

УДК 528.813:551.510.534

О. М. Євтушевський, А. В. Грицай, Г. П. Міліневський,
В. О. Кравченко, З. І. Грицай

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Порівняння наземних та супутникових вимірювань загального вмісту озону над антарктичною станцією Академік Вернадський (1996—2005 рр.)

Надійшла до редакції 25.02.08

За результатами порівняння наземних та супутникових вимірювань загального вмісту озону (ЗВО) в атмосфері над антарктичною станцією Академік Вернадський проаналізовано вплив умов спостережень (хмарності, зенітного кута Сонця, значення ЗВО) на розбіжність даних. Узгодженість між результатами вимірювань спектрофотометром Добсона та даними спектрометра EP-TOMS після переходу у 2004 р. від 7-ї до 8-ї версії алгоритму обробки супутникових даних суттєво не змінилася. Середнє додатне значення різниці 1.8 % для 7-ї версії змінилося на від'ємне значення -2 % для 8-ї версії. Середні значення різниці для безхмарного неба (+4.1 %, 137 днів) та хмарного неба (-4.5 %, 1048 днів) свідчать, що розбіжність супутникових і наземних щоденних значень ЗВО залежить від наявності хмарності. Ця залежність залишається незмінною в результатах порівняння з обома версіями даних TOMS: середні різниці TOMS-Добсон при спостереженнях в умовах чистого і хмарного неба відрізняються майже на 9 %. Одержана залежність різниці TOMS-Добсон від умов спостережень може свідчити про завищення супутникових даних над наземними при чистому небі та про зворотне співвідношення при хмарному небі. Найбільшу розбіжність даних виявлено у період озонної діри (вересень — жовтень) при спостереженнях в умовах хмарності. Одержані результати дозволяють покращити точність вимірювань ЗВО з урахуванням стану атмосфери.

ВСТУП

Глобальні супутникові спостереження озону розпочалися у 1978 р. Упродовж першого і найтривалішого 14-річного періоду вимірювання здійснювалися на борту супутника «Nimbus-7» спектрометром TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) [15] (див. також <http://toms.gsfc.nasa.gov>). Загалом спектрометри цієї серії працювали до 2005 р., коли був задіяний новий інструмент для глобального моніторингу озону OMI (Ozone Monitoring Instrument, <http://aura.gsfc.nasa.gov/instruments/omi>) [2]. Дані про загальний вміст озону (ЗВО) у вертикальному стовпі атмосфери,

одержані спектрометрами TOMS та OMI, мають переваги над іншими супутниковими даними не лише через найбільшу тривалість рядів спостережень, а й через високе просторове розділення (1° по широті та 1.25° по довготі) та практично повне покриття земної кулі щоденними вимірюваннями (за винятком не освітлених Сонцем ділянок Арктики та Антарктики у період полярної ночі) [14]. Це дозволяє досліджувати як планетарні, так і порівняно маломасштабні особливості розподілу ЗВО та його багаторічні зміни [8, 17, 19].

У зв'язку із значними змінами в озонному шарі за останні десятиліття особливо актуальні-

ми стали оцінки якості озонових вимірювань [18]. Такі оцінки виконувалися шляхом зіставлення результатів, одержаних різними серіями приладів, які відрізнялися технологією виготовлення чутливих елементів, методикою вимірювань і калібрувань, а також алгоритмом визначення ЗВО [5, 9, 11–13, 15, 16, 20]. Аналіз багаторічних даних TOMS для середніх широт показав їхню узгодженість у межах 1 % з даними наземної спектрофотометричної мережі у північній півкулі та завищення у південній півкулі приблизно на 2 % [5, 13, 15, 16]. Завищення відносно наземних даних збільшувалося між середніми та високими широтами південної півкулі до 4–12 % [13, 16]. Тому з 2004 р. була запроваджена 8-а версія алгоритму TOMS, яка зменшила вказану розбіжність [4, 12].

Аналіз дворічних вимірювань новим приладом ОМІ показав узгодженість з наземними даними у межах 1–2 % [2]. Проте відзначено існування сезонних змін у розбіжності, джерело яких (наземний чи супутниковий інструмент) залишається невстановленим.

Головні джерела розбіжностей між значеннями вмісту озону за даними TOMS та наземних станцій — це мала висота Сонця над горизонтом, наявність хмарності, труднощі з урахуванням відбивної здатності поверхні у високих широтах (сніг, лід) та залежність чутливості приладів від рівня ЗВО [5, 11, 13, 15]. Південні полярні широти лишаються проблемним регіоном при зіставленні наземних та супутникових озонових даних. Весняне руйнування стратосферного озону над Антарктикою (озонова діра), зокрема в районі станції Академік Вернадський (крайова область діри, 65°15' S, 64°15' W), поєднується з варіаціями низьких і високих рівнів ЗВО, обумовленими динамічними чинниками. При розташуванні краю озонової діри на широті станції зміна його форми і положення, як відзначалося в роботах [13, 16], і як буде показано нижче, є додатковим джерелом розбіжності супутникових та наземних вимірювань.

У даній роботі проведено порівняння 8-ї версії даних спектрометра Earth Probe TOMS (EP-TOMS) та значень ЗВО, отриманих при вимірюваннях спектрофотометром Добсона № 031 на станції Академік Вернадський протягом 1996–2005 рр. Результати порівняння для 7-ї

версії EP-TOMS, одержані нами раніше, наведені в роботах [1, 8, 10]. Дані EP-TOMS наявні з липня 1996 р. до кінця 2005 р., і ми використовуємо їх, щоб виявити зміни, пов'язані із введенням нової версії алгоритму. Розглянуто варіації щоденних значень різниці TOMS–Добсон, сезонну зміну її середньомісячних значень та залежність різниці TOMS–Добсон від рівня ЗВО.

МЕТОД АНАЛІЗУ

Як і в роботі [7], окремо розглянуто ряди вимірювань ЗВО за допомогою спектрофотометра Добсона № 031 (ЗВО_{Добсон}) у ясні дні та у дні з суцільною хмарністю. Для відокремлення даних був використаний параметр «тип спостережень». Якщо всі індивідуальні вимірювання протягом дня кодувалися як «0 — вимірювання по Сонцю» та «2 — чисте небо в zenіті», то середньоденне значення вмісту озону включалося у вибірку для безхмарних днів. У вибірку для хмарних днів відбиралися тільки значення ЗВО, одержані у дати, коли вимірювання протягом спостережного дня кодувалися як «5 — хмарне небо в zenіті».

