

УДК 523.9-046.55:681.586-024.24

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2023-3-5>

Володимир МИСЛІНЧУК

кандидат педагогічних наук, доцент, завідувач кафедри фізики, астрономії та методики викладання, Рівненський державний гуманітарний університет, вул. Степана Бандери, 12, м. Рівне, Україна, 33017

ORCID ID: 0000-0002-7629-4215

SCOPUS-AUTHOR ID: 57745554400

Валентин СІДЛЕЦЬКИЙ

кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізики, астрономії та методики викладання, Рівненський державний гуманітарний університет, вул. Степана Бандери, 12, м. Рівне, Україна, 33017

ORCID ID: 0000-0003-3293-1195

SCOPUS-AUTHOR ID: 57202033265

Павло ШИГОРІН

кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри теоретичної та комп'ютерної фізики імені А. В. Свідзинського, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі, 13, м. Луцьк, Україна, 43025

ORCID ID: 0000-0003-2396-8041

SCOPUS-AUTHOR ID: 36024496600

Богдан НЕЧИПОРУК

кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізики, астрономії та методики викладання, Рівненський державний гуманітарний університет, вул. Степана Бандери, 12, м. Рівне, Україна, 33017

ORCID ID: 0000-0001-6206-7997

SCOPUS-AUTHOR ID: 6506540077

Бібліографічний опис статті: Мислінчук, В., Сідлецький, В., Шигорін, П., Нечипорук, Б. (2023). Реалізація теоретичної моделі визначення величини потоку сонячної радіації на основі сучасних модульних датчиків. *Фізика та освітні технології*, 3, 37–43, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2023-3-5>

РЕАЛІЗАЦІЯ ТЕОРЕТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВИЗНАЧЕННЯ ВЕЛИЧИНИ ПОТОКУ СОНЯЧНОЇ РАДІАЦІЇ НА ОСНОВІ СУЧАСНИХ МОДУЛЬНИХ ДАТЧИКІВ

Дослідження енергетичних характеристик сонячного випромінювання – актуальна проблема сучасної астрономії. Їх точні та стабільні вимірювання відіграють вирішальне значення як для встановлення енергетичного балансу, який визначає клімат Землі, так і для можливостей вивчення причин його зміни. Інтенсивність сонячної радіації кількісно оцінюють сонячною сталою – сумарним потоком сонячного випромінювання, що проходить за одиницю часу через одиничну площу, орієнтовану перпендикулярно до потоку, на відстані однієї астрономічної одиниці від центру Сонця зовні земної атмосфери.

Розділ астрономії, в якому вивчається енергія, що випромінюється Сонцем, поверхнею Землі та її атмосферою називається актинометрією, а прилади для вимірювання різних видів радіації – актинометрами. На основі 12 V LED Display Thermostat Control Instrument Temperature Sensor виготовлено прилад для вимірювання величини потоку сонячної радіації – актинометр.

Показано, що вимірювання кількості теплоти, яку отримує на поверхні Землі одинична площа за одиницю часу (за фіксованих розмірів складових робочих частин актинометра) може бути визначено із співвідношення: $\sigma_0 = 1242 \cdot \Delta T / t$. За допомогою саморобного актинометра експериментально визначено кількість теплоти, яка отримується на поверхні Землі одиничною площею за одиницю часу. Дані експериментальних досліджень наступні: при висоті Сонця $\approx 30^\circ$ над горизонтом $\bar{\sigma}_0^*(1) = 664,23$ (Вт/м²); при висоті Сонця $\approx 40^\circ$ над горизонтом $\bar{\sigma}_0^*(2) = 788,51$ (Вт/м²); при висоті Сонця $\approx 50^\circ$ над горизонтом $\bar{\sigma}_0^*(3) = 860,44$ (Вт/м²).

У припущенні рівномірності розсіювання сонячного випромінювання в атмосфері Землі по всій її товщині та напрямках, визначено, що на кожний кілометр земної атмосфери зменшення величини σ_0 становить $\sigma_0 / 1 = 0,7146$ (Вт/(м²·км)). Оцінено значення сонячної сталої за межами земної атмосфери, яке становить $\bar{\sigma}_0 = 1309,87$ (Вт/м²). Отримане значення з похибкою $\varepsilon = 4,2\%$ співпадає з експериментальними вимірюваннями сонячної сталої науковими установами.

Ключові слова: модульний датчик температури, актинометр, сонячна радіація, сонячна стала.

