

doi: <https://doi.org/10.15407/knit2017.02.041>

УДК 551.513.11:551.510.534

В. Ю. Могильчак¹, Г. П. Міліневський^{1,2}

¹ Київський національний університет імені Тараса Шевченка

² Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ

ВАРІАЦІЇ ЗАГАЛЬНОГО ВМІСТУ ОЗОНУ В АТМОСФЕРІ НАД ТЕРИТОРІЄЮ УКРАЇНИ

Проаналізовано просторовий та часовий розподіл загального вмісту озону (ЗВО) над територією України (43.5... 52.2°N, 22... 42°E). Виявлено коротко- та довгострокові зміни ЗВО на основі супутникових спостережень, що проводились в останні десятиліття (1979—2014 рр.) спектрометрами TOMS та OMI. Відзначено, що для короткострокових (сезонних) змін максимум ЗВО припадає на весняні місяці (березень — квітень), мінімум — на осінні (жовтень — листопад). Довгострокові зміни відповідають зменшенню ЗВО з 1970 до 1990-х рр., але темп зниження ЗВО уповільнився на початку ХХІ ст. Виявлено неоднорідність просторового розподілу загального вмісту озону з широтою, а саме його зменшення у напрямку з півночі на південь України.

Ключові слова: озон, варіації, довгострокові зміни, супутникові спостереження, спектрометри

ВСТУП

Атмосферний озон відіграє важливу роль в регіональних та глобальних змінах клімату, приземний озон згубно впливає на здоров'я людини і навколишнє середовище. Тому спостереження змін загального вмісту озону (ЗВО) надають важливу інформацію для вивчення фізичних процесів у атмосфері Землі [1]. На даний час дистанційні дослідження загального вмісту озону в атмосфері Землі поділяються на наземні [2, 5, 8] та супутникові спостереження [7, 10, 11, 14]. Переважно використовується властивість озону поглинати та розсіювати сонячне ультрафіолетове випромінювання у діапазоні 300...340 нм. При наземних та супутникових вимірюваннях розрахунок поглинання проводиться на основі експоненціального закону Бугера — Ламберта — Бера.

Для визначення ЗВО також відіграє велику роль розсіяння світла на атмосферному аерозолі. Сезонний хід вмісту озону вивчено досить добре як за локальними наземними, так і за супутниковими спостереженнями [4, 5, 7]. Проте у першому випадку нерівномірність географічного покриття призводить до зосередження уваги на регіонах з найбільш густою сіткою станцій. У другому випадку масиви глобальних даних для аналізу сезонних змін ЗВО зазвичай подають у вигляді зонально усереднених часових рядів. Таке представлення супутникових вимірювань добре відтворює широтну залежність сезонного ходу ЗВО, але при цьому втрачаються його регіональні особливості [7, 10]. Порівняння обох видів спостережень на прикладі станції Київ — Голосіїв дає змогу вважати, що різниця між супутниковими і наземними даними обумовлюється недоліками алгоритмів обчислення ЗВО [10, 11].

© В. Ю. МОГИЛЬЧАК, Г. П. МІЛІНЕВСЬКИЙ, 2017

Проте будь-який з методів не надає невичерпну інформацію щодо сезонного та просторового ходу ЗВО.

Починаючи з 1970-х р., діють програми супутникового моніторингу, які забезпечують перервне накопичення даних про глобальний розподіл та просторово-часові варіації ЗВО для аналізу та моніторингу стану озонового шару нашої планети. Наземні спостереження загального вмісту озону в Україні були розпочаті у 1973—1974 рр. на станціях Бориспіль, Карадаг, Одеса, Львів за допомогою озонотрів М-124 [2, 3]. Для відновлення розподілу ЗВО над територією України, особливо в її східній частині, де інструментальні наземні спостереження не проводились, залучалась інформація, отримана зі супутникового приладу TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer). У 1990 р. було відкрито ще дві озонотричні станції: в Києві та Богуславі, де синхронно вимірювались значення загального вмісту озону в атмосфері. З 2010 р. вимірювання ЗВО було розпочато за допомогою спектрофотометра Добсона [7, 11, 13].

