

УДК 551.510

ЗІСТАВЛЕННЯ НАЗЕМНИХ ТА СУПУТНИКОВИХ ВИМІРЮВАНЬ ЗАГАЛЬНОГО ВМІСТУ ОЗОНУ НАД АНТАРКТИЧНИМИ СТАНЦІЯМИ

В.О. Кравченко

*Київський національний університет імені Тараса Шевченка
Київ, проспект Академіка Глушкова, 2, корпус 1, 03022, vok@univ.kiev.ua*

Реферат. Проведено порівняння наземних та супутникових вимірювань загального вмісту озону (ЗВО) в атмосфері над антарктичними станціями Академік Вернадський, Ротера, Галлі та Амундсен-Скотт. Такий аналіз розбіжності даних здійснюється за допомогою глобальної мережі наземних озонотричних станцій з початку регулярних супутникових спостережень (1978 р.). В останнє десятиріччя зафіксовано уповільнення багаторічних глобальних втрат озону і прогнозується відновлення озонового шару в наступні десятиріччя. Тому підвищуються вимоги до точності реєстрації змін ЗВО, що у свою чергу потребує відповідного аналізу похибок вимірювань. У роботі використано дані супутникового спектрометра EP-TOMS за 1996–2005 роки. Щоденні супутникові значення ЗВО взято за останньою, восьмою версією алгоритму, введеною 2004 року та емпірично скоригованою 2007-го. Проаналізовано вплив сезонних змін ЗВО над антарктичним регіоном на розбіжність між наземними та супутниковими вимірюваннями. Найбільш стійкими особливостями є: 1) значне зростання дисперсії відносної різниці «супутник–станція» в період весняного зниження ЗВО і формування озонової діри та 2) залежність різниці від рівня ЗВО.

Сопоставление наземных и спутниковых измерений общего содержания озона над антарктическими станциями. В.А. Кравченко

Реферат. Проведено сравнение наземных и спутниковых измерений общего содержания озона (ОСО) в атмосфере над антарктическими станциями Академик Вернадский, Ротера, Халли и Амундсен-Скотт. Такой анализ расхождения данных осуществляется при помощи глобальной сети наземных озонотрических станций с начала регулярных спутниковых наблюдений (1978 г.). В последнее десятилетие фиксируется замедление многолетних глобальных потерь озона и прогнозируется возобновление озонового слоя в последующие десятилетия. Поэтому повышаются требования к точности регистрации изменений ОСО, что в свою очередь требует соответствующего анализа погрешностей измерений. В работе использованы данные спутникового спектрометра EP-TOMS за 1996–2005 гг. Ежедневные спутниковые значения ОСО взяты по последней, восьмой версии алгоритма, введенной в 2004 г. и эмпирически скорректированной в 2007 г. Проанализировано влияние сезонных изменений ОСО над антарктическим регионом на расхождение наземных и спутниковых измерений. Наиболее стойкими особенностями являются: 1) значительное возрастание дисперсии относительной разности «спутник–станция» в период весеннего снижения ОСО и формирования озоновой дыры и 2) зависимость разности от уровня ОСО.

Comparison of the ground-based and satellite total ozone measurements over the Antarctic stations.
V.O. Kravchenko

Abstract. Comparison of the ground-based and satellite total ozone content (TOC) measurements in the atmosphere over the Antarctic stations Akademik Vernadsky, Rothera, Halley and Amundsen-Scott has been carried out. Similar discrepancy analysis is made using global network of the ground-based ozonometric stations from the beginning of the regular satellite observations (1978). Slowing of the long-term global ozone losses has observed during last decade and recovering of the ozone layer is forecasted for the next decades. Therefore, the accuracy requirements to the ozone change registration are increased, that, in turn, requires corresponding analysis of the measurement errors. In this work, the EP-TOMS satellite data of 1996-2005 are used. Satellite daily TOC values are taken by the last 8th Version of the algorithm introduced in 2004

and empirically corrected in 2007. Influence of the seasonal TOC changes over Antarctic region on the difference between ground-based and satellite measurements is analyzed. The most persistent features are: 1) significant increase of the dispersion of the relative “satellite – station” difference in the period of the spring TOC decrease and ozone hole formation and 2) difference dependence on the TOC level.

