

СИСТЕМА ОПЕРАТИВНОГО МОНІТОРИНГУ ЗА СТАНОМ ОЗОНОВОГО ШАРУ НАД ТЕРИТОРІЄЮ УКРАЇНИ ЗА СУПУТНИКОВИМИ ДАНИМИ

У статті описано систему оперативного моніторингу визначення загального вмісту озону з високим просторовим розділенням ($10 \times 10 \text{ км}^2$) на основі вимірювань з спектрофотометра GOME-2 з полярно-орбітального супутника Metop-A над територією України. Створено схему обробки оперативних супутникових даних, що розповсюджуються в загальному потоці даних EUMETCAST, що передбачає попередню обробку даних, інтерполяцію та побудову відповідних карт.

Ключові слова: супутник MetOp-A, прилад GOME-2, загальний вміст озону.

В статье описана система оперативного мониторинга определения общего содержания озона с высоким пространственным разрешением ($10 \times 10 \text{ км}^2$) на основе измерений с спектрофотометра GOME-2 с полярно-орбитального спутника Metop-A над территорией Украины. Была создана схема обработки оперативных спутниковых данных, которые передаются в общем потоке данных EUMETCAST, которая предусматривает обработку данных, интерполяцию и построение соответствующих карт.

Ключевые слова: спутник MetOp-A, прибор GOME-2, общее содержание озона.

The system of total ozone monitoring with a high spatial resolution of $10 \times 10 \text{ км}^2$ based on GOME-2 measurements from Metop - A satellite over Ukraine is described in the paper. The scheme of the processing of operational satellite data, which obtained from EUMETCAST data stream, which includes data processing, interpolation and maps generation, was developed.

Keywords: satellite MetOp-A, GOME-2, total ozone.

Вступ. Ультрафіолетове випромінювання Сонця, яке поглинається озоном, дає основний вклад у виділення тепла в тропосфері й стратосфері. Викликана природними або антропогенними причинами зміна розподілу озону (а разом з ними й деяких інших малих газових складових) може вплинути на тепловий баланс атмосфери, змінивши приплив енергії випромінювання Сонця в тропосфері та стратосфері, що може позначитися й на динаміці атмосфери, температурі поверхні Землі та на кліматі в цілому. Поглинання озоном короткохвильової сонячної радіації та випромінювання в інфрачервоній області спектра (9.6 мкм) служать найважливішими складовими радіаційного і термічного балансу атмосфери. Для побудови адекватних моделей озоносфери, прогнозування процесів, які протікають у ній, потрібні регулярні виміри концентрації молекул цього газу в різних шарах тропосфери й стратосфери.

Нові можливості для моніторингу озоносфери відкриває дистанційне зондування у видимому та інфрачервоному діапазонах радіохвиль. Тут зосереджені численні спектральні лінії молекул озону та інших газових складових (O_2 , H_2O , ClO , NO_2 , HNO_3 , HCN та ін.).

Сучасні супутникові оперативні вимірювання загального вмісту озону. Вимірювання ЗВО вже протягом тривалого часу проводяться супутниковими методами на підставі інтерпретації вимірювань відбивного

та розсіяного сонячного випромінювання в УФ ділянках спектру. На сьогодні оперативні вимірювання ЗВО проводяться з супутника AURA спектрометром OMI та з супутника MetOp-A спектрометром GOME-2 (Global Ozone Monitoring Experiment).

Прилад OMI [4] вимірює відбиту сонячну радіацію в ультрафіолетовій і видимій частині спектрального діапазону 270 - 500 нм, з використанням двох каналів із спектральним дозволом близько 0.5 нм, з просторовим дозволом в надирі 13 x 24 км².

Для інтерпретації цих вимірів OMI використовує алгоритм TOMS 8-ої версії [2]. У цьому алгоритмі використовуються дані вимірів випромінювання в декількох спектральних каналах УФ області (~310-360 нм) із спектральним дозволом ~1 нм.

Прилад GOME-2 [3,7] здійснює надирні виміри відбитого поверхнею Землі та розсіяного атмосферою сонячного випромінювання в широкому діапазоні спектру (240-790 нм) з спектральною здатністю (0.2-0.4 нм).