Відбір ясних днів у даному дослідженні був проведений більш жорстко порівняно з попередніми нашими роботами. Наприклад, у роботі [10] безхмарними вважалися також дні, коли окремі вимірювання, далекі від полудня, проводилися за хмарної погоди. Більш жорсткий відбір у даній роботі зумовив певне скорочення масиву спостережень для ясних днів, хоча в цілому суттєво не вплинув на результати порівняння.

За створеними таким чином двома рядами дат наземних спостережень (для чистого та хмарного неба) було відібрано відповідні супутникові значення ЗВО_{TOMS}, отримані при проходженні EP-TOMS над станцією Академік Вернадський. Такі ряди супутникових даних формуються майже для 500 наземних станцій, що проводять атмосферні дослідження. Дані EP-TOMS для станції Академік Вернадський за 1996–2005 рр. (№ 232 за міжнародною класифікацією) накопичувалися у файлі OVP232_epc.txt в архіві TOMS за адресою http://toms.gsfc.nasa.gov/eptoms/ep_ovplist_a.html.

Обчислювалися відносні значення різниці TOMS–Добсон (супутникові мінус наземні вимірювання) у відсотках: $D_{Т-Д} (\%) = (ЗВО_{TOMS} - ЗВО_{Добсон}) \cdot 100 / ЗВО_{Добсон}$ і аналізувалися окремо для ясного і хмарного неба, а також для всіх даних із використанням позначень $D_{бх}$, $D_{хм}$ та $D_{пов}$ відповідно.

Вимірювання спектрометром EP-TOMS здійснювалися вздовж полярної орбіти із скануванням у поперечному напрямі в межах $\pm 51^\circ$ від надіра з кроком 3° [14]. Поле зору спектрометра становило $3 \times 3^\circ$, а розмір площадки на поверхні Землі, що потрапляє в поле зору, змінювався від 38×38 км в надирі до 70×140 км при максимальному відхиленні сканувального дзеркала. Така методика забезпечує перекриття вимірювань на суміжних витках супутника і дозволяє відібрати для кожної наземної станції одне значення ЗВО, виміряне безпосередньо над станцією чи поблизу неї. Горизонтальна відстань центра площадки від станції із зазначенням його географічних координат, часу вимірювань та зенітної відстані Сонця на момент вимірювань також внесена у масив супутникових даних. Місцевий час перетину екватора спектрометром EP-TOMS був близьким до полудня, і при тривалості одного витка ~ 100 хв це означає, що всі вимірювання вздовж орбіти виконуються в близькі до місцевого полудня години [14].

Отже, супутникові дані для станції Академік Вернадський у файлі OVP232_erc.txt включають одне вимірювання, зроблене в полуденний час кожного дня при найближчому до станції розташуванні поля зору спектрометра EP-TOMS. Тому для коректного порівняння супутникових та наземних спостережень запропонована в роботі [7] методика передбачала розгляд лише двох станів атмосфери над станцією — чистого неба або суцільної хмарності впродовж усього спостережного дня. Такий підхід забезпечує відповідність погодних умов, за яких одержано супутникове значення $ЗВО_{TOMS}$, визначене над станцією приблизно в середині дня, та середнє значення $ЗВО_{Добсон}$, визначене за сукупністю індивідуальних наземних вимірювань упродовж усього спостережного дня.

Постійна наявність (відсутність) хмарного покриву протягом дня спостережень означає, що небо є хмарним (безхмарним) на великій площі.

Відстань області супутникових вимірювань від станції Академік Вернадський зазнає варіацій упродовж року, проте не перевищує 330 км (рис. 1, а, в).

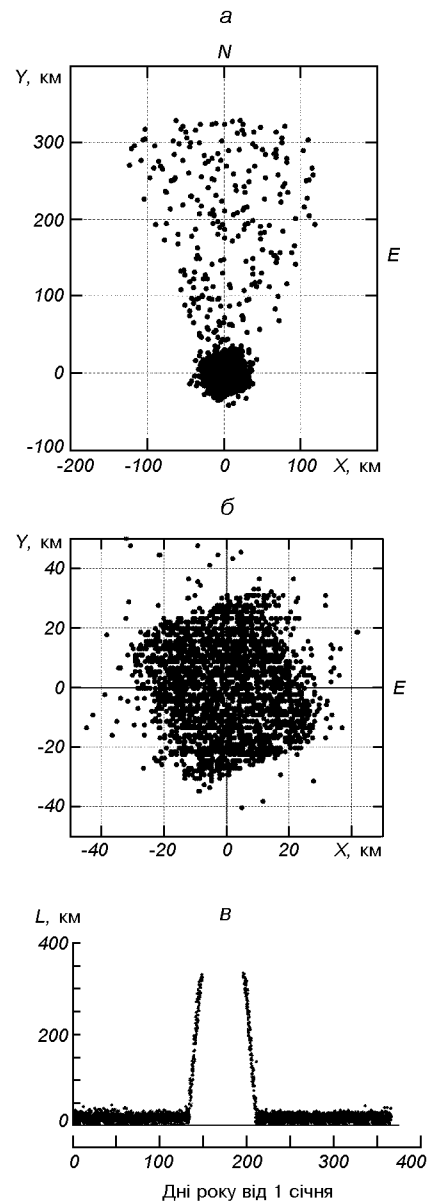


Рис. 1. Варіації положення центра поля зору спектрометра EP-TOMS відносно станції Академік Вернадський при визначенні $ЗВО_{TOMS}$: а — для всіх вимірювань, б — за виключенням початкових (друга половина липня) та кінцевих (друга половина травня) дат періоду неперервних спостережень, коли полуденна висота Сонця над горизонтом становить $6\text{--}8^\circ$; положення станції відповідає початку координатних осей, в — зміна горизонтальної відстані від станції до центра поля зору EP-TOMS упродовж року

Максимальне відхилення у бік екватора зумовлене малою висотою Сонця над горизонтом ($< 10^\circ$) у другій половині травня та у другій половині липня (рис. 1, *в*), коли умови освітлення дозволяють здійснювати вимірювання лише на нижчих від станції широтах. У червні і першій половині липня вимірювання озону на цих широтах спектрометром TOMS та спектрофотометром Добсона не проводяться. Впродовж решти 9.5 місяців сезону неперервних спостережень із серпня до середини травня супутник визначає ЗВО переважно у межах 30 км навколо станції (рис. 1, *б*, *в*). Тому, враховуючи вказані вище розміри поля зору супутникового спектрометра, у переважній більшості вимірювань станція потрапляє в його поле зору.