Дані про вміст озону, одержані в Україні, мають типові для середньоширотної зони максимальні рівні ЗВО у зимово-весняний період та мінімальні — восени. Сезонні коливання, що спостерігаються, значною мірою визначаються рівнем накопичення стратосферного озону, спричиненого зимовим посиленням меридіонального переносу озону в стратосфері — циркуляцією Брюера — Добсона (ЦБД) та темпом наступної фотохімічної релаксації, яка триває до осені. Завдяки ЦБД збагачені озоном стратосферні повітряні маси рухаються з тропіків у бік полюса та осідають над позатропічними широтами. Це призводить до утворення додатного градієнта ЗВО між тропічним та полярним регіонами [4, 7], що відіграє важливу роль у формуванні клімату даної області. Сезонні зміни концентрації озону у стратосфері, внаслідок яких температурний режим стратосфери зазнає змін, впливають на інтенсивність зональної циркуляції у стратосфері, на поширення та руйнування планетарних хвиль, а також на стратосферно-тропосферний обмін у певних регіонах в залежності від сезону [12]. Хоча взаємозв'язки між

змінами вмісту озону та змінами клімату інтенсивно досліджуються та моделюються останнім часом, але досі залишається невизначеність оцінок ролі окремих факторів, зокрема, динамічних та хімічних процесів в атмосфері. Останній фактор, через вплив озону як парникового газу на радіаційний баланс тропосфери, безпосередньо причетний до формування як регіональних, так і глобальних кліматичних змін.

Метою даної роботи було дослідження часових та просторових змін загального вмісту озону над територією України в період 1979—2014 рр. на основі супутникових даних.

ДАНІ ТА МЕТОД АНАЛІЗУ

Для аналізу були використані супутникові спостереження загального вмісту озону спектрометрами TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) за 1979—2005 рр., що були встановлені на супутниках Nimbus-7 (11.1978—05.1993), Earth Probe (07.1996—11.2005), та приладом OMI (Ozone Monitoring Instrument) за 2004—2014 рр., що був встановлений на супутнику AURA (<http://ozoneaq.gsfc.nasa.gov>). Розрахунок та аналіз проводились за даними, визначеними алгоритмом TOMS v.8 [14]. Дослідження просторових змін ЗВО в атмосфері над Україною виконано у прямокутній області з утвореною в ній сіткою з дискретністю $1.0^\circ \times 1.25^\circ$ (TOMS) та $1.0^\circ \times 1.0^\circ$ (OMI) по довготних та широтних смугах відповідно.

Таким чином, було отримано поле змінних значень загального вмісту озону у вузлах сітки та було розраховано просторові і часові зміни ЗВО в даній області.

Для інтерпретації варіацій часового і просторового розподілу ЗВО для кожної смуги широти та довготи було використано незалежний коефіцієнт відносної варіації CRV (coefficient of relative variation), що розраховувався по формулі [5, 6]:

$$CRV_{i,a} = 100 \frac{TOC_{i,a}^{\max} - TOC_{i,a}^{\min}}{TOC_{i,a}^{\text{mean}}},$$

де $TOC_{i,a}^{\max}$, $TOC_{i,a}^{\min}$, $TOC_{i,a}^{\text{mean}}$ — максимум, мінімум та середнє добове значення ЗВО відповідно. За допомогою розрахунку коефіцієнта відносної варіації ми зможемо порівняти добові

