, 30.50 °E) з допомогою спектрофотометра Добсона № 040 ведуться з травня 2010 р. [11]. Ці вимірювання виконуються практично для кожного дня, за винятком ситуацій із тривалими інтенсивними опадами. Методика спостережень із спектрофотометром Добсона передбачає використання стандартних пар довжин хвиль AD і CD, що містяться у ближньому ультрафіолетовому діапазоні 300...340 нм; дві пари довжин хвиль дозволяють суттєво зменшити вплив аерозольного компонента атмосфери і релєвського розсіяння [5, 9]. Відмінності між обчисленнями за однією та за двома парами довжин хвиль ілюструються рис. 1.

Базовими є спостереження з використанням прямого сонячного випромінювання (Direct Sun, DS), для обчислення *ЗВО* за якими є фізично прозорий алгоритм, що ґрунтується на законі Бугера — Бера — Ламберта [5, 9]. Розрахунок у монохроматичному наближенні виконується за формулою [9]

$$X = \frac{\lg \frac{I_0}{I'_0} - \lg \frac{I}{I'} - (\beta - \beta')m \frac{p}{p_0} - (\delta - \delta') \sec Z}{\mu(\alpha - \alpha')}$$

Тут I_0 — інтенсивність сонячного випромінювання поза атмосферою Землі, I — інтенсивність випромінювання на поверхні Землі (у точці спостереження), μ — відношення реального та вертикального шляхів при проходженні випромінювання через озоновий шар, m — те ж відношення для атмосфери загалом, Z — (кутова) зенітна відстань Сонця (строго кажучи, замість $\sec Z$ має бути m_a — відношення реального та вертикального шляхів випромінювання через «аерозольний шар», але проведена заміна не вносить відчутних похибок), p — реальний тиск у

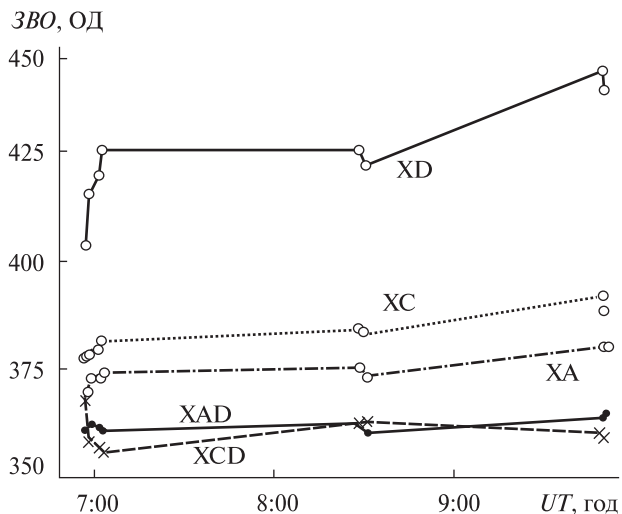


Рис. 1. Значення загального вмісту озону, отримані 16 травня 2016 р. з вимірювань із використанням прямого сонячного випромінювання як в одній (XA, XC, XD), так і у двох (XAD, XCD) парах довжин хвиль. Довжини хвиль становлять: 305.5 і 325.0 нм (пара A); 311.5 і 332.4 нм (C); 317.5 і 339.9 нм (D) — див. [9]

точці спостереження, $p_0 = 1013.25$ гПа — стандартний тиск на рівні моря, α — коефіцієнт поглинання озonom, β — оптична товщина при релєвському розсіянні за умови вертикального поширення випромінювання при стандартному атмосферному тиску на рівні моря $p_0 = 1013.25$ гПа, δ — аерозольна оптична товщина при вертикальному поширенні світла. Вказані параметри α , β , δ відповідають запису закону Бугера — Бера — Ламберта з основою 10.

Основними джерелами похибок при застосуванні описаного методу є вплив розсіяного у приладі світла [5], недостатня точність коефіцієнтів поглинання озonom [12], залишковий вплив аерозольної складової (зокрема, це стосується значних відхилень при обчисленнях за однією парою довжин хвиль — див. рис. 1). Також аналізується світло, розсіяне у зенітній області; такий алгоритм має статистичну основу — будуватиметься поліноміальна апроксимація з використанням одночасних DS-вимірювань [6, 9]. Залежно від стану неба в зеніті йдеться про вимірювання Zenith Blue (ZB) чи Zenith Cloud (ZC). Зенітні дані необхідні для знаходження *ЗВО* при відсутності чи недостатній якості спостережень за «прямим Сонцем».

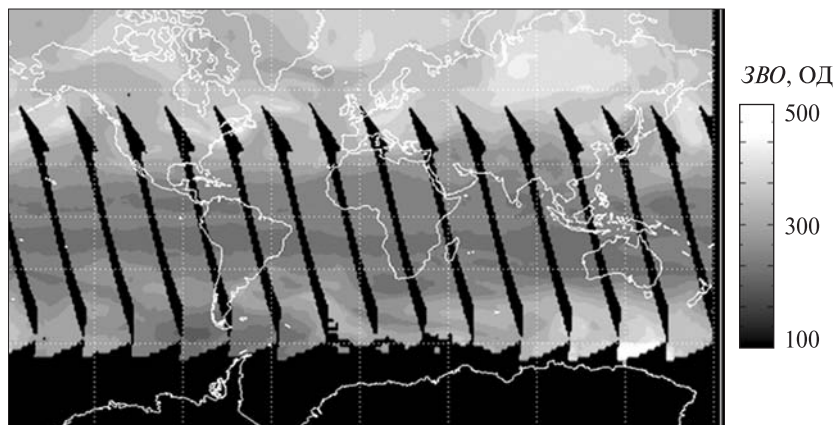


Рис. 2. Загальний вміст озону за даними ОМІ для 16 травня 2016 р

Зазвичай більш надійними є AD-вимірювання, які розглядаються як базові [9]. Втім, ситуація змінюється при малих висотах Сонця [5], що необхідно враховувати протягом одного-півтора місяців до і після зимового сонцестояння. Інтенсивність короткохвильового випромінювання у парі A значно зменшується, це збільшує відносний вплив розсіяного світла на результат. Як наслідок, за таких умов меншими похибками характеризуються вже CD-дані, у свою чергу AD-спостереження помітно недооцінюють ЗВО (див., зокрема, [2]). Особливо значними похибки стають якраз для спостережень за прямим сонячним випромінюванням.

ДАНІ І МЕТОДИКА

У даній роботі використовуються дані окремих вимірювань на станції Київ-Голосіїв, а також середньодобові значення. Розглядалися всі шість типів даних, які з'являються при DS-, ZB- та ZC-вимірюваннях у парах довжин хвиль AD і CD — подібно до роботи [2], де аналізувалися дані 2010—2012 рр.

Регулярні супутникові вимірювання загально-го вмісту озону проводяться з кінця 1978 р. [10]. Головний метод визначення ЗВО ґрунтується на аналізі інтенсивності розсіяного у зворотному напрямку з області надиру випромінювання у ближньому ультрафіолетовому діапазоні (спектрофотометр Добсона має справу з таким же випромінюванням, що пройшло крізь земну атмосферу). У цій роботі використано дані су-

путникових інструментів Ozone Monitoring Instrument (OMI) / Aura, Global Ozone Monitoring Experiment-2 (GOME-2) / MetOpA та GOME-2/ MetOpB (із квітня 2013 р.); див. <http://www.temis.nl>. Усі такі супутники мають полярні сонячно-синхронні орбіти з нахилом близько 98° . Приклад карти, отриманої за вимірюваннями ОМІ/ Aura, наведено на рис. 2. Зазначимо, що для оцінки довгострокових варіацій також залучено базу даних Multi-Sensor Reanalysis (MSR) для 1979—2008 рр. (<http://www.temis.nl>), утворену на основі вимірювань різних приладів.

Що стосується супутникових даних, використані індивідуальні вимірювання (http://www.temis.nl/protocols/o3col/overpass_omi.html), а також моделі, побудовані на основі таких результатів (http://www.temis.nl/protocols/o3field/overpass_omi.html). Модель забезпечує сталий часовий крок (шість годин; значення представлено для 00, 06, 12 та 18^h UT). Такий формат спрощує обробку, тим більше що дані наявні практично для всіх моментів часу. Зрозуміло, точність подібних рядів може помітно змінюватися на різних часових інтервалах. Для порівняння з наземними вимірюваннями використано дані моделі ОМІ станом на 12^h UT, оскільки цей час найбільш відповідає часу спостережень зі спектрофотометром Добсона.