Це означає, що, наприклад, при наземних вимірюваннях у зеніті за умов безхмарного неба ресструватиметься ультрафіолетове випромінювання, розсіяне практично в тому ж вертикальному стовпі атмосфери, що й при супутникових. В іншому режимі вимірювань спектрофотометром Добсона — по Сонцю — вздовж візирної лінії приладу упродовж дня спостерігатимуться різні повітряні маси. Проте при висоті Сонця над горизонтом понад 10° стратосферний максимум озону (20 км) зондуватиметься не далі ніж 60 км від станції. Тому і цей режим вимірювань не пов'язаний із суттєвими просторовими відмінностями стану атмосфери. Оскільки дні з частковою хмарністю та змінними погодними умовами не розглядаються, то практично виключається джерело похибок, пов'язане з ідентифікацією стану атмосфери над антарктичною станцією. Наприклад, при змінній хмарності одноразове супутникове визначення ЗВО над станцією може бути зроблене при безхмарному небі, а більшість наземних — при хмарному. Це зазвичай вносить невизначеність у результати порівняння наземних і супутникових спостережень, яку складно оцінити [5, 13].

ЩОДЕННІ ВАРІАЦІЇ РІЗНИЦІ TOMS – ДОБСОН

Варіації щоденних значень відносної різниці TOMS–Добсон наведено на рис. 2. Спочатку було виконано порівняння різниці $D_{\text{пов}}$ для всіх даних у 7-й та 8-й версіях супутникового алгоритму. Слід перш за все відзначити загальне

зниження значень $D_{\text{пов}}$ у 8-й версії (рис. 2, *б*) порівняно з 7-ю (рис. 2, *а*). Це помітно з розташування області дисперсії відносно нульового значення різниці, показаного горизонтальною штриховою лінією на рис. 2. Зменшення різниці відображає зміни, внесені у 8-й версії для високоширотних даних [4, 12].

Інша відмінність виявлена для сезонної зміни дисперсії. У випадку 8-ї версії існує помітне монотонне зменшення різниці протягом липня — жовтня, що демонструє лінійне наближення на рис. 2, *б*. Ця тенденція, як свідчить лінійне наближення рис. 2, *а*, не проявлялася у 7-й версії. Порівняння даних 8-ї версії для ясних і хмарних днів демонструє, що вимірювання за хмарної погоди і відповідні значення $D_{\text{хм}}$ на рис. 2, *г* дають головний внесок у від'ємний тренд значень $D_{\text{пов}}$ протягом липня — жовтня на рис. 2, *б*. Вимірювання при ясній погоді не мають сезонної залежності для значень $D_{\text{бх}}$. Однак статистика $D_{\text{бх}}$ (137 діб) є відносно невеликою порівняно з рядами даних $D_{\text{хм}}$ (1048 діб). Відношення кількості ясних та хмарних днів протягом 1996—2005 рр. — приблизно 1:8 — відображає метеорологічні умови в районі Антарктичного півострова, де переважає хмарна погода. Тим не менш, дані для ясного неба узгоджуються з результатами для вимірювань по Сонцю в Антарктиці та у північній півкулі, які також не мають сезонного ходу різниці між супутниковими та наземними вимірюваннями [13, 15, 16].

В середньому для 1996—2005 рр. одержано такі значення різниці: для безхмарного неба $D_{\text{бх}} = 4.1 \pm 5.1 \%$ (рис. 2, *в*), для хмарного неба $D_{\text{хм}} = -4.5 \pm 6.4 \%$ (рис. 2, *г*) та для всього масиву даних $D_{\text{пов}} = -2.0 \pm 6.4 \%$ (рис. 2, *б*). Попередня 7-а версія давала додатну різницю $D_{\text{пов}} = 1.8 \pm 5.9 \%$ для всіх даних за 1996—2003 рр. (рис. 2, *а*).

У 8-й версії значення $D_{\text{пов}}$ та $D_{\text{хм}}$ мають досить великий інтервал дисперсії протягом липня — жовтня (близько 30 %; рис. 2, *б*, *г*, відповідно), який швидко звужується в 1.5—2 рази на початку листопада. При порівнянні з обома версіями даних EP-TOMS використані одні й ті ж ряди даних станції Академік Вернадський. Тому спостережуваний перерозподіл дисперсії може бути пов'язаний лише із змінами, внесеними у 8-у