Key words: Antarctica, total ozone content, satellite and ground-based measurements

1. Вступ

Супутникові вимірювання вмісту озону, які тривають з 1970-х років, забезпечують дані про його глобальний розподіл, просторово-часові варіації та багаторічні зміни (Varotsos, 1995; Levelt et al., 1996; Eskes, 2004). Найбільш продуктивні програми супутникових досліджень загального вмісту озону (ЗВО) в атмосфері Землі здійснюються із спектрометрами TOMS (з 1978 р.), GOME (з 1995 р.), SCIAMACHY (з 2002 р.) та OMI (з 2005 р.). До цих спектрометрів найбільше уваги приділяється і з точки зору точності вимірювань. Тому регулярно проводяться порівняння супутникових даних з даними наземної мережі озонотричних інструментів (McPeters and Labow, 1996; Gritsai et al., 2000; Bramstedt et al., 2003; Kulinich et al., 2005; Balis et al., 2007; Ionov et al., 2008).

Переваги даних вимірювань озону спектрометрами серії TOMS полягають не лише в тривалості спостережень (майже три десятиріччя), а й у порівняно високій роздільній здатності (1° по широті та $1,25^\circ$ по довготі) при щоденному формуванні глобального розподілу ЗВО (McPeters et al., 1998). В останнє десятиріччя спостерігається уповільнення багаторічних глобальних втрат озону й надалі прогнозується поступове відновлення озонового шару (WMO, 2007). Тому підвищуються вимоги до надійності визначення змін ЗВО, а отже й до точності вимірювань. Спектрометри TOMS при використанні ранніх версій алгоритму опрацювання спостережень (до 7-ї) давали завищені значення ЗВО для Південної півкулі, особливо у високих широтах (Lambert et al., 2000), і з 2004 р. було запроваджено нову, восьму версію алгоритму, яка значно покращила узгодженість із наземними даними (Labow et al., 2004).

У 2007 р. здійснено ще одне коригування даних, яке стосувалося періоду, коли працював спектрометр EP-TOMS (1996–2005 рр.). Це було зроблено, спираючись на супутникові спостереження двома іншими приладами, NOAA-16 та SBUV/2, з метою виправлення виявлених інструментальних похибок (McPeters et al., 2007). Виправлені дані було введено з 4 вересня 2007 р., і попереднє порівняння показало їх узгодженість із глобальною наземною мережею в середньому за десятиріччя на рівні $\pm 1\%$ (McPeters et al., 2007). Нижче в розділі 3 проведено порівняння саме цих скоригованих даних з наземними вимірюваннями в антарктичному регіоні. Тут умови озонових спостережень складні загалом для всіх типів інструментів: велика зенітна відстань Сонця, низькі температури при наявності снігового та хмарного покриву, а також значні сезонні варіації стратосферного озону. Це призводить до труднощів з належним урахуванням факторів, які впливають на розсіяне молекулами озону сонячне випромінювання на шляху до реєструючого пристрою. Крім того, вказані фактори дають різний внесок у супутникові та наземні методики визначення загального вмісту озону у вертикальному стовпі атмосфери. Основна маса молекул озону у стовпі зосереджена в озоновому шарі, тобто в стратосфері. Тому, наприклад, у випадку супутникових спостережень при відсутності хмар на розсіяне стратосферним озоном сонячного випромінювання накладається відбиття від підстилюючої поверхні, яке складно врахувати (Kylling et al., 2000). При наземних спостереженнях існують проблеми, пов'язані з розсіянням та поглинанням радіації шаром хмар (Brogniez et al., 2005) та з урахуванням повітряної маси при малій висоті Сонця над горизонтом (Bernhard et al., 2005).