Volodymyr MYSLINCHUK

Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Head at the Department of Physics, Astronomy and Teaching Methods, Rivne State University of the Humanities, 12 Stepan Bandera Str., Rivne, Ukraine, 33017

ORCID ID: 0000-0002-7629-4215

SCOPUS-AUTHOR ID: 57745554400

Valentyn SIDLETSKYI

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor at the Department of Physics, Astronomy and Teaching Methods, Rivne State University of the Humanities, 12 Stepan Bandera Str., Rivne, Ukraine, 33017

ORCID ID: 0000-0003-3293-1195

SCOPUS-AUTHOR ID: 57202033265

Pavlo SHYGORIN

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor at the Department of Theoretical and Computer Physics named by A. V. Svidzynskyi, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13, Volya ave., Lutsk, Ukraine, 43025

ORCID ID: 0000-0003-2396-8041

SCOPUS-AUTHOR ID: 36024496600

Bohdan NECHYPORUK

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor at the Department of Physics, Astronomy and Teaching Methods, Rivne State University of the Humanities, 12 Stepan Bandera Str., Rivne, Ukraine, 33017

ORCID ID: 0000-0001-6206-7997

SCOPUS-AUTHOR ID: 6506540077

To cite this article: Myslinchuk, V., Sidletskyi, V., Shygorin, P., Nechyporuk, B. (2023). Realizatsiia teoretychnoi modeli vyznachennia velychyny potoku soniachnoi radiatsii na osnovi suchasnykh modulnykh datchykyv [Implementation of a theoretical model for determining the solar radiation flux based on modern modular sensors]. *Physics and Educational Technologies*, 3, 37–43, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2023-3-5>

IMPLEMENTATION OF A THEORETICAL MODEL FOR DETERMINING THE VALUE OF SOLAR RADIATION FLUX BASED ON MODERN MODULAR SENSORS

The study of the energy characteristics of solar radiation is a relevant issue in modern astronomy. Their precise and stable measurements are crucial both for establishing the energy balance that determines the Earth's climate and for studying the causes of its change. The intensity of solar radiation is quantified by the solar constant, the total flux of solar radiation passing per unit time through a unit area oriented perpendicular to the flux at a distance of one astronomical unit from the center of the Sun outside the Earth's atmosphere.

The branch of astronomy that studies the energy emitted by the Sun, the Earth's surface, and its atmosphere is called actinometry, and devices for measuring various types of radiation are called actinometers. A device for measuring the solar radiation flux, an actinometer, was developed on the basis of the 12 V LED Display Thermostat Control Instrument Temperature Sensor.

It is shown that the amount of heat received on the Earth's surface by a unit area per unit time (with fixed dimensions of the actinometer's component parts) can be determined from the following relation $\sigma_0 = 1242 \cdot \Delta T / \tau$ (J/(m²·K)). Using a homemade actinometer, we experimentally determined the amount of heat received on the Earth's surface by a unit area per unit time. The data of the experimental studies are as follows: at the height of the Sun $\approx 30^\circ$ above the horizon $\bar{\sigma}_0^(1) = 664.23$ (W/m²); at the height of the Sun $\approx 40^\circ$ above the horizon $\bar{\sigma}_0^*(2) = 788.51$ (W/m²), at the height of the Sun $\approx 50^\circ$ above the horizon $\bar{\sigma}_0^*(3) = 860.44$ (W/m²).*

Assuming uniformity of solar radiation scattering in the Earth's atmosphere over its entire thickness and directions, it is determined that for each kilometer of the Earth's atmosphere, the decrease in σ_0 is $\sigma_0/l = 0.7146$ (W/(m²·km)). The value of the solar constant outside the Earth's atmosphere is estimated, which is $\bar{\sigma}_0 = 1309.87$ (W/m²). The obtained value with an error of $\varepsilon = 4.2\%$ coincides with experimental measurements of the solar constant by scientific institutions.

Key words: modular temperature sensor; actinometer; solar radiation, solar constant.

Актуальність проблеми. На поверхню земної кулі падає сонячне випромінювання, енергія якого становить близько $81000 \cdot 10^6$ МВт, з яких $27000 \cdot 10^6$ МВт припадає на материкову частину. Визначально, що 80% цієї енергії надходить до земної поверхні у період з квітня по вересень. Можна провести оцінку, що за годину наша планета отримує від Сонця майже стільки енергії, скільки людство використовує протягом року (Титко, 2010). Промениста енергія Сонця є основним джерелом світла і тепла на нашій планеті, обумовлює різноманітність життя на землі та відіграє вирішальну роль у протіканні біологічних процесів (Саратов, 2009). При вивченні сонячної радіації важливе значення має поверхнева густина різних її потоків – величина потоку радіації на одиницю поверхні. При цьому під прямою сонячною радіацією будемо розуміти короткохвильову сонячну радіацію, яка доходить до земної поверхні у вигляді пучку паралельних променів від Сонця, яка змінюється в залежності від висоти знаходження Сонця над горизонтом, прозорості атмосфери та хмарності (Таранова, 2013).