Індивідуальні супутникові вимірювання представлено у формі так званих «оверпасів», коли наводиться результат, для якого центр поля зору приладу перебував якнайближче до наземної

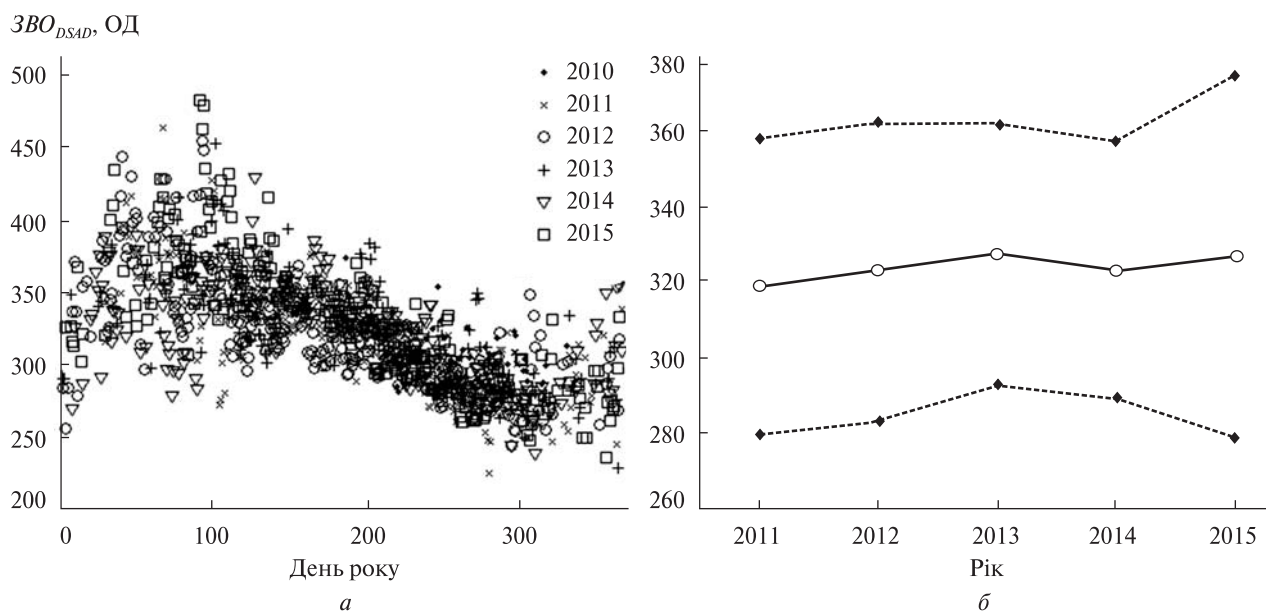


Рис. 3. Значення ZBO_{DSAD} за даними наземних вимірювань типу DSAD на станції Київ-Голосіїв: а — середньодобові дані, б — середньорічні дані

станції. При зіставленні таких даних із наземними важливий просторовий і часовий збіг [14]. Втім, у типових атмосферних умовах масштаб варіацій ZBO дозволяє не враховувати погіршення збіжності при різниці моментів вимірювань у кілька годин і відстаней — у межах 50...100 км.

СЕЗОННІ І МІЖРІЧНІ ЗМІНИ

Результати на рис. 3 підтверджують отримані за супутниковими вимірюваннями висновки [7], що сезонний максимум на станції Київ-Голосіїв спостерігається навесні, а сезонний мінімум — у середині осені. Для періоду перед максимумом і під час нього типовими є великі перепади ZBO , іноді — квазірегулярні. Натомість літньо-осінній період характеризується незначними міждбовими та міжрічними варіаціями. Оскільки рис. 3 містить DSAD-дані, то кількість точок для різних сезонів року неоднакова у зв'язку з мінливістю погодних умов. Відзначимо, що річні середні при переході до інших типів вимірювань змінюються слабо. Мінімальні річні середні значення фіксувались у 2011 р. (319...322 OD залежно від типу вимірювань), а максимальні — у 2013 р. (327...338 OD). Високі рівні озону над Європою реєструвались у 2010 р. [4], але неповні

дані станції Київ-Голосіїв для цього року не дозволяють обчислити надійне середнє. Водночас згідно з моделлю OMI 2010-й рік дійсно характеризується високими значеннями вмісту озону (рис. 4).

Моделі на основі даних OMI, GOME2-a і GOME2-b були використані для обчислення річних середніх і середніх квадратичних відхилень, які характеризують розкид даних протягом року. Отримані результати наведено на рис. 4, при цьому дані спектрофотометра Добсона охоплюють період 2011–2015 рр., а GOME2-b — тільки 2014 і 2015 рр. Для уявлення про довгострокові варіації ZBO на рис. 4 також показані дані MSR, які охоплюють 1979–2008 рр. Вони демонструють властиве середньоширотним станціям поірне зменшення вмісту озону протягом 1980-х рр. із мінімумом на початку 1990-х і збільшенням протягом наступного десятиліття (див., наприклад, ряд [13], отриманий на станції Ароза у Швейцарії). Порівняння рядів даних демонструє, що іноді виникає навіть збіг середньорічних характеристик у межах 1 OD (ZBO для 2012 р., середні квадратичні відхилення для 2014 р.) — це вказує на непогану узгодженість результатів різних приладів. З високою точністю збігаються середні по-

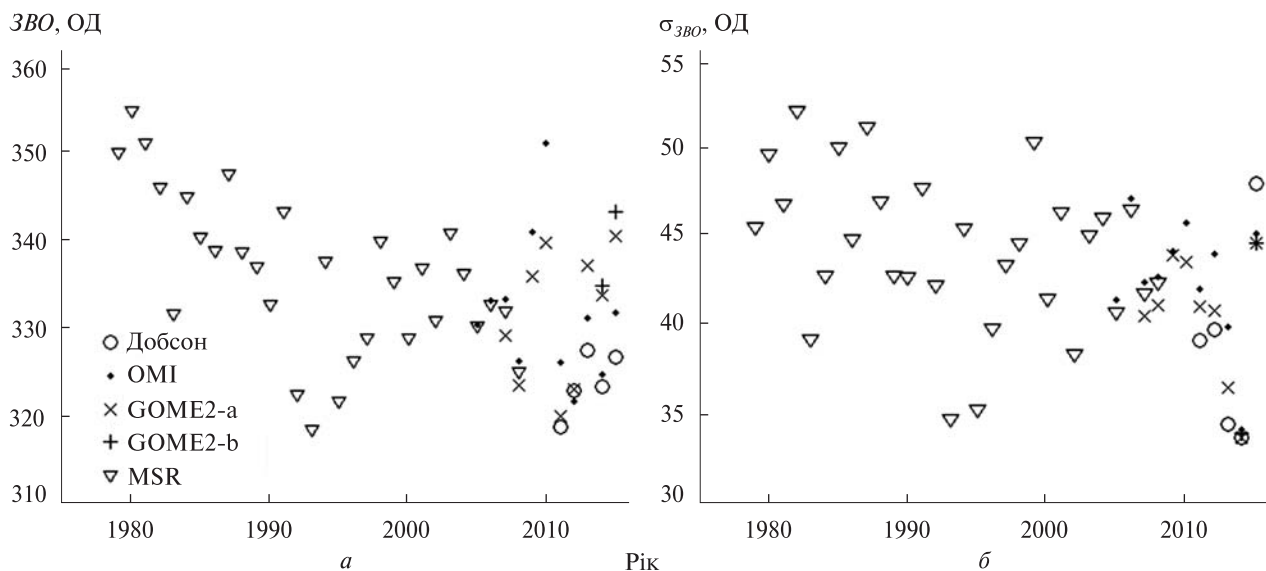


Рис. 4. Середньорічні значення ZBO (а) та відповідні середні квадратичні відхилення σ_{ZBO} (б) у 1979—2015 рр. Використано добові DSAD-дані спектрофотометра Добсона та модельні значення станом на $UT = 12^h$ кожного дня (OMI, GOME2-а, GOME2-б та MSR)

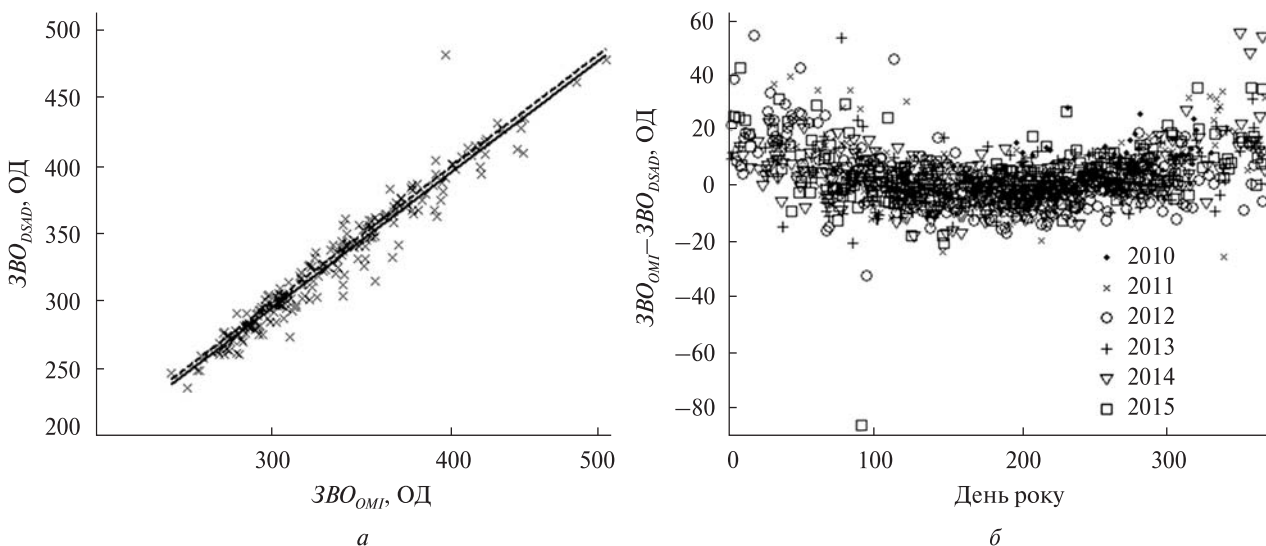


Рис. 5. Корелятивна залежність значень ZBO_{DSAD} , отриманих за даними спектрофотометра Добсона у 2015 р., від модельних значень ZBO_{OMI} станом на 12^h UT (суцільна пряма — апроксимація $ZBO_{DSAD} = (1.00 \pm 0.03)ZBO_{OMI} - 2.9 \pm 10.3$, штрихова — лінія однакових значень $ZBO_{DSAD} = ZBO_{OMI}$) (а) та річні варіації різниці $ZBO_{OMI} - ZBO_{DSAD}$ для 2010—2015 рр. (б)