Оскільки глобальні зміни озонового шару значною мірою визначаються весняними втратами антарктичного озону, основна увага в роботі приділяється аналізу розбіжності між

наземними і супутниковими даними в період озонової діри. Проведено порівняння скоригованих даних EP-TOMS за 1996–2005 рр. з вимірюваннями на чотирьох антарктичних станціях.

2. Використані дані та методика аналізу

Супутникові вимірювання спектрометром EP-TOMS за 1996–2005 рр. використано з архіву даних НАСА, розміщеного за адресою http://toms.gsfc.nasa.gov/eptoms/ep_ovplist_a.html. Це ряди даних, сформовані для кожної з наземних озонотричних станцій. Вибрано чотири антарктичні станції (див. табл. 1), географічне розташування яких показано на рис. 1. Серед них українська станція Академік Вернадський, дві британські – Ротера і Галлі та станція США Амундсен-Скотт на Південному полюсі. На трьох станціях встановлено спектрофотометри Добсона, які вимірюють ЗВО в ультрафіолетовій області спектра. На станції Ротера протягом проаналізованого періоду працював спектрометр системи SAOZ, який вимірює ЗВО у видимій області спектра.

Номери станцій в табл. 1 наведено за переліком Міжнародного центру озонових даних WOUDC у Торонто, Канада (http://www.woudc.org/data/Metadata/platform_e.html), крім Ротери, номер якої вказано за списком в архіві супутникових даних EP-TOMS. Ряди наземних спостережень для станцій Академік Вернадський, Ротера та Галлі одержано з бази даних Британської антарктичної служби (<http://www.antarctica.ac.uk/met/jds/ozone>), а для станції Амундсен-Скотт – з сайту NOAA (<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ozwv/dobson>). Усі значення ЗВО наводяться в одиницях Добсона (ОД).

Оскільки середня площа озонової діри в останнє десятиріччя протягом вересня-жовтня перевищує площу Антарктичного континенту (WMO, 2007), розташування двох вибраних станцій (Академік Вернадський та Ротера), як можна оцінити за рис. 1, припадає на крайову область діри, однієї – на внутрішню її область, але ближче до краю (Галлі), і однієї – на центральну область діри з найбільшим весняним зниженням ЗВО. Таке широтне рознесення дозволяє порівнювати також залежність різниці «супутник-станція» від широти та рівня ЗВО. Станції Академік Вернадський і Ротера розташовані на близькій відстані, але інструменти та методики вимірювань різні, тому результати порівняння можуть бути корисними для виявлення систематичних похибок не лише супутникових, але й наземних вимірювань.

Таблиця 1. Географічні координати станцій та встановлені на них озонотричні прилади

№ станції	Інструмент	Назва станції (країна)	Широта	Довгота
232	Добсон	Академік Вернадський (Україна)	65°15'S	64°16'W
709	SAOZ	Ротера (Велика Британія)	67°34'S	68°07'W
057	Добсон	Галлі (Велика Британія)	75°31'S	26°40'W
111	Добсон	Амундсен-Скотт (США)	89°58'S	24°47'W

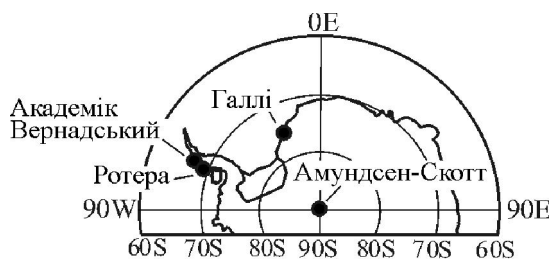


Рис. 1. Географічне розташування антарктичних станцій, вибраних для порівняння наземних і супутникових (EP-TOMS) вимірювань вмісту озону у 1996–2005 рр.

