

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2021.06.019>

УДК 551.590.24;551.558.1

Л. Ф. Черногор

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
пл. Свободи, 4, м. Харків, Україна, 61022
e-mail: Leonid.F.Chernogor@gmail.com

Ефект конвекції у приземній атмосфері протягом сонячних затемнень 20 березня 2015 р. і 10 червня 2021 р.

Протягом сонячного затемнення (СЗ) істотно змінюються чисельні параметри системи Земля — атмосфера — іоносфера — магнітосфера, а також параметри геофізичних полів. Зокрема, протягом затемнення зменшується температура поверхні планети та приземного шару атмосфери, сповільнюються процеси конвекції та турбулізації. Помітно змінюється неоднорідна структура приповерхневого шару атмосфери, зменшується роль флуктуацій температури в цьому шарі, а значить і флуктуацій показника заломлення повітря. Мета роботи — аналіз даних спостережень тремтіння краю сонячного диска протягом двох останніх часткових СЗ, які мали місце поблизу м. Харків 20 березня 2015 р. і 10 червня 2021 р., та оцінки статистичних параметрів повітря, відповідальних за конвекцію. Ефекти СЗ у приземній атмосфері спостерігалися за допомогою оптичного телескопа АФР-2, встановленого в Астрономічній обсерваторії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Для оцінки основних параметрів атмосферної конвекції проведено спостереження тремтіння краю сонячного диска в дні СЗ 20 березня 2015 р. та 10 червня 2021 р., а також у контрольні дні. Варіації параметрів конвекції якісно подібні варіаціям освітленості земної поверхні та температури повітря у приземному шарі атмосфери. У літню пору всі параметри, пов'язані з конвекцією, мають приблизно удвічі більші значення, ніж навесні. Вплив СЗ 10 червня 2021 р. на атмосферну конвекцію був істотно меншим, ніж вплив затемнення 20 березня 2015 р. Це пояснюється незначною фазою СЗ (0.11 проти 0.54). Екранування сонячного диска хмарами помітно придушувало атмосферну конвекцію. Порівняльний аналіз ефекту конвекції для семи СЗ, що ма-

ли місце в 1999—2021 рр., показав, що величина ефекту істотно залежала від стану атмосферної погоди, хмарності, часу доби, пори року та фази СЗ.

Ключові слова: сонячне затемнення, статистичні параметри турбулентності, варіації температури повітря, атмосферна конвекція, фаза сонячного затемнення.

ВСТУП

Сонячне затемнення (СЗ) — унікальне явище природи. Повне СЗ в даній місцевості триває 2...3 хв, а часткове — близько 2...3 год. Вивчення динамічних процесів у системі Земля — атмосфера — іоносфера — магнітосфера, які супроводжують затемнення, становить значний інтерес (див., наприклад, [13]). Незважаючи на те що ефекти СЗ в згаданій системі вивчаються близько 100 років, їхнє детальне дослідження залишається актуальною задачею для сонячно-земної фізики, фізики підстильної поверхні, атмосфери, іоносфери та геомагнетизму.

Протягом СЗ істотно змінюється низка параметрів системи Земля — атмосфера — іоносфера — магнітосфера, а також параметри геофізичних полів. Зокрема, протягом затемнення зменшується температура поверхні планети, сповільнюються процеси конвекції та турбулізації, зменшується температура приземного шару атмосфери. Помітно змінюється неоднорідна структура приповерхневого шару атмосфери, зменшується роль флуктуацій температури в цьому шарі, а значить і флуктуацій показника заломлення повітря. Статистичні властивості показника заломлення можна дослідити оптичними методами [10].

У роботах [7—13] розвинено оптичний метод, заснований на реєстрації тремтіння краю сонячного диска. Тремтіння зумовлено флуктуаціями кута приходу променів внаслідок флуктуацій показника заломлення повітря.

Мета цієї роботи — виклад результатів аналізу даних спостережень тремтіння краю сонячного диска протягом двох останніх часткових СЗ, які мали місце поблизу м. Харків 20 березня 2015 р. і 10 червня 2021 р., й оцінки статистичних параметрів повітря, відповідальних за конвекцію.