Інтенсивність сонячної радіації – це кількість тепла, яка надходить упродовж одиниці часу на одиницю площі абсолютно чорної поверхні, розташованої перпендикулярно до сонячних променів (Захожай, 2021). Дану величину кількісно оцінюють сонячною сталою – сумарним потоком сонячного випромінювання, що проходить за одиницю часу через одиничну площу, орієнтовану перпендикулярно до потоку, на відстані однієї астрономічної одиниці від центру Сонця зовні земної атмосфери (John, 2009). Сонячна стала змінюється на десятки частки відсотків у межах 11-річного сонячного циклу, встановлено прямопропорційний зв'язок між збільшенням числового значення сонячної сталої та ростом кількості плям і сонячних спалахів. Слід зауважити, що навіть невеликі варіації сонячного опромінення можуть призвести до природного впливу на клімат Землі з глобальними та регіональними реакціями (Douglass, 2002). Тому точні та стабільні вимірювання характеристик сонячного опромінення становлять вирішальне значення як для встановлення енергетичного балансу, який визначає клімат Землі, так і для можливостей вивчення причин його зміни.

Аналіз останніх публікацій. Оцінка числового значення сонячної сталої є актуальною

проблемою, яка пронизує усю фізику Сонця. Вперше вона була розв'язана ще у 1838 році французьким фізиком Клод Пуйє за допомогою піргеліометра власної розробки. Його оцінка становила 1228 Вт/м^2 (Dufresne, 2008), що достатньо близько до сучасного значення 1367 Вт/м^2 . У 1875 р. Жюль Віолль відновив роботу Пуйє та отримав значення у 1700 Вт/м^2 . Експериментальні вимірювання при цьому були проведені на Монблані у Франції. У 1884 році Семюел Пірпонт Ленглі зробив спробу оцінки сонячної сталої на горі Вітні в Каліфорнії. Проводячи ряд вимірювань у різний час доби, він здійснив спробу використати корекцію на атмосферне поглинання. Запропоноване ним експериментальне значення сонячної сталої становило 2903 Вт/м^2 . У першій половині ХХ ст. вимірювання на різних високогірних місцях, проведені Чарльз Грілі Ебботом та іншими науковцями дозволили отримати значення, які лежали в межах від 1322 Вт/м^2 до 14665 Вт/м^2 (Sampson, 1911).

Метою даної роботи є розробка теоретичної моделі визначення числового значення величини сонячної сталої та її експериментальна оцінка з використанням саморобного актинометру, побудованого на основі сучасного модульного датчика температури.

Виклад основного матеріалу дослідження. Розділ астрономії, в якому вивчається енергія, яка випромінюється Сонцем, поверхнею Землі і атмосферою, та її перетворення називається актинометрією, а прилади для вимірювання різних видів радіації – актинометрами. В роботі пропонується використати нескладний у побудові саморобний актинометр, дія якого ґрунтується на використанні саморобного датчика температури. Процес виготовлення саморобного актинометра містив кілька послідовних етапів: 1) придбання пристрою для вимірювання температури з цифровою індексацією; 2) виготовлення зручного для користування джерела живлення приладу; 3) виготовлення детектора сонячного випромінювання; 4) виготовлення корпусу приладу та налаштування його роботи.

Модульний датчик температури – цифровий термометр із світлодіодним дисплеєм і виносним датчиком. Він дозволяє проводити вимірювання температури в діапазоні від -50°C до $+110^\circ\text{C}$. Довжина проводу зонду 1 м. Живлення

5–12 В постійного струму. Колір дисплея – червоний. Розмір 4,7x2,8x1,5 см. Живлення термометра здійснюється за допомогою раніше вживаного адаптеру типу FW6299 з наступними характеристиками (input: 230 V~/50 Hz/48 mA; output: 9 V~/800 mA/7,2 VA). Випрямлення змінного струму здійснюється за допомогою саморобного випрямляча, який приєднаний між температурним модулем і адаптером. Загальна конструкція вимірника температури у зібраному стані показано на рис. 1.

В якості приймача сонячного випромінювання ми використали алюмінієву пластинку товщиною 0,5 мм та діаметром 68 мм. Алюмінієва пластинка була припаяна до детектора пристрою для вимірювання температури, закріплена у пінопластовій основі та поміщена у пластмасовий циліндричний корпус. Приймальна частина пластинки була зачорнена.

