

УДК 551.513.11:551.510.534

А. В. Грицай, Г. П. Міліневський

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

АНАЛІЗ РОЗБІЖНОСТІ НАЗЕМНИХ ТА СУПУТНИКОВИХ ВИМІРЮВАНЬ ЗАГАЛЬНОГО ВМІСТУ ОЗОНУ: СТАНЦІЯ КИЇВ-ГОЛОСІЇВ

Зіставляються результати супутникових та наземних вимірювань загального вмісту озону на станції Київ-Голосіїв з 13 травня 2010 р. до кінця 2012 р. Використано дані супутникових приладів OMI та SCIAMACHY, а також дані, отримані на станції Київ-Голосіїв за допомогою спектрофотометра Добсона № 040. Шляхом порівняння із супутниковими даними показано, що найбільш надійним серед різних типів наземних вимірювань є метод «за прямим Сонцем». Високою є також якість наземних зенітних спостережень безхмарного неба у стандартній парі довжин хвиль AD, яка щонайменше не поступає якості вимірювань «за прямим Сонцем». Встановлено, що значення загального вмісту озону, отримані за допомогою спектрофотометра Добсона, є меншими порівняно з супутниковими, коли зенітна відстань Сонця перевищує 60°. Основною причиною цього «розходження» вважається вплив світла, розсіяного всередині спектрофотометра. Різниці між супутниковими і наземними даними демонструють сезонний хід із максимумом узимку та мінімумом улітку, що вказує на недоліки алгоритмів обчислення загального вмісту озону.

ВСТУП

Дистанційні вимірювання загального вмісту озону (ЗВО) у земній атмосфері провадяться з використанням наземних [2, 14, 17] та супутникових [7, 16, 20] спостережних засобів. Переважно використовується властивість озону поглинати та розсіювати сонячне ультрафіолетове випромінювання у діапазоні 300—340 нм [2, 3, 17]. При наземних вимірюваннях розрахунок проводиться на основі експоненціального закону Бугера — Бера, супутникові алгоритми є принципово складнішими — серед іншого потрібно враховувати розсіяння світла хмарами та підстильною поверхнею [4, 8, 21].

Загальний вміст характеризує кількість частинок даної речовини у вертикальному стовпі атмосфери над певною точкою. Історично (а також із міркувань зручності) загальний вміст озону подають в одиницях Добсона (ОД) [14], названих на честь відомого дослідника процесів у озоновому шарі та конструктора спеціального спектрофотометра. Величина в 1 ОД відповідає

шару газу товщиною 0.01 мм за нормальних умов (температура 0 °С, тиск 1013.25 гПа).

Розбіжності між результатами вимірювань ЗВО різними методами можна розділити на дві основні групи. По-перше, наземні і супутникові спостереження провадяться не зовсім одночасно і на певній просторовій дистанції. Як наслідок, ця частина розбіжностей відображає реальні просторово-часові варіації вмісту озону [1]. Сюди ж слід зарахувати й відмінність розмірів досліджуваної області — при супутникових вимірюваннях вони сягають кілометрів чи десятків кілометрів [8, 21]. З іншого боку, розбіжності зумовлюються неідеальністю методик вимірювання характеристик світла, яке взаємодіяло з атмосферою, та недосконалістю алгоритмів для відтворення за цими характеристиками загального вмісту озону [3, 5, 15, 17, 20]. До того ж такі алгоритми є принципово різними, кожен із них містить власні джерела помилок, що ускладнює зіставлення даних та аналіз отриманих розбіжностей. Зокрема, для спектрофотометра Добсона застосовуються сталі значення коефіцієнтів поглинання світла озonom, тому їхня температурна залежність здатна впливати на підсумко-

вий результат [2, 17]. При дослідженні тривалих часових рядів потрібно враховувати можливість зміни параметрів приладів із часом, що особливо важливо для супутникових вимірювань, які мають природні обмеження щодо калібрування [16]. У свою чергу, при наземних вимірюваннях із залученням спостерігача додаються також суб'єктивні помилки.

Оцінка розбіжностей між загальним вмістом озону, знайденим різними методами, є важливим засобом інтеркалібрування, який дозволяє вказати можливі джерела неточностей при тому чи іншому підході [3, 16, 19, 20]. Зокрема, зіставлення результатів наземних і супутникових вимірювань сприяє вдосконаленню супутникових алгоритмів і дозволяє виявити недоліки при роботі наземного обладнання. Застосовується і зіставлення між собою даних кількох наземних [19] чи супутникових [20] приладів.

Реальні просторово-часові зміни значень загального вмісту озону на відстанях у кілька десятків кілометрів та інтервалах у кілька годин, як правило, є незначними [13]. Це й дозволяє активно залучати супутникові вимірювання, зроблені не зовсім над тією точкою та не в той час, що й наземні. Дослідження дали змогу сформувати критерії для наземних станцій, зокрема зі спектрофотометрами Добсона, яким повинні відповідати спостережні пункти з хорошою якістю даних [11]. Так, середня різниця не повинна перевищувати 3 %, а середнє квадратичне відхилення має становити не більше 4.5 %. Порівняння [11] дозволяють вказати на низку обставин, які збільшують розходження. Зокрема, це відбувається при великих зенітних відстанях Сонця, коли точність вимірювань падає через відносне збільшення у спектрофотометрі частки розсіяного світла порівняно з потоком УФ-випромінювання, що пройшло крізь озоновий шар. За таких умов фіксується заниження результату при використанні спектрофотометра Добсона. Головний небажаний ефект зумовлений впливом розсіяного випромінювання з довжинами хвиль поза смугою, у якій ведуться спостереження [2, 9]. Вважається, що найбільший внесок дає світло в діапазоні 350—400 нм. У першу чергу, труднощі мають виникати при ви-

мірюваннях у найкоротшій застосовуваній парі довжин хвиль (λ), починаючи із зенітних відстаней Сонця $z \approx 67^\circ$ [2]. Ефект є неоднаковим для різних (хоч і аналогічних за конструкцією) приладів [9]. Також відзначалася залежність різниць від загального вмісту озону. Характерним є сезонний хід різниць, до певної міри пов'язаний зі зміною зенітної відстані Сонця. Є і розбіжності, які залежать від погодних умов, зокрема рівня хмарності [10].