У роботі визначалася відносна різниця між щоденними значеннями ЗВО за супутниковими ($ZVO_{\text{ТОМС}}$) та наземними ($ZVO_{\text{станція}}$) вимірюваннями: $\Delta ZVO = (ZVO_{\text{ТОМС}} - ZVO_{\text{станція}}) \times 100 / ZVO_{\text{станція}}$, %, як і в цитованих вище (див. розділ 1) аналогічних дослідженнях. Здійснювався аналіз сезонної зміни різниці ΔZVO та її залежності від самого рівня ЗВО. Внаслідок виникнення особливих умов спостережень у період озонової діри – різке зниження вмісту озону та значні його варіації у крайовій області діри – цей період проаналізовано окремо. Застосовано два критерії для виокремлення даних: часовий – з липня до середини грудня, згідно з максимальною тривалістю озонової діри, та за рівнем ЗВО, який для ідентифікації явища озонової діри визначено нижчим 220 ОД (WMO, 2007). Обчислено статистичні характеристики різниці ΔZVO між супутниковими та наземними вимірюваннями – середні значення, середньоквадратичні відхилення ($\pm\sigma$) та тренди для залежності різниці від ЗВО (в % на 100 ОД, а для оцінки значимості трендів вказано їх похибки на рівні $\pm 2\sigma$).

3. Результати порівняння

На рис. 2 показано варіації щоденних значень ЗВО за супутниковими вимірюваннями (ліворуч) та відносних різниць між супутниковими й наземними вимірюваннями (ΔZVO , праворуч) для чотирьох станцій. У сезонному ході ЗВО для всіх станцій видно значне весняне зниження, викликане хімічним руйнуванням озону. Мінімум ЗВО спостерігається в кінці вересня – на початку жовтня (поблизу 100-го дня на горизонтальній шкалі) на рівні 100–150 ОД. Вимірювання озону у високих широтах в кінці зимового періоду розпочинаються при висоті Сонця над горизонтом більше $\sim 10^\circ$. Такі умови створюються пізніше на станціях, розташованих ближче до полюса. Це видно із зміщення початку неперервних вимірювань на пізніші дати при зміщенні по широті в бік полюса (вниз на рис. 2).

Можна також відзначити, що низькі рівні ЗВО під час існування озонової діри реєструються з кінця зими та протягом усієї весни (серпень–листопад) до 150–170-го дня на рис. 2 (ліворуч), тобто до першої половини грудня. При порівнянні цих графіків із розподілом значень ΔZVO (праворуч на рис. 2) видно, що найбільша дисперсія різниць припадає саме на період озонової діри, коли діапазон дисперсії розширюється до $\pm 20\%$ і більше. Це приблизно вдвічі перевищує діапазон дисперсії в наступний літній період. Крім того, якщо сезонному ходу ЗВО для всіх станцій властиві спільні риси, то ΔZVO для кожної станції має індивідуальний хід упродовж сезону спостережень. В даній роботі ці сезонні відмінності не аналізуються, а основна увага приділена періоду озонової діри. Оскільки зростання розбіжності між супутниковими та наземними даними вказує на вплив низьких рівнів озону, було розглянуто залежність різниці ΔZVO від ЗВО як найбільш збуреного в цей період параметра.

На рис. 3 показано співвідношення « $\Delta ZVO - ZVO$ », побудовані окремо для наземних та супутникових рядів значень ЗВО. Як і на рис. 2, дані охоплюють період 1996–2005 рр. Кругами показано масив різниць для періоду озонової діри, який виокремлено за критеріями, вказаними вище, в розділі 2, і застосованими до наземних і супутникових даних (рис. 3, ліворуч і праворуч, відповідно). Для періоду озонової діри розраховано лінійне наближення залежності « $\Delta ZVO - ZVO$ », для якого нижче вживається термін «тренд». Тренд нанесено жирною лінією на рис. 3. Одержані значення тренду наведено в табл. 2 з похибкою тренду на рівні $\pm 2\sigma$. Видно відмінність у розподілі різниці при зіставленні її з наземними та супутниковими результатами спостережень. Існує стійка тенденція: у першому випадку – низхідний тренд різниці для всіх станцій, у другому випадку (за винятком станції Ротера) – відсутній помітний тренд. Відсутня також будь-яка залежність в інтервалі нормальних рівнів ЗВО (>220 ОД, точки на рис. 3); спостерігаються лише варіації навколо нульового значення різниці, за винятком, знову ж таки, станції Ротера у випадку зіставлення ΔZVO з супутниковими значеннями ЗВО (праворуч).