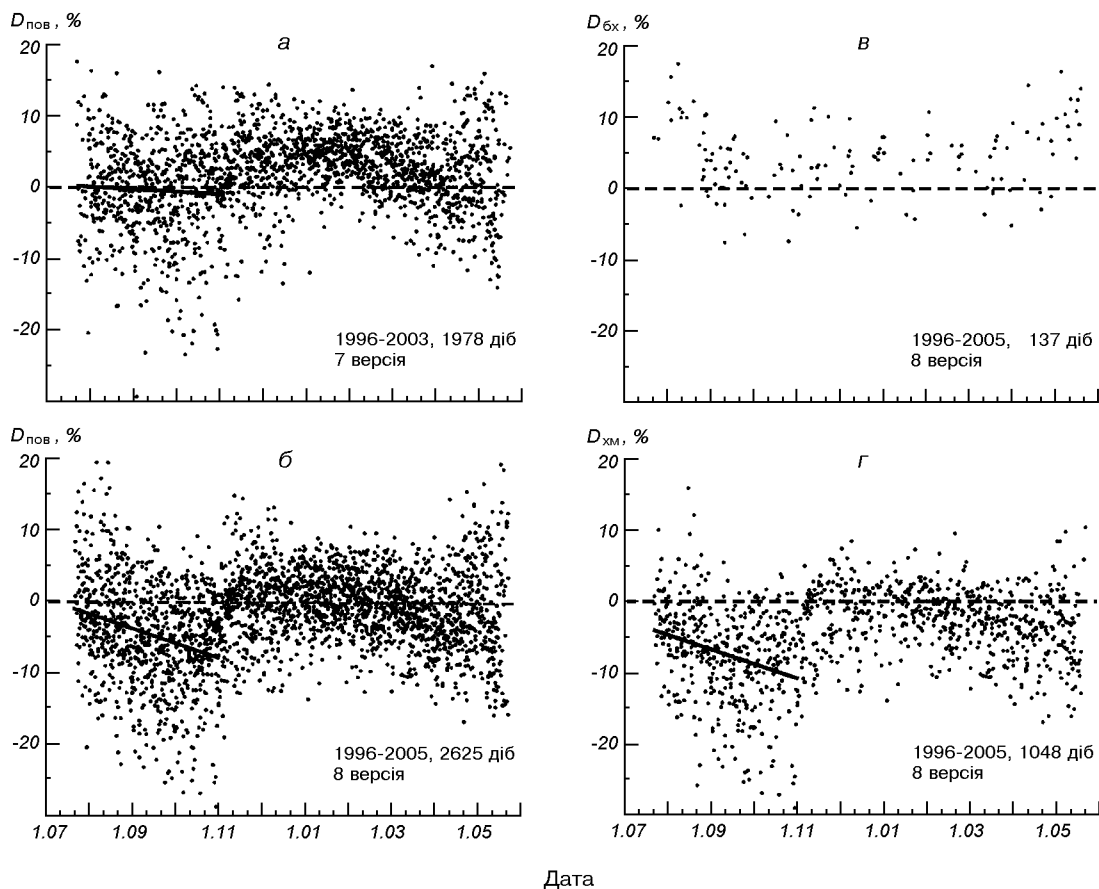


Рис. 2. Варіації відносної різниці між щоденними значеннями загального вмісту озону над станцією Академік Вернадський, одержаними супутниковим спектрометром EP-TOMS та наземним спектрофотометром Добсона: *a* — для всіх даних 1996—2003 рр. (7-ма версія супутникового алгоритму), *б* — для всіх даних 1996—2005 рр. (8-ма версія), *в* — для безхмарного неба (8-ма версія), *г* — для захмареного неба (8-ма версія)

версію супутникових даних. Низхідний тренд різниці у липні — жовтні вказує на залежність від значень ЗВО, оскільки рівень вмісту озону досягає сезонного мінімуму у вересні—жовтні внаслідок розвитку озонової діри. Нижче цю залежність описано докладніше.

Крайова область озонової діри, залежно від збурень планетарними хвилями, може розташовуватися так, що станція Академік Вернадський опиняється всередині чи зовні діри. Цим можна пояснити велику дисперсію різниці, яка зберігається до кінця жовтня. На таке ж походження максимуму дисперсії вказано в роботах [13, 16]. Оскільки супутник робить одне полуденне вимірювання поблизу станції, то проходження краю діри над станцією здатне спричинити помітну

зміну рівня ЗВО упродовж дня, що вплине на середнє його значення, визначене за цей день під час наземних вимірювань. Внаслідок сезонного зменшення розмірів озонової діри її край зміщується в напрямку полюса, і в листопаді над станцією встановлюється стійкий рівень вмісту озону. Це призводить до різкої зміни середнього значення різниці та зменшення її варіацій.

СЕРЕДНЬОМІСЯЧНІ РІЗНИЦІ TOMS – ДОБСОН

Варіації середньомісячних різниць також розглядаються у порівнянні двох версій алгоритму EP-TOMS. Рис. 3, *a* відтворює результат для 7-ї

версії, представлений у роботі [1, рис. 6], де усереднювалися різниці за чотири сезони неперервних спостережень у 1996—2000 рр. Усереднені величини склали $\bar{D}_{\text{бх}} = 8.1 \pm 5.0 \%$ ($N = 133$) для ясного неба та $\bar{D}_{\text{хм}} = -0.7 \pm 5.7 \%$ ($N = 499$) для хмарного. Різниці для 8-ї версії (рис. 3, б) були усереднені за дев'ять сезонів спостережень 1996—2005 рр. Усереднені величини склали $\bar{D}_{\text{бх}} = 4.1 \pm 5.1 \%$ ($N = 137$) для ясного неба та $\bar{D}_{\text{хм}} = -4.5 \pm 6.4 \%$ ($N = 1048$) для хмарного.

Варто відзначити, що обсяг рядів даних для ясного неба є майже однаковим для 7-ї та 8-ї версії (133 та 137 діб відповідно) попри значно більший часовий інтервал у другому випадку. Це зумовлено суворішим відбором безхмарних днів у даній роботі, про що вже згадано вище.

Із рис. 3, а, б помітно, що для обох версій значення $\bar{D}_{\text{бх}}$ для ясного неба (штрихові криві) є більшими, ніж $\bar{D}_{\text{хм}}$ для хмарної погоди (суцільні криві). У середньому $\bar{D}_{\text{бх}}$ перевищує $\bar{D}_{\text{хм}}$ на 8.9 % при використанні 7-ї версії та на 8.6 % — для 8-ї. Отже, середня відстань по вертикалі між двома кривими майже не змінилася при переході до 8-ї версії, хоча середні рівні різниць $\bar{D}_{\text{бх}}$ та $\bar{D}_{\text{хм}}$ знизилися приблизно на 4 %. Така зміна пов'язана з відзначеним вище загальним зниженням значень TOMS у високих широтах південної півкулі в останній версії алгоритму [4, 12].

Порівняння двох версій на рис. 3, а, б дозволяє встановити, що зниження ЗВО_{TOMS} є однаковим для вимірювань при яському та хмарному небі, і у 8-й версії значна розбіжність значень різниці TOMS – Добсон для цих умов спостережень залишається незмінною.

В обох версіях середньомісячна різниця для ясного неба не має сезонної залежності протягом вересня — квітня (8 місяців). Цей результат, відзначений вище для дисперсії різниці на рис. 2, в, узгоджується з результатами порівняння даних 8-ї версії та вимірювань по Сонцю на окремих станціях в Антарктиці та північній півкулі [13, 16]. Раніше подібна тенденція була виявлена при зіставленні 7-ї версії з вимірюваннями на 30 станціях у північній півкулі, обладнаних спектрофотометрами Добсона та Брюера, для зенітних відстаней Сонця, які не перевищують 80° [15].