Роботу присвячено зіставленню супутникових та наземних даних на прикладі станції Київ-Голосіїв, де для знаходження загального вмісту озону застосовується спектрофотометр Добсона № 040. Метою є оцінка якості вимірювань різних типів, що виконуються з допомогою спектрофотометра Добсона, а також встановлення характеру розбіжностей між наземними та супутниковими значеннями ЗВО для вказаної станції. Розглядається часовий інтервал від початку вимірювань на станції Київ-Голосіїв (13 травня 2010 р.) до кінця 2012 р.

ДАНИ ТА МЕТОДИ

Спектрофотометр Добсона № 040 з 13 травня 2010 р. встановлено на даху Головної астрономічної обсерваторії НАН України (географічні координати — широта 50.364°N , довгота 30.497°E ; висота над рівнем моря 206 м) — станція Київ-Голосіїв, код KGV, № 498 у базі Всесвітнього центру озонових та ультрафіолетових даних (World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre — WOUDC, <http://woudc.org>). Вимірювання проводяться щоденно, за винятком періодів із тривалими інтенсивними опадами. Значимо, що спектрофотометр Добсона № 040 протягом 1952—2009 рр. використовувався для вимірювань загального вмісту озону на станції Укль (Бельгія, № 53 у базі WOUDC).

Спектрофотометр Добсона може працювати у двох режимах, визначаючи інтенсивність прямого сонячного випромінювання чи випромінювання в області зеніту, розсіяного земною атмосферою [14]. Зенітні вимірювання, у свою чергу, поділяються на зроблені за умов ясного і хмарного неба, що обумовлено відмінностями при обробці [6, 14]. Таким чином, маємо три типи

спостережень за їхніми умовами: «пряме Сонце» (Direct Sun — DS), ясне небо (Zenith Blue — ZB) та хмарне небо (Zenith Cloud — ZC). Для знаходження загального вмісту озону застосовуються вимірювання у двох парах довжин хвиль, що дозволяє з високою точністю усунути вплив аерозолу [2, 6]. Звичайно залучаються стандартні для спектрофотометра Добсона пари AD та CD; 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) [14]. У підсумку маємо шість різновидів вимірювань, а отже і шість окремих рядів даних: DSAD, ..., ZCCD.

Для зіставлення з наземними даними були використані результати вимірювань супутникових приладів Ozone Monitoring Instrument (OMI, космічний апарат «Аура» [4, 21]) та Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Chartography (SCIAMACHY, супутник «Енвісат» [8, 12]). Дані OMI охоплюють весь досліджуваний часовий інтервал, прилад SCIAMACHY функціонував до виходу з ладу супутника 8 квітня 2012 р. Для порівняння безпосередньо використано так звані «оверпаси» — вимірювання, виконані супутниковими інструментами у межах 100 км від наземної станції: http://www.temis.nl/protocols/o3col/overpass_omi.html для OMI та http://www.temis.nl/protocols/o3col/overpass_scia_v2.html для SCIAMACHY. З огляду на покриття полем зору приладу земної поверхні, на широті Києва OMI іноді забезпечує два значення протягом дня, отримані при проходженні сусідніх витків орбіти. Для SCIAMACHY, натомість, маємо не більше одного вимірювання за день. Для зіставлення всіх наземних даних використано також модель, побудовану за спостереженнями OMI (http://www.temis.nl/protocols/o3field/overpass_omi.html). Вона містить значення для спостережної станції з інтервалом у шість годин (00, 06, 12 та 18 UT). Аналізувалися головним чином дані станом на 12 UT, найближчі за часом до більшості наземних вимірювань.

Величина розбіжностей між вимірюваннями оцінювалась за допомогою обчислення різниць між супутниковими та наземними оцінками ЗВО (саме з таким знаком; там, де шукається різниця між двома супутниковими значен-

нями, знак вказано окремо). Відмінності між рядами характеризуються з допомогою середніх різниць та стандартних відхилень від середнього. При використанні запису зі знаком «±» наводиться подвоєне стандартне (середнє квадратичне) відхилення, яке для випадку гауссівського розподілу різниць має включати 95.4 % значень.

СЕЗОННИЙ ХІД ЗАГАЛЬНОГО ВМІСТУ ОЗОНУ НА СТАНЦІЇ КИЇВ-ГОЛОСІЇВ

Спершу охарактеризуємо варіації загального вмісту озону, які спостерігаються у досліджуваному пункті протягом року. Київ-Голосіїв є середньоширотною станцією північної півкулі. Згідно з багаторічними спостереженнями для цієї кліматичної зони типовим є максимум ЗВО у кінці зими — на початку весни та мінімум у кінці осені [18, 22]. Така тенденція підтверджується супутниковими та наземними спостереженнями на станції Київ-Голосіїв. При цьому мінімальні значення у жовтні—листопаді сягають близько 250 ОД, а максимальні, у лютому — березні, — понад

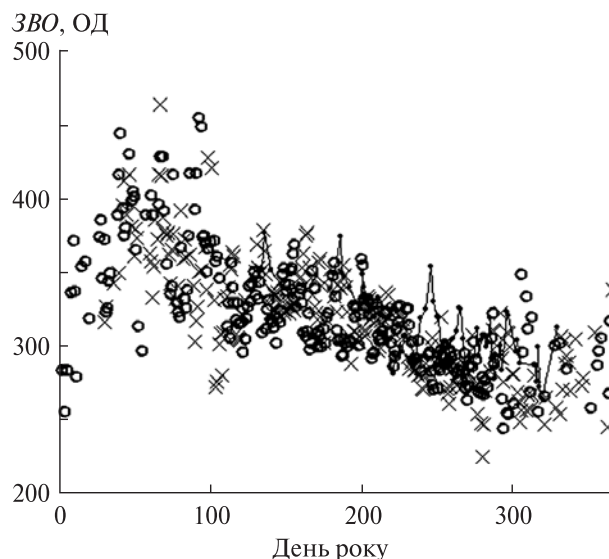


Рис. 1. Зміни загального вмісту озону (середньодобові значення) на станції Київ-Голосіїв за даними вимірювань із допомогою спектрофотометра Добсона протягом року: точки — 2010 р., хрестики — 2011 р., кружки — 2012 р. Використано результати спостережень за прямим Сонцем у стандартних парах довжин хвиль AD (DSAD). Тут і далі день року відраховується від 1 січня

400 ОД. Середньорічні значення ЗВО над станцією Київ-Голосіїв становлять близько 320 ОД.