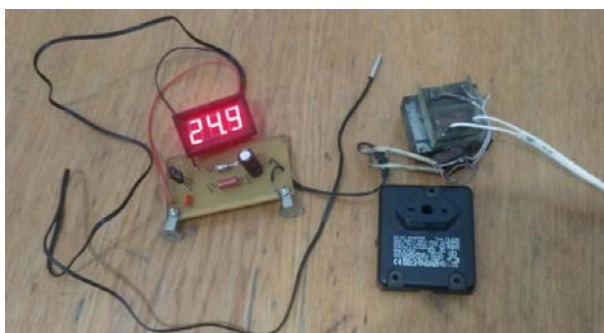


Рис. 1. Модуль для вимірювання температури

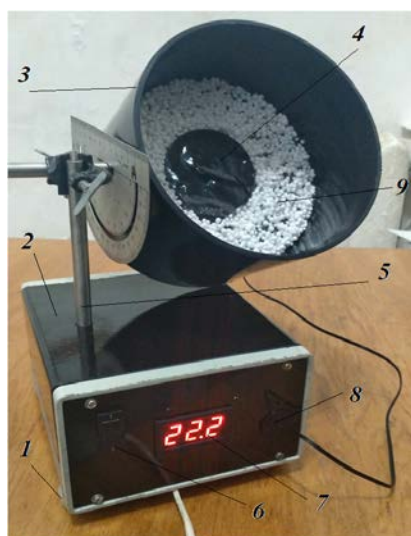


Рис. 2. Актинометр

Загальний вигляд актинометра показано на рис. 2. В якості основи слугує стандартний

корпус (2) для саморобних пристроїв, нижня частина якого містить 4 підставні ніжки (1). До основи прикріплений металевий стрижень (5) довжиною 25 см. Пристрій для вимірювання температури поміщений у металевий короб (2) розмірами 15x18x9 см і жорстко прикріплений до основи. На передню панель приладу винесено цифрова панель вимірника температури (7), вимикач (6) та виведено провід до детектору (8). До металевого стрижня жорстко прикріплений транспорт.

Згідно означення сонячної сталої формула для її визначення матиме вигляд:

$$\sigma_0 = \frac{W}{S_{\text{Площ}} \cdot \tau}, \quad (1)$$

де σ_0 – сонячна стала, $S_{\text{Площ}}$ – площа площадки, на яку потрапляє сонячна енергія W за проміжок часу τ . Кількість енергії, яка потрапляє на площадку, будемо вважати рівною кількості теплоти, яку отримує алюмінієва пластинка актинометра. Отже:

$$\sigma_0 = \frac{W}{S_{\text{Площ}} \cdot \tau}, \quad W = Q, \quad \sigma_0 = \frac{Q}{S_{\text{Площ}} \cdot \tau},$$

$$Q = C_{\text{Al}} \cdot m_{\text{Al}} \cdot \Delta T, \quad m_{\text{Al}} = \rho_{\text{Al}} \cdot V_{\text{Al}} = \rho_{\text{Al}} \cdot S_{\text{Al}} \cdot h_{\text{Al}}, \quad (2)$$

$$\sigma_0 = \frac{Q}{S_{\text{Площ}} \cdot \tau} = \frac{C_{\text{Al}} \cdot m_{\text{Al}} \cdot \Delta T}{S_{\text{Площ}} \cdot \tau} = \frac{C_{\text{Al}} \cdot \rho_{\text{Al}} \cdot S_{\text{Al}} \cdot h_{\text{Al}} \cdot \Delta T}{S_{\text{Площ}} \cdot \tau}.$$

Оскільки S_{Al} – площа алюмінієвої пластинки, $S_{\text{Площ}}$ – площа площадки, на яку потрапляє сонячне проміння рівні між собою, то:

$$\sigma_0 = \frac{C_{\text{Al}} \cdot \rho_{\text{Al}} \cdot h_{\text{Al}} \cdot \Delta T}{\tau}. \quad (3)$$

Беручи табличні величини $C_{\text{Al}} = 920 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, $\rho_{\text{Al}} = 2700 \text{ кг}/\text{м}^3$ та вважаючи товщину пластинки $h_{\text{Al}} = 0,5 \text{ мм}$ (за паспортними даними приладу), робоча формула для визначення сонячної сталої набуде вигляду:

$$\sigma_0 = \frac{1242 \cdot \Delta T}{\tau} \left(\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \right). \quad (4)$$

Перед проведенням експериментальної частини дослідження, саморобний актинометр рекомендується увімкнути на 10 хв для встановлення теплового балансу між різними його елементами.

Експериментальна частина роботи виконувалася влітку. Зокрема експериментальні вимірювання проводилися 5, 6 та 7 липня 2022 р., які вирізнялися найбільшою сприятливістю погодних умов. Вимірювання проводились серіями тричі на день. Перший раз близько 9 години

за київським часом (при висоті Сонця $\approx 30^\circ$ над горизонтом), другий і третій раз послідовно через проміжки часу в півтори години при висоті Сонця $\approx 40^\circ$ і $\approx 50^\circ$. Рекомендована технологія проведення експериментальних вимірювань температури і часу нагрівання наступна:

1. Центральну трубу актинометра розмістити таким чином, щоб зачорнена поверхня алюмінієвої пластинки була перпендикулярна до падаючого сонячного проміння. Зафіксувати наближену висоту Сонця над горизонтом ($\angle Q$) за допомогою транспортиру.