казники для моделей на основі GOME2-а та GOME2-б. В інших випадках розбіжності більш серйозні. Скажімо, зіставлення річних середніх для 2010 і 2013—2015 рр. може призвести до різних висновків при використанні моделей OMI та GOME2-а. Дані про масштаб варіацій ZBO (рис. 4, б) мають вищу однорідність і свідчать, зокрема, про менші перепади вмісту озону у 2014 р.

(середнє квадратичне відхилення $\sigma_{ZBO} \approx 35$ ОД) порівняно з 2015 р. (45 ОД чи дещо більше).

**ЗІСТАВЛЕННЯ ДАНИХ,
ОТРИМАНИХ НАЗЕМНИМИ
І СУПУТНИКОВИМИ МЕТОДАМИ**

На рис. 5, а приведено корелятивну залежність значень ZBO_{DSAD} над станцією Київ-Голосіїв,

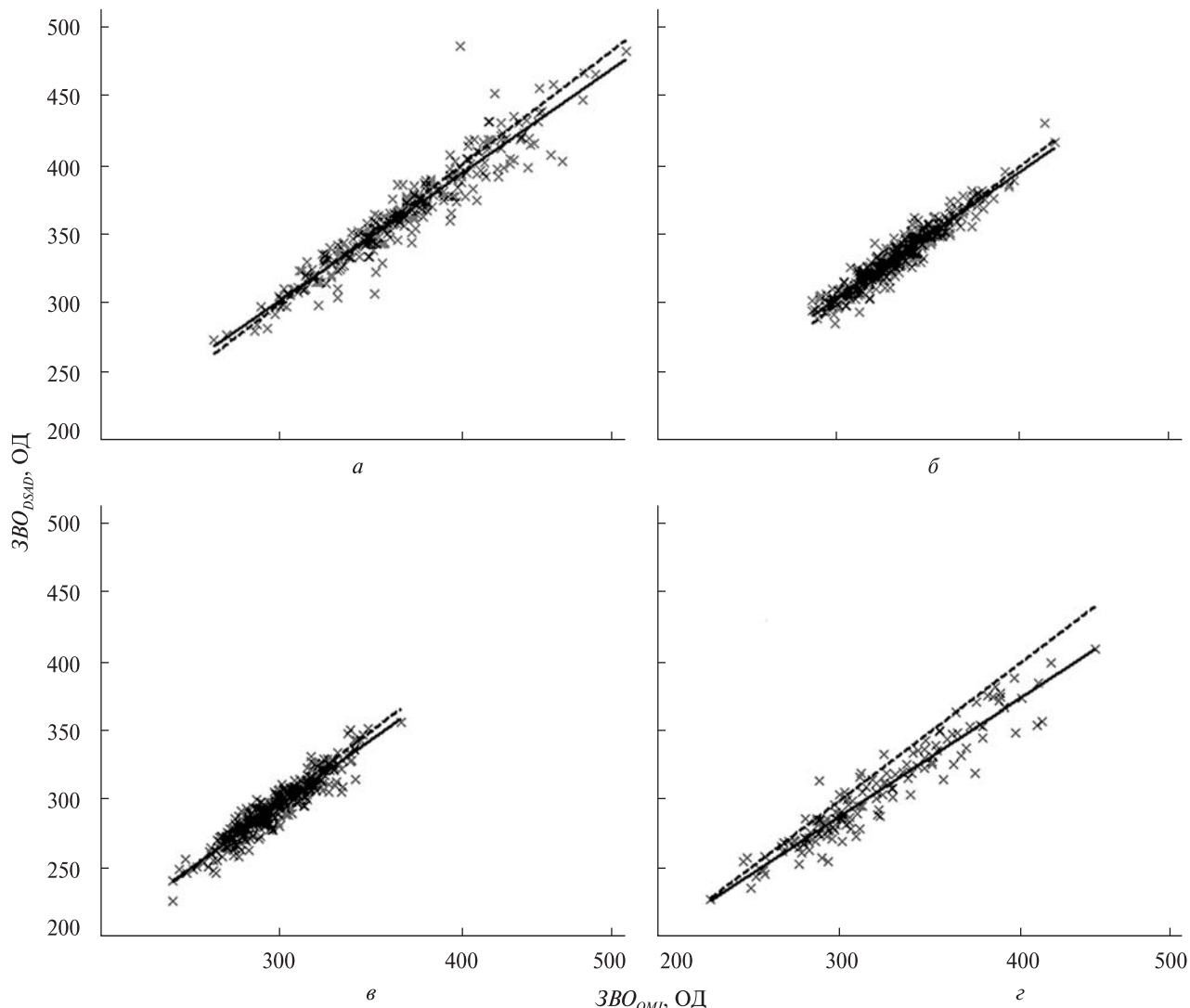


Рис. 6. Корелятивні залежності значень ZBO_{DSAD} , отриманих з DSAD-вимірювань зі спектрофотометром Добсона, від модельних значень ZBO_{OMI} станом на 12^h UT для різних сезонів та їхні лінійні апроксимації (суцільні прямі): *a* – весна (дні року 35...125, апроксимація $ZBO_{DSAD} = (0.91 \pm 0.03)ZBO_{OMI} + 27.6 \pm 12.4$), *б* – літо (126...219, апроксимація $ZBO_{DSAD} = (0.92 \pm 0.03)ZBO_{OMI} + 29.3 \pm 9.2$), *в* – осінь (220...311, апроксимація $ZBO_{DSAD} = (0.94 \pm 0.03)ZBO_{OMI} + 15.8 \pm 9.9$), *г* – зима (312...34, апроксимація $ZBO_{DSAD} = (0.86 \pm 0.04)ZBO_{OMI} + 29.1 \pm 14.2$). Штрихові прямі – лінії однакових значень

отриманих за DSAD-даними спектрофотометра Добсона, та модельних значень ZBO_{OMI} , отриманих на основі вимірювань ОМІ. У середньому наземні та модельні дані між собою узгоджуються добре, але є набір точок, для яких спектрофотометр Добсона показав відносно заниження на кілька десятків одиниць Добсона. Зокрема, у шістнадцяти випадках наземні добові середні нижчі за модельні більш як на 20 ОД, аналогічне перевищення даних DSAD порівняно з моделлю

ОМІ спостерігається тільки для двох днів у 2015 р. Це підтверджується і даними наземних вимірювань для всіх років (рис. 5, б): максимальні відхилення вказаного характеру спостерігаються поблизу моменту зимового сонцестояння. Типові значення розбіжності сягають 20 ОД, а іноді й більше. Середнє значення різниці за весь період, природно, суттєво менше: у 2015 р. становило 4.1 ± 22.3 ОД (вказане подвійне середнє квадратичне відхилення 2σ). Розкид різниць наймен-