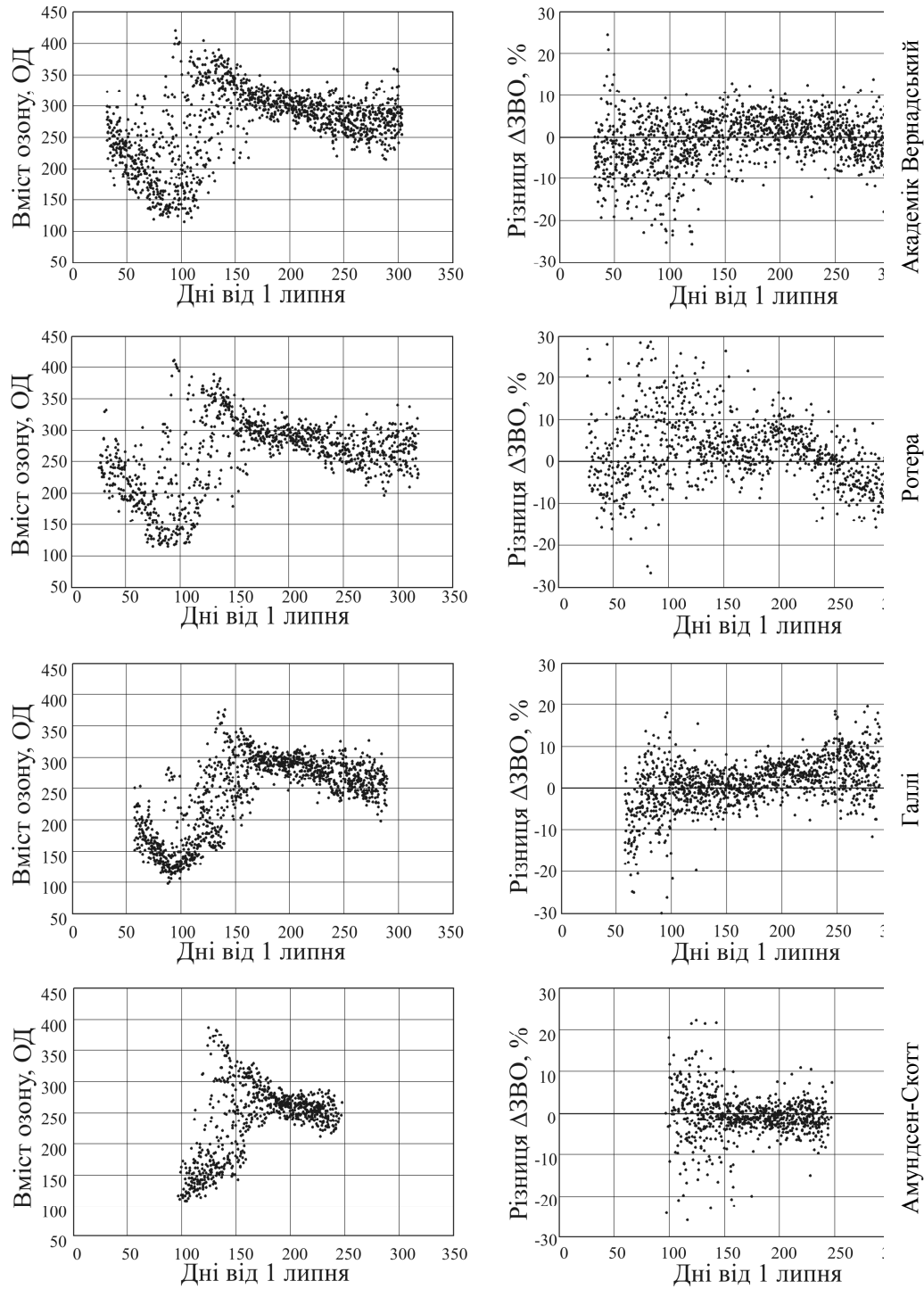


Рис. 2. Варіації щоденних значень ЗВО протягом липня–травня (супутникові дані, ліворуч) та відносної різниці ΔЗВО між супутниковими й наземними вимірюваннями (праворуч), 1996–2005 рр.

Можна зробити висновок, що тренд « Δ ЗВО – ЗВО» в умовах озонової діри є статистично значимим і варіює в межах від -6,6 до -13,0% на 100 ОД при розгляді наземних вимірювань. Аналогічний розгляд супутникових спостережень показує статистично значимий тренд -11,6 % на 100 ОД тільки для станції Ротера. Близький результат для цієї станції (-13,0 % на 100 ОД) одержано і у випадку наземних спостережень. Тому ця узгодженість оцінок може характеризувати похибки наземного інструмента SAOZ (сутінкові спостереження у видимій області спектра). На це вказують і середні значення Δ ЗВО для станції Ротера в табл. 2. Вони за абсолютним значенням у кілька разів більші, ніж для інших станцій. Це означає помітне систематичне заниження наземних даних у порівнянні з супутниковими в умовах озонової діри. Середньоквадратичні відхилення середньої різниці у табл. 2 також найвищі для цієї станції.

