

УДК 528.813:551.510.534

**В. В. Лозицький**

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

## ПОРІВНЯННЯ ДОВГОТНИХ РОЗПОДІЛІВ ЗАГАЛЬНОГО ВМІСТУ ОЗОНУ НА ВИСОКИХ ШИРОТАХ ПІВНІЧНОЇ ТА ПІВДЕННОЇ ПІВКУЛЬ ЗЕМЛІ

*Наведено результати порівняльного аналізу проявів квазістаціонарних хвиль у довготних розподілах загального вмісту озону на широтах  $60^\circ N$  та  $60^\circ S$ . Для аналізу використовувалась восьма версія масиву супутникових даних TOMS за 1979–2003 рр. Максимуми збурень розподілів озону планетарними хвилями спостерігалися у весняно-зимовий період як у північній, так і у південній півкулях Землі. Для аналізу довгострокових варіацій просторових розподілів та їхніх спектральних компонентів було проведено усереднення за три місяці кожного року — за січень–березень для північної півкулі та серпень–жовтень для південної. Виявлене стійке домінування компонента хвилі довготного розподілу із зональним числом 1 для весни південної півкулі. У північній півкулі для більшості років спостережень спостерігається суперпозиція хвиль 1 та 2, причому для деяких років амплітуда хвилі 2 є більшою за амплітуду хвилі 1. Протягом розвитку антарктичної озонної діри з середини 1980-х років фаза довготного розподілу озону на широті  $60^\circ S$  значно зсунулася на схід, в той час як на широті  $60^\circ N$  зсуву на схід зазнала лише довгота максимуму. В обох півкулях є сильні міжрічні варіації положень та амплітуд квазістаціонарних хвиль.*

### ВСТУП

Одне з перших досліджень квазістаціонарних хвиль і їхніх спектральних компонентів було здійснено в роботі [11]. З того часу багато дослідників вивчали квазістаціонарні хвилі та їхній вплив на глобальні динамічні процеси. Хвильові процеси у стратосфері північної та південної півкуль загалом схожі, проте є і суттєві відмінності: наприклад, зимовий полярний вихор над Антарктикою значно потужніший, ніж над Арктикою. Планетарні хвилі відіграють ключову роль у руйнуванні озонної діри, оскільки інтенсифікують транспорт озону з нижніх широт, а також беруть участь у руйнуванні полярного вихору навесні [8]. Проте деякі дослідники зазначають, що існування протилежного ефекту, а саме підсилення полярного вихору, також можливе за певних умов [1, 6]. Сильні кореляції між середньою меридіональною циркуляцією та накопиченням озону в середніх широтах північної півкулі у зимові місяці (жов-

тень–березень) знайдено у роботі [9]. Для середньозональних значень отримано кореляції на рівні 0.70.

Міжрічні варіації довготного розподілу озону на широті  $65^\circ S$  для серпня–жовтня 1979–2004 рр. були описані у роботі [5]. У вказані місяці хвильова активність у південній півкулі досягає свого максимуму.

Отримані довготні розподіли були розкладені у ряди Фур'є із виділенням компонентів хвиль (KX) із зональними числами 1–5. Аналіз KX показав, що перший компонент (хвиля 1) домінує в усі роки спостережень. Також виявлено, що спостережний довготний розподіл ЗВО за роки дослідження зсунувся на схід із середньою швидкістю  $2^\circ$  довготи за рік. Відмічене значне зменшення загального вмісту озону (ЗВО) практично на всіх довготах дослідженої широти за обраний період.

Тренди ЗВО на широтах від  $70^\circ S$  до  $70^\circ N$  за 1978–1990 рр. вивчалися у роботі [10]. Були отримані статистично суттєві негативні тренди для обох півкуль ( $65^\circ S$ – $70^\circ N$ ) на рівні 5 % за

десятиліття, і на рівні 20 % для широти 70° S. Винятком стала лише широта 60° N, для якої виявлено незначний позитивний тренд. Зсув мінімуму довготного розподілу ЗВО відзначено для високих широт південної півкулі.

