

УДК 551.510.534

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

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

РОЗПОДІЛ ОЗОНУ В АНТАРКТИЦІ ЗА ДАНИМИ 30-ЛІТНІХ СУПУТНИКОВИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

Досліджено особливості розподілу озону над Антарктикою та його варіації протягом 30-літнього інтервалу (1979–2008 рр.) систематичних спостережень із допомогою супутникових спектрометрів TOMS та OMI. Проаналізовано зміни параметрів озонної діри, досліджено багаторічні варіації характеристик квазістаціонарних планетарних хвиль в атмосфері над Антарктикою. За результатами аналізу трендів характеристик озонної діри зроблено висновок про припинення як спаду рівнів озону, так і зростання площі озонної діри з другої половини 1990-х років. Показано, що квазістаціонарні хвилі зумовлюють: 1) стійку зональну асиметрію розподілу озону зі зміщенням озонної діри відносно південного полюса у бік атлантичного довготного сектора та 2) систематичний зсув на схід області низьких рівнів озону, який є статистично достовірним у діапазоні широт 50–80 °S і за останні 30 років досяг 50° по довготі. Натомість багаторічна зміна положення максимуму виявилася несуттєвою. Збереження систематичного зсуву на схід мінімуму квазістаціонарної хвилі упродовж трьох десятиріч свідчить про існування динамічного чинника, який змінює асиметрію озонної діри незалежно від тенденцій у рівнях озону.

ВСТУП

Розподіл озону у помірних та високих широтах південної півкулі зазнає суттєвих змін як протягом року, так і від сезону до сезону. Найбільш відчутні варіації розподілу озону відбуваються навесні, у вересні — листопаді [10, 24]. Із початку 1980-х років спостерігається озонна діра — значне весняне зниження загального вмісту озону (ЗВО) у стовпі атмосфери в навколополярній області [6]. Дане явище обумовлене хімічними реакціями на висотах стратосферного максимуму у вертикальному розподілі озону [14]. Що стосується сезонних змін у розподілі ЗВО, то протягом більшої частини року суттєві просторові неоднорідності не спостерігаються, ситуація змінюється тільки у серпні — вересні.

Розвиток озонної діри обумовлений, серед іншого, особливостями стратосферної циркуляції над Антарктикою. Взимку тут формується полярний вихор, який ізолює полярні повітряні маси від середньоширотних, сприяючи більшому, ніж в Арктиці, зниженню температури та за-

важаючи меридіональному змішуванню і поповненню запасів озону, що руйнується навесні [20]. Тривалість існування вихору визначає і терміни зниження ЗВО [17, 19]. Так, незвичайний характер циркуляції у 2002 р. призвів до розділення й ослаблення озонної діри уже в кінці вересня [2], скоротивши на два місяці типовий час її розвитку. Водночас довготривалі тренди вмісту озону та площі діри залежать від концентрацій речовин, у реакціях із якими руйнуються молекули озону.

Полярний вихор не є симетричним, перебуваючи під впливом великомасштабних планетарних хвиль (ПХ). Максимум їхньої активності у південній півкулі спостерігається навесні, передуючи руйнуванню вихору [11]. Вплив ПХ призводить до меридіональних зміщень у крайовій області вихору, внаслідок чого у зональному напрямку (вздовж паралелі) тут спостерігаються суттєві варіації атмосферних параметрів. Найбільші амплітуди в антарктичному регіоні мають квазістаціонарна хвиля (КСХ) із зональним числом (відношення довжини паралелі до довжини хвилі) $m = 1$ та біжуча хвиля з $m = 2$ [15]. Зручним індикатором існування ПХ у нижній стратосфері постає загальний вміст озону, оскільки озон має в цій області чіткий висотний максимум, а

перепад його концентрацій у меридіональному напрямку є досить значним [16, 18]. Відповідно при картографуванні зонального розподілу ЗВО планетарні хвилі є добре помітними, відношення їхніх амплітуд до зонального середнього досягає 0.3–0.4 навіть при усередненні за місяць [9]. Переважний вплив квазістаціонарної хвилі з $m = 1$ зумовлює стійке меридіональне зміщення озонної діри відносно полюса в напрямі атлантичного сектора довгот [10]. Метою цієї роботи є продовження аналізу характеристик планетарних хвиль над антарктичним регіоном як одного з основних факторів зональної неоднорідності розподілу озону навесні та їхнього узагальнення за період супутникових спостережень (1979–2008 рр.). Узгодженість асиметрії озонної діри та стратосферного полярного вихору відносно полюса демонструє рис. 1. Діра розташовується всередині області з максимальною швидкістю зонального вітру 50–55 м/с.