Результати для інших станцій можуть вказувати на більший вплив наземних вимірювань на формування від'ємного тренду « Δ ЗВО – ЗВО» (рис. 3, ліворуч) у порівнянні з супутниковими вимірюваннями (рис. 3, праворуч; див. також табл. 2). Порівняння супутникових та наземних вимірювань ЗВО у Північній півкулі, здійснене для 7-ї версії супутникового алгоритму, показало протилежну залежність – зростання різниці на 1–2% при зростанні ЗВО на 100 ОД (McPeters et al., 1996). З іншого боку, про від'ємний тренд різниці в Антарктиці свідчать дані роботи (Lambert et al., 2000). Отже, дані рис. 3 і табл. 2 показують, що й після поліпшення супутникового алгоритму розрахунку ЗВО у 2004 і 2007 рр. вимірювання озону над Антарктикою демонструють низьку узгодженість з наземними вимірюваннями в умовах низьких рівнів ЗВО.

Таблиця 2. Середні характеристики розподілу значень Δ ЗВО в залежності від значень ЗВО, одержаних в умовах озонової діри (<220 ОД) за наземними та супутниковими вимірюваннями

Станція	Співвідношення Δ ЗВО – ЗВО _{станція}			Співвідношення Δ ЗВО – ЗВО _{ТОМС}		
	Тренд, % на 100 ОД	Середня різниця, %	N, дні	Тренд, % на 100 ОД	Середня різниця, %	N, дні
Вернадський	-6.6±3.6	-1.9±7.6	233	-1.2±5.8	-3.8±8.5	265
Ротера	-13.0±3.6	7.6±10.0	213	-11.6±4.6	5.4±10.7	213
Галлі	-6.8±2.2	-1.1±6.7	379	-1.6±1.8	-1.7±7.0	387
Амундсен-Скотт	-9.6±3.8	1.2±8.0	202	-2.6±5.0	0.2±8.8	203