2. Записуємо початкову температуру латунної пластинки Т1 відкриваємо вхідний отвір актинометра одночасно з чим запускаємо електронний секундомір.

3. Слідкуючи за датчиком температури, чекаємо поки температура алюмінієвої пластинки

не підвищиться на 10 градусів. При виконанні даної умови зупиняємо секундомір і знімаємо його покази (τ) з точністю до сотої.

4. Підставляючи отримані дані у формулу (4), обчислюємо кількість теплоти, яку отримує від Сонця кожен секунду одинична площадка на Землі, розміщена перпендикулярно до сонячного проміння для даної висоти Сонця над горизонтом.

5. Закриваємо вхідний отвір актинометра і очікуємо, поки покази його термометра стабілізуються, тобто не перестане знижуватися і максимально наблизиться до початкового. Виконуємо п. 1 – п. 4 кілька разів, після чого знаходимо середнє значення величини σ_0^* . Дані експериментальних вимірювань та обчислень подано у таблиці 1.

Зауважимо, що отримані величини σ_0^* виражаються в одиницях вимірювання сонячної сталої Вт/м^2 . Однак визначити із них сонячну сталу можна буде за умови врахування для кожного вимірювання (в залежності від висоти Сонця над горизонтом) величини екстинкції (послаблення світлового потоку) у земній атмосфері.

На час проведення експериментальних вимірювань, згідно з таблицею 20 (Відьмаченко, 2021, с. 116), геліоцентрична відстань Землі від Сонця становила: $r=1,015$ а.о. Отримані середні значення величин $\bar{\sigma}_0^*(1)=664,23 \text{ Вт/м}^2$, $\bar{\sigma}_0^*(2)=788,51 \text{ Вт/м}^2$ і $\bar{\sigma}_0^*(3)=860,44 \text{ Вт/м}^2$ засвідчують, що частина сонячної енергії, яка розсіюється (поглинається) в атмосфері (атмосферою) Землі, є значною. Спробуємо за отриманими вище експериментальними даними оцінити числове значення сонячної сталої за межами атмосфери.

Таблиця 1
Дані експериментальних вимірювань та обчислень

Дата	θ , град	ΔT , К	$\Delta \tau$, с	σ_0^* , Вт/м ²	$\bar{\sigma}_0^*$, Вт/м ²
5.07.2022 р.	30°	10	18,8	660,64	667,79
		10	18,6	667,74	
		10	18,4	675	
	40°	10	15,8	786,08	796,24
		10	15,6	796,15	
		10	15,4	806,49	
	50°	10	14,6	850,69	847,78
		10	14,4	853,45	
		10	14,8	839,19	
6.07.2022 р.	30°	10	18,4	675	682,47
		10	18,2	682,42	
		10	18,0	690	
	40°	10	16,0	776,25	783,14
		10	15,4	806,49	
		10	16,2	766,67	
	50°	10	14,4	862,5	862,94
		10	14,8	839,19	
		10	14,0	887,14	
7.07.2022 р.	30°	10	19,4	640,2	642,43
		10	19,4	640,2	
		10	19,2	646,88	
	40°	10	16,0	776,25	786,16
		10	15,8	786,08	
		10	15,6	796,15	
	50°	10	14,2	874,65	870,6
		10	14,4	862,5	
		10	14,2	874,65	

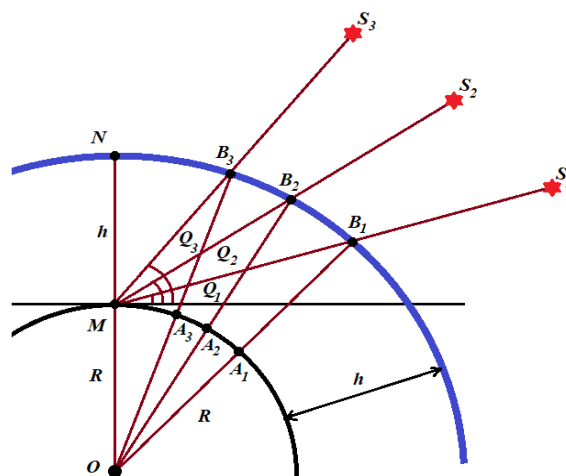


Рис. 3. До визначення сонячної сталої

На рис. 3 позначено:

S_1, S_2 і S_3 – послідовні положення Сонця, т. О – центр Землі, $OM=OA_1=OA_2=OA_3=R$ – радіус Землі ($R_{\oplus} = 6400$ км), $Q_1 = 30^\circ, Q_2 = 40^\circ, Q_3 = 50^\circ$ – висоти Сонця над горизонтом, $MN=A_1V_1=A_2V_2=A_3V_3=h$ – товщина Земної атмосфери. Будемо вважати, величину $h \approx 500$ км (товщина тропосфери, стратосфери та іоносфери разом) (Корсунь, 2003, с. 168). Розглянемо $\triangle OB_1M$, $OB_1=R+h \approx 6400+500=6900$ км, $OM=R=6400$ км, $MB_1=h=500$ км, $\angle B_1MO=30^\circ+90^\circ=120^\circ$. З трикутника $\triangle OB_1M$ за теоремою синусів:

$$\frac{OB_1}{\sin \angle OMB_1} = \frac{MB_1}{\sin \angle MOB_1} = \frac{MO}{\sin \angle MB_1O} \Rightarrow \frac{R+h}{\sin 120^\circ} = \frac{R}{\sin \angle OB_1M} \Rightarrow$$

$$\sin \angle OB_1M = \frac{R \cdot \sin 120^\circ}{R+h} = \frac{6400 \text{ км} \cdot 0,866}{6900 \text{ км}} = 0,8033 \Rightarrow$$

$$\angle OB_1M = 53,45^\circ, \angle B_1OM = 180^\circ - 120^\circ - 53,45^\circ = 6,55^\circ.$$

$$\frac{MB_1}{\sin \angle MOB_1} = \frac{OM}{\sin \angle OB_1M} \Rightarrow MB_1 = \frac{R \cdot \sin 6,55^\circ}{\sin 53,45^\circ} = \frac{6400 \text{ км} \cdot 0,1141}{0,8033} = 909 \text{ км}.$$

Проводячи аналогічні міркування для положення S_2 , розглянемо $\triangle OB_2M$, $OB_2=R+h \approx 6400+500=6900$ км, $OM=R=6400$ км, $MB_2=h=500$ км, $\angle B_2MO=40^\circ+90^\circ=130^\circ$. З трикутника $\triangle OB_2M$ за теоремою синусів:

$$\frac{OB_2}{\sin \angle OMB_2} = \frac{MB_2}{\sin \angle MOB_2} = \frac{MO}{\sin \angle MB_2O} \Rightarrow \frac{R+h}{\sin 130^\circ} = \frac{R}{\sin \angle OB_2M} \Rightarrow$$

$$\sin \angle OB_2M = \frac{R \cdot \sin 130^\circ}{R+h} = \frac{6400 \text{ км} \cdot 0,7661}{6900 \text{ км}} = 0,7106 \Rightarrow$$

$$\angle OB_2M = 45,28^\circ, \angle B_2OM = 180^\circ - 130^\circ - 45,28^\circ = 4,72^\circ.$$

$$\frac{MB_2}{\sin \angle MOB_2} = \frac{OM}{\sin \angle OB_2M} \Rightarrow MB_2 = \frac{R \cdot \sin 4,72^\circ}{\sin 45,28^\circ} = \frac{6400 \text{ км} \cdot 0,0828}{0,7106} = 746 \text{ км}.$$

Аналогічно для положення S_3 : розглянемо $\triangle OB_3M$, $OB_3=R+h \approx 6400+500=6900$ км, $OM=R=6400$ км, $MB_3=h=500$ км, $\angle B_3MO=50^\circ+90^\circ=140^\circ$. З трикутника $\triangle OB_3M$ за теоремою синусів:

$$\frac{OB_3}{\sin \angle OMB_3} = \frac{MB_3}{\sin \angle MOB_3} = \frac{MO}{\sin \angle MB_3O} \Rightarrow \frac{R+h}{\sin 140^\circ} = \frac{R}{\sin \angle OB_3M} \Rightarrow$$

$$\sin \angle OB_3M = \frac{R \cdot \sin 140^\circ}{R+h} = \frac{6400 \text{ км} \cdot 0,6428}{6900 \text{ км}} = 0,5962 \Rightarrow$$

$$\angle OB_3M = 36,59^\circ, \angle B_3OM = 180^\circ - 140^\circ - 36,6^\circ = 3,4^\circ.$$

$$\frac{MB_3}{\sin \angle MOB_3} = \frac{OM}{\sin \angle OB_3M} \Rightarrow MB_3 = \frac{R \cdot \sin 3,41^\circ}{\sin 36,59^\circ} = \frac{6400 \text{ км} \cdot 0,0593}{0,5962} = 637 \text{ км}.$$

Таким чином при проходженні сонячного випромінювання в атмосфері Землі відстані $V_1M=909$ км отримано значення $\bar{\sigma}_0^*(1)=664,23$ Вт/м², при проходженні відстані $V_2M=746$ км $\Rightarrow \bar{\sigma}_0^*(2)=788,51$ Вт/м², при

