

## ПЕРЕХІД ВІД НОМОГРАМИ ДО АНАЛІТИЧНОГО РОЗРАХУНКУ ЗАГАЛЬНОГО ВМІСТУ ОЗОНУ, ВИМІРЯНОГО ПРИЛАДОМ М-124

Подано методику автоматизації процесу розрахунку загального вмісту озону (ЗВО) під час вимірювання озонметром М-124 шляхом переходу від номограми до аналітичного розрахунку. Отримано універсальний і повністю автоматизований алгоритм розрахунку ЗВО, що пройшов тестування та був перевірений на двох приладах М-124. Зазначений алгоритм можна буде адаптувати для інших приладів цього типу.

**Ключові слова:** загальний вміст озону (ЗВО), номограма, аналітичний розрахунок, висота Сонця, коефіцієнти.

### Вступ

На сьогодні методика проведення спостережень за загальним вмістом озону на станціях, оснащених приладами М-124 з використанням номограм, багато в чому є застарілою. Така методика розрахунків несе в собі не тільки втрату часу, але й наявність похибок, що пов'язані з візуальним зняттям даних, оскільки більшість номограм мають непрезентабельний вигляд (рис. 1). Однак прилади М-124 все ж використовуються в мережі, тому одним з основних завдань стає повна або часткова автоматизація процесу розрахунків. Створення аналітичного вигляду розрахунку ЗВО допоможе виконати низку **актуальних задач**: зменшити похибки під час визначення вмісту озону та інтерпретації даних; вивести формулу розрахунку; створити окремі програмні модулі визначення ЗВО; вирішити значну кількість задач, пов'язаних з методикою вимірювання.

### Виклад основного матеріалу

Процес вимірювання ЗВО полягає в знятті показників двох світлофільтрів та розрахунку залежності  $K_T K_H \frac{I_1}{I_2}$ , де  $K_H$  – коефіцієнт стану неба біля диска Сонця,  $K_T$  – температурний коефіцієнт озонметра,  $I_1$  та  $I_2$  – покази першого й другого світлофільтрів [1, 2, 4-7]. Повна формула залежності  $K_T K_H \frac{I_1}{I_2}$  виглядає таким чином:

$$K_H K_T \frac{I_1}{I_2} = \frac{K_S \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \omega_{1\lambda} I_{o\lambda} 10^{-\alpha_\lambda \mu X - \beta_\lambda m - \delta_\lambda m'} d\lambda}{\int_{\lambda_3}^{\lambda_4} \omega_{2\lambda} I_{o\lambda} 10^{-\alpha_\lambda \mu X - \beta_\lambda m - \delta_\lambda m'} d\lambda}, \quad (1)$$

де  $I_n$  – показ приладу, мкА;  $K_S$  – коефіцієнт прив'язки, який визначають під час калібрування (повірки) озонметра за даними сонячних спостережень;  $\omega_{n\lambda}$  – спектральна чутливість в інтервалі довжини хвиль від  $\lambda_{n1}$  до  $\lambda_{n2}$ ;  $I_{o\lambda}$  – енергетична освітленість на верхній межі атмосфери, Вт/см<sup>2</sup>нм;  $\alpha_\lambda$  – показник поглинання озону, см<sup>-1</sup>;  $\beta_\lambda$  – показник релєївського послаблення атмосфери;  $\delta_\lambda$  – показник аерозольного послаблення;  $\mu$  та  $m$  – озонова та повітряна оптичні маси ( $m' = m$ ) відповідно.

Отримане співвідношення  $K_T K_H \frac{I_1}{I_2}$  із формули (1) переводиться в значення ЗВО (о. Д.). Для цього використовуються номограми (рис. 1), де по вісі  $X$  відкладено висоти Сонця ( $H_S$ ), по вісі  $Y$  – співвідношення  $K_T K_H \frac{I_1}{I_2}$  (позначимо  $K$ ).

Криві зі значеннями ЗВО залежать від висоти Сонця та коефіцієнта  $K$ . Тож застосування номограми передбачає повністю візуальний процес. Як видно з рис. 1, більшість номограм мають непрезентабельний вигляд, а тому під час визначення показників ЗВО можливе допущення значних похибок.

Номограми розраховуються в методичному центрі Головної геофізичної обсерваторії ім. А.І. Воейкова, що розташовується в с. Воейкове (Ленінградська обл., Росія) під час повірки озонметрів. Оскільки методичний центр надає озонметричним станціям тільки готові номограми, без алгоритмів їх розрахунку, на сьогоднішньому етапі важливо мати не саму номограму, а формулу, за якою буде розраховуватися ЗВО, що дасть змогу перейти на використання відповідного програмного забезпечення.