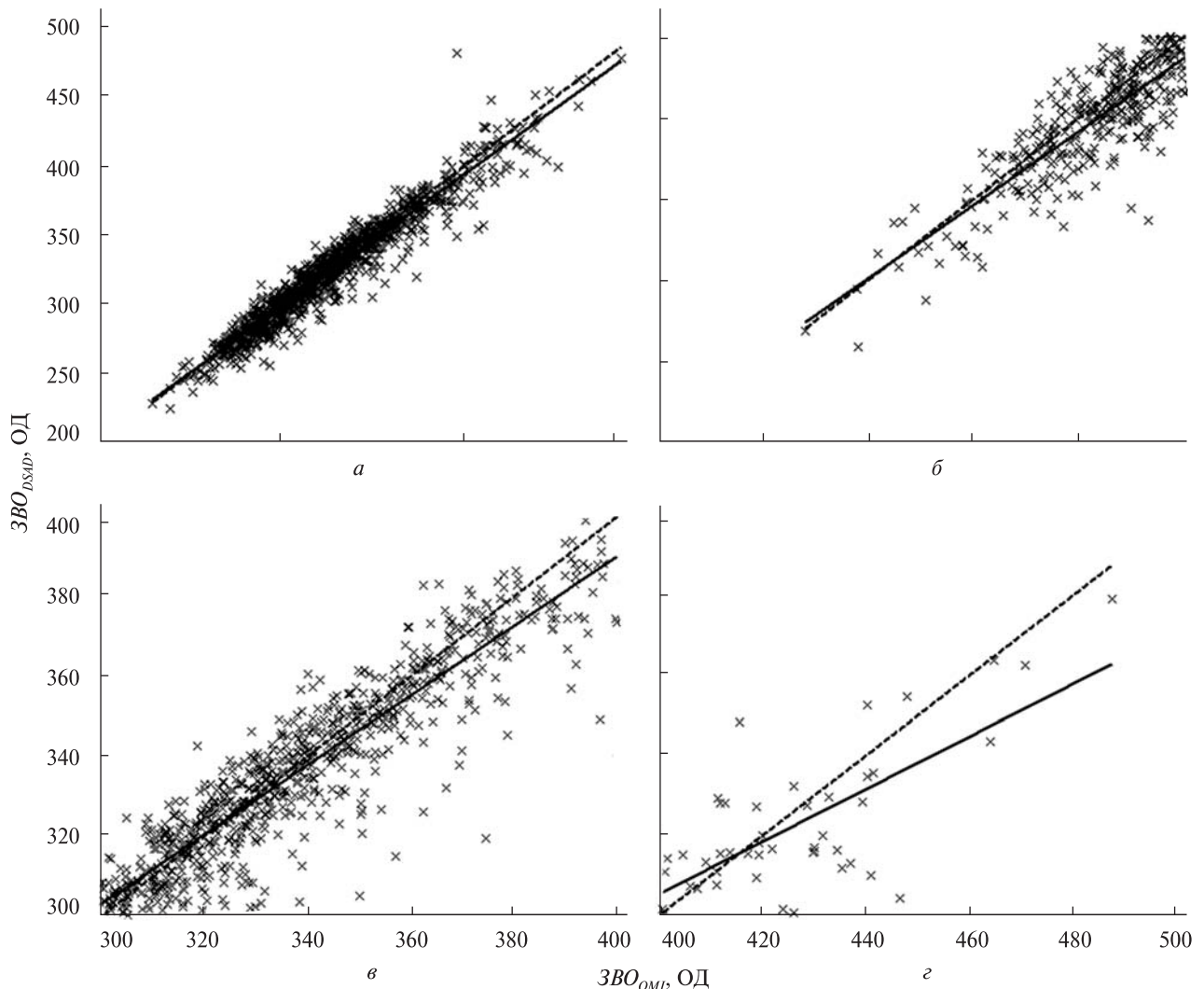


Рис. 7. Корелятивні залежності середньодобових значень ZBO_{DSAD} , отриманих з DSAD-вимірювань зі спектрофотометром Добсона, від модельних значень ZBO_{OMI} станом на 12^h UT для різних динамічних діапазонів та їхні лінійні апроксимації (суцільні прямі): *a* – 200...500 ОД, апроксимація $ZBO_{DSAD} = (0.95 \pm 0.01)ZBO_{OMI} + 12.0 \pm 4.7$, *б* – 200...300 ОД, апроксимація $ZBO_{DSAD} = (0.91 \pm 0.06)ZBO_{OMI} + 22.8 \pm 18.0$, *в* – 300...400 ОД, апроксимація $ZBO_{DSAD} = (0.87 \pm 0.03)ZBO_{OMI} + 41.5 \pm 9.1$, *г* – 400...500 ОД, апроксимація $ZBO_{DSAD} = (0.66 \pm 0.20)ZBO_{OMI} + 142.6 \pm 85.6$. Штрихові прямі – лінії однакових значень

ший у літній період, коли самі значення ZBO також демонструють найменшу мінливість.

Виявлені відмінності спонукають до безпосереднього аналізу корелятивної залежності супутникових та наземних даних для різних сезонів. Такий аналіз проведено для періодів навколо весняного та осіннього рівнодень (рис. 6, *a* і *в* відповідно) та літнього і зимового сонцестоянь (рис. 6, *б* і *г* відповідно) із застосуванням усіх вимірювань за 2010–2015 рр. Як і слід було очікувати, літні та осінні дані демонструють незна-

чний діапазон варіацій ZBO у межах 100 ОД. Самі відхилення теж незначні, зі збільшенням ZBO проявляється деяке відносно заниження даних спектрофотометра Добсона, на що вказує коефіцієнт, менший за одиницю, для відтвореної лінійної регресії. Описане явище стає куди більш суттєвим для весняних вимірювань із високим рівнем озону (рис. 6, *a*), а надто — для зимових із мінімальною висотою Сонця (рис. 6, *г*). В останньому випадку кутковий коефіцієнт прямої, яка відображає лінійну регресію, становить лише

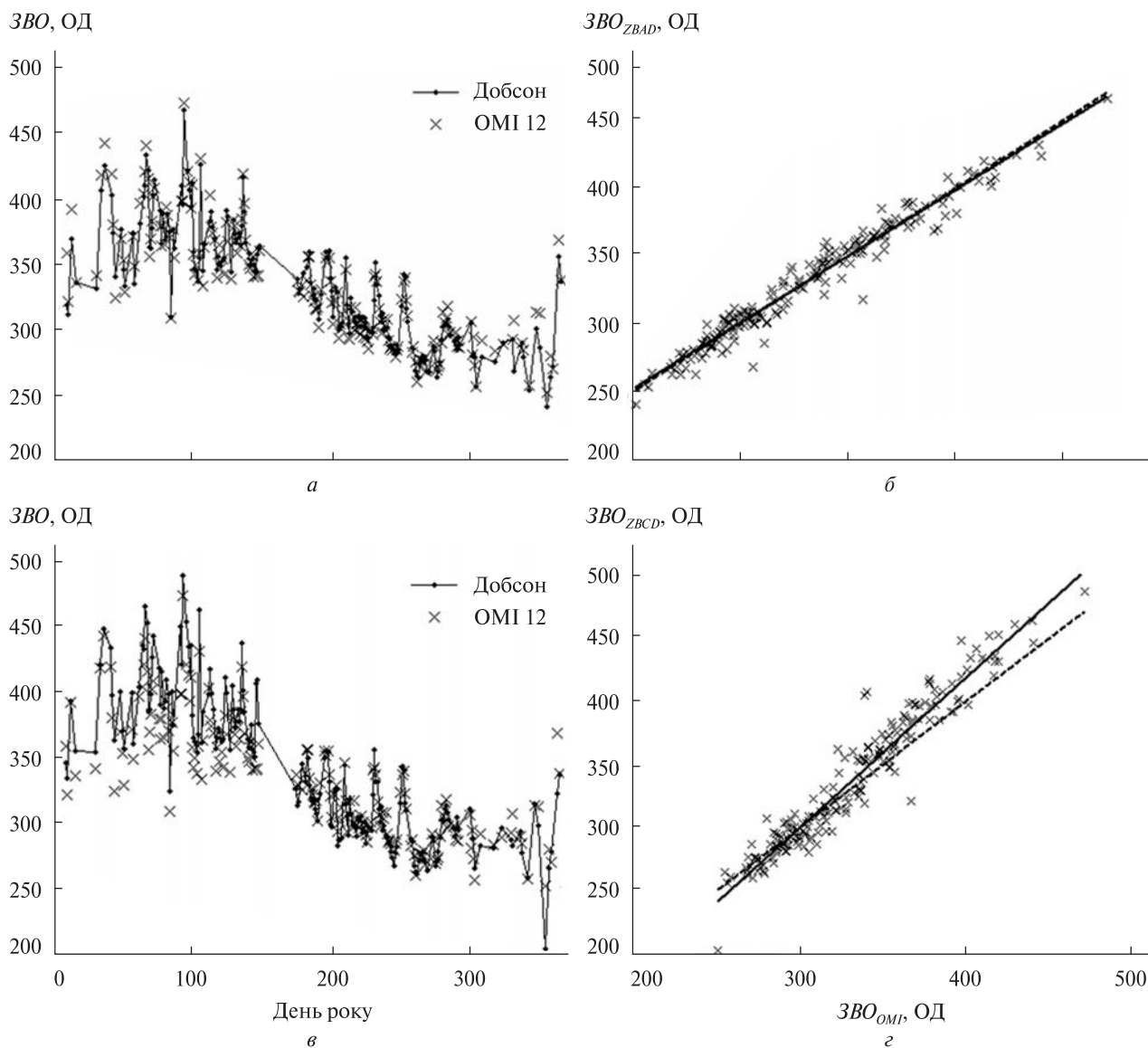


Рис. 8. Річні варіації значень ZBO_{ZBAD} (а) та ZBO_{ZBCD} (в) у 2015 р. за даними спектрофотометра Добсона (ZBAD та ZBCD відповідно), а також корелятивні залежності цих величин від модельних значень: б — залежність ZBO_{ZBAD} від ZBO_{OMI} станом на 12^h UT (апроксимація $ZBO_{ZBAD} = (0.98 \pm 0.03)ZBO_{OMI} + 8.0 \pm 9.5$), г — залежність ZBO_{ZBCD} від ZBO_{OMI} (апроксимація $ZBO_{ZBCD} = (1.19 \pm 0.05)ZBO_{OMI} - 55.4 \pm 15.3$). Штрихові прямі — лінії однакових значень

0.86, і для переважної більшості точок наземні значення, отримані при DSAD-вимірюваннях, нижчі за знайдені з моделі OMI станом на 12^h UT. Отже, як бачимо, погіршення якості DSAD-вимірювань відбувається при малій висоті Сонця над горизонтом, а супутнім фактором постає збільшення вмісту озону.