Сезонний хід загального вмісту озону за даними DSAD вимірювань представлено на рис. 1. Видно велику дисперсію ЗВО у період максимуму: значення інколи змінюються на 100 ОД за кілька днів. Натомість варіації протягом травня — листопада суттєво менші і звичайно не перевищують 30—40 ОД. Вказане зростання часових варіацій навесні має призводити і до збільшення розкиду різниць між даними, отриманими різними методами. У свою чергу, влітку і восени природна складова розбіжностей повинна бути меншою.

ВЗАЄМНЕ ЗІСТАВЛЕННЯ СУПУТНИКОВИХ ДАНИХ

Розглянемо, як співвідносяться між собою дані, отримані із допомогою різних супутникових приладів, а також оцінки ОМІ з моделлю, розробленою на їхній основі (рис. 2). Отримані параметри мають демонструвати рівень внутрішньої відповідності супутникових даних — чи достатній він, щоб оцінити прийнятність значень у наземних рядах. Серед іншого, потрібно проаналізувати вплив просторових та часових інтервалів між вимірюваннями на величину розбіжностей. Відповідні дані наводяться у табл. 1.

Отже, спершу простежимо за різницями між індивідуальними вимірюваннями ОМІ та створеною на їхній основі моделлю. Будемо розглядати

всі значення для станції Київ-Голосіїв, отримані з 1 жовтня 2004 р. (початок функціонування приладу ОМІ в робочому режимі) по 31 грудня 2012 р. включно. Індивідуальні вимірювання беремо в межах 100 км від станції Київ-Голосіїв. Для вивчення часової мінливості зіставимо дані, що відповідають, з одного боку, більшому часовому інтервалу (8 год), з іншого — вужчому (4 та 2 год). Отримані абсолютні значення різниці (табл. 1), ймовірно, показують внутрішню неузгодженість між даними й моделлю. Ці розбіжності не є великими, але привертає до себе увагу їхній систематичний характер: для всіх розглянутих років середнє значення для моделі перевищує відповідну величину за індивідуальними вимірюваннями. Для 2012 р. розбіжність виявилася незначною, але для попередніх років вона більша, іноді досягаючи 8—10 ОД (2009—2011 рр.). Характерно, що у багатьох випадках видно чіткий сезонний хід із переважно додатними різницями «модель — супутник» узимку та від'ємними — влітку (рис. 2, а). Цей ефект не простежується для 2012 р. (рис. 2, б). Вказана обставина відображає певні алгоритмічні проблеми або при обробці індивідуальних спостережень, або при створенні моделі із кроком 6 год (чи в обох випадках одночасно).

Дуже важливою характеристикою є дисперсія різниці, яка включає і випадкові похибки, і реальні варіації ЗВО. Зрозуміти їхню роль допомагає зміна обмежень на інтервал у часі та просторі

Таблиця 1. Різниця ΔZVO загального вмісту озону та подвоєне середнє квадратичне відхилення 2σ між модельними даними та результатами вимірювань ОМІ у 2004 — 2012 рр. для різних просторових та часових інтервалів спостережень

| Рік | $\Delta ZVO \pm 2\sigma$, ОД | | | | |
|------|-------------------------------|---------------|---------------|--------------|--------------|
| | 100 км, 8 год | 100 км, 4 год | 100 км, 2 год | 50 км, 4 год | 25 км, 4 год |
| 2004 | 5.1±19.2 | 4.3±14.6 | 4.9±13.9 | 4.6±15.1 | 4.1±14.2 |
| 2005 | 3.4±23.0 | 3.1±17.8 | 3.4±16.5 | 3.3±17.6 | 3.1±16.7 |
| 2006 | 2.9±22.4 | 2.9±17.6 | 3.3±16.2 | 3.3±16.8 | 3.1±15.9 |
| 2007 | 4.8±25.2 | 4.7±18.6 | 5.6±17.1 | 5.1±17.7 | 4.9±17.5 |
| 2008 | 5.3±24.2 | 5.3±17.9 | 6.1±17.1 | 5.5±17.6 | 5.3±17.9 |
| 2009 | 8.8±21.7 | 8.6±16.9 | 8.8±14.9 | 8.6±16.1 | 8.3±15.6 |
| 2010 | 10.3±21.6 | 10.0±17.6 | 9.0±16.6 | 9.2±16.8 | 8.4±16.9 |
| 2011 | 8.3±22.2 | 8.0±17.3 | 7.2±16.0 | 7.2±16.2 | 6.5±15.6 |
| 2012 | 2.1±24.3 | 1.8±18.3 | 2.3±18.2 | 1.2±17.6 | 1.0±16.8 |

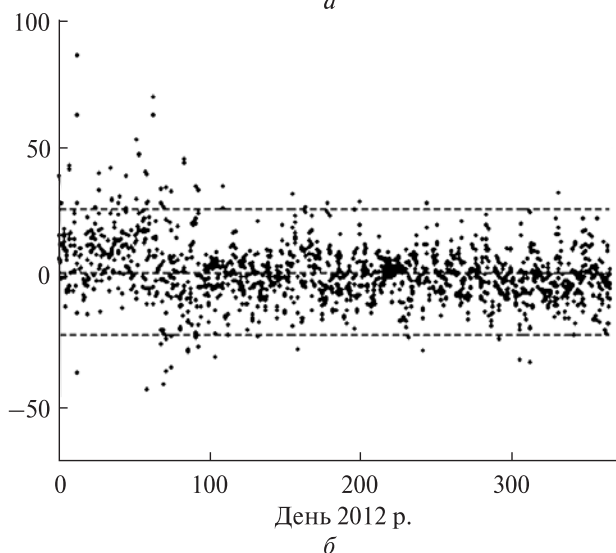
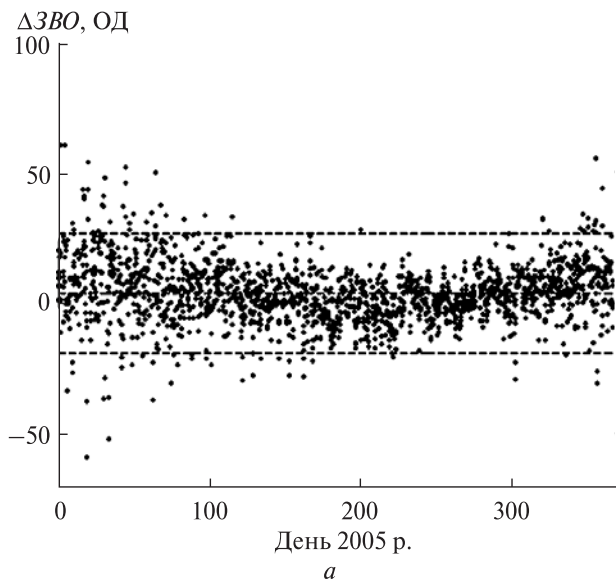