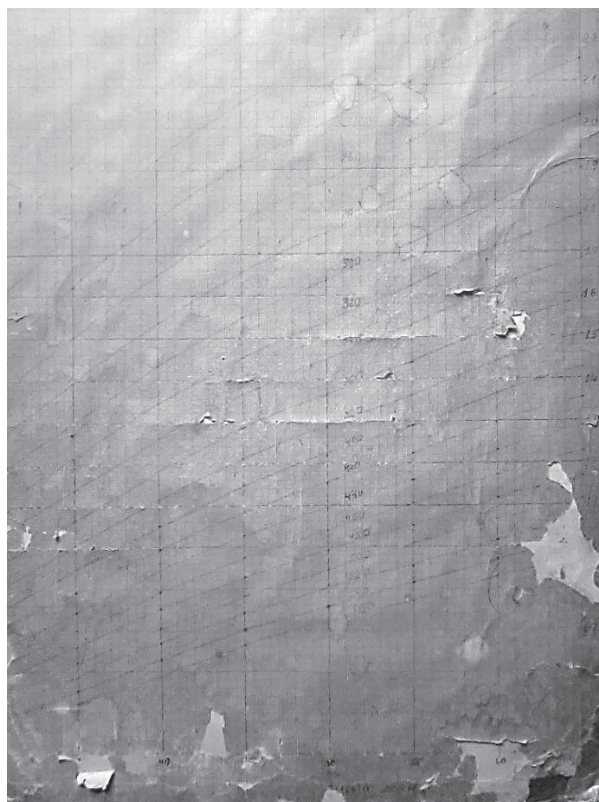
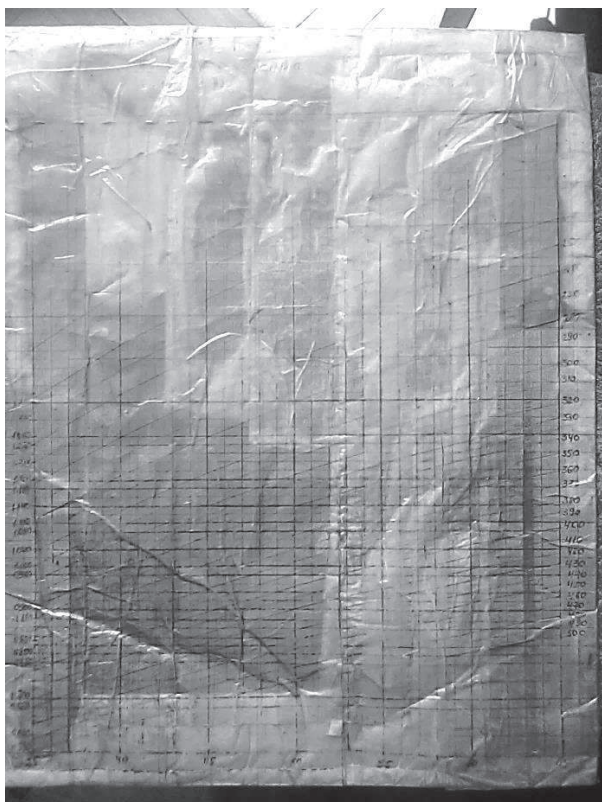


Рис. 1. Номограми розрахунку ЗВО [3]

Для виведення формули, яка б точно поєднувала результати вимірів світлофільтрами та ЗВО, розглянемо спочатку залежності між коефіцієнтом  $K$ , висотою Сонця  $H_s$  та ЗВО (рис. 2). Графік залежностей побудовано на основі [3].

ЗВО залежить від коефіцієнта  $K$ , що є результатом вимірів за приладом, та висоти Сонця. Однакові показники світлофільтрів зі збільшенням висоти Сонця вказують і на більший вміст озону в атмосфері. Отримані залежності дозволяють уже напямую шукати взаємозв'язок між усіма відомими (висота Сонця, виміри) та невідомими (ЗВО) величинами.

Таким чином, знайдемо залежності між коефіцієнтом  $K$  та ЗВО. Найпростіший вигляд кривих та найлегший їх опис можливий під час переходу до показника  $K^{-1}$  (рис. 3).

Із зображеного графіка взаємозв'язку  $K^{-1}$  та ЗВО можна перейти до процесу виведення формули.