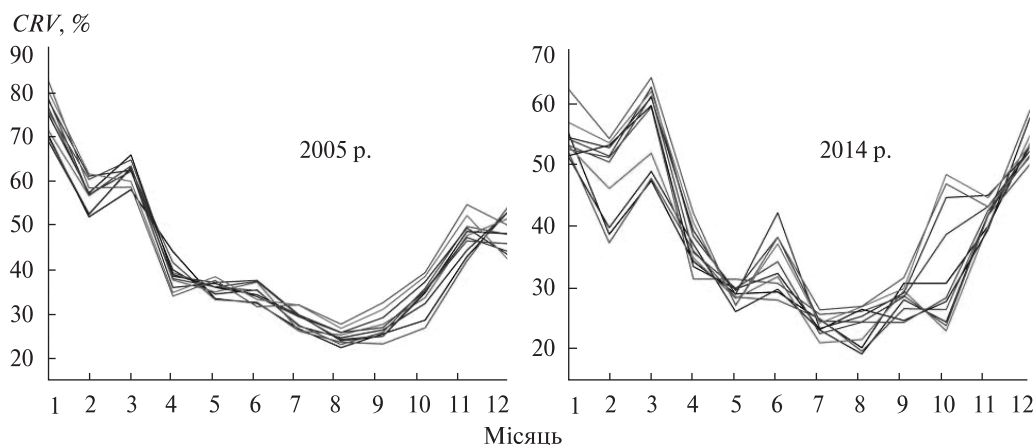


Рис. 1. Середньомісячні зміни коефіцієнта відносних варіацій ЗВО над різними точками території України за 2005 і 2014 рр.

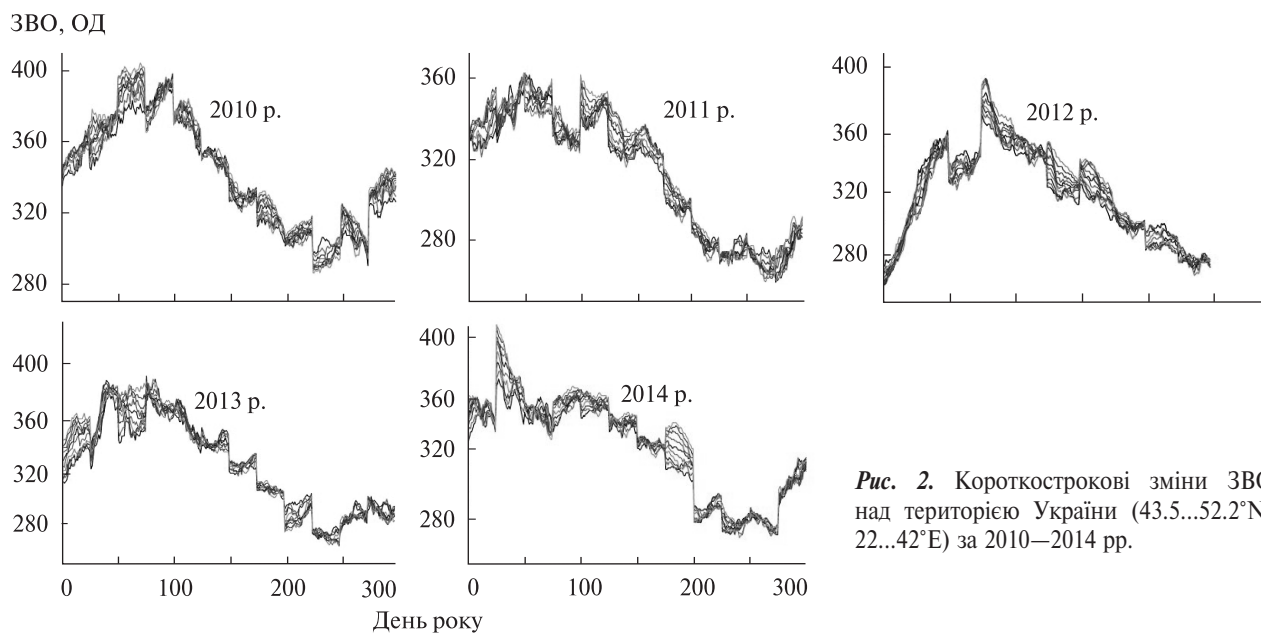


Рис. 2. Короткострокові зміни ЗВО над територією України (43.5...52.2°N, 22...42°E) за 2010—2014 рр.