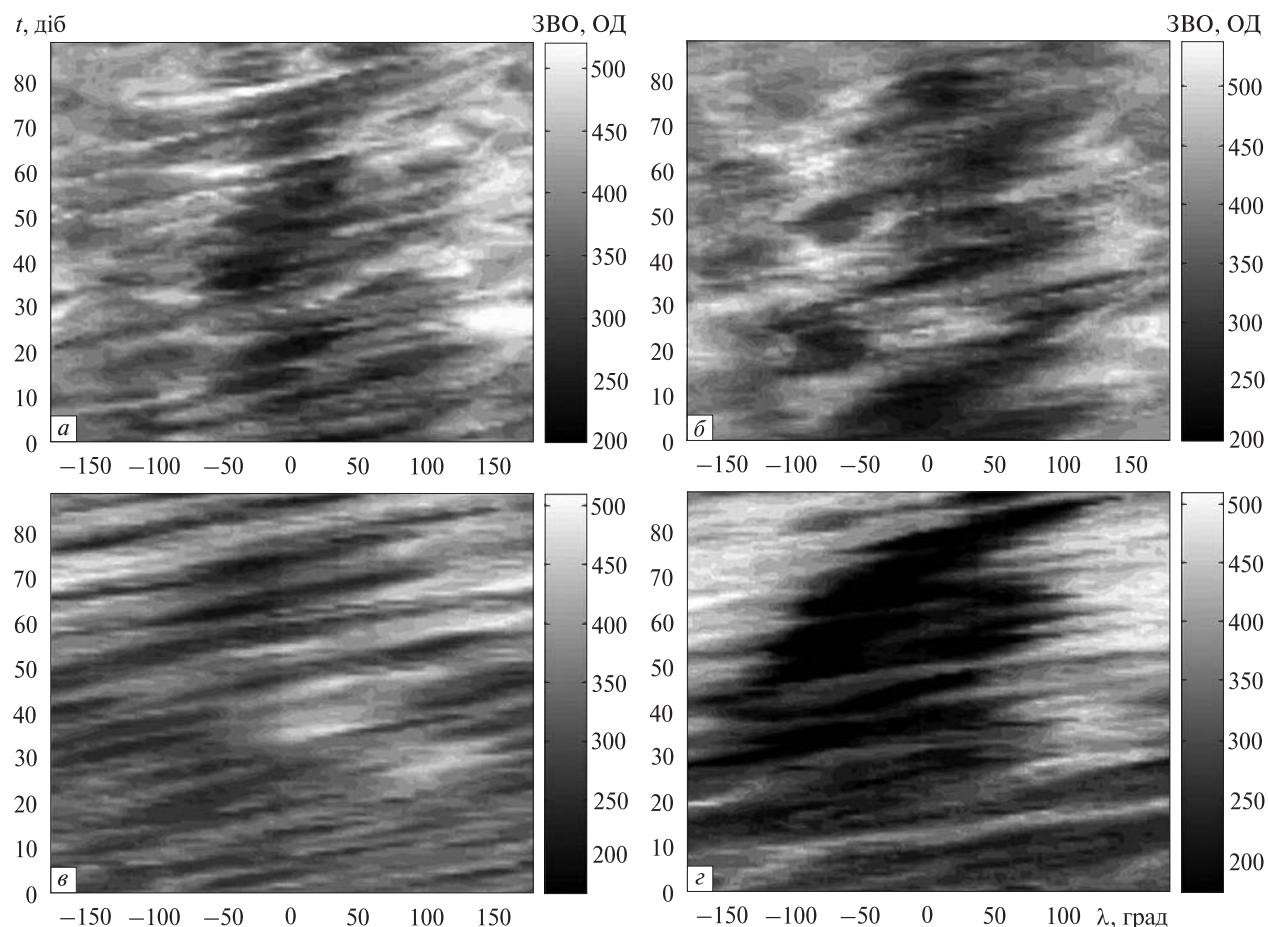
Вплив квазістаціонарних планетарних хвиль на довготні розподіли ЗВО помірних широт обох півкуль також аналізувався у роботі [7]. Жовтень і лютий місяці були взяті для аналізу у південній та північній півкулях відповідно. За оцінками дослідників, квазістаціонарні планетарні хвилі спричиняють асиметрію довготних розподілів ЗВО з амплітудами 30–60 ОД (одиниць Добсона) для періоду 1979–1996 рр.