Як видно з рис. 3, кожна крива описується квадратичним рівнянням  $y = ax^2 + bx + c$ . За допомогою вбудованих функцій Microsoft Office Excel було побудовано тренди та знайдено рівняння, що пов'язали коефіцієнт  $K^{-1}$  та ЗВО.

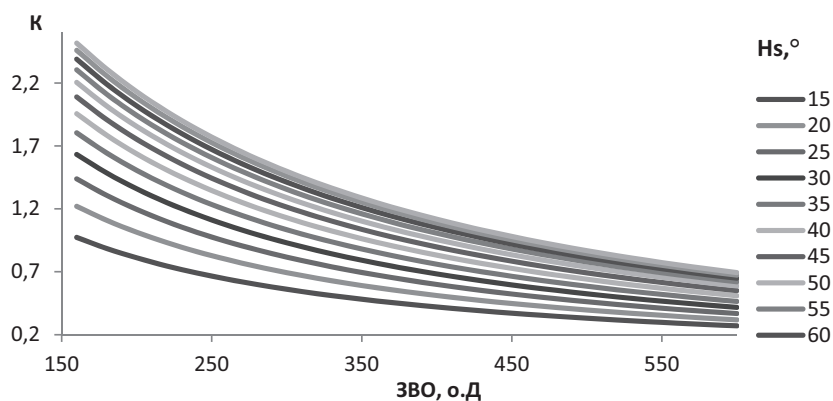


Рис. 2. Графік взаємозв'язку ЗВО, висоти Сонця та коефіцієнта  $K$

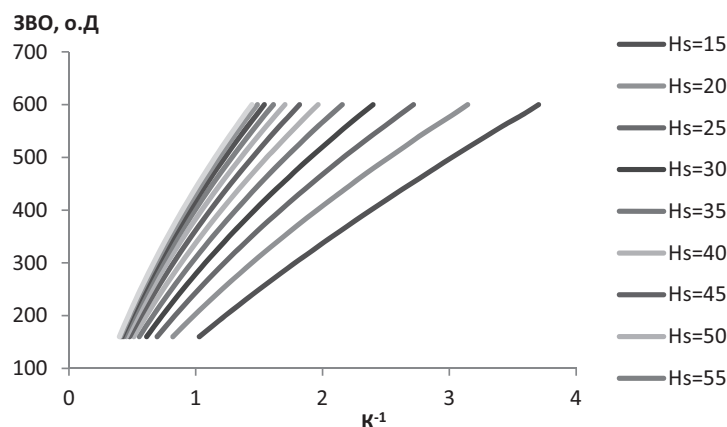


Рис. 3. Графік взаємозв'язку ЗВО та показника  $K^{-1}$

Формула (2) показує вигляд залежності для висоти Сонця  $15^\circ$ .

$$X = -9.9001 \cdot \left(\frac{1}{K}\right)^2 + 210.21 \cdot \left(\frac{1}{K}\right) - 44.158 \quad (2)$$

за  $H_s=15$ .

За таким же методом розраховано рівняння для всіх висот Сонця, коефіцієнти яких наведено в табл. 1. Зважаючи на те, що рівняння однотипні, наступним кроком стало визначення залежності коефіцієнтів рівняння ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ) та висоти Сонця.

На відміну від попередніх рівнянь, залежності коефіцієнтів  $a$ ,  $b$ ,  $c$  від висоти Сонця не описуються однотипними рівняннями (3). Так, коефіцієнт  $a$  має лінійну залежність від висоти Сонця (рис. 4), коефіцієнт  $b$  – описується поліноміальним трендом другого порядку (рис. 5), коефіцієнт  $c$  – поліноміальним трендом третього порядку (рис. 6).

Таблиця 1  
Розраховані коефіцієнти  $a$ ,  $b$  та  $c$  за різних висот Сонця

a	b	c	Hs
-9,9001	210,21	-44,158	<b>15</b>
-18,459	260,51	-38,769	<b>20</b>
-27,685	309,51	-39,174	<b>25</b>
-37,56	356,73	-41,75	<b>30</b>
-48,063	402,01	-45,321	<b>35</b>
-58,301	443,4	-48,63	<b>40</b>
-68,965	482,83	-52,526	<b>45</b>
-78,897	517,96	-55,895	<b>50</b>
-88,566	550,17	-59,295	<b>55</b>
-97,403	578,22	-62,22	<b>60</b>
-104,93	601,65	-64,52	<b>65</b>
-111,56	621,48	-66,652	<b>70</b>