зміни просторових варіацій загального вмісту озону, відкинувши вплив часових змін.

Дослідження часових змін ЗВО зводилося до дослідження короткострокових (сезонних) та довгострокових змін ЗВО. Було проаналізовано сезонні зміни ЗВО з 2010 по 2014 рр. та річні зміни з 1979 р. по 2014 р. Урахування впливу сезонних варіацій ЗВО на довгострокові зміни було розраховано за формулою [5]

$$D_p(t) = m + n \sin wt + o \cos wt,$$

де t — місяць року, m — зміщення, $n \sin wt + o \cos wt$ — складова, що описує сезонний хід ЗВО, $w = 2\pi / 12$ — константа.

РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗУ

Результати, отримані для просторових варіацій для 2005 р. та 2014 р., наведено на рис. 1, де зображено залежність коефіцієнта CRV від місяця року для різних широт досліджуваної області. Як видно, на всій території України у 2014 рік спостері-

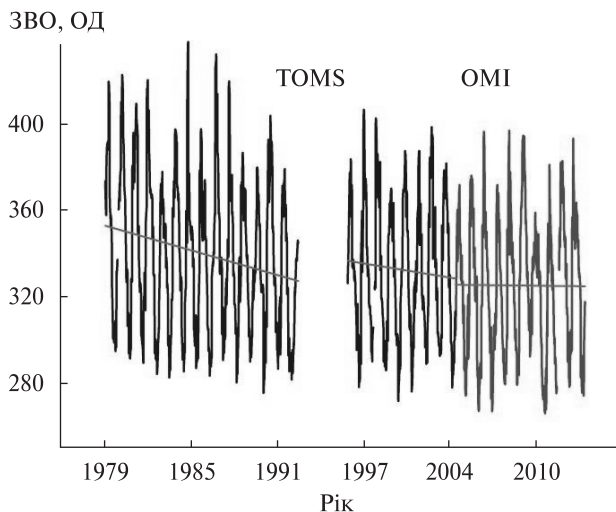


Рис. 3. Довгострокові зміни ЗВО над територією України

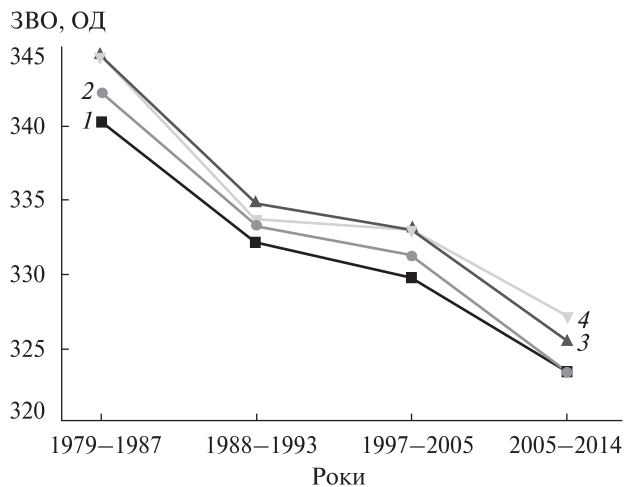


Рис. 5. Усереднені за восьмирічний період значення ЗВО для чотирьох широтних поясів над територією України: 1 – 43.5°, 2 – 46.5°, 3 – 49.5°, 4 – 52.5°N