Рис. 2. Різниця ΔZVO між модельними даними та оцінками ОМІ в околі станції Київ-Голосіїв у 2005 р. (а) і 2012 р. (б). Пунктирні лінії — середня величина і діапазон подвоєного середнього квадратичного відхилення. Використано близькі дані, часовий інтервал між якими не перевищує 8 год, відстань від центра поля зору супутникового приладу до станції не більша за 100 км

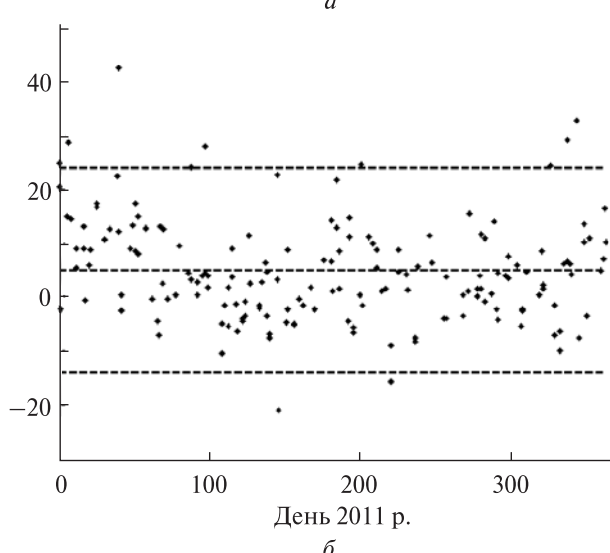
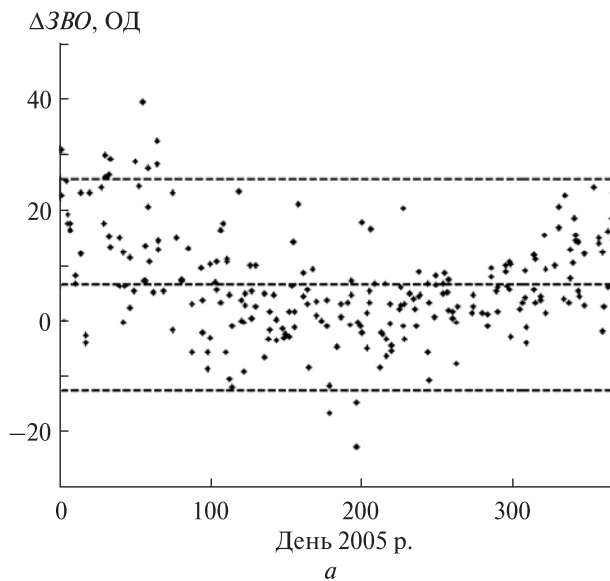


Рис. 3. Різниця ΔZVO між даними загального вмісту озону за вимірюваннями супутникових приладів SCIAMACHY та ОМІ в околі 100 км від станції Київ-Голосіїв: а — 2005 р., б — 2011 р. Інтервал між вимірюваннями не перевищує 4 год

(100, 50 та 25 км). Можна бачити, що при переході від 100 до 50 км дисперсія дещо знижується, подвійне середнє квадратичне відхилення становить відповідно 22—25 та 16—18 ОД. Натомість для 25 км зміни вже практично немає. Що стосується часу, то дисперсії виявляються приблиз-

но однаковими для інтервалів 4 год ($2\sigma = 15\text{—}19$ ОД) та 2 год (14—18 ОД), тоді як значення для 8 год відчутно більші (19—25 ОД). Це може вказувати на реальні масштаби просторово-часової мінливості ZVO або ж на особливості створеної моделі — щоб розмежувати ці випадки, потрібно

залучити також порівняння між двома масивами спостережних даних.

Для такого порівняння зіставимо дані ОМІ та SCIAMACHY. Звернемо тільки увагу на те, що супутник «Енвісат» припинив функціонування у квітні 2012 р., тому вдасться врахувати лише частину заключного року обраного часового інтервалу. Крім того, тепер маємо вже три просторові точки (станція, центр поля зору ОМІ та центр поля зору SCIAMACHY). Для оцінки просторових інтервалів будемо послідовно аналізувати два вимірювання в радіусі 100 км від станції кожне (відносна відстань до 200 км), в радіусі 50 та 25 км (відносна відстань у кожному випадку може виявитися вдвічі більшою за наведене значення). Різницю в часі, з огляду на результати зіставлення даних ОМІ та моделі, обмежимо 4 год. Приклади для 2005 та 2011 рр. наведені на рис. 3, а обчислені середні характеристики представлені у табл. 2.

Результати проведеного зіставлення дозволяють робити висновки про відносно завищення даних SCIAMACHY порівняно з ОМІ. Як не дивно, 6-годинна модель, побудована на основі даних ОМІ, за середньою величиною виявляється ближчою до них, а до результатів SCIAMACHY (див. табл. 1 та 2). Крім того, помітним є сезонний хід різниці з максимумом у зимовий період. Відзначимо, що 2004 і 2012 рр. не можуть вважатися репрезентативними з огляду на малу кількість матеріалу для порівняння. Середні

Таблиця 2. Різниці між даними SCIAMACHY та ОМІ при зміні відстані між центром поля зору приладу та станцією Київ-Голосіїв

| Рік | $\Delta ZVO \pm 2\sigma$, Од | | |
|------|-------------------------------|--------------|--------------|
| | 100 км, 4 год | 50 км, 4 год | 25 км, 4 год |
| 2004 | 8.0±15.9 | 8.5±16.6 | 8.1±16.4 |
| 2005 | 6.3±19.1 | 6.5±19.3 | 6.1±17.8 |
| 2006 | 6.1±18.4 | 6.2±18.2 | 6.4±18.3 |
| 2007 | 4.7±18.7 | 5.2±18.1 | 5.5±18.9 |
| 2008 | 5.0±21.2 | 5.1±21.5 | 4.9±21.8 |
| 2009 | 9.2±20.2 | 9.3±20.7 | 8.7±20.5 |
| 2010 | 6.6±19.5 | 5.6±18.2 | 5.0±18.0 |
| 2011 | 4.9±18.9 | 4.4±17.9 | 3.8±18.6 |
| 2012 | 14.7±20.6 | 14.8±21.8 | 12.1±14.3 |

квадратичні відхилення не демонструють жодної залежності від відстані у межах 25—100 км, тому її існування при попередньому зіставленні доводиться визнати штучно внесеним моделлю. Дані не виявляють окремих різких відхилень від загальної картини, що з високою ймовірністю свідчить про відсутність грубих промахів у досліджуваних рядах.