Подібність спостерігається і для варіацій зна-

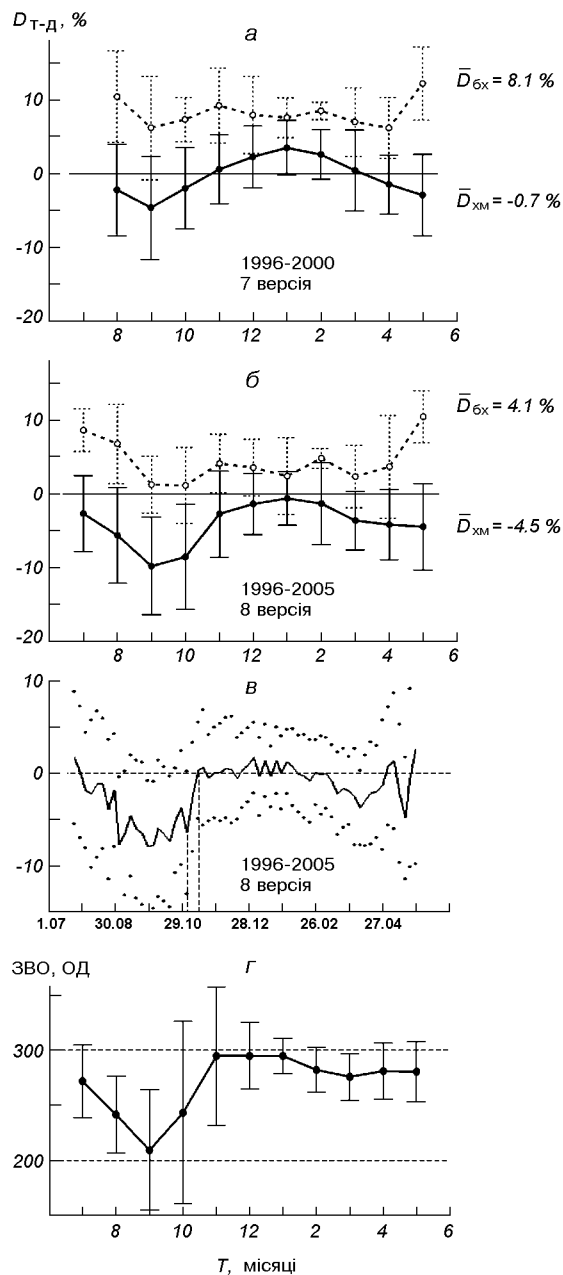


Рис. 3. Середньомісячні різниці TOMS—Добсон $D_{\text{T-Д}}$: а — для 7-ї версії супутникових даних, усереднені за 1996—2000 рр. [1] ($\bar{D}_{\text{бх}} = 8.1 \pm 5.0 \%$ ($N = 133$) та $\bar{D}_{\text{хм}} = -0.7 \pm 5.7 \%$ ($N = 499$)); б — для 8-ї версії за 1996—2005 рр. ($\bar{D}_{\text{бх}} = 4.1 \pm 5.1 \%$ ($N = 137$) та $\bar{D}_{\text{хм}} = -4.5 \pm 6.4 \%$ ($N = 1048$)), в — п'ятиденне усереднення, г — середньомісячні значення ЗВО за вимірюваннями спектрофотометра Добсона на станції Академік Вернадський у 1996—2005 рр.; наведено середні квадратичні відхилення ($\pm\sigma$)

чень $\overline{D}_{\text{бх}}$ для обох версій (штрихові криві на рис. 3, а, б). Узгодженість сезонних варіацій, отриманих у даній роботі та в [10], де відбір безхмарних днів було здійснено за менш суворим критерієм, свідчить, що такі відмінності вибірок не впливають на результати порівняння. Тому збереження незмінного стану неба (ясного чи хмарного) впродовж полуденних годин може бути достатнім для забезпечення ідентичності умов спостережень наземних та супутникових вимірювань. Зміна рівня хмарності на станції в ранкові чи вечірні години вимірювань істотно не впливатиме на якість порівняння внаслідок малої ваги цих індивідуальних спостережень у віддалені від полудня години.

Суттєве зростання від'ємної різниці $\overline{D}_{\text{хм}}$ спостерігається навесні, коли розвивається озонова діра (суцільна крива на рис. 3, б). У цей період середньомісячні різниці для хмарного неба демонструють тенденцію, відзначену вище для поведінки дисперсії різниць (рис. 2, б, г). В цілому сезонні зміни $\overline{D}_{\text{хм}}$ на рис. 3, б повторюють хід середньомісячних значень ЗВО за вимірюваннями спектрофотометра Добсона на рис. 3, г. Аномальне збільшення від'ємної різниці $\overline{D}_{\text{хм}}$ у вересні до $-9.8 \pm 6.6\%$ (рис. 3, б) узгоджується з положенням найнижчого середньомісячного значення ЗВО (209 ± 55 ОД, рис. 3, г). Рівень ЗВО відновлюється у листопаді і залишається відносно стійким протягом семи місяців. Значення $\overline{D}_{\text{хм}}$ демонструють подібну поведінку (рис. 3, б, суцільна крива). Слід зауважити, що для мінімумів ЗВО та $\overline{D}_{\text{хм}}$ у вересні — жовтні властива висока змінність значень (дивись середні квадратичні відхилення на рис. 3, б—г). А нормальний рівень вмісту озону 300 ОД, який спостерігається з листопада, поєднується з мінімальною змінністю обох параметрів та зближенням значень $\overline{D}_{\text{хм}}$ та $\overline{D}_{\text{бх}}$ (рис. 3, б).

Зміну дисперсії щоденних значень різниці TOMS – Добсон на початку листопада якісно проілюстровано вище (рис. 2, б, г), а за середньомісячними значеннями різниці $\overline{D}_{\text{хм}}$ у жовтні і листопаді зміна становить 5% (рис. 3, б). Для уточнення часу та рівня цієї зміни щоденні значення різниць $D_{\text{пов}}$ за 1996—2005 рр. були послідовно усереднені з 5-денним кроком. Із рис. 3, в видно, що впродовж двох весняних

місяців (вересень — жовтень) різниця має значення -7% , і за першу декаду листопада вона зменшується до 0% . Це усереднена за десятиріччя характеристика перехідного часового інтервалу, яким закінчується період озонової діри з високою змінністю $D_{\text{пов}}$ і ЗВО (серпень — жовтень) над станцією Академік Вернадський. Середні квадратичні відхилення, нанесені точками на рис. 3, в, зменшуються в цей же час у 1.5 рази. Відповідно до даних ЗВО на рис. 3, г, ця зміна пов'язана з відновленням нормальних рівнів вмісту озону.