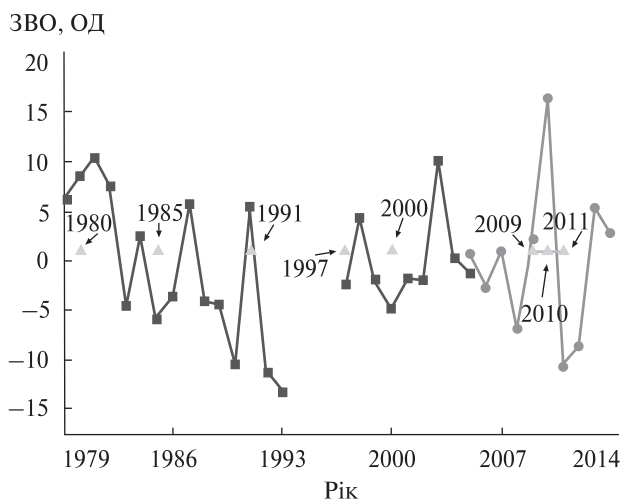


Рис. 4. Довгострокові зміни ЗВО над територією України з виключеними сезонними варіаціями: квадратики — дані TOMS, точки — OMI, трикутники — моменти вивержень

гались два максимуми *CRV* — у січні та березні, тоді як у 2005 р. максимум варіацій припадав на січень. Значення ЗВО зменшувались з півночі на південь. Це підтверджує вищезазначене накопичення стратосферного озону, спричиненого зимовим посиленням меридіонального переносу озону та темпом наступної фотохімічної релакса-

Найбільш потужні виверження вулканів на Землі наприкінці ІХХ — початку ХХ ст.

Дата виверження	Місце знаходження	Назва вулкану
18 травня 1980 р.	Штат Вашингтон, США	Сент-Геленс
29 березня 1982 р.	Мексика	Ель-Чічон
12—13 листопада 1985 р.	Колумбія	Невадо-дель-Руїс
9—15 червня 1991 р.	О. Лусон, Філіппіни	Пінатубо
30 червня 1997 р.	Мексика	Попокатепетль
14 березня 2000 р.	Камчатка, Росія	Безіменний
14—19 грудня 2000 р.	Мексика	Попокатепетль
12 червня 2009 р.	О. Матуа, Росія	пік Саричева
14 квітня 2010 р.	Ісландія	Ейяфьятлайокудль
21 травня 2011 р.	Ісландія	Грімсвотн
5 червня 2011 р.	Чилі	Пуйеуе
12 червня 2011 р.	Еритрея	Набро

ції, яка триває до осені, та утворення градієнта між тропічним та полярним регіонами. Поведінка коефіцієнта *CRV* демонструє загальновідомі значні варіації вмісту озону у зимові та весняні місяці і малу змінність наприкінці літа у серпні.

Для короткострокових варіацій було отримано залежності ЗВО від широти, що наведені на рис. 2. Для сезонних варіацій загального вмісту озону спостерігається приблизно однаковий сезонний хід ЗВО за останні п'ять років, який має чітко визначений стійкий максимум ЗВО у перехідний період зима — весна, а саме у лютому — квітні.

Зміни ЗВО протягом останніх трьох десятиліть (довгострокові зміни) наведені на рис. 3. Перерва в даних після 1991 р. пов'язана з перериванням надійних вимірювань на супутнику «Метеор-3» (08.1991—11.1994). З рис. 3 видно, що зменшення середньорічних значень ЗВО в атмосфері над Україною з 1970-х по 1990-ті рр. уповільнилось, і за даними ОМІ зменшення ЗВО є незначним, що підтверджується даними [3].

Різницю між змінами ЗВО протягом останніх трьох десятиліть та сезонними варіаціями наведено на рис. 4. У таблиці також наведено дати найбільш потужних вивержень вулканів наприкінці ІХХ — на початку ХХ ст., які, можливо, відповідають за збільшення амплітуди варіацій ЗВО в останні три десятиліття. Проаналізувавши час виверження вулканів та результати спостережень ЗВО, можна зробити висновок про зменшення вмісту озону в атмосфері, яке може бути спричинене потужними виверженнями вулканів [9].