Широкий діапазон спектру й висока спектральна здатність прилада GOME-2 дозволяють використати для відновлення загального вмісту озону алгоритм DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy) - це метод, який заснован на диференціальному поглинанні сонячного або інфрачервоного випромінювання атмосферними газами [5,6]. Виміряні спектри поглинання дають можливість ідентифікувати гази й отримувати інформацію про їх концентрацію.

2. *Опис системи оперативного моніторингу за загальним вмістом озону над територією України.* В УкрГМІ з 2006 р. функціонує система по отриманню та обробці оперативних супутникових даних, які передаються по системі EUMETCAST, що дозволяє одержувати дані з полярно-орбітального європейського супутника MetOp-A, на якому встановлено спектрометр GOME-2.

Система EUMETCAST [1] заснована на поширенні оперативної цифрової супутникової інформації через систему телекомунікаційних супутників. Для цього в головний телекомунікаційний центр, який розташований у Німеччині, дані передаються по широкосмуговим каналам зв'язку зі станцій прийому первинної інформації, як з геостационарних, так і з полярно-орбітальних супутників. Вихідні супутникові дані оперативно обробляються в німецькому аерокосмічному центрі (DLR) та розповсюджуються в загальному потоці даних. Затримка в часі між реальними вимірами та отриманими даними, які вже оброблені, становить не більше двох годин. Обробка оперативних даних і поширення споживачам кінцевої продукції виконується в рамках проекту ОЗМ SAF [9]. Система оперативного моніторингу за складом загального вмісту озону за супутниковими даними над територією України складається з кількох модулів, які представлено на рис.1.

Із загального потоку даних, що поширюються за системою Eumetcast, дані загального вмісту озону вибираються за іменами файлів, в яких

вказано час проведення вимірів. Відповідно до орбіти супутника Metop-A територія України повністю покривається вимірами, які зроблено з 7:00 до 9:00 GMT. Для того, щоб мати оперативну передачу інформації через систему EUMETCAST, дані передаються у вигляді невеликих за розмірами файлів. Таким чином, для відновлення поля загального вмісту озону над територією України потрібно близько 30 файлів. Попередня обробка даних полягає в їх розпаковуванні, тобто у виділенні даних про загальний вміст озону та їх географічних координат і об'єднанні розпакованих даних в один файл. На цьому ж етапі перевіряється повнота вхідних даних шляхом нанесення географічних координат кожної точки супутникового виміру загального вмісту озону на карту України (рис.2) Як вже наголошувалося раніше, виміри загального вмісту озону за супутниковими даними дискретні та розподілені над територією України нерівномірно (рис.2), тобто вони представлені двома послідовними смугами супутника. У зв'язку з цим для представлення даних на рівномірній сітці було реалізовано процедуру просторової інтерполяції.



Рис.1. Система оперативного моніторингу загального вмісту озону над Україною, яка заснована на вимірах з супутника METOP-A

В УкрГМІ традиційно використовується для представлення оброблених супутникових даних картографічна проекція Plate Carree [8] з просторовим кроком по широті та довготі близько 10 км. Як вагові коефіцієнти для відновлення загального вмісту озону у вузлах сітки використовувалися значення обернено пропорційні до відстані від вузла сітки до точки виміру, притому враховувалися найближчі чотири виміри,

тобто чим ближче вимір до вузла сітки, тим більше його вплив на значення загального вмісту озону у вузлі.

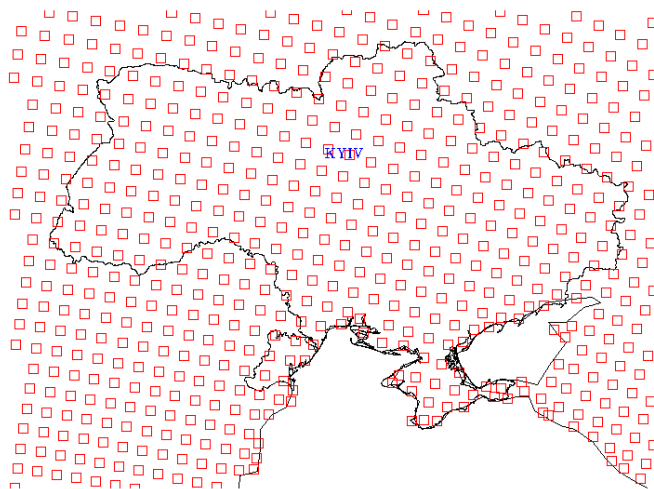


Рис.2. Географічне розташування супутникових вимірів ЗВО над територією України

Таким чином, значення ZBO_i в i – ом вузлі сітки виражалось наступною формулою:

$$ZBO_i = \sum_{j=1}^4 ZBO_j * \lambda_j, \quad (1)$$

де ZBO_j – загальний вміст озону в чотирьох найближчих до i – ому вузлу сітки точках супутникових вимірювань ($j=1,..4$);

$$\lambda_j = \frac{1/D_j^2}{\sum_{j=1}^4 1/D_j^2}, \text{ де } D_j - \text{відстань від точки вимірювання ЗВО до вузла}$$

сітки

У результаті обробки даних формуються два типи вихідних файлів – ASCII файл, який використовується в подальшій статистичній обробці і файл у вигляді зображень карт з розподілом ЗВО над територією України (рис.3).

3. *Валідація супутникових та наземних вимірювань.* Для проведення валідації супутникових та наземних вимірювань ЗВО було здійснено такі кроки:

- проведення порівняння даних вимірювань ЗВО між еталонним спектрофотометром Добсона та двома супутниковими приладами GOME-2(MetOp) та OMI (AURA) над м. Києвом, де встановлено цей прилад;
- проведення порівняльного аналізу оцінки якості наземних даних ЗВО усіх станцій озонметричної мережі України з супутниковими даними GOME-2.

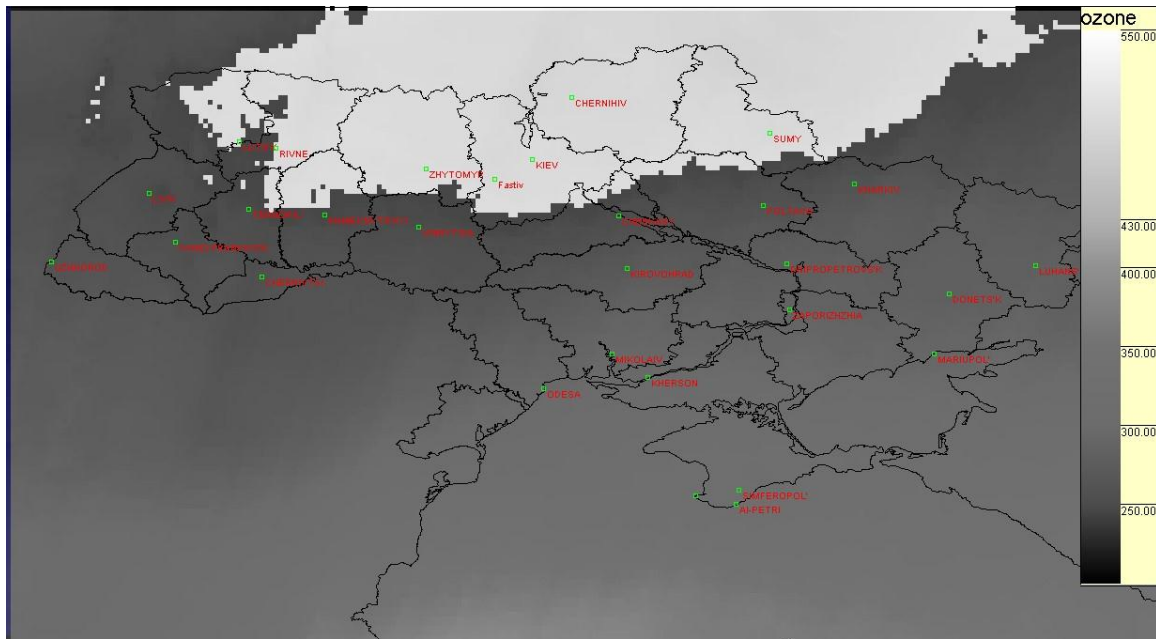


Рис. 3. Карта розподілу загального вмісту озону над територією України

За статистичні оцінки порівняння вимірювань було використано такі:

- Відносна похибка

$$\Delta = [\sum \text{abs}(3\text{VO}_{\text{sat}}^i - 3\text{VO}_D^i) / 3\text{VO}_D^i] / N, \quad (2)$$

де $3\text{VO}_{\text{sat}}^i$ - супутникові вимірювання, 3VO_D^i - вимірювання еталонним спектрофотометром Добсона, N - число вимірювань.