проходженні відстані $V_3M=637$ км $\Rightarrow \bar{\sigma}_0^*(3)=860,44$ Вт/м². Помічаємо, що чим довший шлях в атмосфері Землі проходить сонячне випромінювання, тим більша його частка розсіюється. Припустивши, що розсіювання сонячного випромінювання в атмосфері Землі здійснюється рівномірно по всій її товщині та напрямках, оцінимо величину зменшення σ_0 на кожний кілометр атмосфери.

$$\frac{\Delta\sigma_{01}}{l_1-l_3} = \frac{\bar{\sigma}_0^*(3) - \bar{\sigma}_0^*(1)}{MB_1 - MB_3} = \frac{860,44 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} - 664,23 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}}{909 \text{ км} - 637 \text{ км}} = 0,7214 \frac{\text{Вт}}{\text{км} \cdot \text{м}^2};$$

$$\frac{\Delta\sigma_{02}}{l_2-l_3} = \frac{\bar{\sigma}_0^*(3) - \bar{\sigma}_0^*(2)}{MB_2 - MB_3} = \frac{860,44 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} - 788,51 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}}{746 \text{ км} - 637 \text{ км}} = 0,6599 \frac{\text{Вт}}{\text{км} \cdot \text{м}^2};$$

$$\frac{\Delta\sigma_{03}}{l_1-l_2} = \frac{\bar{\sigma}_0^*(2) - \bar{\sigma}_0^*(1)}{MB_1 - MB_2} = \frac{788,51 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} - 664,23 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}}{909 \text{ км} - 746 \text{ км}} = 0,7625 \frac{\text{Вт}}{\text{км} \cdot \text{м}^2}.$$

З останніх співвідношень знаходимо середнє значення:

$$\frac{\Delta\sigma_0}{1} = \frac{\frac{\Delta\sigma_{01}}{l_1-l_3} + \frac{\Delta\sigma_{02}}{l_2-l_3} + \frac{\Delta\sigma_{03}}{l_1-l_3}}{3} = \frac{0,7214 + 0,6599 + 0,7625}{3} = 0,7146 \left(\frac{\text{Вт}}{\text{км} \cdot \text{м}^2} \right).$$

Отже, можна обчислити значення сонячної сталої за межами земної атмосфери у точках V_1, V_2 та V_3 відповідно:

У точці V_1 :

$$\sigma_0(1) = 664,23 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} + 0,7146 \frac{\text{Вт}}{\text{км} \cdot \text{м}^2} \cdot 909 \text{ км} = 1313,8 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

У точці V_2 :

$$\sigma_0(2) = 788,51 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} + 0,7146 \frac{\text{Вт}}{\text{км} \cdot \text{м}^2} \cdot 746 \text{ км} = 1300,16 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

У точці V_3 :

$$\sigma_0(3) = 860,44 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} + 0,7146 \frac{\text{Вт}}{\text{км} \cdot \text{м}^2} \cdot 637 \text{ км} = 1315,64 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Таким чином, експериментально визначене середнє значення сонячної сталої буде рівне: $\bar{\sigma}_0 = (\sigma_0(1) + \sigma_0(2) + \sigma_0(3))/3 = 1309,87$ Вт/м². Отримане середнє значення сонячної сталої $\bar{\sigma}_0 = 1309,87$ Вт/м² наближено рівне значенню, яке фігурує в оцінці даної величини науковцями $\sigma_0 = 1367,5$ Вт/м². Похибка отриманих результатів при цьому рівна:

$$\Delta\sigma = \sigma_0 - \bar{\sigma}_0 = 1367,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} - 1309,87 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} = 57,63 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2};$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta\sigma}{\sigma_0} \cdot 100\% = \frac{57,63 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}}{1367,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}} \cdot 100\% = 4,2\%.$$

Знаючи сонячну сталу, можна оцінити світимість Сонця та його ефективну температуру.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Точне вимірювання сонячної сталої необ-

хідне не лише астрономам, але і багатьом суміжним з нею наукам: геофізиці, кліматології, екології, тощо. Точні вимірювання сонячної сталої поза земною атмосферою і біля поверхні Землі, допоможуть вирішити екологічну проблему оцінки впливу діяльності людини на клімат Землі та на атмосферний шар озону (озоносферу). В роботі оцінено значення сонячної сталої за межами земної атмосфери, яке становить $\bar{\sigma}_0 = 1309,87 \text{ Вт/м}^2$, дана величина з похибкою $\varepsilon = 4,2\%$ співпадає із загальноприйнятим значенням.