На рис. 7 наведено лінійні залежності ZBO_{DSAD} від ZBO_{OMI} та їхні апроксимації, побудовані методом найменших квадратів для різних динаміч-

них діапазонів (а — 200...500, б — 200...300, в — 300...400, г — 400...500 ОД). Для забезпечення симетричності картини з розгляду вилучалися спостереження, які потрапляли до шуканого інтервалу тільки за одним типом вимірювань. Помітно, що наземні вимірювання зі спектрофотометром Добсона дають відносно заниження при підвищенні вмісту озону. Кутовий коефіцієнт у лінійній залежності для всіх випадків менший за одиницю, причому він зменшується при

переході до інтервалів із вищим ЗВО. Зауважимо, що кількість днів із вмістом озону, що перевищує 400 ОД, відносно незначна, тому результати для цього інтервалу менш надійні (рис. 7, з).

Сезонні зміни ЗВО за даними ZBAD та ОМІ для 2015 р., а також їхні корелятивні залежності показано на рис. 8, а і б відповідно. Пауза в середині року викликана калібруванням спектрофотометра Добсона у Гогенпайсенберзі, через що виникла прогалина у вимірюваннях з 29 травня по 15 червня. Структура сезонного циклу залежно від типу даних суттєво не змінюється, але значення для спектрофотометра Добсона поблизу моменту зимового сонцестояння дещо занижені. Середня різниця даних у 2015 р. становить $0.0 \pm \pm 17.6$ ОД, але є помітний сезонний хід різниці. Видно, що якість ZBAD-даних не поступається якості базових спостережень за прямим Сонцем (DSAD). Відхилення апроксимаційної прямої від лінії однакових значень лежать у межах похибок. Для ZBCD-вимірювань різниця «модель – Добсон» у 2015 р. складала -6.3 ± 32.4 ОД. До того ж різниці є дуже неоднорідними протягом року: завищені на 20...30 ОД наземні значення до калібрування змінюються однаковими чи трохи завищеними значеннями після калібрування, а надто наприкінці року, коли спостерігаються суттєві перепади на коротких часових інтервалах. Так, рис. 8, з демонструє, що при високому вмісті озону ZBCD-значення перевищують модельні, лінійна апроксимація дає кутовий коефіцієнт 1.19. Таким чином, ZBCD-дані виявляються не досить надійними, на відміну від ZBAD.

Рис. 9 показує масштаб розбіжностей між моделлю, створеною на основі вимірювань ОМІ, та вимірюваннями зі спектрофотометром Добсона. Тут приведено різниці між модельними та наземними даними всіх типів для станції Київ-Голосіїв. Як видно, у 2010 р. (рис. 9, а) є відносна недооцінка значень із боку спектрофотометра Добсона, особливо в кінці року — навіть при тому, що тоді не виконувались AD-вимірювання. До порівняння середніх показників для 2010 р. із даними для інших років слід ставитись обережно. Вимірювання розпочалися 13 травня 2010 р., а регулярно здійснюються тільки з вересня 2010 р., тому ряд має недостатню довжину і несиметрич-

но відображає внесок для різних пір року. Можна зауважити деякий сезонний хід різниць у 2011 р. (рис. 9, б); високі значення різниць, які відповідають відносному заниженню для спектрофотометра Добсона, спостерігалися на початку року. Рис. 9, в демонструє проблеми із ZBCD-значеннями влітку 2012 р. — є систематичне відносне їхнє завищення порівняно з моделлю. При хмарному небі помітні значні відхилення. У 2013 р. (рис. 9, з) є інтервали із завищеними ZBCD-даними, цього разу навесні і восени. Трапляються надмірні перепади за прямим Сонцем та великі розбіжності за хмарним небом. У 2014 р. (рис. 9, д) систематичне завищення спостерігається для всіх CD-даних. Великих відхилень небагато, але в кінці року є виразне відносне заниження з боку спектрофотометра Добсона. Передовсім це характерно для DSAD- та ZCAD-даних. Для 2015 р. (рис. 9, д) зауважуємо зменшення розбіжностей після червневого калібрування.

У табл. 1 вказано середньорічні значення різниць для всіх проаналізованих років вимірювань. Можна зауважити основні особливості, помітні з табл. 1. Так, середні квадратичні відхилення у 2012 р. для всіх типів вимірювань є максимальними чи принаймні одними з найбільших. Ця обставина з високою ймовірністю свідчить про неоднорідність даних спектрофотометра Добсона у цей рік. Раніш уже зазначалося, що влітку 2012 р. спостерігаються значні розбіжності для ZBCD-даних. Меншою мірою це характерно і для обох типів ZC-вимірювань. У підсумку до 2015 р. три з чотирьох значень подвоєного середнього квадратичного відхилення σ , що перевищують 30 ОД, зафіксовані саме у 2012 р. Є чітка тенденція до зменшення різниць «модель – Добсон» із часом, особливо у випадку CD-спостережень. Оскільки ця тенденція є суттєво неоднаковою для різних типів вимірювань, то основну її причину слід шукати саме в даних спектрофотометра Добсона. Привертає увагу систематичний спад різниці для ZBCD-даних із рекордним від'ємним значенням, що означає відносне завищення для наземних спостережень у 2014 р. Показово, що такі розбіжності стають максимальними за модулем у літній період, коли умови вимірювань звичайно найліпші. Причина

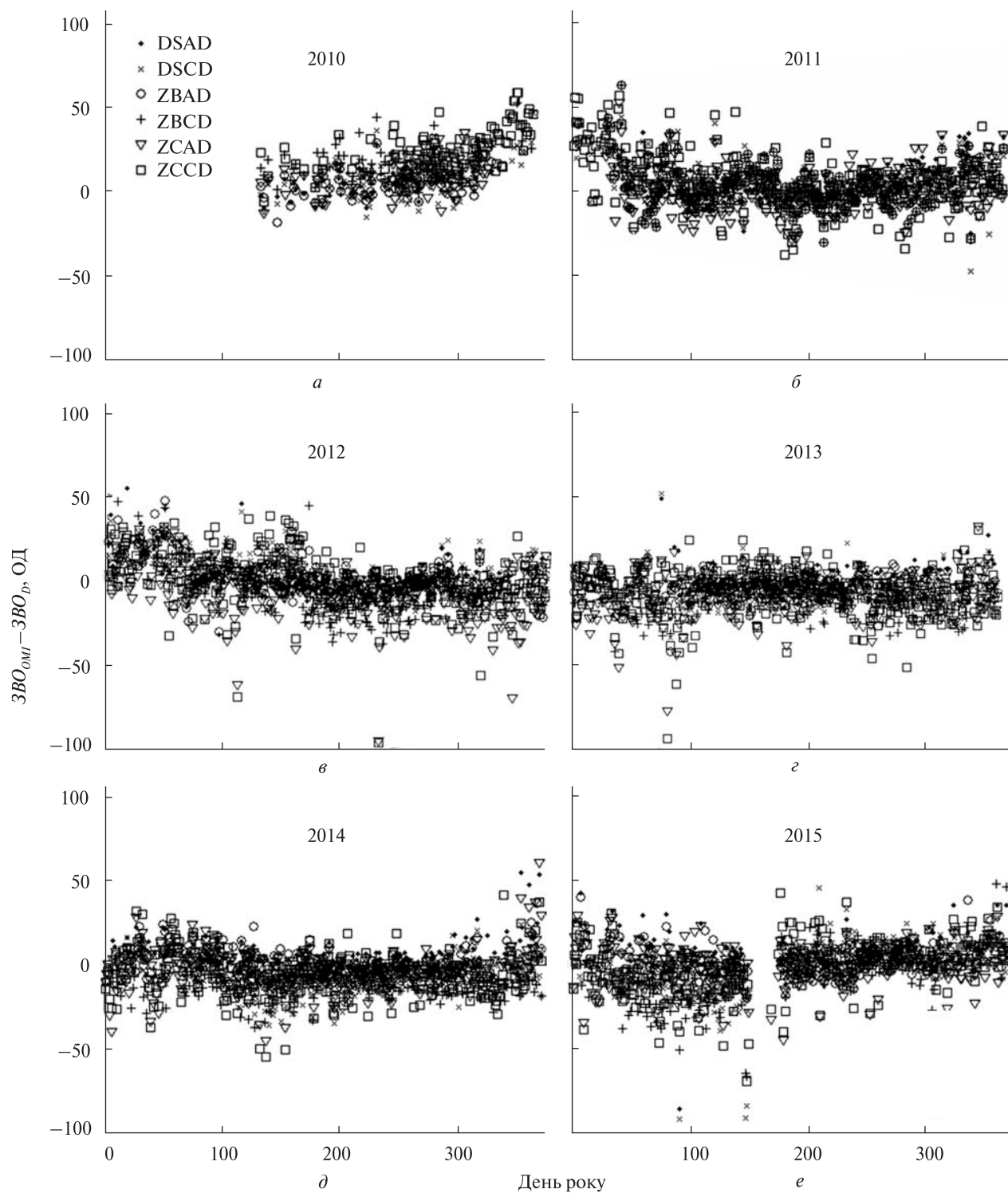


Рис. 9. Річні варіації різниць $ZVO_{OMI} - ZVO_D$ модельних значень ZVO_{OMI} станом на 12^h UT та добових середніх значень ZVO_D , отриманих зі спектрофотометром Добсона у 2010–2015 рр. за всіма типами наземних даних (DSAD, DSCD, ZBAD, ZBCD, ZCAD та ZCCD)