Метою даного дослідження було проведення порівняльного аналізу якісних та чисельних ха-

рактеристик квазістаціонарних хвиль у ЗВО на широтах 60° обох півкуль і пошуку можливих взаємозв'язків.

### ОБРОБКА ДАНИХ ТА АНАЛІЗ

Використовувались бази даних TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) версії v.8 (NIMBUS-7+Earth-Probe) для 1979–2003 рр., доступні за адресою <http://toms.gsfc.nasa.gov/ftpdata.html>. Вивчення контурних карт ЗВО над Арктикою та Антарктикою виявило асиметрію у зональних розподілах озону пізньої зими — середини весни у південній півкулі та середини зими — ранньої весни у північній. Широти 60° N та 60° S були обрані для аналізу через те, що це найвищі широти, які повністю захоплюються



**Рис. 1.** Довготно-часові діаграми ЗВО (у ОД) для 1983 та 2003 рр.: *a* — січень–березень 1983 р., 60° N; *б* — січень — березень 2003 р., 60° N; *в* — серпень — жовтень 1983 р., 60° S; *г* — серпень–жовтень 2003 р., 60° S. Час *t* відмірюється від 1 серпня до 31 жовтня (південна півкуля) чи від 1 січня до 31 березня (північна півкуля)

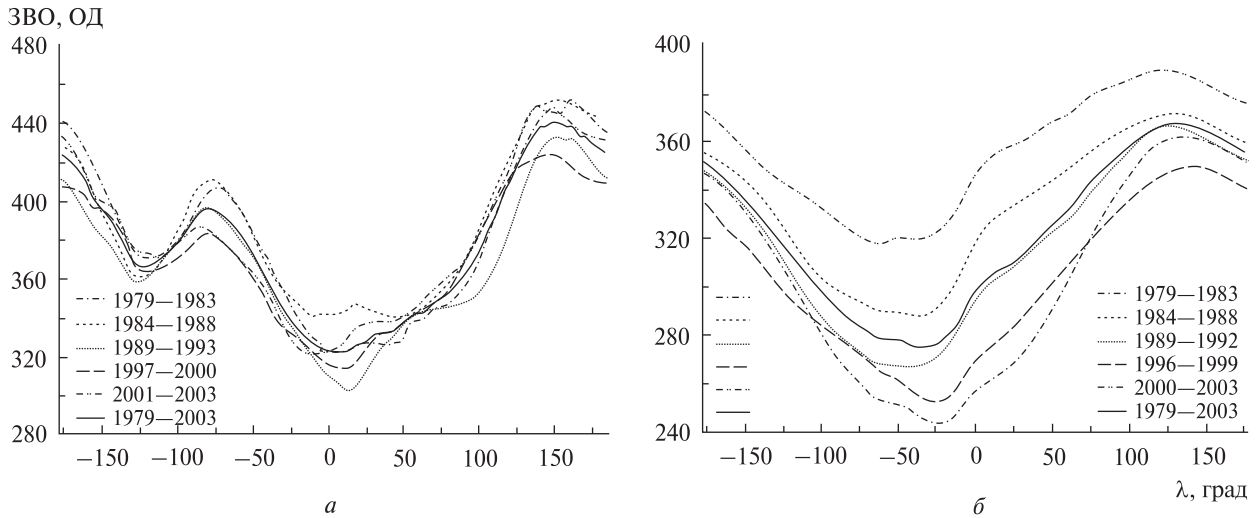


Рис. 2. Довготні розподіли ЗВО на широтах 60° N (а) та 60° S (б), усереднені за декілька років