Наведена в роботі методика оцінки числового значення величини сонячної сталої може бути використана на уроках природничих дисциплін, заняттях фізико-астрономічних гуртків та заняттях учнів-членів Малої академії наук України. Використання сучасних модульних датчиків (температури, вологості, руху, рівня, освітленості та присутності) дозволяє розширити комплекс загальнодоступних вимірювань фізичних величин шляхом конструювання нескладного вимірювального обладнання або модернізації існуючого.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Титко Р., Калініченко В.М. Відновлювальні джерела енергії (досвід Польщі для України): навчальний посібник. – Варшава: OWG, 2010. – 530 с.
2. Таранова Н.Б. Метеорологія і кліматологія: словник-довідник (основні терміни і поняття) / Н.Б. Таранова. – Тернопіль: Навчальна книга – Богдан, 2013. – 192 с.
3. Douglass D.H., Clader B.D. Climate sensitivity of the Earth to solar irradiance. *Geophys. Res. Lett.* 2002, 29(16). – P. 33-1–33-4. <https://doi.org/10.1029/2002GL015345>
4. John A.E. The Sun, the Earth, and near-earth space: a guide to the sun-earth system. – National Aeronautics and Space Administration, 2009. – 301 p.
5. Dufresne J.-L. The measurement of the solar constant by Claude Pouillet. *La Meteorology.* 2008, 60. – P. 36–43. <http://dx.doi.org/10.4267/2042/16943>
6. Sampson R.A. Sun. *Encyclopedia Britannica* (11-th ed.) / ed. by H. Chislom. – Cambridge: Cambridge University Press, 1911. V.26. – P. 87.
7. Захожай В.А., Захожай О.В. Основи елементарної астрономії: навчальний посібник. – Харків: ХНУ ім. В.Н. Каразіна, 2021. – 232 с.
8. Астрономічний календар 2022 / [ред. кол. А.П. Відьмаченко (гол. ред.) та ін.]. – Київ: Академперіодика, 2021. – 214 с.
9. Корсунь А.О. Земля : астрономічний енциклопедичний словник / [за заг. ред. І.А. Клімишина, А.О. Корсунь]. – Львів: Головна астрономічна обсерваторія НАН України: ЛНУ ім. Івана Франка, 2003. – С. 168.
10. Саратов І.Ю., Дядін Д.В. Конспект лекцій з навчальної дисципліни «Метеорологія і кліматологія». – Харків: ХНАМГ, 2009. – 59 с.

REFERENCES:

1. Tytko, R., Kalinichenko, V.M. (2010) Vidnovliuvalni dzhherela enerhii (dosvid Polshchi dlia Ukrainy): navchalnyi posibnyk [Renewable energy sources (Polish experience for Ukraine): a study guide]. – Varshava: OWG. – 530 s. [in Ukrainian].
2. Taranova N.B. (2013) Meteorolohiia i klimatolohiia: slovnyk-dovidnyk (osnovni terminy i poniattia) [Meteorology and climatology: a glossary (basic terms and concepts)]. – Ternopil: Navchalna knyha – Bohdan. – 192 s. [in Ukrainian].
3. Douglass, D.H., Clader, B.D. Climate sensitivity of the Earth to solar irradiance // *Geophys. Res. Lett.* 2002, 29(16). – P. 33-1–33-4. <https://doi.org/10.1029/2002GL015345>
4. John, A.E. The Sun, the Earth, and near-earth space: a guide to the sun-earth system. – National Aeronautics and Space Administration, 2009. – 301 p.
5. Dufresne J.-L. The measurement of the solar constant by Claude Pouillet // J.-L. Dufresne. *La Meteorology.* 2008, 60. – P. 36–43. <http://dx.doi.org/10.4267/2042/16943>
6. Sampson, R.A. Sun. *Encyclopedia Britannica* (11-th ed.) / ed. by H. Chislom. – Cambridge: Cambridge University Press, 1911. V.26. Cambridge University Press. – P. 87.
7. Zakhozhai, V.A., Zakhozhai O.V. (2021) Osnovy elementarnoi astronomii: navchalnyi posibnyk [Fundamentals of elementary astronomy: a textbook]. – Kharkiv: KhNU im. V.N. Karazina. – 232 s. [in Ukrainian].
8. Astronomichniy kalendar 2022 [Astronomical calendar 2022] / [red. kol.: A.P. Vidmachenko (hol. red.) ta in.]. – Kyiv: Akadempriodyka, 2021. – 214 s. [in Ukrainian].
9. Korsun A.O. Zemlia : astronomichniy entsyklopedychnyi slovnyk [Earth. Astronomical encyclopedic dictionary] / [za zah. red. I.A. Klymyshyna, A.O. Korsun]. – Lviv: Holovna astronomichna observatoriia NAN Ukrainy: LNU im. Ivana Franka, 2003. – S. 168. [in Ukrainian].
10. Saratov, I.Yu., Diadin, D.V. (2009) Konspekt lektzii z navchalnoi dystsypliny «Meteorolohiia i klimatolohiia» [Lecture notes on the discipline «Meteorology and climatology»]. – Kharkiv: KNAMG. – 59 s. [in Ukrainian].