РЕЗУЛЬТАТИ ПОРІВНЯННЯ НАЗЕМНИХ І СУПУТНИКОВИХ ДАНИХ

Як уже зазначалося, ми аналізуємо шість рядів наземних даних, отриманих різним способом (DS, ZB та ZC) із використанням двох пар довжин хвиль (AD і CD). Середньодобові значення будемо зіставляти з модельними станом на 12 UT, а індивідуальні вимірювання — з індивідуальними супутниковими, отриманими у межах тих чи інших просторових та часових інтервалів. З огляду на виявлену розбіжність між модельними даними та окремими супутниковими спостереженнями головний інтерес становитимуть дисперсії різниць, а самі абсолютні різниці можуть привертати увагу тільки при надто великих їхніх значеннях — як середніх, так і для деяких точок (викиди). Кожен рік, зокрема неповний 2010-й, розглядаємо окремо.

Як можна бачити з рис. 4, сезонний хід однаково описується як супутниковими (модельними), так і наземними даними. Найбільші неузгодженості простежуються для періоду зростання ZBO (січень — початок лютого) та максимуму (лютий — початок квітня). Надалі розбіжності між даними різного походження, як і варіації вмісту озону, помітно зменшуються.

Аналіз середніх значень дозволяє виокремити більш і менш надійні способи вимірювань. З огляду на спостережувані міжрічні варіації параметрів (різниць і середніх квадратичних відхилень) та їхні абсолютні значення варто вказати, що вимірювання DSAD, ZBAD та DSCD якісніші, ніж ZBCD, ZCAD та ZCCD. Відповідні середні величини і подвійні середні квадратичні відхилення відтворені на рис. 5.

Розгляд розбіжностей проводився також із використанням індивідуальних вимірювань. Залучалися наземні й супутникові дані, отримані

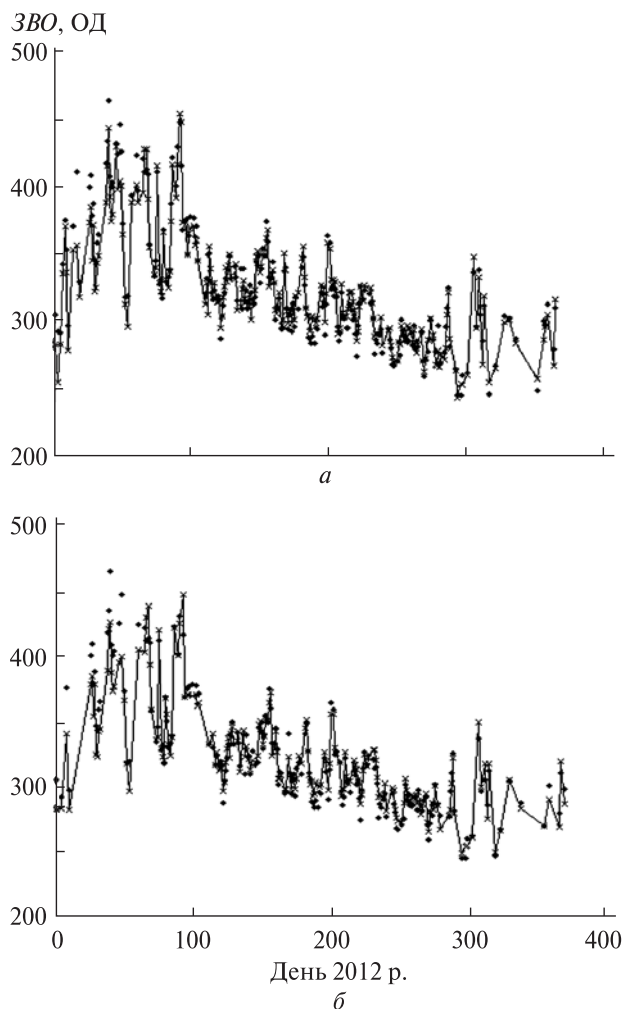


Рис. 4. Значення ZVO на станції Київ-Голосіїв: точки — модельні дані станом на 12 UT (OM112), хрестики та лінії — середньодобові значення, отримані з допомогою спектрофотометра Добсона (спостереження типів DSAD (а) та ZBAD (б))

протягом однієї доби. Аналіз відповідних результатів теж вказує на існування, з одного боку, сезонної залежності різниці, а з іншого — виявляє ті чи інші неточності при наземних вимірюваннях, які тут більш помітні, ніж у випадку середньодобових значень (рис. 6).

Практично важливим є дослідження залежності різниці від зенітної відстані при наземних і супутникових вимірюваннях, оскільки це дає змогу визначити оптимальні режими спостережень. Встановлено, що різниця зростає (тобто,

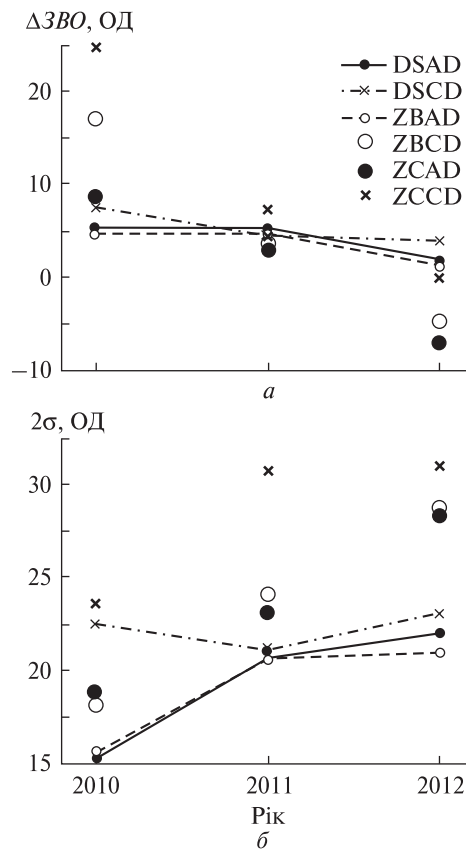


Рис. 5. Різниця ΔZVO між модельними та наземними оцінками загального вмісту озону для станції Київ-Голосіїв: а — середні значення, б — подвоєне середнє квадратичне відхилення. Наведено річні усереднення, використано модельні дані станом на 12 UT та добовий ZVO за вимірюваннями спектрофотометра Добсона