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО СОНЯЧНІ ЗАТЕМНЕННЯ

Повне СЗ 20 березня 2015 р., яке розпочалося над Атлантикою, спостерігалось в Арктиці, Європі та у значній частині Азії. Для Центральної та Східної Європи, а також Азії СЗ було частковим. Фаза (магнітуда) M затемнення змінювалась від 0 до 0.97 у Рейк'явіку. У Харкові $M_{\max} = 0.54$. Затемнення тут розпочалося об 11:09 LT, а закін-

чилося — о 13:21 LT (LT — місцевий час). Максимальна фаза відмічалася о 12:16 LT. При цьому висота Сонця над горизонтом була близькою до 40° , азимут — 191° .

Тінь від затемнення 10 червня 2021 р., яке розпочалося над Канадою, проходила через Гренландію, Північний Льодовитий Океан, Північний полюс, значну частину Європи й Азії, північно-східну частину США, північ Аляски та північ Атлантики. У Харкові часткове СЗ розпочалось о 13:42 LT, а закінчилось о 15:12 LT. Максимальна фаза затемнення $M_{\max} = 0.11$ спостерігалася о 14:28 LT (<https://eclipse.gsfc.nasa.gov/JSEX/JSEX-AS.html>).

СТАН АТМОСФЕРНОЇ ПОГОДИ

Протягом періоду спостережень (19...21 березня 2015 р.) Центральна Європа перебувала у зоні слабого антициклону. Тривалість хмарності в денний час в обсерваторіях, де велися вимірювання, не перевищувала 30 % світлого часу доби. Майже весь час небо було затягнуте серпанком, крізь який виднівся диск Сонця. Наявність серпанку дозволила візуально спостерігати затемнення без залучення будь-яких засобів. Швидкість вітру варіювала у межах 3...6 м/с. Тиск повітря був близьким до 1020 гПа, вологість — близько 80 %. Опади та сніжний покрив були відсутні. У денний час температура повітря t_a змінювалася у межах 4...15 °С. Затемнення призвело до її максимального зменшення, близького до $t_{a \max} = 1$ °С. Метеоспостереження виконано у трьох обсерваторіях, рознесених на 50...60 км [14].

З 07 по 16 червня 2021 р. Центральна Європа перебувала під впливом циклону, супроводжуваного щоденними опадами у вигляді дощу. Типова поведінка атмосферної погоди в обсерваторіях, де виконано спостереження (поблизу м. Харків), була такою. Від ранку, близько 09:00 LT, і до 12:00...13:00 LT небо на 50...90 % було покрите купчастими хмарами. Далі їм на зміну приходили купчасто-дощові хмари, супроводжувані нетривалими (20...30 хв) опадами, зменшенням на 2...3 °С температури повітря. Атмосферний тиск становив 1015 гПа, вологість — 90...95 %. Швидкість вітру в ранковий час становила від 0 до 1 м/с, перед дощем і протягом дощу 3...6 м/с. Покриття Сонця хмарами призводило до зменшення температури t_a на 2...3 °С. Затемнення 10 червня 2021 р. призвело до зменшення t_a приблизно на 1 °С. У денний час температура повітря змінювалася від 18...20 до 25...28 °С.

ЗАСОБИ ТА МЕТОДИ

Ефекти СЗ у приземній атмосфері спостерігалися за допомогою оптичного телескопа АФР-2, встановленого в Астрономічній обсерваторії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Її

координати: 49 40 пн. ш., 36 50 сх. д. Еквівалентна фокусна відстань телескопа становила 7 м. Об'єктив розташовано на висоті $z_0 = 3$ м. Основу вимірювального комплексу склали оптичний телескоп, реєструвальний пристрій і комп'ютер. Досліджувалося тремтіння краю сонячного диска.