може полягати в характері відтворення залежності ZBCD (і у меншій мірі інших CD-спостережень) від зенітної відстані Сонця. Між тим, розкид значень після 2012 р. виглядає більш прийнятним. Варто відзначити, що за середнім квадратичним відхиленням найліпший результат для 2011—2013 рр. дають ZBAD-дані, для 2014 р. — ZBCD (!), хоч і з несуттєвою відмінністю від ZBAD. Тільки для неповного 2010 р. середнє квадратичне відхилення у випадку DSAD трохи менше, ніж для ZBAD. Вимірювання за ясним небом у зеніті виявляються надійнішими, ймовірно, через більшу однорідність умов: вимірювання за прямим Сонцем можуть вестися при змінній частковій хмарності. 2015 р. відзначається низькою якістю CD-даних, що проявляється великими, понад 30 ОД, подвоєними середніми квадратичними відхиленнями. Для AD-спостережень результати цілком задовільні, найліпша ситуація зберігається при вимірюваннях по ясному небу в зеніті. Отримано також результати зіставлення модельних даних, отриманих на основі вимірювань GOME2-а, та середньодобових значень для спектрофотометра Добсона. Табл. 2 містить результати зіставлення для даної моделі. Відмінність між табл. 1 і 2 змушує при-

писати частину систематичних змін моделям, а не наземним спостереженням. Добре помітно, що в 2010—2011 рр. модель на основі GOME2 давала систематично нижчі значення ZBO, а в 2013—2014 рр. — вищі. Запитання щодо надійності результатів ZBCD у 2011—2012 рр. залишається актуальним у будь-якому випадку.

Для порівняння якості даних різних типів, отриманих зі спектрофотометром Добсона, на рис. 10, а приведено середньорічні значення розбіжностей модельних значень ZBO_{OMI} (на 12^h UT) і середньодобових значень ZBO_D різних типів для спектрофотометра Добсона, а на рис. 10, б — подвоєні середні квадратичні відхилення 2σ для вказаних різниць.

При його аналізі потрібно пам'ятати про недостатню репрезентативність вимірювань для 2010 р., адже вони були розпочаті тільки 13 травня, а у близькому до неперервного режимі здійснювались лише із 1 вересня. Тому при наявності сезонного циклу різниць (рис. 10, а) навряд чи варто говорити про якусь особливу неточність вимірювань у 2010 р. на основі середньорічних величин. Як наслідок, наведені точки для 2010 р. є тільки орієнтовними. Аналіз іншої частини залежності загалом підтверджує вищу якість AD-

Таблиця 1. Середньорічні різниці $ZBO_{OMI} - ZBO_D$. Для кожного дня використовувались модель OMI станом на 12^h UT та середньодобове значення для відповідного типу вимірювань спектрофотометра Добсона

Ряд даних	$ZBO_{OMI} - ZBO_D \pm 2\sigma$, ОД					
	2010	2011	2012	2013	2014	2015
DSAD	5.4 ± 15.3	3.7 ± 21.7	1.8 ± 23.0	1.6 ± 17.3	2.5 ± 19.0	4.1 ± 22.3
DSCD	7.5 ± 23.5	2.9 ± 22.6	3.9 ± 24.2	-2.1 ± 19.0	-7.1 ± 22.1	-2.6 ± 39.3
ZBAD	4.6 ± 15.7	3.4 ± 21.4	1.2 ± 21.8	-0.9 ± 14.9	-0.8 ± 17.6	0.0 ± 17.6
ZBCD	17.1 ± 18.6	2.2 ± 25.3	-4.8 ± 30.7	-7.5 ± 19.9	-10.8 ± 17.2	-6.3 ± 32.4
ZCAD	8.5 ± 19.3	1.8 ± 25.2	-7.0 ± 30.2	-5.8 ± 23.7	-3.0 ± 24.1	-0.9 ± 24.5
ZCCD	24.7 ± 24.8	6.1 ± 33.1	-0.1 ± 33.2	-5.1 ± 29.1	-5.8 ± 27.0	-2.2 ± 32.8

Таблиця 2. Різниці $ZBO_{GOME2-a} - ZBO_D$ між модельними і наземними даними (модель GOME2-а)

Ряд даних	$ZBO_{GOME2-a} - ZBO_D \pm 2\sigma$, ОД				
	2010	2011	2012	2013	2014
DSAD	-4.3 ± 15.7	-3.4 ± 19.4	2.4 ± 18.8	6.1 ± 20.4	9.8 ± 21.9
DSCD	-1.6 ± 25.7	-4.1 ± 20.5	4.8 ± 22.1	2.5 ± 20.2	0.1 ± 24.4
ZBAD	-5.2 ± 16.0	-3.6 ± 18.7	1.8 ± 17.2	3.8 ± 17.6	6.4 ± 19.7
ZBCD	7.6 ± 19.5	-4.9 ± 23.9	-4.4 ± 26.5	-2.8 ± 18.1	-3.7 ± 17.9
ZCAD	-0.5 ± 20.2	-5.1 ± 22.8	-5.4 ± 25.6	-0.2 ± 26.2	5.8 ± 25.2
ZCCD	17.2 ± 27.0	-0.6 ± 32.3	2.3 ± 30.6	0.6 ± 30.0	3.1 ± 28.6

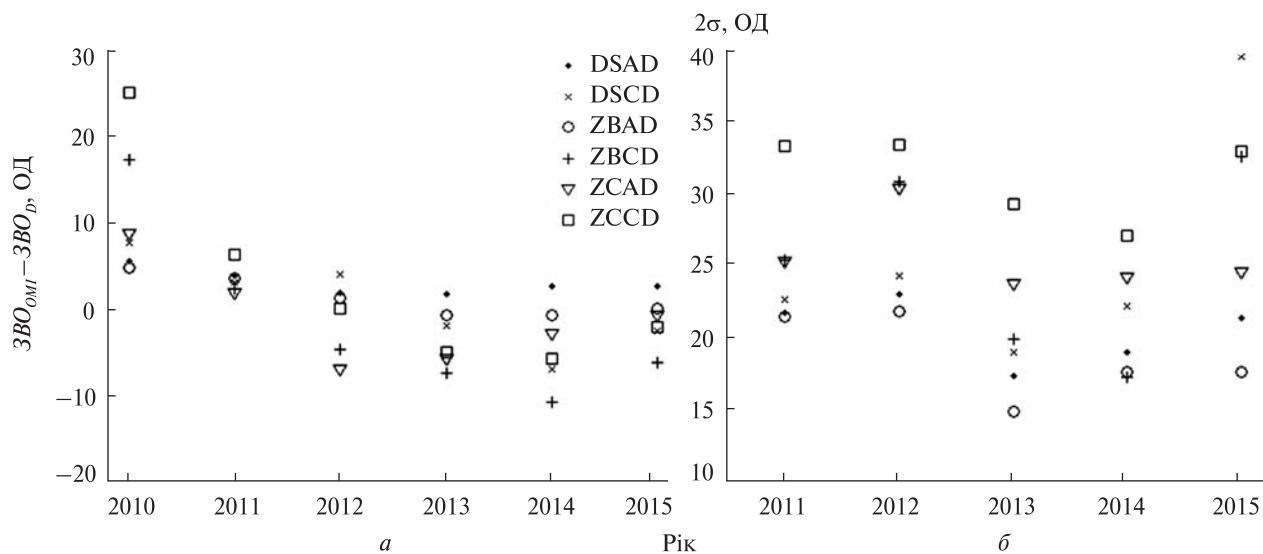


Рис. 10. Середньорічні значення різниці $ZVO_{OMI} - ZVO_D$ модельних значень ZVO_{OMI} станом на 12^h UT та середньодобових значень ZVO_D за рядами даних різних типів для спектрофотометра Добсона (а) та подвоєні середні квадратичні відхилення 2σ для вказаних рядів (б)