Зауважимо, що загальний вміст озону традиційно вимірюється в одиницях Добсона (ОД). Одиниця Добсона відповідає шару речовини товщиною 0.01 мм за нормальних умов. Звичайно ЗВО ≈ 300 ОД, але при весняному зниженні над Антарктикою досягаються значення близько 100 ОД [21]. Границею озонної діри вважається значення 220 ОД — рівень, на який у середньому припадає різкий градієнт ЗВО та який не спостерігався у цьому регіоні до початку 1980-х років [19] (різні критерії оцінки площі території з аномально низьким вмістом озону аналізуються у роботі [4]).

Вимірювання ЗВО проводяться з допомогою наземних (спектрофотометри Добсона, Брюера, озонметри М-124 та ін.) і супутникових засобів [7]. Перевага супутникових інструментів полягає у можливості регулярних спостережень майже над усією поверхнею Землі, зокрема й над областями, де систематичні наземні вимірювання неможливі (океани, незаселені території). Використовуються головним чином вимірювання інтенсивності розсіяного випромінювання в ближньому ультрафіолетовому діапазоні ($\lambda > 300$ нм) [3]. Основний масив інформації був отриманий із допомогою приладів Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS), зараз спостереження ви-

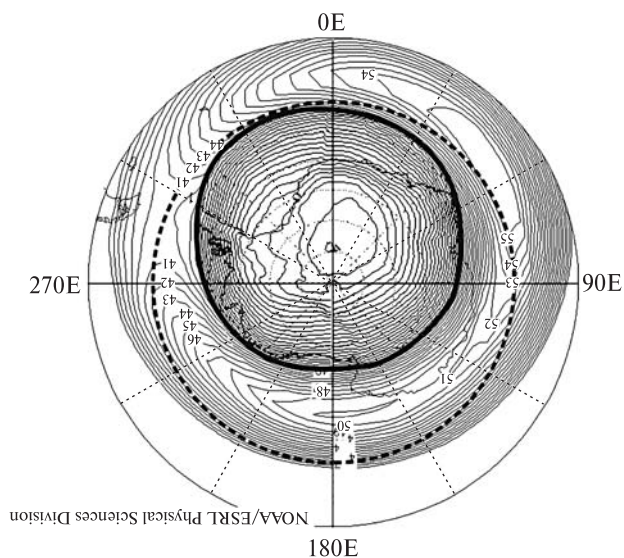


Рис. 1. Асиметрія розподілу озону та швидкості зонального вітру відносно полюса. Жирною лінією обмежено область озонної діри з контурами ЗВО < 220 ОД. Зовні від жирної лінії наведено контури швидкості зонального вітру на рівні тиску 50 гПа для жовтня 2008 р. в інтервалі 35–55 м/с. Пунктирним колом виділено паралель 60° S

конце Ozone Monitoring Instrument (OMI) на супутнику «Aura». У 2008 р. завершився 30-річний період визначення вмісту озону супутниковими спектрометрами TOMS/OMI, що дозволяє проаналізувати зміни ЗВО над Антарктикою за цей час та зробити висновки про основні кліматологічні закономірності розподілу ЗВО, зумовлені, зокрема, впливом квазістаціонарних планетарних хвиль.

ДАНИ ТА МЕТОДИ

У цій статті використано вимірювання Nimbus-7 TOMS (1979–1992 рр.), Earth Probe TOMS (1996–2005 рр.) та OMI (2006–2008 рр.), які покривають переважну частину періоду систематичних супутникових спостережень (1979–2008 рр.). Результати спостережень TOMS і OMI містяться на сайті <http://toms.gsfc.nasa.gov>. Для трьох років (1993–1995 рр.) застосовані дані реаналізу KNMI (Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, <http://www.temis.nl>). З огляду на наявність знач-