Вимірювання амплітуди тремтіння краю сонячного диска виконано 19, 20 і 21 березня 2015 р. та 9, 10 і 11 червня 2021 р. Вхідна апертура телескопа обмежувалася діафрагмою діаметром $d_d = 5$ см. У фокусі телескопа встановлювалася прямокутна діафрагма розміром 20 уздовж лімба Сонця та 50 перпендикулярно до нього. Край диска Сонця виступав на 30 від краю діафрагми. Вимірювалася амплітуда тремтіння краю сонячного диска, зумовленого турбулентними та конвективними процесами у приземній атмосфері. Для цього світловий сигнал, який пройшов через діафрагму, фільтр (ефективна довжина хвилі $5.6 \cdot 10^{-7}$ м), фотоелектронний помножувач (ФЕП) і широкосмуговий операційний підсилювач зі 100 %-м негативним зворотним зв'язком, подавався на інтегратор з часом інтегрування 10 мс. Після оцифрування з частотою 50 Гц амплітуда сигналу $s(t)$ зберігалася в цифровому вигляді у файлах на жорсткому диску. Одна реалізація, складена з 512 відліків, мала тривалість близько 10 с. Тривалість серії, утвореної 18 реалізаціями, дорівнювала 3 хв. Серії повторювалися через 15 хв, з 09:00 до 17:00 LT.

Отримана залежність $s(t)$ використовувалася для обчислення автокореляційної функції $K_s(\cdot)$. Інтервал дискретизації $\Delta t = 20$ мс, повне число відліків $N = 512$. Значення $K_s(0) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} s_n^2$ пропорційне дисперсії зміщення σ_s^2 краю сонячного диска, причому $\sigma_s = 10^{-2}$ відповідає $\sigma_s = 0.25$.

Відзначимо, що переміщення краю диска Сонця в діафрагмі практично пропорційне зміні сигналу на виході ФЕП, оскільки зміна яскравості фотосфери на кутовій відстані 30 від краю не перевищує 1 % на 1. При зміщенні до 5 ця яскравість можна вважати лінійною функцією зсуву. При цьому переміщення на 1 призводить до зміни рівня сигналу на 4 %.

Як вихідні використовувалися вирази для дисперсії флуктуацій кута приходу променів σ_m^2 , приведеної дисперсії σ_m^2 , структурних характеристик показника заломлення C_n^2 і температури C_T^2 повітря, а також дисперсії флуктуацій температури повітря σ_T^2 .

Обробка даних спостережень і обчислень параметрів приземної атмосфери здійснювалися за таким алгоритмом.

1. Спочатку проводилося згладжування методом найменших квадратів часової залежності $s(t)$ для інтервалу спостереження.

2. За згладженою залежністю $s(t)$ обчислюється величина $m(t) = s(t) / \sqrt{\sec \theta}$, де θ — зенітний кут Сонця.

3. З формули, яка пов'язує $m(t)$ з $C_n(t)$, визначалося середнє за висотою C_n . Тут доводиться припускати, що і у період СЗ конвекція

залишається розвинутою, хоча й послабленою за своєю інтенсивністю. Підставою для цього служить та обставина, що час становлення атмосферної конвекції t , визначений за часом становлення $\sigma_m(t)$ поблизу максимальної фази затемнення, становив 15...16 хв. Тривалість СЗ перевищувала 120 хв, що значно більше за t . Це означає, що конвекційний процес встигає «підлаштуватися» під зміни у приземній атмосфері, викликані СЗ.

4. За $C_n(t)$ обчислювались середні за висотою $C_T(t)$.

5. За залежністю $C_T(t)$ обчислювалась часова залежність $\sigma_T(t)$.

6. За відомими значеннями турбулентного числа Прандтля $a_t = 1$, зовнішнього масштабу турбулентності L_0 та $C_T(t)$, обчислювався градієнт температури $\sigma(t)$.

РЕЗУЛЬТАТИ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

В отриманій залежності $\sigma_m(t)$ спочатку виключалася залежність від $\sigma_m(t)$, яка визначає товщину атмосферного шару, що дає внесок в ефект тремтіння краю сонячного диска. Потім аналізувалася часова залежність $\sigma_m(t)$.

СЗ 20 березня 2015 р. Варіації $\sigma_m(t)$ для 19...21 березня 2015 р. наведено на рис. 1. У контрольні дні вранці (близько 09:00 LT) значення становили $\sigma_m = 0.39 \dots 0.40$. Потім приблизно до 14:00 LT значення σ_m збільшувались до $0.52 \dots 0.53$, після чого вони зменшувались до $0.44 \dots 0.45$ близько 17:00 LT.