Узагальнення даних рис. 2 і 3 дозволяє зробити висновок про дві важливі особливості у розбіжності між наземними та супутниковими вимірюваннями озону над станцією Академік Вернадський, пов'язаних з розвитком озонової діри. По-перше, відбувається значне зростання від'ємної різниці TOMS – Добсон при зниженні ЗВО у весняні місяці. По-друге, це зниження дає основний внесок у багаторічне середнє значення різниці -2% , а при його відсутності її варіації відбувалися б поблизу нульового значення (рис. 3, в). Тому зв'язок різниці TOMS – Добсон з рівнем ЗВО варто розглянути докладніше.

ЗАЛЕЖНІСТЬ РІЗНИЦІ TOMS – ДОБСОН ВІД ЗНАЧЕНЬ ЗВО

Вже відзначалося, що оцінки залежності значень $D_{\text{Т-Д}}$ від рівня ЗВО наводилися раніше, наприклад, в роботах [13, 15, 16]. Результати були різними для північної і південної півкуль. Згідно з роботою [15] різниця між супутниковими і наземними даними у північній півкулі збільшувалася на 1—2% при зростанні ЗВО на 100 ОД. Від'ємний тренд різниці спостерігався в Антарктиці [13].

Вище було показано, що і різниці $D_{\text{Т-Д}}$, і рівень ЗВО у зимово-весняний період (липень — листопад) змінюються в значно більших межах, ніж у літньо-осінній (грудень — травень), причому така змінність пов'язана головним чином із спостереженнями в умовах хмарності (рис. 2 і 3). Тому залежність різниці TOMS – Добсон від ЗВО оцінювалася окремо для вказаних двох періодів. У першому з них різниця зростає на $4.0 \pm 0.8\%$ на кожні 100 ОД при зростанні ЗВО

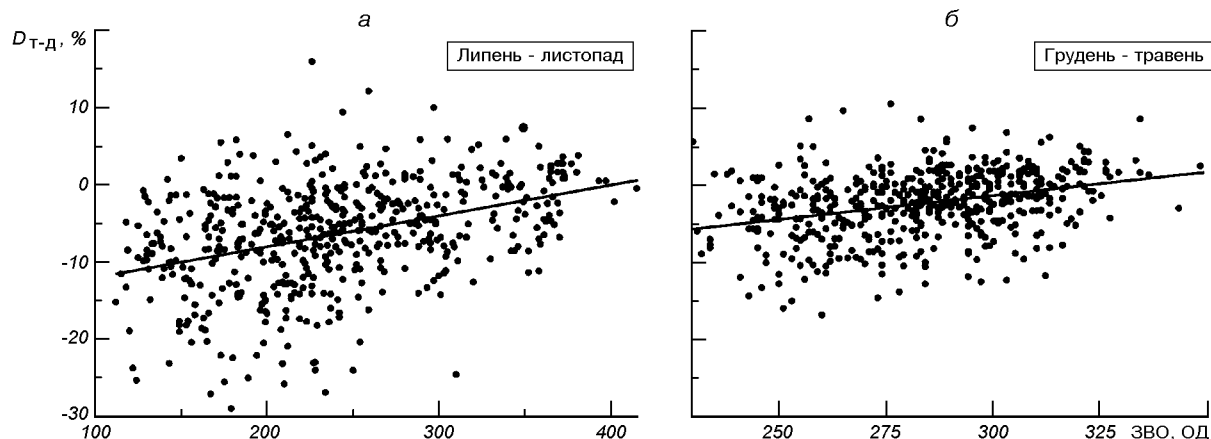


Рис. 4. Залежність різниці TOMS – Добсон D_{T-D} від рівня загального вмісту озону для спостережень в умовах суцільної хмарності упродовж: *a* — зимово-весняного періоду та *б* — літньо-осіннього періоду

приблизно від 120 до 400 ОД (рис. 4, *a*).

Упродовж другого періоду, коли діапазон змін ЗВО становить 240—330 ОД, тренд дещо вищий: 6.6 ± 1.5 % на 100 ОД (рис. 4, *б*). Похибки тренду вказано на рівні середніх квадратичних відхилень $\pm\sigma$, тобто відмінність двох значень тренду статистично суттєва. Отже, залежність різниці D_{T-D} від ЗВО посилюється у період, коли рівень озону стабілізується (інтервал змінності ЗВО у грудні — травні на рис. 3, *в* приблизно вдвічі менший, ніж у липні — листопаді).

Сезонні зміни хмарності у поєднанні з мало-вивченими варіаціями спектру ультрафіолетового випромінювання, розсіяного шаром хмар [6], недостатньо враховуються при обчисленні $ZVO_{\text{Добсон}}$. Найімовірніше, дані рис. 4 можуть вказувати саме на вплив хмарного покриву на залежність D_{T-D} від ЗВО, тобто на зв'язок з наземними спостереженнями. Вимірювання спектрометром TOMS значно менш чутливі до сезонних змін висоти та оптичної товщини хмар, оскільки стратосферний максимум озону розташований над ними. Зміни ж хмарності враховуються в алгоритмі TOMS вимірюваннями розсіяного УФ-випромінювання на довжині хвилі 380 нм, незалежно від озонових вимірювань в діапазоні 310—340 нм [4].

Інший суттєвий фактор — зміна висоти Сонця над горизонтом — має однаковий сезонний хід в обох випадках. Тому залежність значень D_{T-D} від ЗВО при вимірюваннях в умовах суцільної

хмарності може бути пов'язана більшою мірою з похибками наземних спостережень. Хоча в період озонової діри ця залежність кількісно менша, ніж в інші сезони, зниження ЗВО настільки значне, що рівень різниці TOMS – Добсон у середньомісячних даних досягає -10 %. Це може вказувати на завищення $ZVO_{\text{Добсон}}$ над ZVO_{TOMS} .

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ТА ВИСНОВКИ

Узгодженість між результатами вимірювань спектрофотометром Добсона на станції Академік Вернадський та даними EP-TOMS після переходу від 7-ї до 8-ї версії алгоритму TOMS суттєво не змінилася. Середня додатна різниця 1.8 % для 7-ї версії (за оцінками вимірювань у 1996—2003 рр.) змінилася від'ємною -2 % для 8-ї версії (1996—2005 рр.). Середні значення різниці $\overline{D_{\text{бх}}} = 4.1$ % (137 безхмарних днів) та $\overline{D_{\text{хм}}} = -4.5$ % (1048 хмарних днів) свідчать, що розбіжність супутникових і наземних даних залежить від наявності хмарного покриву. Характер відмінності середніх різниць при спостереженнях в умовах ясного і хмарного неба не змінився (близько 9 % в обох версіях).