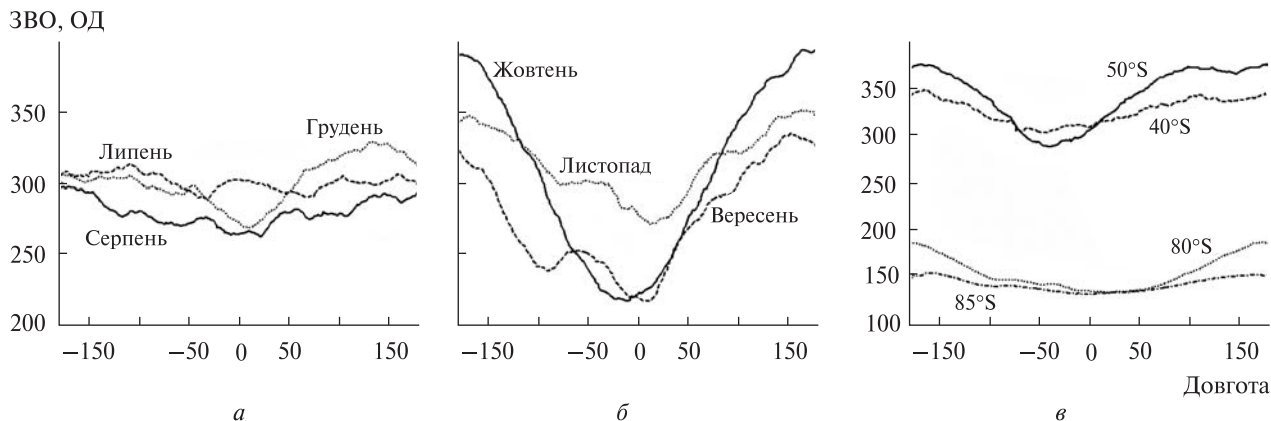


Рис. 2. Усереднений довготний розподіл ЗВО для місяців 2008 р.: а — липень, серпень і грудень, широта 60 °S; б — вересень — листопад, широта 60 °S; в — жовтень, широти 40, 50, 80 і 85 °S

них часових пропусків у вимірюваннях Meteor-3 TOMS (1991–1994 рр.), ці дані ми не використовували.

Вибір для аналізу пори року та просторової області обумовлено часом та місцем розвитку озонної діри. Розглянуто часовий інтервал з вересня по листопад, що дозволяє охопити весняний період максимальної активності ПХ. Сезонні відмінності асиметрії довготного розподілу ЗВО ілюструє рис. 2, а, б. У роботі досліджено широтний інтервал 50–80 °S із п'ятиградусним кроком (використано дані вимірювань TOMS/OMI з сайту <http://toms.gsfc.nasa.gov> для широт 50.5, 55.5, ... 80.5 °S). З метою визначення зональних характеристик планетарних хвиль аналіз проведено окремо для кожної паралелі. Навколополярна частина озонної діри (80–90 °S) з точки зору просторового розподілу ЗВО є найменш збуреною планетарними хвилями, і тому в даній роботі не розглядається. Зменшення зональної асиметрії до країв широтного інтервалу, обраного для дослідження, ілюструє рис. 2, в: перепад вмісту озону вздовж паралелі у жовтні 2008 р. становив 87 ОД на широті 50 °S і 52 ОД на широті 80 °S при 176 ОД для 60 °S. За межами інтервалу (85 °S і 40 °S) розподіл стає ще менш збуреним.

Профіль квазістаціонарної хвилі для кожного року отримується з допомогою усереднення даних уздовж паралелі для відповідного періоду. При знаходженні параметрів КСХ застосовується

згладжування з допомогою 50-градусного вікна для усунення впливу локальних неоднорідностей. Амплітуда хвилі обчислюється як половина різниці між значеннями максимуму та мінімуму. Чітке знаходження амплітуди та положень максимуму і мінімуму є можливим завдяки домінуванню в квазістаціонарному розподілі ЗВО для високих широт південної півкулі хвилі з зональним числом $m = 1$ [24].

Для характеристики багаторічних змін вмісту озону в Антарктиці обчислювалися зональні середні значення ЗВО вздовж вказаних паралелей та використовувалися дані про площу озонної діри (http://www.cpc.noaa.gov/products/stratosphere/winter_bulletins). Щоб усунути значні міжрічні варіації та спростити якісний аналіз, застосовано 5-річне ковзне усереднення. Довготривалі тенденції у змінах параметрів характеризуються лінійним трендом, коефіцієнти прямої знаходяться із допомогою методу найменших квадратів.