У день СЗ приблизно об 11:15 LT почалось зменшення σ_m від 0.487 до 0.43 о 12:15 LT. Далі значення σ_m збільшувались від 0.43 до 0.49 о 14:15 LT. Після 14:15 LT відмічалось зменшення σ_m до

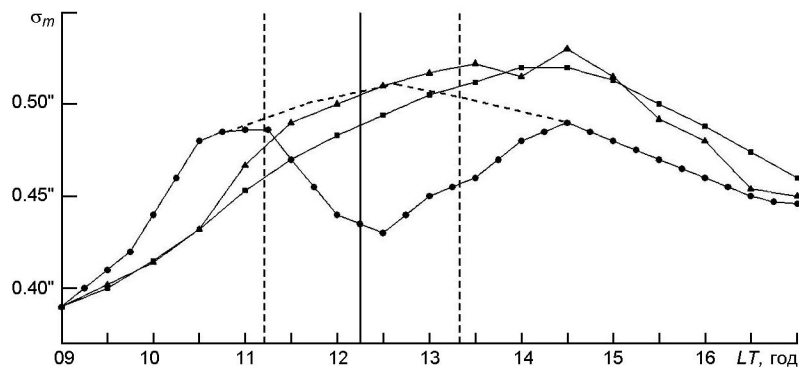


Рис. 1. Часова залежність середнього квадратичного відхилення варіацій кута приходу за 19...21 березня 2015 р. Вертикальні штрихові лінії — моменти початку та закінчення сонячного затемнення, суцільна — момент настання максимальної фази. Трикутники — часові залежності у контрольний день 19 березня, точки — 20 березня, квадратики — 21 березня 2021 р. Штрихова крива — очікувані варіації σ_m при відсутності СЗ

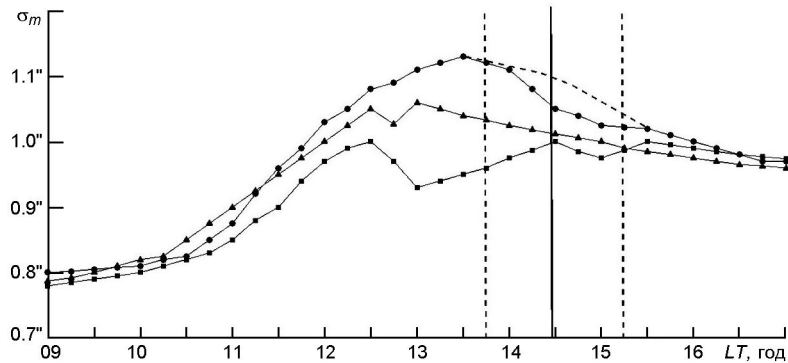


Рис. 2. Часова залежність середнього квадратичного відхилення варіацій кута приходу за 9...11 червня 2021 р. Вертикальні штрихові лінії — моменти початку та закінчення сонячного затемнення, суцільна — момент настання максимальної фази. Трикутники — часові залежності у контрольний день 9 червня, точки — 10 червня, квадратики — 11 червня 2021 р. Штрихова крива — очікувані варіації σ_m при відсутності СЗ

0.445 о 17:00 LT. У результаті СЗ значення σ_m зменшилось на σ_m 0.08 .

СЗ 10 червня 2021 р. Залежності $\sigma_m(t)$ в день СЗ 10 червня 2021 р. та в сусідні дні наведені на рис. 2. Видно, що в контрольні дні значення σ_m спочатку збільшувались приблизно від 0.8 до 1 . У другій половині доби ці значення зменшувались до 0.96 о 15:00...17:00 LT. 11 червня 2021 р. близько 13:00 LT і 15:00 LT спостерігались провали в залежності $\sigma_m(t)$.

У день СЗ значення σ_m спочатку збільшувались від 0.8 до 1 о 13:30 LT, потім протягом 2 год зменшувались від 1.13 до 1.02 . Після 15:30 LT падіння σ_m продовжувалось.

РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ

Як відомо, тремтіння зображень викликано флуктуаціями кута приходу променів, зумовлених турбулентними процесами, конвекцією та поривами вітру [9, 10]. У приземній атмосфері внутрішній і зовнішній масштаби турбулентності становлять 1...10 мм і 1...10 м відповідно [9, 10]. Тремтіння зображень спостерігається при розмірах неоднорідностей, більших за діаметр діафрагми телескопа $d_d = 5$ см. Будемо як зазвичай вважати [10], що неоднорідності локалізуються у нижніх шарах атмосфери.

Основні співвідношення. Дисперсія флуктуацій кута приходу променів визначається структурною характеристикою C_n^2 показника заломлення атмосфери [10]:

$$\sigma^2 = 2.84 d_d^{1/3} \sec^2 \int_0^z C_n^2(z) dz = 2.84 d_d^{1/3} \sec^2 C_n^2 z_0. \quad (1)$$

Тут C_n^2 — середнє значення структурної характеристики в діапазоні висот від 0 до z_0 , z_0 — висота розташування телескопа. Дана формула справедлива, якщо шар атмосфери можна вважати плоским (тобто 75...80) і якщо радіус першої зони Френеля $r_F \ll d_d$. У нашому випадку $r_F \approx 0.13$ см.

Очевидно, що залежність $C_n^2(t)$ зумовлена залежністю $C_n^2(t)$.

В оптичному діапазоні головною причиною флуктуацій показника заломлення n є флуктуації абсолютної температури T_a повітря [10, 11]. Дисперсія останніх змінюється в широких межах $\frac{\partial n}{\partial T} = 0.001 \dots 1 \text{ K}^{-2}$. Величина n пов'язана з T_a і тиском газу [6, 10]:

$$n - 1 = 79 \frac{p}{T_a} \cdot 10^{-6}, \quad (2)$$

де p — тиск у гектопаскалях, T_a — у кельвінах. Тоді з (2) маємо

$$\frac{\partial n}{\partial T_a} = 79 \frac{p}{T_a^2} \cdot 10^{-6},$$

або

$$C_n^2 = 79 \frac{p}{T_a^2} \cdot 10^{-6} C_T^2, \quad (3)$$

де $\frac{\partial n}{\partial T_a}$, $\frac{\partial C_T^2}{\partial T_a}$ — дисперсії n і T_a , C_n^2 і C_T^2 — їхні структурні характеристики.

При $p_a = 1015$ гПа, $T_a = 298$ К з (3) маємо $C_n^2 = 0.91 \cdot 10^{-12} C_T^2$. Звідси $C_T = 1.05 \cdot 10^6 C_n \text{ K m}^{-1/3}$. З іншого боку, структурна характеристика флуктуацій [10] дорівнює

$$C_T^2 = a_t a^2 L_0^{4/3} g^2, \quad (4)$$

де $a = \frac{\partial n}{\partial T_a}$, $a_t = \frac{\partial C_T^2}{\partial T_a}$, $g = g / C_p = 0.01$ К/м — адіабатичний градієнт температури, g — прискорення вільного падіння, $a = \frac{\partial n}{\partial T_a} / z$, $a_t = 1$ — турбулентне число Прандтля; $a^2 = 2.83$, $L_0 = z$ — зовнішній масштаб турбулентності, $\alpha = 0.4$ — стала Кармана [9]. При $z_0 = 3$ м з (4) маємо $L_0 = 1.2$ м, $C_T = 0.30 C_n$.

При цьому справедливе співвідношення

$$C_T = C_n L_0^{1/3}. \quad (5)$$

Для $L_0 = 1.2$ м маємо $C_T = 1.06 C_n$.

Результати розрахунків для СЗ 20 березня 2015 р. і 10 червня 2021 р., виконаних відповідно до описаного алгоритму (співвідношення (1)...(5)), наведено у табл. 1 і 2. Видно, що у міру покриття диска Сонця значення C_n зменшувалися, а отже, зменшувалися такі параметри атмосфери, як C_n , C_T , C_T і C_T . Потім у міру зменшення затіненої частини диска Сонця значення цих параметрів збільшувалися. Поблизу головної фази затемнення інтенсивність конвекції помітно зменшувалася, але навіть при функції покриття диска Сонця $A_{\max} = 0.73$ її внесок дорівнював приблизно 0.43 [13].