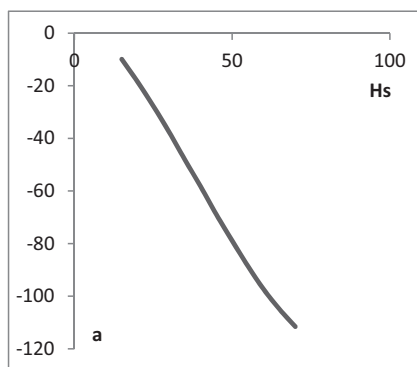


Рис. 4. Залежність коефіцієнта  $a$  від  $H_s$

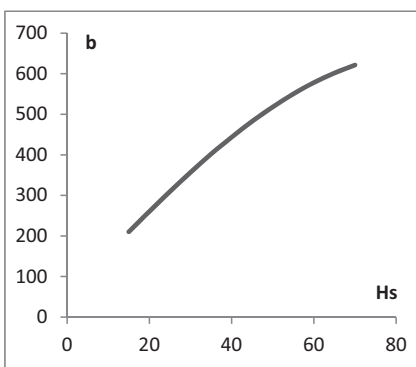


Рис. 5. Залежність коефіцієнта  $b$  від  $H_s$

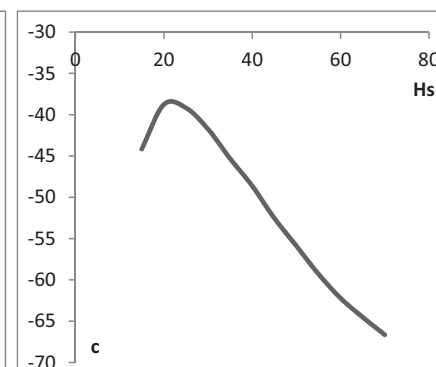


Рис. 6. Залежність коефіцієнта  $c$  від  $H_s$

$$\begin{aligned}
 a &= a_1 \cdot H_s + a_2 \\
 b &= b_1 \cdot H_s^2 + b_2 \cdot H_s + b_3 \\
 c &= c_1 \cdot H_s^3 + c_2 \cdot H_s^2 + c_3 \cdot H_s + c_4
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

У результаті підстановки коефіцієнтів з рівнянь (3) у рівняння (2), було виведено формулу обчислення ЗВО (4):

$$\begin{aligned}
 X &= a \cdot K^{-2} + b \cdot K^{-1} + c, \\
 \text{де } a &= -1,918 \cdot H_s + 18,99 \\
 b &= -0,0632 \cdot H_s^2 + 12,948 \cdot H_s + 27,316, \\
 c &= -0,0005 \cdot H_s^3 - 0,07 \cdot H_s^2 + \\
 &\quad + 2,4217 \cdot H_s - 64,951.
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Для перевірки правильності формули (4) було взято 276 значень ЗВО з номограми [3] для різних висот Сонця та розраховано значення озону за формулою. Як видно з табл. 2, коефіцієнти кореляції між аналітично розрахованими та взятими з номограми значеннями ЗВО за різних висот Сонця є практично ідентичними.

Таблиця 2  
Коефіцієнти кореляції між аналітично розрахованими та взятими з номограми значеннями ЗВО за різних висот Сонця

<b>Hs</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>30</b>	<b>35</b>	<b>40</b>
<b>r</b>	0,999987	0,99996	0,999947	0,99995	0,999955	0,999948
<b>Hs</b>	<b>45</b>	<b>50</b>	<b>55</b>	<b>60</b>	<b>65</b>	<b>70</b>
<b>r</b>	0,999946	0,999948	0,999951	0,999954	0,999954	0,999951

Таким чином, виведення формули (4) дає можливість частково автоматизувати розрахунок значення ЗВО, а саме, визначати вміст одразу після зняття показників з приладу М-124 без використання номограми.

У результаті було написано програмне забезпечення (рис. 7), що дозволяє отримати показники ЗВО. Вхідними даними для початку розрахунків є такі:

- дата і час спостереження, за якими розраховується висота Сонця та виводиться на екран у відповідному вікні програми;
- показники вимірювання, тобто показники першого та другого світлофільтрів, яких було знято під час проведення спостережень;
- коефіцієнт хмарності (коефіцієнт стану неба), що лежить у межах від 1 до 5 та характеризує кількість та тип хмарності над місцем проведення спостережень. Коефіцієнт беремо із таблиць настанови [2];
- температура приладу, що знімається безпосередньо з ознометра та виводиться на відповідну шкалу під час проведення спостережень.