Отже, зміни даних TOMS, пов'язані з введенням 8-ї версії алгоритму, проявилися у загальному зниженні рівня ЗВО в районі станції Академік Вернадський, але залишилася незмінною

залежність розбіжності наземних і супутникових даних від наявності чи відсутності хмар в районі станції. Варто також відзначити деякі інші особливості варіацій різниці TOMS – Добсон.

Вимірювання в умовах ясного неба. Вимірювання при відсутності хмар не мають суттєвої сезонної залежності різниці D_{T-D} (рис. 2, в та рис. 3, а, б, штрихові лінії). Середньомісячні значення змінюються в межах від 1 до 5 % протягом 8-місячного інтервалу вересень – квітень, який включає весну, літо та осінь відповідно до календаря південної півкулі (рис. 3, б, штрихова крива). Високі ж значення $D_{bx} = 7-10\%$ у липні – серпні та травні пов'язані із зниженням точності як супутникових, так і наземних вимірювань при зенітній відстані Сонця більше 80° . Тому найбільш надійними слід вважати вимірювання на станції Академік Вернадський з вересня до квітня.

Усреднена за вересень – квітень щоденна різниця становить $2.8 \pm 4.5\%$ (сонячний зенітний кут менший за 80° , 102 щоденних значення ЗВО). Відносна сезонна стійкість різниці TOMS – Добсон у цей період може бути зумовлена тим, що супутниковий і наземний прилади при відсутності хмар вимірюють інтенсивність УФ-випромінювання у практично одному й тому ж стовпі атмосфери над поверхнею Землі, що впливає з даних рис. 1. Тому можна зробити висновок, що алгоритми визначення вмісту озону як для спектрометра TOMS, так і для спектрофотометра Добсона не вносять відчутних похибок у сезонний хід ЗВО при вимірюваннях в умовах ясного неба та при зенітних відстанях Сонця, менших за 80° .

Проте, як видно з рис. 2, в і 3, б, дані EP-TOMS систематично перевищують наземні дані. Спостереження за умов безхмарного неба з допомогою спектрофотометра Добсона забезпечують найточніші вимірювання (похибки – 1–2 % [5, 13]). Тому спостережуваний рівень різниць, найімовірніше, може пояснюватися завищенням даних TOMS, яке збереглося у 8-й версії. Воно може бути наслідком неналежного врахування альbedo поверхні, покритої снігом або льодом, чи помилкової інтерпретації його як альbedo хмар [11]. Сніговий та льодовий покрив зберігається в районі станції Академік Вернадський практично упродовж року (поверхня острова Галіндез та прилегла водна поверхня).

Найвищі додатні значення D_{bx} (в середньому 9–10 %, рис. 2, в та 3, б) спостерігаються на початку та в кінці сезону неперервних спостережень, коли зенітна відстань Сонця більша за 80° . Такі аномальні різниці можуть зумовлюватися похибками як наземних, так і супутникових приладів [3, 13].

Вимірювання в умовах суцільної хмарності. На відміну від умов ясного неба, за хмарної погоди не спостерігається аномальних відхилень середньої різниці при сонячних зенітних кутах, більших за 80° . Наприклад, у липні – серпні та травні дисперсія D_{xm} на рис. 2, г є симетричною відносно середнього рівня різниці, а середньомісячні значення на рис. 3, б близькі до сезонного середнього (-4.5%). Вплив великих зенітних відстаней Сонця проявляється тільки у відносно більшому діапазоні дисперсії та відповідно вищих значеннях стандартного відхилення.

Середньомісячні різниці для хмарного неба є від'ємними (суцільна лінія на рис. 3, б). Частково це заниження ЗВО, вимірюного TOMS над хмарами, може зумовлюватися недооцінкою супутниковим алгоритмом тропосферного озону, розташованого під верхньою межею хмарного покриву [21]. Коли середньомісячний вміст озону знижується до 200 ОД (вересень, рис. 3, в), відносний внесок тропосферного озону у ЗВО зростає. Однак велику різницю у вересні (-10% , рис. 3, б, суцільна лінія) не можна віднести на рахунок цього джерела похибок. Така різниця становить 20 ОД, що приблизно дорівнює рівню тропосферного озону в районі станції. Це мало б означати повну відсутність тропосферного озону в алгоритмі TOMS, проте його середні кліматологічні значення враховані використаними в алгоритмі вертикальними профілями озону [4]. Інструментальні похибки, пов'язані з низькою чутливістю до малих рівнів ЗВО, теж не є задовільним поясненням, оскільки вимірювання за ясної погоди (рис. 2, в і 3, б, пунктирна крива) не показують такого ефекту у вересні, коли спостерігається мінімум ЗВО (рис. 3, в).

Із загальних міркувань за хмарної погоди перевага має надаватися супутниковим вимірюванням, оскільки стратосферний озон як основна складова ЗВО розташований над шаром хмар. Супутниковий прилад безпосередньо вимірює основну частину УФ-випромінювання, розсія-

ного назад молекулами стратосферного озону. Натомість наземний інструмент екранується від стратосфери хмарами. Очевидно, значно складніше належно врахувати поглинання ультрафіолету хмарами при наземних вимірюваннях. Тому в цьому випадку одержані значення різниць можна тлумачити як завищення наземних даних у порівнянні з супутниковими.

Отже, розбіжність TOMS – Добсон, ймовірно, пов'язана переважно з похибками супутникових вимірювань при ясному небі (додатна різниця $\bar{D}_{\text{бх}}$ внаслідок завищення ЗВО_{TOMS} над ЗВО_{Добсон}) та наземних — при хмарному небі (від'ємна різниця $\bar{D}_{\text{хм}}$ внаслідок завищення ЗВО_{Добсон} над ЗВО_{TOMS}). В цілому результати порівняння свідчать про вплив на розбіжність даних як кліматичних особливостей регіону та індивідуальних характеристик спектрофотометра Добсона, так і змін, пов'язаних з удосконаленням алгоритму обробки супутникових вимірювань озону. Слід відзначити, що 8-ма версія алгоритму TOMS застосовується і при обробці даних ОМІ [2], тому результати роботи можуть сприяти з'ясуванню причин залежності результатів вимірювання від умов спостережень і зменшенню похибок як супутникових, так і наземних вимірювань. Особливої уваги заслуговують спостереження в умовах хмарності при низьких рівнях ЗВО у вересні — жовтні.