Таблиця 1. Основні параметри, які описують атмосферну конвекцію вдень 20 березня 2015 р.

LT	m	$C_n, 10^{-7} \text{М}^{-1/3}$	$C_T, \text{К} \text{М}^{-1/3}$	$\tau, \text{К}$	$\rho, \text{К} \text{М}^{-1}$
09:00	0.39	3.9	0.41	0.43	0.12
09:30	0.41	4.1	0.43	0.46	0.13
10:00	0.44	4.4	0.46	0.49	0.14
10:30	0.48	4.8	0.50	0.53	0.15
11:00	0.486	4.9	0.51	0.54	0.15
11:30	0.47	4.7	0.49	0.52	0.15
12:00	0.44	4.4	0.46	0.49	0.14
12:30	0.43	4.2	0.45	0.48	0.14
13:00	0.45	4.5	0.47	0.50	0.14
13:30	0.46	4.6	0.48	0.51	0.14
14:00	0.48	4.8	0.50	0.53	0.15
14:30	0.49	4.9	0.51	0.54	0.15
15:00	0.48	4.8	0.50	0.53	0.15
15:30	0.47	4.7	0.49	0.52	0.15
16:00	0.46	4.6	0.48	0.51	0.14
16:30	0.45	4.5	0.47	0.50	0.14
17:00	0.446	4.4	0.46	0.49	0.14

Таблиця 2. Основні параметри, які описують атмосферну конвекцію 10 червня 2021 р.

LT	m	$C_n, 10^{-7} \text{М}^{-1/3}$	$C_T, \text{К} \text{М}^{-1/3}$	$\tau, \text{К}$	$\rho, \text{К} \text{М}^{-1}$
09:00	0.8	8	0.84	0.89	0.25
09:30	0.805	8.05	0.85	0.90	0.26
10:00	0.81	8.1	0.85	0.90	0.26
10:30	0.825	8.25	0.87	0.92	0.26
11:00	0.875	8.75	0.92	0.98	0.28
11:30	0.96	9.6	1.01	1.07	0.30
12:00	1.03	10.3	1.08	1.14	0.32
12:30	1.08	10.8	1.13	1.20	0.34
13:00	1.11	11.1	1.17	1.24	0.35
13:30	1.13	11.3	1.19	1.26	0.36
14:00	1.11	11.1	1.13	1.20	0.34
14:30	1.05	10.5	1.11	1.18	0.33
15:00	1.025	10.25	1.08	1.14	0.32
15:30	1.02	10.2	1.07	1.13	0.32
16:00	1	10	1.05	1.11	0.32
16:30	0.98	9.8	1.03	1.09	0.31
17:00	0.97	9.7	1.02	1.08	0.31

Динамічні процеси, що супроводжували сонячні затемнення. Опишемо процеси у найнижчих шарах атмосфери. Зазвичай із затемненням пов'язане зменшення величини m , а потім подальше її збільшення. У першому наближенні $m(t)$ якісно повторює хід функції $1 - A(t)$, однак m_{\min} запізнюється відносно A_{\max} приблизно на $t - 16 \pm 1$ хв. Тут $A(t)$ — функція покриття (відносна площа покриття диска Сонця).

Зменшення величини τ_m при СЗ можна пояснити поступовим послабленням конвективних процесів. Справді, $\tau_m^2 \propto C_T^2$. В свою чергу, як випливає з (4), $C_T^2 \propto \tau_m^{-2}$.