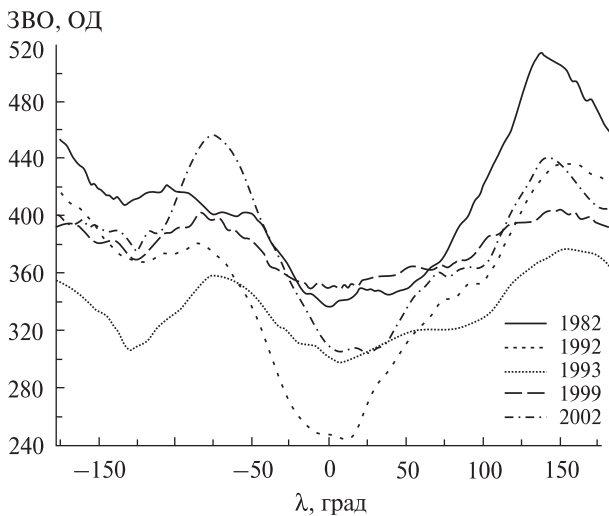


Рис. 3. Довготні розподіли ЗВО, що найбільше відрізнялися від середнього розподілу для всього періоду

спутниковими спостереженнями протягом зимових місяців. Поодинокі прогалини у даних заповнювались інтерпольованими значеннями. На початку квітня та грудня для північної та південної півкуль відповідно полярний вихор відступає за широту 60° у напрямку полюса. Саме тому для аналізу вибрано січень — березень місяці для північної та серпень — жовтень для південної півкулі.

Для усіх років спостережень були побудовані довготно-часові діаграми (діаграми Ховмьолле-

ра), які потім аналізувались. На рис. 1 приведені такі діаграми для 1983 та 2003 рр. Біжучі планетарні хвилі на рисунку видимі як тонкі похилі особливості, в той час як квазістаціонарні хвилі є крупномаштабними особливостями із низькою довготною рухливістю.

## РЕЗУЛЬТАТИ

Усереднені за 3–5 років довготні розподіли ЗВО приведені на рис. 2. Різні інтервали усереднення (3, 4 і 5 років) використовувалися для уникнення прогалини у спостереженнях 1994–1995 рр. Як бачимо, квазістаціонарні хвилі у північній та південній півкулях мають суттєві відмінності. У загальному розподілі південної півкулі домінує хвиля 1, у той час як у північній маємо домінування суперпозиції хвиль 1 та 2. У південній півкулі ЗВО має монотонний негативний тренд, особливо в області мінімуму розподілу. Довготи максимуму, та особливо мінімуму розподілу виявляють зсув на схід протягом досліджуваного періоду. Цей результат узгоджується із роботою [2], в якій вказується на зсув мінімуму квазістаціонарної хвилі на широтах 55–80° із швидкістю, більшою за швидкість зсуву максимуму у 1.5–2 рази. Довготний розподіл ЗВО у північній півкулі не має настільки очевидних трендів, проте зазнає сильних міжрічних варіацій (рис. 3).