ЗМІНИ ЗАГАЛЬНОГО ВМІСТУ ОЗОНУ ПРОТЯГОМ 1979–2008 рр.

Аналіз зональних середніх значень ЗВО у досліджуваній області вказує на регулярне зменшення ЗВО від початку систематичних супутникових спостережень до кінця 1990-х рр. Наявність вираженого від'ємного тренду у весняні місяці в Антарктиці протягом 1980-х — початку 1990-х рр.

відома з багатьох досліджень (наприклад, [26] та узагальнені дані [19]). При усуненні накладених на загальну тенденцію міжрічних варіацій із допомогою ковзного 5-річного середнього, для цього періоду отримано картину, близьку до лінійного тренду (рис. 3, *a*). Однак надалі ситуація змінюється. Навіть якщо не зважати на внесок весни 2002 р. із аномально високим для Антарктики рівнем озону, все одно можна прийти до висновку про припинення від'ємного тренду ЗВО в цьому регіоні з другої половини 1990-х років.

Такий результат впливає і з аналізу даних про площу озонної діри (рис. 3, *б*). У цьому випадку зростання також тривало майже два десятиріччя, але з кінця 1990-х рр. ситуація змінюється. Зміна тенденції простежується для всього весняного періоду вересень — листопад. Вказане свідчить про припинення зростання площі озонної діри, відображене, зокрема, на рис. 4-8 із роботи [19], де такий результат наведено для останньої декади вересня. Подібні результати отримано також і іншими дослідниками. Так, у роботі [25] зроблено висновок про припинення спаду вмісту озону в Антарктиці після 1997 р., що розглядається як перший етап у процесі відновлення озонного шару. Це дозволяє говорити про ознаки стабілізації ЗВО в Антарктиці з другої половини 1990-х років.

ПАРАМЕТРИ КВАЗИСТАЦІОНАРНОЇ ХВИЛІ В РОЗПОДІЛІ ЗАГАЛЬНОГО ВМІСТУ ОЗОНУ

Ми дослідили форму довготного профілю квазістаціонарної хвилі у розподілі озону над Антарктикою протягом 1979—2008 рр., яка близька до синусоїдальної (рис. 4) через переважання гармоніки із зональним числом $m = 1$. Як зазначалося вище, КСХ може бути описана трьома основними параметрами: довготним положенням максимуму і мінімуму ЗВО та амплітудою. Характер зміни профілю хвилі за період супутникових спостережень ілюструється рис. 4. Крім загального зниження ЗВО, помітні також інші особливості: зростання асиметрії, відчутне зміщення на схід області мінімуму та незначне змі-

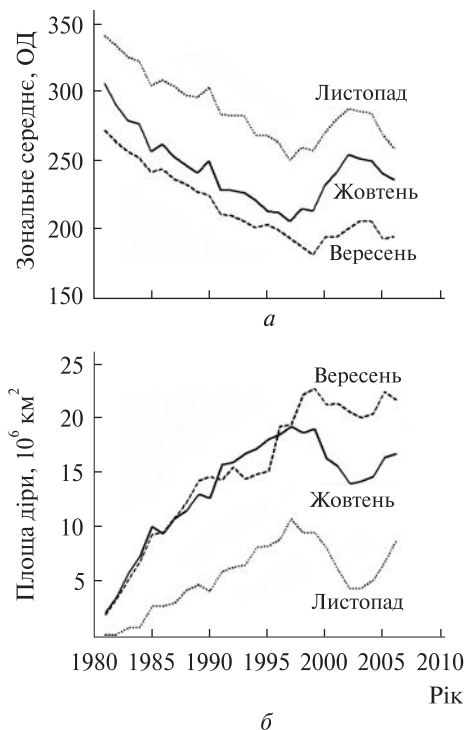


Рис. 3. Ковзне 5-річне усереднення для весняних місяців: *a* — ЗВО на широті 70°S, *б* — площа озонної діри (ЗВО < 220 ОД)