дані спектрофотометра Добсона є відносно заниженими), коли зенітна відстань Сонця перевищує 60° (рис. 7). Особливо помітним цей процес стає при зенітних відстанях понад 70° . Характер залежності приблизно однаковий для вимірювань за прямим Сонцем (рис. 7, а) та за ясним небом у зеніті (рис. 7, б). До певної міри зростання різниці може пояснюватися недосконалістю супутникового алгоритму, але, швидше за все, відбувається заниження значень ZVO спектрофотометром Добсона, зумовлене передовсім розсіяним усередині приладу світлом [2].

Для перевірки походження великих різниць при зростанні зенітної відстані Сонця виконано додатковий аналіз. Безпосереднє вивчення

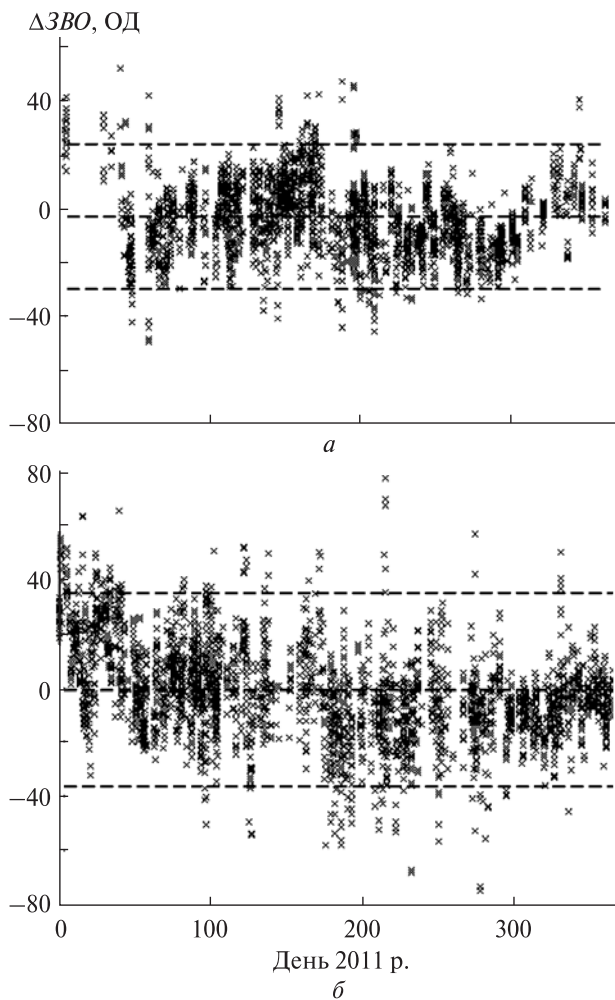


Рис. 6. Різниця ΔZVO між індивідуальними вимірюваннями ОМІ та спектрофотометра Добсона на станції Київ-Голосіїв: *a* — різниця ОМІ – ZBCD, *б* — ОМІ – ZCCD. Супутникові спостереження виконувались того ж дня, що й наземні, на відстані, яка не перевищує 100 км. Пунктирні лінії — середньорічна різниця та діапазон подвоєного середнього квадратичного відхилення

залежності загального вмісту озону від зенітної відстані малоефективне через наявність сезонного ходу у *ZVO*. Таким чином, малі зенітні відстані досяжні тільки у кінці весни чи влітку, що спотворює ефект. До того ж вимірювання при великих зенітних відстанях виконуються переважно у зв'язку з відсутністю інших даних біля моменту зимового сонцестояння. Доцільнішим виглядає дослідження залежності різниці між індивідуальним і середньодобовим значенням від

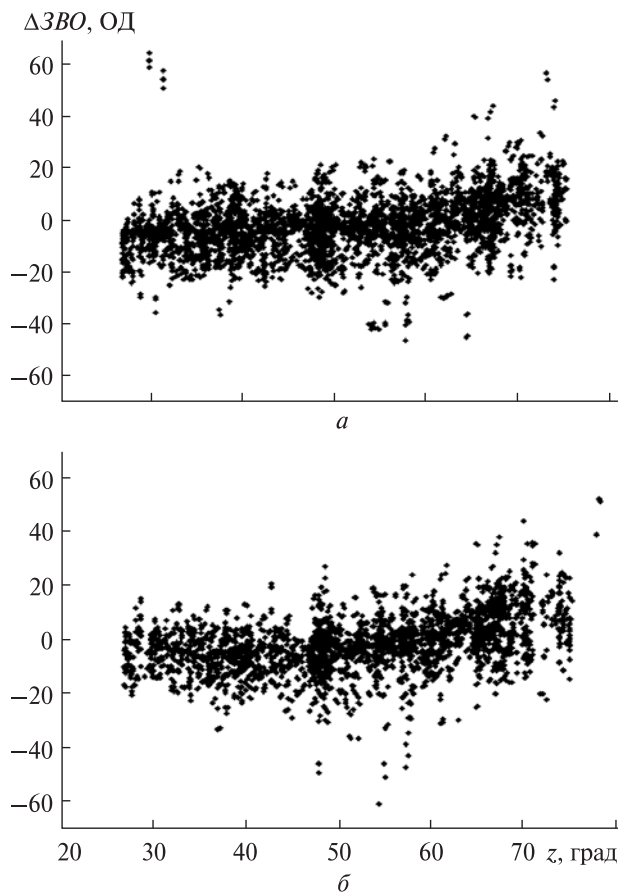


Рис. 7. Залежності різниці ΔZVO між супутниковими (ОМІ) та наземними (спектрофотометр Добсона) вимірюваннями на станції Київ-Голосіїв у 2012 р. від зенітної відстані *z* Сонця: *a* — різниця ОМІ – DSAD, *б* — ОМІ – ZBAD

зенітної відстані, що дає змогу усунути сезонний хід. Такий метод не виявив впливу зенітної відстані при значеннях, які переважно використовуються (до $\sim 70^\circ$).