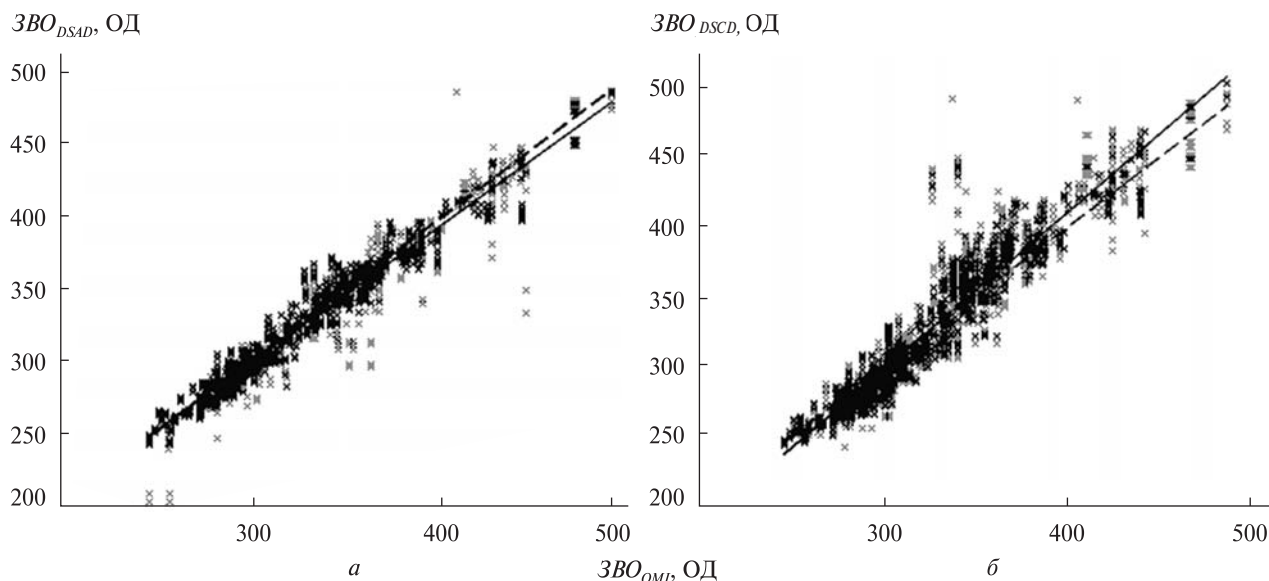


Рис. 11. Корелятивні залежності середньодобових значень ZVO_{DSAD} (а) та ZVO_{DSCD} (б), отриманих у 2015 р. за даними спектрофотометра Добсона (DSAD та DSCD відповідно), від модельних значень ZVO_{OMI} станом на 12^h UT. Суцільні прями — апроксимації $ZVO_{DSAD} = (0.96 \pm 0.01)ZVO_{OMI} + 10.0 \pm 2.6$ та $ZVO_{DSCD} = (1.12 \pm 0.01)ZVO_{OMI} - 37.9 \pm 4.2$. Штрихові прями — лінії однакових значень

даних відносно CD-даних, що добре помітно з поведінки значень 2σ (рис. 10, б), які відображають повторюваність результату. Потрібне подальше дослідження надійності ZBCD-даних з огляду на не досить зрозумілі міжрічні стрибки. Проведений аналіз показує, що високу якість забезпечують DSAD-, DSCD- і ZBAD-ряди (за ви-

нятком DSCD-ряду для 2015 р.). ZBCD- і ZCADані виявляються нестійкими стосовно середніх різниць, а їхні подвоєні середні квадратичні відхилення регулярно перевищують 25 ОД.

Досліджувалися також розбіжності між індивідуальними вимірюваннями спектрофотометра Добсона та ОМІ. Використовувались оверпаси,

отримані в радіусі 100 км від наземної станції протягом тієї ж доби. Для прикладу на рис. 11 показано результати зіставлення для DSAD- і DSCD-даних для 2015 р. Структура розбіжностей подібна до описаної для середньодобових наземних і модельних рядів: невелике відносне заниження *ZBO* у випадку AD-вимірювань при високому вмісті озону та, навпаки, завищення для CD-вимірювань (на зразок спостережень за ясным небом у зеніті з рис. 8, *г*). Зростає вплив окремих невдалих вимірювань (викиди), оскільки при обчисленні середньодобових значень вони згладжувалися. Різниця у проілюстрованій ситуації становлять: 2.5 ± 21.3 ОД (ОМІ – DSAD) і -2.0 ± 36.3 ОД (ОМІ – DSCD).

ВИСНОВКИ

Проаналізовано наземні і супутникові дані загального вмісту озону над станцією Київ-Голосіїв протягом 2010–2015 рр. Сезонний максимум на станції Київ-Голосіїв спостерігається навесні (лютий – березень), а сезонний мінімум – у середині осені (жовтень – листопад), що відповідає звичайній картині для середніх широт північної півкулі. Для періоду перед максимумом і під час нього типовими є значні перепади *ZBO*, іноді – квазірегулярні. У свою чергу, міждодові та міжрічні варіації для літньо-осіннього періоду є незначними. Відзначимо, що річні середні для різних типів вимірювань зі спектрофотометром Добсона суттєво не відрізняються. Мінімальні річні середні значення фіксувались у 2011 р. (319...322 ОД залежно від типу вимірювань), а максимальні – у 2013 р. (327...338 ОД). Високі рівні озону реєструвались у 2010 р., але неповні дані станції Київ-Голосіїв для цього року не дозволяють обчислити надійне середнє. Водночас модель на основі вимірювань супутникового приладу ОМІ дійсно показує високі значення вмісту озону. Такий результат, щоправда, суперечить отриманому з моделлю GOME2-а, тому остаточні висновки про відхилення *ZBO* у 2010 р. від значень для сусідніх років зробити не вдається.

Згідно з результатами зіставлення з супутниковими вимірюваннями для спектрофотометра Добсона № 040 станції Київ-Голосіїв високу якість демонструють DSAD-, DSCD- і ZBAD-

ряди (за винятком DSCD для 2015 р.). ZBCD- і ZC-дані виявляються нестійкими стосовно середніх різниць, а подвоєні середні квадратичні відхилення, обчислені протягом календарного року, регулярно перевищують 25 ОД. Різниця між супутниковими і наземними даними демонструє сезонний цикл із максимумом (тобто, відносною недооцінкою *ZBO* при наземних спостереженнях) у кінці осені – на початку зими. Головною причиною бачиться деяке заниження DSAD-значень поблизу моменту зимового сонцестояння, коли зенітна відстань Сонця велика. Вказане явище у першу чергу погіршує якість AD-даних через швидкий спад інтенсивності випромінювання у короткохвильовій парі А при збільшенні зенітної відстані Сонця (зростає вплив розсіяного всередині спектрофотометра Добсона світла). Типові значення розбіжності сягають 20 ОД, а іноді й більше. Відносна недооцінка при AD-спостереженнях збільшується, якщо вміст озону високий. У випадку CD-спостережень, навпаки, значення спектрофотометра Добсона в умовах високого *ZBO* збільшуються.

ЛІТЕРАТУРА

1. Александров Э. Л., Израэль Ю. А., Кароль И. Л., Хргиан А. Х. Озонный щит Земли и его изменения. — Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 1992. — 288 с.
2. Грицай А. В., Міліневський Г. П. Аналіз розбіжності наземних та супутникових вимірювань загального вмісту озону: станція Київ-Голосіїв // Космічна наука і технологія. — 2014. — **20**, № 1. — С. 3–13.
3. Могильчак В. Ю., Міліневський Г. П. Варіації загального вмісту озону в атмосфері над територією України // Космічна наука і технологія. — 2017. — **23**, № 2. — С. 41–47.
4. Antón M., Mateos D. Shortwave radiative forcing due to long-term changes of total ozone column over the Iberian Peninsula // Atmos. Environ. — 2013. — **81**. — P. 532–537.
5. Basher R. E. Review of the Dobson spectrophotometer and its accuracy. — Geneva: World Meteorological Organization Global Ozone Research and Monitoring Project, 1982. — Rep. N 13. — 94 p.
6. Dobson G. M. B., Normand C. W. B. Determination of the constants etc. used in the calculation of the amount of ozone from spectrophotometer measurements and of the accuracy of the results // Ann. Int. Geophys. Year. — 1962. — **16**, Part II. — P. 161–191.
7. Evtushevsky O., Grytsai A., Milinevsky G. On the regional distinctions in annual cycle of total ozone in the northern midlatitudes // Rem. Sens. Lett. — 2014. — **5**, N 3. — P. 205–212.