- Коефіцієнт кореляції

$$R = [\sum (3\text{VO}_{\text{sat}}^i - 3\text{VO}_{\text{sat}})(3\text{VO}_D^i - 3\text{VO}_D)] / [(\sum (3\text{VO}_{\text{sat}}^i - 3\text{VO}_{\text{sat}})^2)^{1/2} (\sum (3\text{VO}_D^i - 3\text{VO}_D)^2)^{1/2}] \quad (3)$$

- Арифметичне відхилення

$$\text{Diff} = (3\text{VO}_D^i - 3\text{VO}_{\text{sat}}^i) / N \quad (4)$$

3.1. Порівняльний аналіз супутникових вимірювань ЗВО з еталонним спектрофотометром Добсона

Порівняння наземних вимірювань ЗВО, що проводилися в Головній астрономічній обсерваторії НАН України в Києві за допомогою спектрофотометра Добсона з супутниковими вимірюваннями здійснювалося за період з квітня по грудень 2011 року. Значення ЗВО відповідали 11⁰⁰ годинам UTC. Порівняльний аналіз відповідних даних, які наведено в табл.1, показав, що відносна похибка не перевищує 2.3%, коефіцієнт кореляції -0.94 - 0.95 та арифметичне відхилення становить від 7 до 9 од.Добсона, що дозволяє стверджувати, що вимірювання супутниковими приладами GOME-2 та OMI близькі до реалістичних, тобто зіставні з даними спектрофотометра Добсона. Виходячи з значень та Diff , кращі результати отримано для GOME-2. Необхідно відмітити, що для

супутникових вимірювань, незалежно від приладу, точність практично однакова на всьому діапазоні зміни ЗВО (Рис.4-5).

Таблиця 1.

Статистичні характеристики узгоджень наземних (спектрофотометра Добсона) і супутникових вимірювань загального вмісту озону

Станція	$\Delta, \%$		Diff, од. Добсона		R	
	GOME-2	OMI	GOME-2	OMI	GOME-2	OMI
Київ	2	2.3	7	9	0.94	0.95

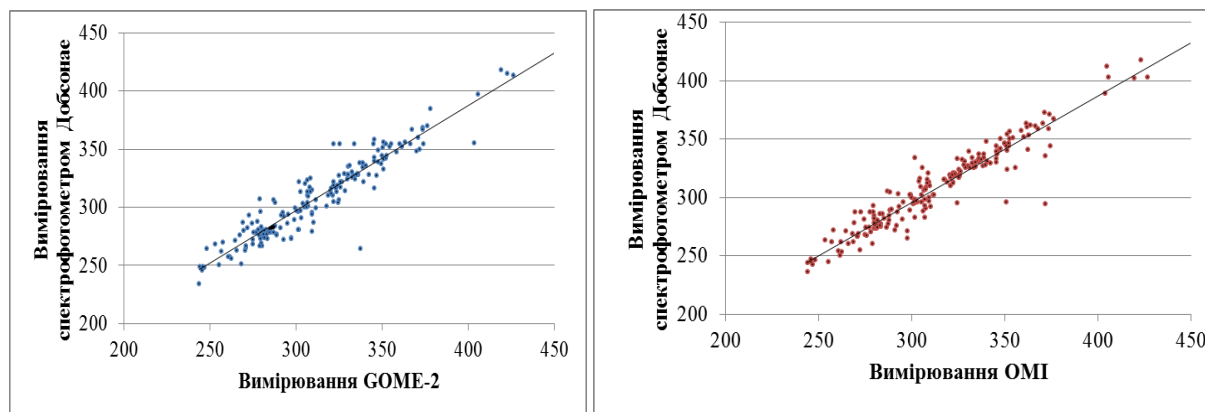


Рис.4,5. Порівняння вимірювань ЗВО спектрофотометром Добсона та супутниковим приладом GOME-2 над м. Київ; порівняння вимірювань ЗВО спектрофотометром Добсона та супутниковим приладом OMI над м. Київ

3.2. Порівняльний аналіз наземних та супутникових (GOME-2) даних на озонотричних станціях України (Київ, Бориспіль, Львів, Феодосія (Карадаг)).