Аналогічний метод щодо супутникових вимірювань застосовний тільки дуже обмежено. Спостереження для середньопівнічних пунктів виконуються приблизно в один і той же момент за місцевим часом, що не дозволяє проаналізувати залежність від зенітної відстані Сонця навіть упродовж кількох днів. Щоправда, вимірювання ОМІ можуть здійснюватися на двох сусідніх витках орбіти, але відповідна відмінність у зенітних відстанях є малою. У межах такої відмінності не

вдалося виявити впливу зенітної відстані на значення *ZBO*.

Як уже зазначалось вище, у роботі [11] зроблено спробу встановити критерії для якісних наземних вимірювань загального вмісту озону. Що стосується середньої різниці, то відповідну величину оцінено у 3 %. Це дозволяє зарахувати дані станції Київ-Голосіїв до якісних за середньою різницею, принаймні для типів даних DSAD, ZBAD та DSCD. Середня різниця тут не перевищує 2.4 % (відносне заниження для спектрофотометра Добсона при DSCD вимірюваннях у 2010 р.). Характеристики для інших типів спостережень демонструють суттєву міжрічну мінливість (див. рис. 5, *a*), що природно пов'язати з труднощами при проведенні відповідних наземних вимірювань, а головним чином — при їхній обробці (адже в цих випадках обчислення є непрямим і базується виключно на статистичній залежності). Максимальною виявилася розбіжність для даних ZCCD у 2010 р. — відносне заниження наземних результатів на 8.4 %. Загалом середня різниця для спектрофотометра Добсона № 040 перебуває у прийнятних межах, але вона змінюється протягом року. Зауважимо, що з огляду на виявлені невідповідності навіть між даними ОМІ та побудованою за ними моделлю, більш важливою характеристикою, ніж середня різниця, є середнє квадратичне відхилення.

Середні квадратичні відхилення дають змогу виокремити різновиди спостережень із неоднаковою якістю. Вказані раніше як найбільш точні, дані типів DSAD, ZBAD та DSCD зберігають середнє квадратичне відхилення у межах, зазначених у [11]: 4.5 %. Отже, результат для цих типів спостережень наближається до отриманого при зіставленні між собою різних супутникових вимірювань та супутникових вимірювань із моделлю. Ймовірно, відповідні величини відображають природні просторово-часові варіації *ZBO* у районі станції Київ-Голосіїв. Відхилення для інших типів даних можуть бути пов'язані з їхньою недостатньою якістю. Особливо це стосується спостережень за хмарним небом у зеніті (ZCAD та ZCCD), коли умови в ході вимірювання змінюються, збільшуючи, часом дуже суттєво, випадкову похибку.

Залежність від зенітної відстані Сонця розглядається майже завжди, коли вивчається функціонування наземних озонотричних приладів. Така залежність пов'язана зі зміною товщини повітря, через яку проходить сонячне випромінювання, у даному випадку — через озоновий шар. Вище зазначалось, що при великих зенітних відстанях зростає частка розсіяного у спектрофотометрі світла, занижуючи результати обчислень *ZBO* [2]. Це накладає обмеження на значення зенітних відстаней, при яких можливі коректні спостереження. Водночас такі обмеження не є чітко визначеними, оскільки вони залежать як від умов спостережень (зокрема рівня *ZBO*), так і від характеристик приладу. Крім того, зенітна відстань є важливою і при супутникових вимірюваннях, впливаючи на інтенсивність розсіяння (роль алгоритму обробки) і будучи пов'язаною із сезонними змінами та з впливом підстильної поверхні.

ВИСНОВКИ

Проаналізовано точність значень загального вмісту озону на станції Київ-Голосіїв, отриманих зі спектрофотометром Добсона № 040 протягом 2010—2012 рр. Аналіз дозволяє зробити висновки про якість цих наземних вимірювань та суттєві чинники, що її визначають. Водночас розглянуто ряди даних супутникових приладів SCIAMACHY, ОМІ та модель, побудовану на основі останніх. Відповідно до отриманих результатів можна говорити про надійність наземних спостережень за прямим Сонцем, а також за ясним небом у зеніті з використанням стандартних пар AD спектрофотометра Добсона. Вимірювання за хмарним небом є менш надійними з огляду на нестійкі умови їхнього проведення. Спостереження типу ZBCD, певно, потребують удосконалення обробки.

Важливою обставиною є висока якість зенітних рядів ZBAD, яка не поступається якості вимірювань за прямим Сонцем. Слід, однак, пам'ятати, що *ZBO* за зенітними вимірюваннями обчислюється з допомогою їхнього зіставлення з даними DS-вимірювань із застосуванням поліноміального наближення та врахуванням емпіричних корекцій відповідно до спільних спостережень ZB та DS.

Різниці між супутниковими та наземними вимірюваннями демонструють помітний сезонний хід із максимумом узимку та мінімумом улітку. Подібний хід (хоч і з меншою амплітудою) простежується і при зіставленні двох супутникових рядів даних. Це вказує на ймовірний зв'язок сезонного ходу різниць між значеннями ЗВО із варіаціями зенітної відстані Сонця. Пошук першопричини описаного явища потребує додаткових досліджень. Міжрічні зміни різниць для деяких типів вимірювань, схоже, обумовлені неточностями при наземних вимірюваннях. При зенітних відстанях Сонця, які перевищують 60°, дані спектрофотометра Добсона є відносно заниженими, що, вочевидь, пов'язано із впливом на результат світла, розсіяного всередині приладу.

Отже, є всі підстави вважати вимірювання загального вмісту озону на станції Київ-Голосіїв якісними. Сезонні зміни різниць між супутниковими й наземними даними, ймовірно, обумовлюються недоліками обох алгоритмів обчислення ЗВО. Значення розбіжності між результатами вимірювань залежить, зокрема, від зенітної відстані Сонця.