Представлені на рис. 2 і рис. 3 результати вказують на часові межі, коли зростає розбіжність між наземними й супутниковими озоновими даними в антарктичному регіоні. Це період низьких рівнів ЗВО у серпні–листопаді. На даному матеріалі неможливо зробити висновки про залежність тренду від широти станції чи її висоти над рівнем моря (станція Амундсен-Скотт розташована на льодовому плато на висоті 2835 м, а інші станції – практично на рівні моря: 10–32 м). Результати роботи не дозволяють також чітко виділити внесок супутникового та наземного інструментів у від'ємний тренд залежності « Δ ЗВО – ЗВО». Проте, з урахуванням даних рис. 3 і табл. 2, є підстави припустити, що одержані значення тренду в умовах озонової діри пов'язані з індивідуальними характеристиками наземних приладів. Тому, враховуючи відзначене розширення діапазону дисперсії різниць у період озонової діри, варто продовжити пошук причин зростання розбіжності між наземними та супутниковими даними саме в цей період.

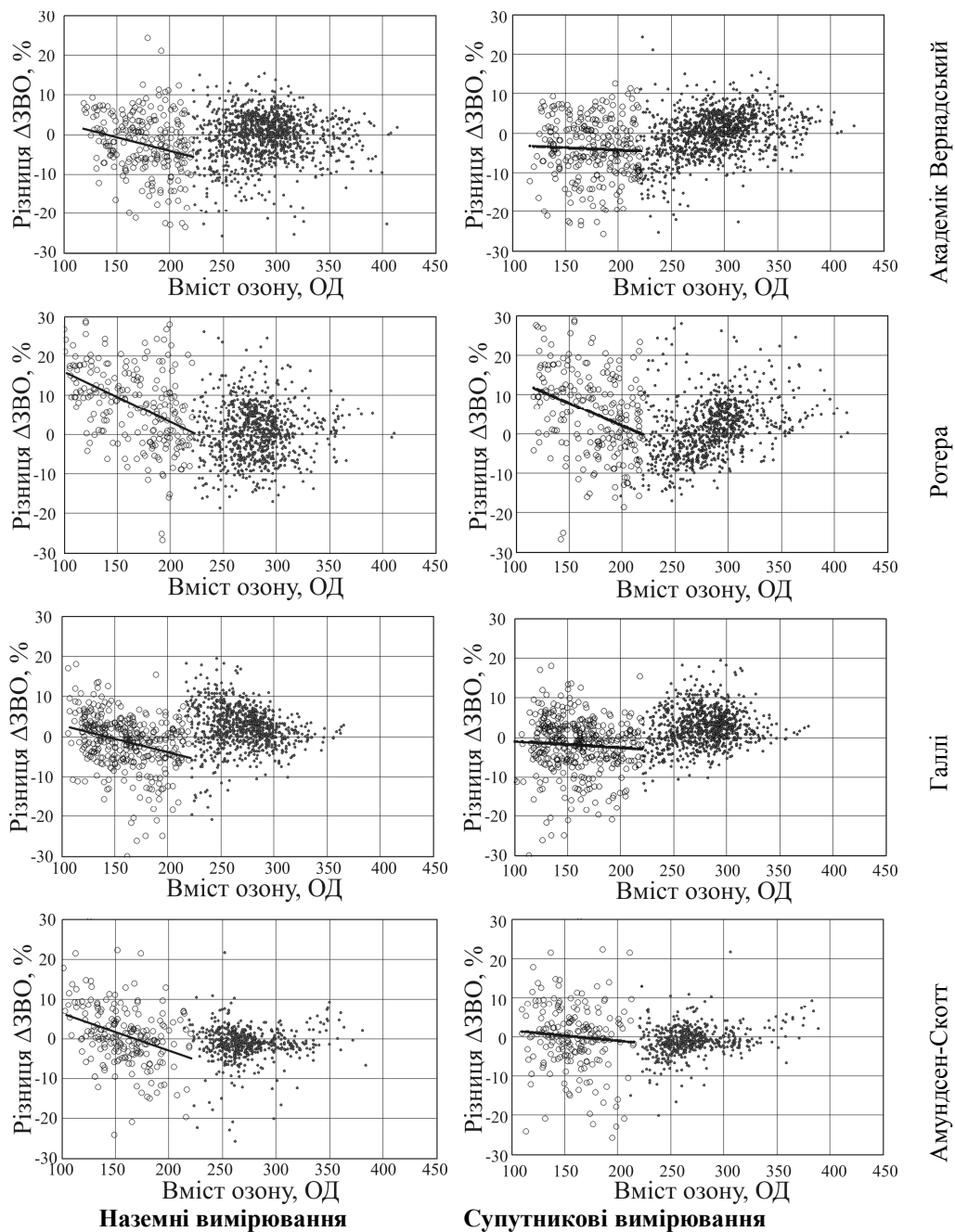


Рис. 3. Залежність відносної різниці Δ ЗВО від рівня ЗВО, одержаного за наземними (ліворуч) та супутниковими (праворуч) вимірюваннями. Кругками позначено спостереження в період озонної діри, точками – після її розпаду.

4. Висновки

З аналізу відносної різниці між супутниковими та наземними даними вимірювань загального вмісту озону в атмосфері над чотирма антарктичними станціями виявлено значне

зростання її дисперсії (до $\pm 20\%$ і більше) в період утворення озонової діри (серпень–листопад). В цей же період дані для всіх станцій свідчать про стійку й статистично значущу залежність різниці від рівня ЗВО, визначеного при наземних спостереженнях. Від'ємний тренд у межах від $-6,6$ до $-13,0\%$ на 100 ОД суттєво відрізняється від даних для північної півкулі ($1\text{--}2\%$ на 100 ОД). Одержані результати, вказуючи на умови виникнення найбільшої розбіжності даних, можуть бути корисними для встановлення джерел значних похибок вимірювань та їх усунення.

Дослідження проведено в рамках науково-дослідної роботи 06БФ051-12 Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Література