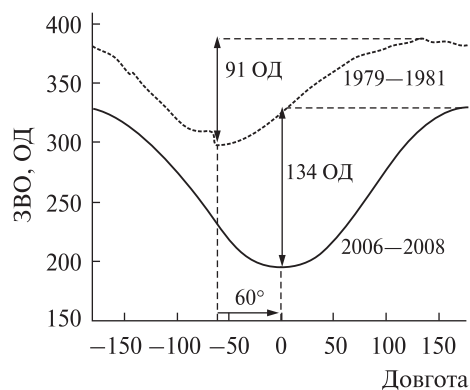


Рис. 4. Квазістаціонарний розподіл для вересня — листопада 1979—1981 та 2006—2008 рр. (трирічне усереднення) на широті 65°S. Вказано величину зсуву мінімуму та різницю між максимумом і мінімумом (подвійну амплітуду)

щення максимуму. Нижче наведено основні результати кількісного аналізу вказаних змін.

Розпочнемо з аналізу варіацій амплітуди КСХ. У крайовій області озонної діри вона відчут-

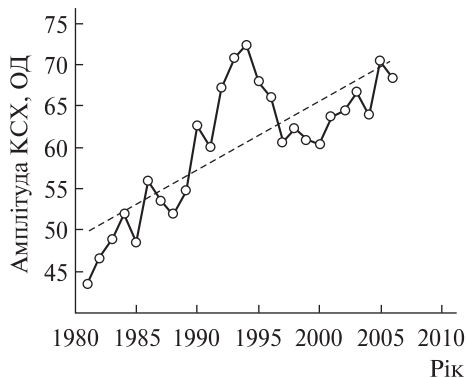


Рис. 5. Амплітуда КСХ на широті 65 °S (5-річне ковзне середнє та лінійний тренд)

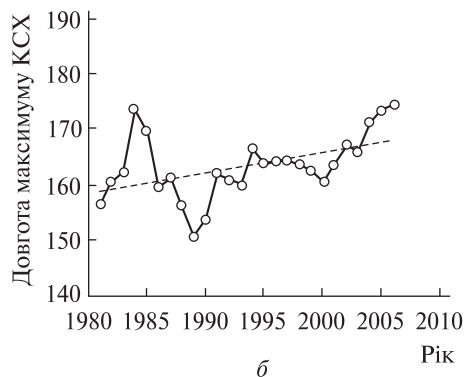
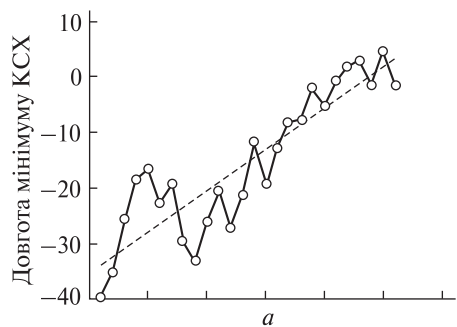


Рис. 6. Варіації положень мінімуму (а) та максимуму (б) КСХ на широті 65 °S у вересні — листопаді після проведення 5-річного ковзного усереднення. Показані лінійні тренди для усереднених даних

но зростає до середини 1990-х рр. (рис. 5). Це пов'язується з помітно вищими темпами зниження мінімуму, обумовленого асиметрією озонної діри, ніж максимуму (див. рис. 4). Натомість, пізніше чіткої тенденції не видно, що від-

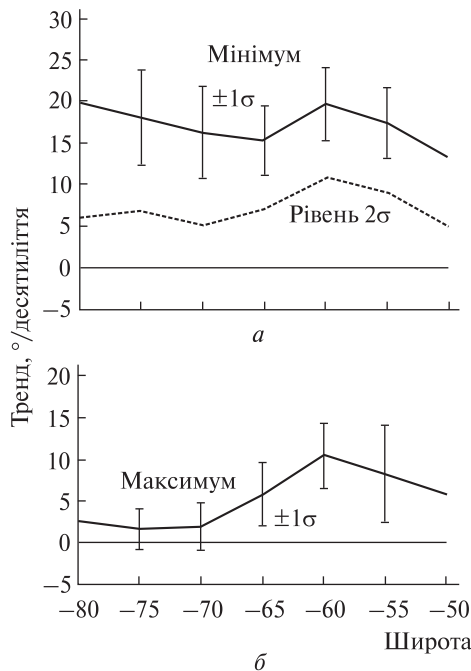


Рис. 7. Зсуви мінімуму (а) та максимуму (б) протягом 1979—2008 рр. (у градусах східної довготи за десятиліття). Вказані інтервали середніх квадратичних відхилень та рівень 2σ для мінімуму. Горизонтальна лінія позначає відсутність зсуву

повідляє розглянутій раніше картині стабілізації значень ЗВО у регіоні.