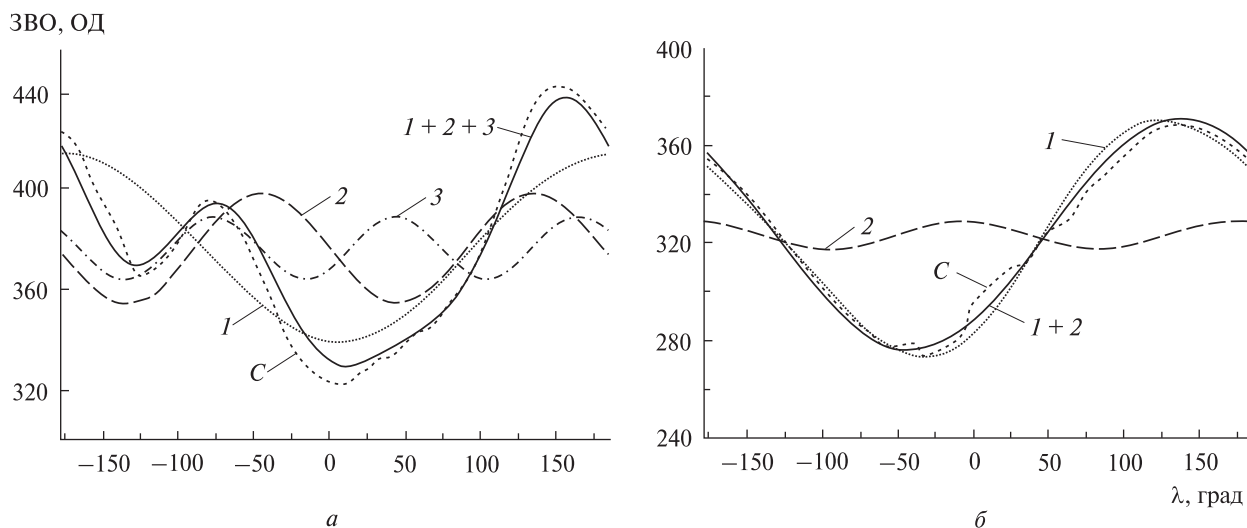


Рис. 4. Апроксимація середніх довготних розподілів (1979–2003 рр.) квазістаціонарними хвилями перших порядків на широтах 60° N (а) та 60° S (б): 1, 2, 3 – компоненти 1–3, С – спостереження, 1+2+3 – сума перших компонентів

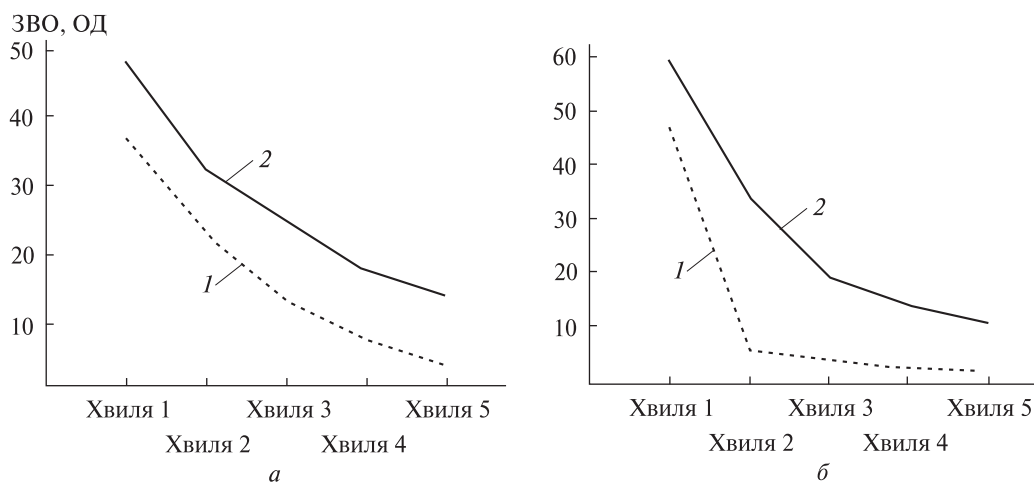


Рис. 5. Амплітуди квазістаціонарних (1) і абсолютних (2) складових довготних розподілів ЗВО на широтах 60° N (а) та 60° S (б), усереднених за 1979–2003 рр.

Із аналізу розподілів квазістаціонарних хвиль в окремі роки і у різних півкулях було виявлено таку цікаву деталь. Якщо аномально високий вторинний максимум у північній півкулі супроводжується аномально низьким первинним максимумом (відношення первинного максимуму до вторинного для 2002 року було меншим за одиницю), то спостережувана через півроку озонна діра у південній півкулі виявляється аномально малою за площею. Такими аномаль-

ними роками в Антарктиці були: 1988 р. (мала та короткоживуча озонна діра), 1991 р. (велика амплітуда квазістаціонарної хвилі і її зсув на захід, ранній колапс озонної діри), 2002 р. (мала за площею і короткоживуча, проте глибока озонна діра).