У результаті внесення введених даних та розрахунків програма виводить на екран значення ЗВО.

Дане програмне забезпечення проходило тестування на озонотричній станції «Київ» № 33344 протягом травня 2014 р. ЗВО вимірювався фільтровим ознометром М-124 № 329 та розраховувався за номограмою [3] та аналітично. Основні результати представлено в табл. 3.

Таблиця 3  
Відхилення в розрахунках ЗВО під час порівняння результатів за номограмою [3] та формулою (травень 2014)

	<b>Max</b>	<b>Min</b>	<b>Середнє</b>
<b>о. Д.</b>	4	-4	-0,60795
<b>%</b>	1,12	-1,04	-0,16



Рис. 7. Зовнішній вигляд програмного забезпечення розрахунку ЗВО

Отриману методику було протестовано й на іншому приладі М-124 № 168 та знайдено відповідні коефіцієнти. Результати тестування моделі розрахунку ЗВО показали високу точність та симетричність, максимальні похибки якої дорівнюють приблизно 1 %, що повністю входить у межі допустимих похибок вимірювання озону приладом М-124. Однією з причин максимальних та мінімальних похибок може бути саме неточність візуального зняття даних.

Оскільки сьогодні існують проблеми не тільки прямих задач з визначенням ЗВО, а й обернених (наприклад, наявності точного механізму повірки приладів), на думку автора, цю методику можна буде використовувати і в разі знаходження поправочних коефіцієнтів. Дослідження в цьому напрямку вже розпочалися, проте вони потребують подальшого поглиблення й детального вивчення.

\* \*

1. Гуцин Г.П., Виноградова Н.Н. Суммарный озон в атмосфере. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 280 с.
2. Настанова гідрометеорологічним станціям і по-стам. Вип. 13. Спостереження за загальним вмістом озону. Офіційне видання. – К.: Державна гідрометеорологічна служба, 2008. – 28 с.
3. Номограмма для обработки измерений ОСО по зениту. М-124 № 329. Рассчитана 22.06.99 (без учёта аэрозоля).
4. Озонометр М-124. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. ЦКБ ГМП. – Обнинск, 1983. – 54 с.
5. Перов С.П., Хргиан А.Х. Современные проблемы атмосферного озона. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 288 с.
6. Хргиан А.Х. Физика атмосферного озона. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 292 с.
7. Хргиан А.Х., Кузнецов В.И. Проблема наблюдений и исследований атмосферного озона. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1981. – 216 с.

Український гідрометеорологічний інститут, Київ

## Висновки

Створено аналітичний вигляд розрахунку ЗВО та знайдено коефіцієнти. Результатом тестування моделі є висока точність та симетричність, похибки якої не перевищують 1 %. Створена методика дає можливість використовувати цей аналітичний розрахунок як у разі визначення ЗВО «вручну», так і на будь-якому рівні автоматизації. Було створено програмне забезпечення, що дозволяє отримувати показники ЗВО без використання номограм. За допомогою методики можна вирішувати не тільки прямі задачі визначення озону, а й перейти до зворотних задач, що на сьогодні є актуальними.

## М.В. Савенец

### Переход от номограммы к аналитическому расчёту общего содержания озона, измеренного прибором М-124

*Представлено методику автоматизации процесса расчёта общего содержания озона (ОСО) во время измерений озонометром М-124 путём перехода от номограммы к аналитическому расчёту. Получен универсальный и полностью автоматизированный алгоритм расчёта ОСО, который прошёл тестирование и был проверен на двух приборах М-124. Указанный алгоритм может быть адаптирован к другим приборам данного типа.*

**Ключевые слова:** общее содержание озона (ОСО), номограмма, аналитический расчёт, высота Солнца, коэффициенты.

## M.V. Savenets

### Transition from the nomogram to analytical calculation of total ozone column measured by M-124 instrument

*There was given the method of total ozone content's (TOC) automated calculations during measurements by M-124 ozonometer by the transition from nomogram to analytical calculations. Algorithm for TOC calculate, which is multipurpose and completely automatic, were obtained. Algorithm was tested and was checked on two M-124 instruments. Shown algorithm can be adapted for other such type's instruments.*

**Keywords:** total ozone (TO), nomogram, analytical calculations, sun's height, coefficients.