Робота виконувалася за часткової підтримки Національного антарктичного наукового центру (проект А/2-2004), Міністерства освіти і науки України (М/86-2006) та Київського національного університету імені Тараса Шевченка (01БФ051-14, 06БФ051-12).

1. Міліневський Г. П., Леонов М. А., Грицай З. І. та ін. Вимірювання озону на антарктичній станції Академік Вернадський у 1996—2000 роках // Вісник Київ. ун-ту. Астрономія.—2002.—№ 38.—С. 63—69.
2. Balis D., Kroon M., Koukouli M. E., et al. Validation of Ozone Monitoring Instrument total ozone column measurements using Brewer and Dobson spectrophotometer ground-based observations // *J. Geophys. Res.*—2007.—112, N D24.—D24S46, doi:10.1029/2007JD008796.
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., Wellemeyer C. W. TOMS V8 Algorithm theoretical basis document.—2004.—http://toms.gsfc.nasa.gov/version8/v8toms_atbd.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 // *Atm. Chem. Phys.*—2003.—3, N 5.—P. 1409—1419.
6. Brogniez C., Houet M., Siani A. M., et al. Ozone column retrieval from solar UV measurements at ground level: effects of clouds and results from six European sites // *J. Geophys. Res.*—2005.—110, N D24.—D24202, doi: 10.1029/2005JD005992.
7. Gritsai Z. I., Evtushevsky A. M., Leonov N. A., Milinevsky G. P. Comparison of ground-based and TOMS-EP total ozone data for Antarctica and northern midlatitude stations (1996—1999) // *Phys. Chem. Earth (B)*.—2000.—25, N 5-6.—P. 459—461.
8. Grytsai A. V., Evtushevsky O. M., Agapitov O. V., et al. Structure and long-term change in the zonal asymmetry in Antarctic total ozone during spring // *Ann. Geophys.*—2007.—25, N 2.—P. 361—374.
9. Jaross G., Taylor S. L., Wellemeyer C. G., et al. An assessment of long-term uncertainties using Total Ozone Mapping Spectrometers (TOMS) // *Int. J. Rem. Sens.*—2003.—24, N 2.—P. 329—338.
10. Kulinich B. V., Evtushevsky A. M., Leonov N. A., Milinevsky G. P. Seasonal change of difference between the ground-based and EP-TOMS satellite ozone measurements // *Укр. антарктичний журн.*—2005.—№ 3.—С. 5—9.
11. Kylling A., Dahlback A., Mayer B. The effect of clouds and surface albedo on UV irradiances at a high latitude site // *Geophys. Res. Lett.*—2000.—27, N 9.—P. 1411—1414.
12. Labow G. J., McPeters R. D., Bhartia P. K. A comparison of TOMS and SBUV version 8 total column ozone data with data from groundstations // *Proc. Quadr. Ozone Symp.*, 1—8 June 2004, Kos, Greece / Ed. by C. Zerefos. — Athens, Greece, 2004.—1.—P. 123—124.
13. Lambert J.-C., Van Roozendaal M., Simon P. C., et al. Combined characterization of GOME and TOMS total ozone measurements from space using ground-based observations from the NDSC // *Adv. Space Res.*—2000.—26, N 12.—P. 1931—1940.
14. McPeters R. D., Bhartia P. K., Krueger A. J., et al. Earth Probe Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) Data Products User's Guide // NASA Technical Publication 1998—206895.—Greenbelt, Maryland: Goddard Space Flight Center, 1998.—70 p.
15. 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, N 25.—P. 3695—3698.
16. Piacentini R. D., Crino E., Flores J. S., Ginzburg M. Intercomparison between ground based and TOMS/EP satellite southern hemisphere ozone data. New results // *Adv. Space Res.*—2002.—29, N 11.—P. 1643—1648.
17. Schoeberl M. R., Krueger A. J., Newman P. A. The morphology of Antarctic total ozone as seen by TOMS // *Geophys. Res. Lett.*—1986.—13, N 12.—P. 1217—1220.
18. Scientific assessment of ozone depletion: 1998. — Geneva: World Meteorological Organization, 1999.—Report N 44.
19. Stolarski R. S., McPeters R. D., Newman P. A. The ozone hole of 2002 as measured by TOMS // *J. Atm. Sci.*—2005.—62, N 3.—P. 716—720.

20. Vanicek K. Differences between ground Dobson, Brewer and satellite TOMS-8, GOME-WFDOAS total ozone observations at Hradec Kralove, Czech // *Atm. Chem. Phys.*—2006.—6, N 12.—P. 5163—5171.
21. Varotsos C. A. On the correction of the total ozone content over Athens, Greece as deduced from satellite observations // *Int. J. Rem. Sens.*—1995.—16, N 10.—P. 1771—1776.

**COMPARISON OF GROUND-BASED AND SATELLITE
TOTAL OZONE MEASUREMENTS OVER
THE ANTARCTIC STATION
AKADEMIK VERNADSKY (1996—2005)**

*O. M. Evtushevsky, A. V. Grytsai, G. P. Milinevsky,
V. O. Kravchenko, Z. I. Grytsai*

The influence of observation conditions (cloudiness, solar zenith angle, total ozone content (TOC) values) on the data disagreement is analyzed through the comparison of ground-based

and satellite TOC measurements over the Antarctic station Akademik Vernadsky. After transition from 7th to 8th Version of satellite algorithm in 2004, the agreement between the Dobson spectrophotometer and EP-TOMS spectrometer measurement results did not change essentially. A mean positive difference of 1.8 % in 7th was replaced by a negative one of -2 % in 8th Version. Mean difference values for cloudless (4.1 %, 137 days) and cloudy (-4.5 %, 1048 days) sky are evidences of the dependence of the satellite and ground-based daily TOC values discrepancy on the cloudiness presence. This dependence remains unchanged in comparison results for both Versions of the TOMS data: mean TOMS - Dobson differences under the observation conditions of clear and cloudy sky are distinguished by almost 9 %. The TOMS - Dobson difference dependence on the observation conditions can point to some overestimation of the ground-based data by the satellite ones under the clear sky and the reverse relationship under the cloudy sky. The largest data disagreement is revealed in the ozone hole period (September — October) for the observations under the cloudy sky conditions. Our results allow one to improve the TOC observation accuracy with regard to the atmosphere state.