У 1993 р. ЗВО зазнав значного зменшення практично на всіх широтах через виверження вулкану Пінатубо (1991 р.). У 1999 р. аномально плоский довготний розподіл спостерігався у

**Характеристики хвиль у північній та південній півкулях та їхні стандартні похибки**

Особливість (для періоду 1979–2003 рр.)	60° S	60° N
Тренд значень ЗВО у максимумах розподілів, % за десятиріччя	$-5 \pm 2.5$	$-3 \pm 6$
Тренд значень ЗВО у мінімумах розподілів, % за десятиріччя	$-13 \pm 4$	$-2.5 \pm 8$
Тренд амплітуди квазістаціонарної хвилі, ОД за десятиріччя	$+19 \pm 8$	$-4 \pm 11$
Середня довгота максимуму хвилі 1	122° E	174° E
Середня довгота мінімуму хвилі 1	27° W	3° W
Зсув фази хвилі 1	41° на схід	Відсутній
Зсув фази хвилі 2	Відсутній	Відсутній

північній півкулі, а у 1982 р., також у північній півкулі, спостерігалися екстремально високі значення ЗВО, особливо в області первинного максимуму. Виверження вулкану Ель-Чичон (Мексика), яке відбулося 29 березня 1982 р., проявилось у стратосфері через рік.

З метою виділення з розподілів ЗВО складових квазістаціонарних хвиль до них був застосований розклад у ряд Фур'є. Отримано відносні амплітуди і фази складових із хвильовими числами 1–5. Аналіз цих складових підтвердив попередній висновок про домінування хвилі 1 на широті 60° S та суперпозиції хвиль 1 і 2 на широті 60° N (рис. 4). Аналіз трендів фаз квазістаціонарних складових показав, що вони статистично несуттєві (тренди відсутні) для усіх складових на обох широтах, за винятком хвилі 1 на широті 60° S, яка зазнала зсуву на схід на 45° з 1979 по 2003 рр. [2].

На рис. 5 порівнюються значення амплітуд «абсолютних» і «квазістаціонарних» спектральних складових 1–5. Під «абсолютними» слід розуміти усереднені за всі роки компоненти зі змінними від року до року фазами. Термін «квазістаціонарні» тут означає, що усереднення розподілів за всі роки спостережень (1979–2003 рр.) було зроблено ще до фур'є-аналізу. Видно, що для південної півкулі вклад квазістаціонарної хвилі 2 дуже малий порівняно із вкладом хвилі 1. Цей результат подібний результатам, отриманим у роботі [5] для широти 65° S.

**ВИСНОВКИ**

Порівнюючи загальну картину поведінки квазістаціонарних хвиль на широтах 60° N та 60° S, можна зробити такі узагальнення.

У південній півкулі протягом періоду 1979–2003 рр. явно домінували компоненти із хвильовим числом 1, що мають порівняно стійкі від року до року фази і амплітуди. Довготний розподіл ЗВО у північній півкулі загалом непогано описується суперпозицією хвиль 1 і 2, проте в деякі роки (див. рис. 3) значно відхиляється від середнього. Вищі гармоніки у південній півкулі вносять незначний вклад у загальний розподіл, в той час як у північній навіть вклад третьої гармоніки є суттєвим. Положення мінімумів ЗВО на широтах 60° N і 60° S дуже близькі (5° E і 37° W). У північній півкулі положення екстремумів квазістаціонарної хвилі слабо змінилися за роки спостережень. У південній півкулі фаза квазістаціонарної хвилі проявляє повільний, проте стійкий зсув на схід. Запропоновано індикатор, який може вказувати на аномально малу озонову діру в Антарктиці ще за півроку до її появи. Таким передвісником, можливо, є зменшення відношення первинного та вторинного максимумів квазістаціонарної хвилі ЗВО взимку та на початку весни північній півкулі.