8. Fioletov V. E., Labow G., Evans R., et al. Performance of the ground-based total ozone network assessed using satellite data // *J. Geophys. Res.* — 2008. — **113**, N D14. — D14313.
 9. Komhyr W. D., Evans R. D. Operations handbook — ozone observations with a Dobson spectrophotometer. — Geneva: World Meteorological Organization Global Ozone Research and Monitoring Project, NOAA/ESRL Global Monitoring Division, 2006. — 91 p.
 10. McPeters R. D., Hollandsworth S. M., Flynn L. E., et al. Long-term ozone trends derived from the 16-year combined Nimbus 7 / Meteor 3 TOMS Version 7 record // *Geophys. Res. Lett.* — 1996. — **23**, N 25. — P. 3699–3702.
 11. Milinevsky G. P., Danylevsky V. O., Grytsai A. V., et al. Recent developments of atmospheric research in Ukraine // *Adv. Astron. Space Phys.* — 2012. — **2**. — P. 114–120.
 12. Redondas A., Evans R., Stuebi R., et al. Evaluation of the use of five laboratory-determined ozone absorption cross sections in Brewer and Dobson retrieval algorithms // *Atmos. Chem. Phys.* — 2014. — **14**. — P. 1635–1648.
 13. Scarnato B., Staehelin J., Stübi R., Schill H. Long-term total ozone observations at Arosa (Switzerland) with Dobson and Brewer instruments (1988–2007) // *J. Geophys. Res.* — 2010. — **115**. — D13306.
 14. van der A R. J., Allaart M. A. F., Eskes H. Multi sensor reanalysis of total ozone // *Atmos. Chem. Phys.* — 2010. — **10**, N 22. — P. 11277–11294.
 15. Verhoelst T., Granville J., Hendrick F., et al. Metrology of ground-based satellite validation: co-location mismatch and smoothing issues of total ozone comparisons // *Atmos. Meas. Tech. Discuss.* — 2015. — **8**. — P. 8023–8082.
- Стаття надійшла до редакції 15.01.18

REFERENCES

1. Aleksandrov E. L., Izrael Ju. A., Karol I. L., Khrgian A. Kh. Earth's ozone shield and its changes, 288 p. (Gidrometeoizdat, St. Petersburg, 1992) [in Russian].
2. Grytsai A. V., Milinevsky G. P. Analysis of the discrepancy between ground-based and satellite total ozone content measurements at Kyiv-Goloseyev station. *Space Science and Technology*, **20** (1), 3–13 (2014) [in Ukrainian].
3. Mogylchak V. Y., Milinevskiy G. P. Variations of total ozone in the atmosphere over the territory of Ukraine. *Space Science and Technology*, **23** (2), 41–47 (2017) [in Ukrainian].
4. Antón M., Mateos D. Shortwave radiative forcing due to long-term changes of total ozone column over the Iberian Peninsula. *Atmos. Environ.*, **81**, 532–537 (2013).
5. Basher R. E. Review of the Dobson spectrophotometer and its accuracy. Geneva: World Meteorological Organization Global Ozone Research and Monitoring Project, Rep. N 13, 94 p. (1982).
6. Dobson G. M. B., Normand C. W. B. Determination of the constants etc. used in the calculation of the amount of ozone from spectrophotometer measurements and of the

- accuracy of the results. *Ann. Int. Geophys. Year*, **16** (Part II), 161–191 (1962).
7. Evtushevsky O., Grytsai A., Milinevsky G. On the regional distinctions in annual cycle of total ozone in the northern midlatitudes. *Rem. Sens. Lett.*, **5** (3), 205–212 (2014).
8. Fioletov V. E., Labow G., Evans R., et al. Performance of the ground-based total ozone network assessed using satellite data. *J. Geophys. Res.*, **113** (D14), D14313 (2008).
9. Komhyr W. D., Evans R. D. Operations handbook — ozone observations with a Dobson spectrophotometer. Geneva: World Meteorological Organization Global Ozone Research and Monitoring Project, NOAA/ESRL Global Monitoring Division, 91 p. (2006).
10. McPeters R. D., Hollandsworth S. M., Flynn L. E., et al. Long-term ozone trends derived from the 16-year combined Nimbus 7 / Meteor 3 TOMS Version 7 record. *Geophys. Res. Lett.*, **23** (25), 3699–3702 (1996).
11. Milinevsky G. P., Danylevsky V. O., Grytsai A. V., et al. Recent developments of atmospheric research in Ukraine. *Adv. Astron. Space Phys.*, **2**, 114–120 (2012).
12. Redondas A., Evans R., Stuebi R., et al. Evaluation of the use of five laboratory-determined ozone absorption cross sections in Brewer and Dobson retrieval algorithms. *Atmos. Chem. Phys.*, **14**, 1635–1648 (2014).
13. Scarnato B., Staehelin J., Stübi R., Schill H. Long-term total ozone observations at Arosa (Switzerland) with Dobson and Brewer instruments (1988–2007). *J. Geophys. Res.*, **115**, D13306 (2010).
14. van der A R. J., Allaart M. A. F., Eskes H. Multi sensor reanalysis of total ozone. *Atmos. Chem. Phys.*, **10** (22), 11277–11294 (2010).
15. Verhoelst T., Granville J., Hendrick F., et al. Metrology of ground-based satellite validation: co-location mismatch and smoothing issues of total ozone comparisons. *Atmos. Meas. Tech. Discuss.*, **8**, 8023–8082 (2015).

Received 15.01.18

A. В. Грицай¹, Г. П. Милиневский^{1, 2, 3}

¹ Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев, Украина

² Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины, Киев, Украина

³ Международный центр науки будущего, Цзилинский университет, Чанчунь, Китай

ОБЩЕЕ СОДЕРЖАНИЕ ОЗОНА НАД СТАНЦИЕЙ КИЕВ-ГОЛОСИИВ ПО НАЗЕМНЫМ И СПУТНИКОВЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ В 2010–2015 ГГ.

Наземные измерения общего содержания озона (ОСО) в единицах Добсона (ЕД) проводятся с помощью спектрофотометра Добсона на станции Киев-Голосиив с

мая 2010 г. В этой работе выполняется исследование расхождений между спутниковыми и наземными наблюдениями *ОСО* в атмосфере над данной станцией. Для сравнения использованы отдельные наблюдения вблизи наземной станции и построенные на их основе модели с шестичасовым шагом. Определено, что минимальные годовые средние значения *ОСО* фиксировались в 2011 г. (319...322 ЕД в зависимости от типа наблюдений), а максимальные — в 2013 г. (327...338 ЕД). Согласно результатам сопоставления со спутниковыми измерениями, для спектрофотометра Добсона № 040 станции Киев-Голосив хорошее качество демонстрируют ряды наблюдений типов DSAD, DSCD и ZBAD (за исключением DSCD для 2015 г.). Наблюдения ZBCD и ZC оказываются неустойчивыми относительно средних разностей, а удвоенные среднеквадратические отклонения, вычисленные на протяжении календарного года, регулярно превышают 25 ЕД. Разность между спутниковыми и наземными данными демонстрирует сезонный цикл с относительной недооценкой *ОСО* при наземных наблюдениях в конце осени — начале зимы. Главная причина видится в некотором занижении DSAD-значений вблизи момента зимнего солнцестояния. Указанное явление в первую очередь ухудшает качество AD-данных вследствие быстрого спада интенсивности излучения в коротковолновой паре А при увеличении зенитного расстояния Солнца (возрастает влияние рассеянного света). Типичные значения расхождения достигают 20 ЕД, а иногда и больше. Расхождения увеличиваются при высоком содержании озона. Наоборот, CD-значения в таких условиях оказываются завышенными по сравнению с модельными.

Ключевые слова: общее содержание озона, спектрофотометр Добсона, спутниковые измерения, ряды наблюдений, сравнение данных.

A. V. Grytsai¹, G. P. Milinevsky^{1,2,3}

¹ Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

² Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

³ International Center of Future Science, Jilin University, Changchun, China

TOTAL OZONE CONTENT OVER
KYIV-GOLOSEYEV STATION
BY GROUND-BASED AND SATELLITE
MEASUREMENTS IN 2010—2015

Ground-based measurements of total ozone content (TOC) in Dobson Units (DU) over Kyiv-Goloseyev station using

Dobson spectrophotometer are carried out from May 2010. The ground-based measurements are realized under Direct Sun (DS), Zenith Blue (ZB), and Zenith Cloud (ZC) conditions in the standard pairs of wavelengths A, C, D in near ultraviolet range (300—340 nm). In this work, the discrepancies between satellite and ground-based TOC observations in the atmosphere over the station are studied. Besides, both seasonal TOC variations and changes in the differences between satellite and ground-based measurements are considered. First task of the work is to study main features of the seasonal TOC variations at Kyiv-Goloseyev station. Second task is to estimate the level of distinctions between satellite and ground-based TOC values and to determine possible causes of the distinctions. We processed the Kyiv-Goloseyev Dobson DS, ZB, and ZC double-pair (AD and CD) measurements of total ozone content using the satellite OMI/Aura, GOME-2/MetOpA, and GOME-2/MetOpB data. For the comparison, both separate measurements made in the vicinity of the ground-based station and the corresponding models with 6-hour step were considered. The differences between satellite (model) and ground-based data are studied separately for each type of the Dobson observations. It was determined that minimal annual mean TOC values were registered in 2011 (319—322 DU in dependence on measurement type) and maximal values were reached in 2013 (327—338 DU). The difference between the satellite and ground-based data has exhibited a seasonal cycle with relative TOC underestimation in the ground-based measurements at the late autumn and early winter. A decrease in the DSAD values near the winter solstice moment is seen as the main cause of the underestimation. Firstly, an indicated phenomenon worsens the AD data quality because of the fast decrease of radiation intensity in the short-wave A pair, what happens when solar zenith angle rises, and scattered light has a greater impact. Typical values of the discrepancy reach 20 DU and sometimes even greater. Discrepancies increase with high ozone content above 400 DU. On the contrary, the CD values are overestimated under those conditions as compared with model ones. According to the results of comparison with satellite measurements, the Kyiv-Goloseyev Dobson spectrophotometer No. 040 demonstrates the high quality in cases of DSAD, DSCD, and ZBAD series (excluding DSCD in 2015). The ZBCD and ZC data seem to be unsteady for mean differences, and double standard deviations calculated during a calendar year regularly exceed 25 DU.

Keywords: total ozone content, Dobson spectrophotometer, satellite measurements, observational series, data comparison.