На рис. 5 наведено усереднені за восьмирічний період значення ЗВО для чотирьох широтних поясів над територією України.

За даними довгострокових змін ЗВО (рис. 5) протягом 1979—2014 рр. спостерігається зменшення кількості озону на 18 ОД за 35 років, що складає близько 6 % втрат озону у стратосфері. Видно також широтну залежність значень ЗВО при переході від північних широт до південних. За усередненими даними значення різниці ЗВО між північним поясом і південним поясом складає близько -4 ОД. Це відповідає загальному широтному розподілу озону в середньоширотній області, але таку залежність ЗВО над територією України помічено вперше.

ОБГОВОРЕННЯ ТА ВИСНОВКИ

Проведено аналіз часових та просторових варіацій загального вмісту озону над територією України за даними супутникових інструментів TOMS та ОМІ, отриманих протягом останніх трьох десятиліть. За результатами обробки даних для широтних поясів сезонний максимум ЗВО припадає на зимово-весняні місяці (лютий — квітень), мінімум — на осінні (вересень — листопад). Для значень ЗВО спостерігаються два максимуми коефіцієнта відносної варіації *CRV* у січні та березні над всією територією України. Виявлено помітну широтну залежність значень ЗВО — зменшення вмісту озону при переході від північних широт до південних. За усередненими даними значення різниці ЗВО між північними районами і південними складає близько -4 ОД, що загалом відповідає широтному розподілу озону в середньоширотній області північної півкулі. Довгострокові зміни ЗВО відповідають зменшенню загального вмісту озону в 1970—1990-ті роки, але темп зменшення уповільнився на початку 2000-х рр.

Роботу виконано за підтримки проекту 16БФ051-02 Київського національного університету імені Тараса Шевченка, теми 369Кт «Аерозоль-UA» (NAS) Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2012—2016 рр., гранту Ф73/115-2016 Державного фонду фундаментальних досліджень. Дані супутникових спостережень загального вмісту озону інструментами TOMS та ОМІ з веб-сторінки Ozone Processing Team, NASA Goddard Space Flight Center <http://ozoneaq.gsfc.nasa.gov>.

1. Александров Э. Л., Израэль Ю. А., Кароль И. Л., Хргиан А. Х. Озонный щит Земли и его изменения. — Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 1992. — 288 с.
2. Дворецька В. Особливості динаміки загального вмісту озону в сучасний період // Наук. праці УкрНД-ГМІ. — 2012. — Вип. 262. — С. 257—271.
3. Ліпінський В. М., Дячук В. А., Бабіченко В. М. Клімат України. — Київ: Вид-во Раєвського, 2003. — С. 75—77.
4. Chandra S., Varotsos C., Flynn L. E. The mid-latitude total ozone trends in the Northern Hemisphere // Geophys. Res. Lett. — 1996. — 23, N 5. — P. 555—558. — doi:10.1029/96GL00305.