1. Adams C., Strong K., Batchelor R. L., et al. Validation of ACE and OSIRIS ozone and NO₂ measurements using ground-based instruments at 80°N // Atmos. Meas. Tech. — 2012. — 5, N 5. — P. 927–953.
2. 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.
3. Bernhard G., Evans R. D., Labow G. J., Oltmans S. J. Bias in Dobson total ozone measurements at high latitudes due to approximations in calculations of ozone absorption coefficients and air mass // J. Geophys. Res. — 2005. — 110, N D10. — D10305, doi:10.1029/2004JD005559.
4. Bhartia P. K. OMI algorithm theoretical basis document. — NASA, 2002. — Vol. II. OMI ozone products. — 91 p. — http://www.knmi.nl/omi/documents/data/OMI_ATBD_Volume_2_V2.pdf.
5. Bramstedt K., Gleason J., Loyola D., et al. Comparison of total ozone from the satellite instruments GOME and TOMS with measurements from the Dobson network 1996–2000 // Atmos. Chem. Phys. — 2003. — 3, N 12. — P. 1409–1419.
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. — XVI, Part II. — P. 161–191.
7. Eskes H. Stratospheric ozone: satellite observations, data assimilation and forecasts // Proc. Seminar on Recent Developments in Data Assimilation for Atmosphere and Ocean, 8–12 September 2003. — Reading, UK: ECMWF, 2004. — P. 341–360.
8. Eskes H. J., van der A R. J., Brinksma E. J., et al. Retrieval and validation of ozone columns derived from measurements of SCIAMACHY on Envisat // Atmos. Chem. Phys. Discuss. — 2005. — 5, N 4. — P. 4429–4475.
9. Evans R., McConville G., Oltmans S., et al. Measurement of internal stray light within Dobson ozone spectrophotometers // Int. J. Remote Sens. — 2009. — 30, N 15–16. — P. 4247–4258.
10. Evtushevsky O., Milinevsky G., Grytsai A., et al. Comparison of ground-based Dobson and satellite EP-TOMS total ozone measurements over Vernadsky station, Antarctica, 1996–2005 // Int. J. Remote Sens. — 2008. — 29, N 9. — P. 2675–2683.
11. 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, doi:10.1029/2008JD009809.
12. Gottwald M. (Ed.). — SCIAMACHY, Monitoring the Changing Earth's Atmosphere. — DLR, Institut für Methodik der Fernerkundung, 2006. — 167 p.
13. Grytsai A., Milinevsky G. SCIAMACHY/Envisat, OMI/Aura, and ground-based total ozone measurements over Kyiv-Goloseyev station // Int. J. Remote Sens. — 2013. — 34, N 15. — P. 5611–5622.
14. 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.
15. Kravchenko V., Evtushevsky A., Grytsai A., et al. Total ozone dependence of the difference between the empirically corrected EP-TOMS and high-latitude station datasets // Int. J. Remote Sens. — 2009. — 30, N 15/16. — P. 4283–4294.
16. McPeters R. D., Labow G. J. An assessment of the accuracy of 14.5 years of Nimbus 7 TOMS version 7 ozone data by comparison with the Dobson network // Geophys. Res. Lett. — 1996. — 23. — P. 3695–3698.
17. 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. Discuss. — 2013. — 13, N 9. — P. 22979–23021.
18. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006. — Geneva: World Meteorological Organization, 2007. — Rep. N 50.

19. *Staelin J., Kerr J., Evans R., Vanicek K.* Comparison of total ozone measurements of Dobson and Brewer spectrophotometers and recommended transfer functions. — World Meteorological Organization Global Atmosphere Watch, 2003. — Rep. N 149. — 35 p.
20. *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.
21. *Veeffkind J. P., de Haan J. F., Brinksma E. J., et al.* Total ozone from the Ozone Monitoring Instrument (OMI) using the DOAS technique // *IEEE Transact. Geosci. Remote Sens.* — 2006. — **44**, N 5. — P. 1239—1244.
22. *Weber M., Lamsal L. N., Coldewey-Egbers M., et al.* Pole-to-pole validation of GOME WFDOAS total ozone with groundbased data // *Atmos. Chem. Phys.* — 2005. — **5**, N 5. — P. 1341—1355.

Стаття надійшла до редакції 16.01.14

А. В. Грицай, Г. П. Милиневский

АНАЛИЗ РАСХОЖДЕНИЯ МЕЖДУ НАЗЕМНЫМИ И СПУТНИКОВЫМИ ИЗМЕРЕНИЯМИ ОБЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА: СТАНЦИЯ КИЕВ-ГОЛОСИИВ

Сопоставляются данные спутниковых и наземных измерений общего содержания озона на станции Киев-Голосиив с 13 мая 2010 г. до конца 2012 г. Используются данные спутниковых приборов OMI и SCIAMACHY, а также данные, полученные на станции Киев-Голосиив с помощью спектрофотометра Добсона № 040. Путем сравнения со спутниковыми данными выполнена оценка качества наземных измерений разных типов. Показано, что наиболее надежным является метод наземных измерений «по прямому Солнцу». Кроме того, следует отметить высокое качество наземных зенитных наблюдений безоблачного неба в стандартной паре длин волн AD, которое, по крайней мере, не хуже качества измерений «по прямому Солнцу». Установлено, что значения общего содержания озона, полученные с помощью спектро-

фотометра Добсона, являются меньшими сравнительно со спутниковыми, когда зенитное расстояние Солнца превышает 60°. Главной причиной этого «расхождения» считается занижение общего содержания озона спектрофотометром Добсона вследствие влияния рассеянного внутри прибора света. Разности между спутниковыми и наземными данными демонстрируют сезонный ход с максимумом зимой и минимумом летом, что указывает на ограниченность алгоритмов вычисления общего содержания озона

А. В. Grytsai, G. P. Milinevsky

ANALYSIS OF THE DISCREPANCY BETWEEN GROUND-BASED AND SATELLITE TOTAL OZONE CONTENT MEASUREMENTS AT KYIV-GOLOSEYEV STATION

We compared satellite and ground-based total ozone measurements at the Kyiv-Goloseyev station. Some data of the Ozone Monitoring Instrument and Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Cartography satellite instruments were used. The ground-based observations were carried out with the Dobson spectrophotometer N 040. The period from the measurement beginning (13 May 2010) at the Kyiv-Goloseyev station to the end of 2012 was considered. An estimation for ground-based observations of different types was performed through their comparison with satellite data. The “Direct Sun” ground-based measurements were shown to be the most reliable ones. Moreover, it is essential to note a high quality of Zenith Blue ground-based observations. Their quality was at least comparable with one for the “Direct Sun” measurements. The Dobson total ozone content (TOC) values were revealed to be lower than the satellite values while solar zenith angle is greater than 60°. The main cause of this discrepancy is probably a TOC underestimate by the Dobson spectrophotometer due to radiation scattered within the instrument. The differences between satellite and ground-based data display seasonal changes with the maximum in winter and minimum in summer. This points to some limits of the TOC calculation algorithm.