Оскільки амплітуда КСХ характеризує рівень зональної асиметрії ЗВО, результати рис. 5 свідчать про зростання асиметрії також лише до середини 1990-х рр. Нагадаємо, що амплітуда КСХ визначається рівнями ЗВО в екстремумах хвилі, тобто, взагалі кажучи, характеризує не тільки динамічне збурення озонного шару планетарними хвилями, а й інтенсивність хімічних втрат озону, яка позначається лише на рівні ЗВО в мінімумі КСХ. Щоб з'ясувати, чи відбуваються зміни в розподілі ЗВО над антарктичним регіоном, спричинені суто динамічним впливом КСХ, слід розглянути зональну структуру квазістаціонарної хвилі.

Положення максимуму й мінімуму квазістаціонарної хвилі змінюються відносно незалежно, що демонструє рис. 6, де показані їх варіації при п'ятирічному ковзному усередненні. Це

зумовлено наявністю складових із зональними числами, більшими 1 (хоч і з невеликими амплітудами), що було відзначено у роботі [10]. Як видно з рис. 6, *a*, говорити про стабілізацію положення мінімуму, принаймні за даними до 2008 р., передчасно. Мінімум квазістаціонарної хвилі демонструє виразний зсув на схід у усьому широтному інтервалі 50—80 °S (див. рис. 7, *a*).

Аналіз зсувів мінімуму та максимуму на значущість підкреслює їхню різну статистичну достовірність. Зсув мінімуму є достовірним на рівні 2σ для всього широтного інтервалу, у крайовій області озонової діри (55—65 °S) маємо достовірність на рівні 3σ . Натомість, зсув максимуму не є достовірним, лише на широті 60 °S досягається рівень 2σ (рис. 7). Отже, можна впевнено говорити тільки про систематичне 30-річне зміщення області найнижчих значень ЗВО. Різна поведінка максимуму та мінімуму КСХ пов'язана з особливостями зміни фаз складових із зональними числами 1 і 2, які забезпечують переважний внесок у амплітуду квазістаціонарної хвилі (98.9 % для жовтня на широті 60 °S відповідно до результатів [24]). Питання про можливий вплив поведінки гармонік із $m = 1$ та $m = 2$ на форму КСХ детальніше викладено в одній із наших попередніх робіт на дану тематику [1].

Середня швидкість зсуву мінімуму ЗВО у широтному інтервалі 50—80 °S відповідно до рис. 7, *a* становить 17 ± 5 °/десятиріччя, що відповідає загальному зміщенню на схід близько 50° довготи. Отже, до стійких кліматологічних особливостей розподілу ЗВО над Антарктикою можна віднести не лише його зональну асиметрію, а й тенденцію зміни асиметрії, вперше відзначену в роботах [1, 8]. Зсув мінімуму ЗВО на рис. 6, *a* не зазнає впливу процесів, які спостерігаються в останнє десятиріччя у значеннях ЗВО та площі озонової діри на рис. 3, а також в амплітуді КСХ на рис. 5. Тому ця тенденція, очевидно, не пов'язана з процесами весняного руйнування озону, а свідчить про зміни динаміки антарктичної стратосфери, які потребують подальшого дослідження. Оскільки розподіл стратосферного озону тісно пов'язаний з розподілом температури, викладені вище дані свідчать, що великомасштабні хвилі спричинюють помітні регіональні відмінності теплового

режиму у стратосфері, що можуть відобразитися на стані антарктичної атмосфери загалом.

Як сама зональна асиметрія у розподілі стратосферного озону над антарктичним регіоном, так і її зміни останніми роками привертають увагу багатьох дослідників. Так, у роботі [12] проаналізовано зсув на схід хвилі 1 та показано, що вона спричинює основні зміни в розподілі температури в стратосфері. Вважається, що асиметрія та її зміни впливає і впливатиме на характер атмосферної циркуляції в регіоні, будучи пов'язаною з регіональними змінами клімату [5, 13, 23]. Дослідники також звертають увагу, що адекватні моделі змін клімату у південній півкулі неможливі без урахування зональної асиметрії в розподілі стратосферного озону над Антарктикою [12, 13, 22].