Як показав попередній порівняльний аналіз, що супутникові дані дають реалістичні дані ЗВО, тому ці дані придатні для використання в подальшому аналізі якості отриманих даних з усіх наземних озонотричних станцій України (Київської, Бориспільської, Львівської та Карадагської). Для цього було розраховані відповідні статистичні характеристики, що наведено в табл.2.

Аналіз цих характеристик показує, що найточніші, тобто реалістичні є дані, що отримуються на станції Київ (УкрГМІ), де практично відсутні систематичні похибки ($Diff=5.0$). Найгірші дані, з погляду точності, спостерігаються на станції Львів, де відносна похибка сягає майже 30%, а $Diff=-88.7$, що показує значну систематичну похибку, тобто завищені значення ЗВО, що фіксуються наземним приладом. На станції Бориспіль також відмічається значна систематична похибка $Diff=-35.0$, що також указує на завищені значення ЗВО, що вимірюються наземними приладами та можуть розглядатися як нереалістичні. Досить великі значення

відносної похибки та коефіцієнта кореляції з супутниковими даними на станції Карадаг можуть розглядатися відносно точними, незважаючи на наявну систематичну похибку $Diff = -18.9$.

Таблиця 2.

Статистичні характеристики узгоджень наземних і супутникових вимірювань загального вмісту озону озонотричної мережі України

Станція	$\Delta, \%$	$Diff, \text{од.Добсона}$	R
Київ	4	5.0	0,91
Бориспіль	11	-35.0	0,93
Львів	29	-88.7	0,81
Карадаг	6	-18.9	0,94

4. Висновки. У 2010 р. в УкрГМІ було засновано систему по оперативному отриманню ЗВО на підставі супутникових даних спектрометра GOME-2. Оперативна супутникова система моніторингу загального вмісту озону складається з наступних модулів: отримання даних ЗВО, попередня обробка даних, просторова інтерполяція даних, архівація даних, статистична обробка даних та складання карт ЗВО.

Було проведено порівняння супутникових даних ЗВО з даними еталонного спектрофотометра Добсона, що показало хороше співвідношення між ними (табл.1).

Для оцінки якості наземних даних ЗВО було проведено порівняльний аналіз усіх станцій озонотричної мережі України з супутниковими даними GOME-2. Аналіз показав хороше співвідношення супутникових та наземних даних на Київській і Карадагській станціях ($\Delta, \%$ - 4 для Києва, 6 - для Карадагу; R, % - 0,91 для Києва, 0,94 - для Карадагу). Спостерігається систематичне завищення даних на Львівській і Бориспільській станціях, що не дозволяє визначати їх реалістичними.

Використані джерела:

1. Кривобок А.А. Новые возможности приема цифровой спутниковой информации через систему EumetCast, *Наук.пр. УкрНДГМІ*: - 2008, вип.257
2. Charles G. Wellemeyer, Pawan K. Bharhia Version 8 Total ozone mapping spectrometer (TOMS) algorithm
3. J. Callies, E. Corpaccioli, M. Eisinger, A. Hahne & A. Lefebvre GOME-2 – Metop's Second-Generation Sensor for Operational Ozone Monitoring
4. M. Kroon, I. Petropavlovskikh, R. Shetter, S. Hall, K. Ullmann, J. P. Veefkind, R. D. McPeters, E. V. Browell, and P. F. Levelt OMI total ozone column validation with Aura-AVE CAFS observations *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, VOL. 113, 2008
5. U. Platt. Differential optical absorption spectroscopy (DOAS) // *Air Monitoring by Spectroscopic Techniques Chemical Analysis Series* / Ed. Seegrift M. John Wiley and Sons, 1994. V. 127. P. 27–84.
6. <http://atmos.ucla.edu>
7. <http://iup.uni-bremen.de/gome/gomeinst.html>
8. <http://maps.peterrobins.co.uk>
9. <http://o3msaf.fmi.fi>