5. Chen L., Yu B., Chen Z., et al. Investigating the Temporal and Spatial Variability of Total Ozone Column in the Yangtze River Delta Using Satellite Data: 1978–2013 // *Remote Sens.* — 2014. — **6**. — P. 12527–12543. — doi:10.3390/rs61212527.
6. Evtushevsky O. M., Grytsai A. V., Klekociuk A. R., Milinevsky G. P. Total ozone and tropopause zonal asymmetry during the Antarctic spring // *J. Geophys. Res.* — 2008. — **113D**, N 7. — doi:10.1029/2008jd009881.
7. Evtushevsky O., Grytsai A., Milinevsky G. On the regional distinctions in annual cycle of total ozone in the northern midlatitudes // *Remote Sens. Lett.* — 2014. — **5**, N 3. — P. 205–212. — <http://dx.doi.org/10.1080/2150704X.2014.894653>.
8. Evtushevsky O., Milinevsky G., Grytsai A. Comparison of ground-based Dobson and satellite EP-TOMS total ozone measurements over Vernadsky station, Antarctica, 1996–2005 // *Int. J. Remote Sens.* — 2008. — **29**, N 9. — P. 2675–2683.
9. Flentje H., Claude H., Elste T., et al. The Eyjafjallajökull eruption in April 2010 — detection of volcanic plume using in-situ measurements, ozone sondes and lidar-ceilometer profiles // *Atmos. Chem. Phys.* — 2010. — **10**. — P. 10085–10092. — doi:10.5194/acp-10-10085-2010.
10. Grytsai A., Milinevsky G. SCIAMACHY/Envisat, OMI/Aura, and ground-based total ozone measurements over Kyiv-Goloseyev station // *Int. J. Remote Sens.* — 2013. — **34**, N 15. — P. 5611–5622.
11. Kravchenko V., Evtushevsky A., Grytsai A. Total ozone dependence of the difference between the empirically corrected EP-TOMS and high-latitude station datasets // *Int. J. Remote Sens.* — 2009. — **30**, N 15/16. — P. 4283–4294.
12. Lozitsky V., Grytsai A., Klekociuk A., Milinevsky G. Influence of planetary waves on total ozone column distribution in northern and southern high latitudes // *Int. J. Remote Sens.* — 2011. — **32**, N 11. — P. 3179–3186. — doi:10.1080/01431161.2010.541519.
13. Milinevsky G. P., Danylevsky V. O., Grytsai A. V. Recent developments of atmospheric research in Ukraine // *Adv. Astron. Space Phys.* — 2012. — **2**, N 2. — P. 114–120.
14. Wellemeyer C., Bhartia P. K., Taylor S., et al. Version 8 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) algorithm // *Proc. XX Quadrennial Ozone Symp.* / Ed. C. Zerefos. — 2004. — Vol. 1. — P. 635–636. — *Int. Ozone Comm.*, Athens. (https://ozoneaq.gsfc.nasa.gov/media/docs/toms_algor.pdf)

Стаття надійшла до редакції 20.01.17

REFERENCES

1. Aleksandrov Je. L., Izrajel' Ju. A., Karol' I. L., Hrgian A. H. The ozone shield Earth and its changes, 288 s. (Gidrometeoizdat, Sankt-Peterburg: 1992) [in Russian].
2. Dvoret's'ka V. Features of the dynamics of total ozone in modern times. *Nauk. pratsi UkrNDHMI*, Vyp. 262, 257–271 (2012). [in Ukrainian].
3. Lipins'kyj V. M., Diachuk V. A., Babicheko V. M. The climate of Ukraine, 75–77 (Vydavnytstvo Raievs'koho, Kyiv, 2003) [in Ukrainian].
4. Chandra S., Varotsos C., Flynn L. E. The mid-latitude total ozone trends in the Northern Hemisphere. *Geophys. Res. Lett.*, **23** (5), 555–558 (1996).
5. Chen L., Yu B., Chen Z., et al. Investigating the temporal and spatial variability of total ozone column in the Yangtze river delta using satellite data: 1978–2013. *Remote Sens.*, **6**, 12527–12543 (2014).
6. Evtushevsky O. M., Grytsai A. V., Klekociuk A. R., Milinevsky G. P. Total ozone and tropopause zonal asymmetry during the Antarctic spring. *J. Geophys. Res.*, **113** (D7) (2008).
7. Evtushevsky O., Grytsai A., Milinevsky G. On the regional distinctions in annual cycle of total ozone in the northern midlatitudes. *Remote Sens. Lett.*, **5** (N 3), 205–212 (2014).
8. Evtushevsky O., Milinevsky G., Grytsai A. Comparison of ground-based Dobson and satellite EP-TOMS total ozone measurements over Vernadsky station, Antarctica, 1996–2005. *Int. J. Remote Sens.*, **29** (N 9), 2675–2683 (2008).
9. Flentje H., Claude H., Elste T., et al. The Eyjafjallajökull eruption in April 2010 — detection of volcanic plume using in-situ measurements, ozone sondes and lidar-ceilometer profiles. *Atmos. Chem. Phys.*, **10**, 10085–10092 (2010).
10. Grytsai A., Milinevsky G. SCIAMACHY/Envisat, OMI/Aura, and ground-based total ozone measurements over Kyiv-Goloseyev station. *Int. J. Remote Sens.*, **34** (15), 5611–5622 (2013).
11. Kravchenko V., Evtushevsky A., Grytsai A. Total ozone dependence of the difference between the empirically corrected EP-TOMS and high-latitude station datasets. *Int. J. Remote Sens.*, **30** (15/16), 4283–4294 (2009).
12. Lozitsky V., Grytsai A., Klekociuk A., Milinevsky G. Influence of planetary waves on total ozone column distribution in northern and southern high latitudes. *Int. J. Remote Sens.*, **32** (11), 3179–3186 (2011).
13. Milinevsky G. P., Danylevsky V. O., Grytsai A. V. Recent developments of atmospheric research in Ukraine. *Adv. Astron. Space Phys.*, **2** (2), 114–120 (2012).