Використано дані супутникових спостережень загального вмісту озону спектрометром TOMS (<http://toms.gsfc.nasa.gov/ftpdata.html>).

*Робота частково підтримана Київським національним університетом імені Тараса Шевченка в рамках проекту 06BF051-12. Дослідження здійснювалися за участі в програмах ORACLE-O3 та SCAR ICESTAR в рамках проведення Міжнародного полярного року 2007/2008. Автор вдячний Г. Міліневському, О. Євтушевському, А. Грицяю за корисні поради.*

1. *Castanheira J. M., et al.* Does the troposphere respond to polar stratospheric vortex strengthening by increasing planetary wave generation? // *Geophys. Res. Abstr.* — 2008. — **10**. — EGU2008-A-11255.
2. *Grytsai A., Evtushevsky O., Agapitov O., 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.



3. Grytsai A., Evtushevsky O., Milinevsky G. Anomalous quasi-stationary planetary waves over the Antarctic region in 1988 and 2002 // *Ann. Geophys.* — 2008. — **26**, N 5. — P. 1101–1108.
4. Grytsai A., Grytsai Z., Evtushevsky A., Milinevsky G. Interannual variability of planetary waves in the ozone layer at 65°S // *IJRS.* — 2005. — **26**, N 16. — P. 3377–3387.
5. Grytsai A., Grytsai Z., Evtushevsky A., et al. Zonal wave numbers 1–5 in planetary waves from the TOMS total ozone at 65°S // *Ann. Geophys.* — 2005. — **23**. — P. 1565–1573.
6. Li Q., Graf H.-F., Giorgetta M. A. Stationary planetary wave propagation in Northern Hemisphere winter — climatological analysis of the refractive index // *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* — 2006. — **6**. — P. 9033–9067.
7. McCormack J., Miller A., Nagatani R., Fortuin F. Interannual variability in the spatial distribution of extratropical total ozone // *Geophys. Res. Lett.* — 1998. — **25**, N 12. — P. 2153–2156.
8. Murry L. S., Callaghan P. F. Influence of planetary wave activity on the stratospheric final warming and spring ozone // *J. Geophys. Res.* — 2007. — **112**.
9. Nikulin G., Karpechko A. The mean meridional circulation and midlatitude ozone buildup // *Atmos. Chem. Phys.* — 2005. — **5**. — P. 3159–3172.
10. Niu X., Frederick J., Stein L., Tiao G. Trends in column ozone based on TOMS data — Dependence on month, latitude and longitude // *J. Geophys. Res.* — 1992. — **97D**, N 13. — P. 14,661–14,669.
11. Wu M. F., Geller M. A., Nash E. R., Gelman M. E. Global atmospheric circulation statistics — four year averages // *NASA Technical Memorandum 100690.* — 1987.

Надійшла до редакції 24.02.09

V. V. Lozitsky

#### COMPARISON OF TOTAL OZONE CONTENT DISTRIBUTION OVER NORTHERN AND SOUTHERN HIGH LATITUDES

Our results of comparative analysis of quasi-stationary wave (QSW) influence on total ozone content (TOC) distribution over 60N and 60S latitudes are presented. Version 8 of TOMS total ozone satellite data for 1979–2003 years was used for visualization of the variations of the longitudinal ozone distribution. The 3-month averaging for each year was used to obtain QSW spatial distribution and their spectral components. Long-term changes of QSW characteristics are compared for Arctic and Antarctic regions. The quasi-stationary planetary wave 1 is prevailing in the Southern hemisphere (SH) during the spring period, while in Northern hemisphere (NH) the wave 1 is also predominating, although in separate years the wave 2 dominates. The maximal TOC disturbances by planetary waves are observed in the winter–spring period both in NH (January–March) and SH (August–October). During the Antarctic ozone hole development (from the mid-1980s and so far) QSW position at 60S changed in the way of eastward rotation, whereas in the latitude 60N only position of QSW maximum slightly moved, also eastward. At means of yearly QSW variations, both hemispheres show strong variability in positions and amplitudes.