ВИСНОВКИ

У роботі проведено дослідження розподілу озону в Антарктиці за даними супутникових спостережень протягом 1979—2008 рр. Отримані результати вказують на існування двох часових інтервалів із різним характером зміни ЗВО та амплітуди квазістаціонарної хвилі як показника зональної асиметрії озону в південному полярному регіоні. Протягом 1980-х — першої половини 1990-х років спостерігався систематичний спад вмісту озону, який добре описується лінійним трендом на фоні міжрічних варіацій. Натомість, упродовж останнього десятиліття відзначається стабілізація в озоновому шарі, помітна із припинення як від'ємного тренду середньозональних значень, так і зростання площі озонової діри. Аналіз варіацій амплітуди КСХ дозволяє стверджувати, що її зростання також припинилося в середині 1990-х. Припинення трендів, властивих для 1980-х — 1990-х рр., може бути передвісником прогнозованого на наступні десятиліття відновлення озонового шару над Антарктикою.

Результати аналізу, крім того, показують, що стійкими кліматологічними особливостями розподілу ЗВО над Антарктикою за останні 30 років (1979—2008 рр.) є його зональна асиметрія та зміна в структурі асиметрії, яка спричинює систематичне зміщення на схід низьких рівнів ЗВО

в атлантичному довготному секторі. Збереження систематичного зсуву мінімуму КСХ на схід упродовж трьох десятиріч свідчить про існування динамічного чинника, який змінює асиметрію озонової діри незалежно від тенденцій у рівнях ЗВО.

Робота виконана в рамках теми 06БФ051-12 Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