Balis D., Kroon M., Koukoulis 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. – Vol. 112, No. D24. – D24S46, doi:10.1029/2007JD008796.

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. – Vol. 110, No. D10. – D10305, doi:10.1029/2004JD005559.

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. – Vol. 3, No. 5. – P. 1409–1419.

Brogniez C., Houët 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. – Vol. 110, No. D24. – D24202, doi:10.1029/2005JD005992.

Eskes H. Stratospheric ozone: satellite observations, data assimilation and forecasts // *Proceedings ECMWF.* – 2004. – P. 341–360.

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. – Vol. 25, No. 5-6. – P. 459–461.

Ionov D.V., Goutail F., Pazmino A., Pommereau J.-P. Validation of satellite total ozone and NO₂ data with ground-based SAOZ network // *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 10, EGU2008-A-01547, 2008.

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. – Vol. 27, No. 9. – P. 1411–1414.

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 // *Український антарктичний журнал.* – 2005. – № 3. – С. 5–9.

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.: C. Zerefos). – Athens, Greece. – 2004. – Vol. 1. – P. 123–124.

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. – Vol. 26, No. 12. – P. 1931–1940.

Levelt P.F., F. Allaart, M.A., Kelder H.M. On the assimilation of total-ozone satellite data // *Ann. Geophysicae.* – 1996. – Vol. 14, No. 11. – P. 1111–1118.

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.

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. – Vol. 23, No. 25. – P. 3695–3698.

McPeters R., Taylor S., Jaross G. et al. Empirically corrected TOMS Earth Probe dataset. – <http://toms.gsfc.nasa.gov>. – December 20, 2007. – 13 p.

Varotsos C.A. On the correction of the total ozone content over Athens, Greece as deduced from satellite observations // *Int. J. Rem. Sens.* – 1995. – Vol. 16, No. 10. – P. 1771–1776.

WMO (World Meteorological Organization), Scientific assessment of ozone depletion: 2006 / Global Ozone Research and Monitoring Project. Report No. 50. – Geneva (Switzerland), 2007. – 572 p.