14. Wellemeyer C., Bhartia P. K., Taylor S., et al. Version 8 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) algorithm. Proc. XX Quadrennial Ozone Symp. (Ed. C. Zerefos), 1, 635–636 (2004). — Int. Ozone Comm., Athens. (https://ozoneaq.gsfc.nasa.gov/media/docs/toms_algor.pdf).

В. Ю. Могильчак¹, Г. П. Милиневский^{1, 2}

¹ Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко

^{1, 2} Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины, Киев

ВАРИАЦИИ ОБЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА В АТМОСФЕРЕ НАД ТЕРРИТОРИЕЙ УКРАИНЫ

Проанализированы пространственное и временное распределение общего содержания озона (ОСО) над территорией Украины (43.5...2.2°N, 22...42°E). Обнаружены кратко- и долгосрочные изменения на основе спутниковых наблюдений, проводимых в последние десятилетия (1979—2014 гг.) спектрометрами TOMS и OMI. Отмечено, что для краткосрочных (сезонных) изменений максимум ОСО приходится на весенние месяцы (март — апрель), минимум — на осенние (октябрь — ноябрь). Долгосрочные изменения ОСО соответствуют уменьшению ОСО с 1970-х по 1990-е гг., но темп снижения ОСО замедлился в начале XXI века. Обнаружены неоднородность пространственного распределения с широтой, а именно его уменьшение в направлении с севера на юг Украины.

Ключевые слова: озон, вариации, долгосрочные изменения, спутниковые наблюдения, спектрометры.

V. Y. Mogylychak¹, G. P. Milinevskiy^{1, 2}

¹ Taras Shevchenko National University of Kyiv

^{1, 2} Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

VARIATIONS OF TOTAL OZONE IN THE ATMOSPHERE OVER THE TERRITORY OF UKRAINE

In the paper, we analyze the spatial and temporal distribution of total ozone column (TOC) over the territory of Ukraine (43.5—52.2°N, 22—42°E). The presence of short- and long-term total ozone changes was detected based on satellite observations, conducted in the last decades (1979—2014) by spectrometers TOMS and OMI. It was noted that for short-term (seasonal) changes, the maximum of TOC falls on the spring months (March — April), the minimum one has been observed in the autumn (October — November). Long-term changes of TOC correspond to its decrease from the 1970s to the 1990s, but the rate of decline slowed down at the beginning of the 21st century. Heterogeneity of TOC spatial distribution with latitude was detected, that means TOC reduction in the direction from north to south of Ukraine.

Keywords: ozone variations, long-term changes, the satellite observation spectrometers.