1. Грицай А. В., Євтушевський О. М., Міліневський Г. П. *та ін.* Довготний розподіл загального вмісту озону в атмосфері у крайовій області антарктичного стратосферного вихору // *Космічна наука і технологія.* – 2005. – **11**, № 5/6. – С. 5–11.
2. Allen D. R., Bevilacqua R. M., Nedoluha G. E., *et al.* Unusual stratospheric transport and mixing during the 2002 Antarctic winter // *Geophys. Res. Lett.* – 2003. – **30**, N 12. – doi:10.1029/2003GL017117.
3. Bhartia P. K., Wellemeyer C. W. TOMS V8 Algorithm theoretical basis document. – 2004. – 23 p. – (http://toms.gsfc.nasa.gov/version8/v8toms_atbd.pdf).
4. Bodeker G. E., Shiona H., Eskes H. Indicators of Antarctic ozone depletion // *Atmos. Chem. Phys.* – 2005. – **5**, N 10. – P. 2603–2615.
5. Crook J. A., Gillett N. P., Keeley S. P. E. Sensitivity of Southern Hemisphere climate to zonal asymmetry in ozone // *Geophys. Res. Lett.* – 2008. – **35**. – L07806, doi:10.1029/2007GL032698.
6. Farman J. C., Gardiner B. G., Shanklin J. D. Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction // *Nature.* – 1985. – **315**. – P. 207–210.
7. 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**. – D14313, doi:10.1029/2008JD009809.
8. Grytsai A., Grytsai Z., Evtushevsky A., Milinevsky G. Interannual variability of planetary waves in the ozone layer at 65°S // *Int. J. Remote Sensing.* – 2005. – **26**, N 16. – P. 3377–3387.
9. Grytsai A., Grytsai Z., Evtushevsky A., *et al.* Zonal wave number 1–5 in planetary waves from the TOMS total ozone at 65°S // *Ann. Geophys.* – 2005. – **23**, N 5. – P. 1565–1573.
10. 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.
11. Hio Y., Hirota I. Interannual variations of planetary waves in the Southern Hemisphere stratosphere // *J. Met. Soc. Jap.* – 2002. – **80**, N 4B. – P. 1013–1027.
12. Lin P., Fu Q., Solomon S., Wallace J. M. Temperature trend patterns in Southern Hemisphere high latitudes: novel indicators of stratospheric change // *J. Climate.* – 2009. – **22**, N 23. – doi: 10.1175/2009JCLI2971.1.
13. Neff W., Perlwitz J., Hoerling M. Observational evidence for asymmetric changes in tropospheric heights over Antarctica on decadal time scales // *Geophys. Res. Lett.* – 2008. – **35**. – L18703, doi:10.1029/2008GL035074.
14. Perlwitz J., Pawson S., Fogt R. L., *et al.* Impact of stratospheric ozone hole recovery on Antarctic climate // *Geophys. Res. Lett.* – 2008. – **35**. – L08714, doi:10.1029/2008GL033317.
15. Quintanar A. I., Mechoso C. R. Quasi-stationary waves in the Southern Hemisphere. Part I. Observational data // *J. Climate.* – 1995. – **8**, N 11. – P. 2659–2672.
16. Randel W. J. Global normal-mode Rossby waves observed in stratospheric ozone data // *J. Atmos. Sci.* – 1993. – **50**, N 3. – P. 406–420.
17. Roscoe H. K., Shanklin J. D., Colwell S. R. Has the Antarctic vortex split before 2002? // *J. Atmos. Sci.* – 2005. – **62**, N 3. – P. 581–588.
18. Salby M. L., Callaghan P. F. Fluctuations of total ozone and their relationship to stratospheric air motions // *J. Geophys. Res.* – 1993. – **98D**, N 2. – P. 2715–2727.
19. *Scientific assessment of ozone depletion: 2006.* – Geneva: World Meteorological Organization, 2007. – Report N 50.
20. Shepherd T. G. Large-scale atmospheric dynamics for atmospheric chemists // *Chem. Rev.* – 2003. – **103**, N 12. – P. 4509–4531.
21. Stolarski R. S., McPeters R. D., Newman P. A. The ozone hole of 2002 as measured by TOMS // *J. Atmos. Sci.* – 2005. – **62**, N 3. – P. 716–720.
22. Turner J., Comiso J. C., Marshall G. J., *et al.* Non-annular atmospheric circulation change induced by stratospheric ozone depletion and its role in the recent increase of Antarctic sea ice extent // *Geophys. Res. Lett.* – 2009. – **36**. – L08502, doi:10.1029/2009GL037524.
23. Weare B. C. Dynamical modes associated with the Antarctic ozone hole // *Atmos. Chem. Phys.* – 2009. – **9**, N 15. – P. 5403–5416.
24. Wirth V. Quasi-stationary planetary waves in total ozone and their correlation with lower stratospheric temperature // *J. Geophys. Res.* – 1993. – **98D**, N 5. – P. 8873–8882.
25. Yang E.-S., Cunnold D. M., Newchurch M. J., *et al.* First stage of Antarctic ozone recovery // *J. Geophys. Res.* – 2008. – **113**. – D20308. – doi:10.1029/2007JD009675.
26. Zou H., Gao Y. Long-term variation in TOMS over 60–70°S // *Geophys. Res. Lett.* – 1997. – **24**, N 18. – P. 2295–2298.

Надійшла до редакції 01.10.09

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

**OZONE DISTRIBUTION IN THE ANTARCTIC
REGION FROM DATA OF 30-YEAR SATELLITE
MEASUREMENTS**

Some features of the Antarctic ozone distribution and its variations are studied for a 30-year period (1979–2008) of satellite measurements made with the TOMS and OMI satellite spectrometers. The changes of the ozone hole parameters are analysed and multi-year variations of the quasi-stationary planetary wave characteristics in the atmosphere over the Antarctic region are studied. The conclusion on stopping both the ozone level diminution and the ozone hole

area increase since the late 1990s is made from the analysis of trends in the ozone hole characteristics. It is shown that the quasi-stationary waves cause the following: steady zonal asymmetry of the ozone distribution with ozone hole displacement relatively the South Pole into Atlantic longitudinal sector; a systematical eastward shift of the low ozone level region which is statistically reliable in the latitude range from 50 to 80° S and which reached 50° by longitude during the last 30 years. At the same time, a long-term change of the maximum position is insignificant. The retention of the regular eastward shift of quasi-stationary wave minimum during three decades is indicative of the existence of a dynamical factor changing the ozone hole asymmetry independently on tendencies in the ozone levels.