Запізнення реакції атмосфери на СЗ, вочевидь, пов'язане з опусканням верхньої межі шару з конвективними комітками на стадії покриття диска Сонця і з її підняттям на стадії зменшення його покриття. Характерна швидкість цього процесу $v_K = \sqrt{2K_t/t_0}$, де K_t — коефіцієнт теплообміну, $t_0/2$ — час покриття диска світила. Припускаючи $K_t = 1 \text{ м}^2/\text{с}$, $t_0 = 2$ год, отримаємо $v_K = 1.5 \text{ см/с}$. Тоді характерний час руху шару товщиною $L_K = 3z_0$ у прямому та зворотному напрямках становить $t_K = 2L_K/v_K = 6z_0/v_K = 18$ хв. Видно, що t_K і t є близькими між собою, тому їх можна ототожнити. Маючи значення інтервала кореляції $\tau_k = 50$ мс і $v_K = 1.5 \text{ см/с}$, можна оцінити внутрішній масштаб турбулентності $l_0 = v_K \tau_k = 0.75 \text{ мм}$. Таке значення l_0 узгоджується з даними [9, 10].

Пояснимо епізодичні флуктуації τ_m . По-перше, вони зумовлені покриттям частини неба хмарами, що призводило до охолодження земної поверхні, а отже й до деякого зменшення $|C_T|$ і τ_m . По-друге, флуктуації пов'язані зі збільшенням сили вітру, швидкість якого досягла значення $w = 6 \text{ м/с}$. При цьому густина середньої кінетичної енергії турбулентних пульсацій за час t збільшилась на [10]

$$\Delta \epsilon = u_*^2 \frac{w}{z} t.$$

Тут u_* — швидкість тертя, w/z — вертикальний градієнт горизонтальної швидкості вітру, ρ — щільність повітря. Звідси

$$\frac{1}{\tau_m} \frac{d\tau_m}{dt} = u_*^2 \frac{w}{z}.$$

Припускаючи $|w/z| = u_*/L_0$, $u_* = 0.1w = 0.6 \text{ м/с}$, $L_0 = z_0 = 1 \text{ м}$, отримаємо $|u_*^2 w/z| = u_*^3/L_0 = 0.216 \text{ м}^2/\text{с}^3$. У спокійних умовах в атмосфері на висоті $z_0 = 3 \text{ м}$ зазвичай ця величина є близькою до $0.03 \text{ м}^2/\text{с}^3$ [10], тобто в 7.2 раза меншою. Її флуктуації й зумовлювали флуктуації τ_m .

ОБГОВОРЕННЯ

Проведемо порівняльний аналіз ефекту конвекції семи СЗ у приземній атмосфері, які мали місце у період 1999—2021 р. (табл. 3). Дані про перші п'ять СЗ запозичено з монографії [13].

СЗ 11 серпня 1999 р. Ефекти цього затемнення можна розглядати як еталонні. Залежність $\tau_m(t)$ відстежувала поступове покриття, а потім — і відкриття диска Сонця. Мінімальне значення в залежності

$m(t)$ настало приблизно через 16–1 хв після настання головної фази затемнення.

СЗ 31 травня 2003 р. Практично таке ж запізнення, як і 11 серпня 1999 р., було й 31 травня 2003 р., близькими були й значення M_{\max} (0.79 і 0.73). Спостережуваний час запізнення зумовлений інерційністю конвективної активності приземної атмосфери. Хід залежності $m(t)$ після опівдня 11 серпня 1999 р. та вранці 31 травня 2003 р. істотно відрізнявся. У другому випадку СЗ затримало розвиток конвекції, яка активізувалася лише після 07:00 LT.

СЗ 3 жовтня 2005 р. Затемнення мало місце приблизно опівдні. Ефекти в цей день в цілому нагадували ефекти СЗ 11 серпня 1999 р., але були виражені слабше. Це пояснюється значеннями M_{\max} , які сильно відрізнялися (0.24 і 0.79 відповідно). Не було виявлено також і запізнення моменту настання m_{\min} по відношенню до моменту часу настання A_{\max} . Це пояснюється ефектом лише незначного (до 30 %) ослаблення конвективних процесів.

СЗ 29 березня 2006 р. Затемнення 29 березня 2006 р. і 11 серпня 1999 р. за своїми параметрами дуже близькі: значення M_{\max} становили 0.77 і 0.79, моменти настання та закінчення СЗ практично збігалися, моменти досягнення головної фази відрізнялися на 1 хв. Залежності $m(t)$ для цих затемнень різко відрізнялися. Справа в тому, що березневе затемнення супроводжувалося потужною хмарністю. Важливо також, що ранньою весною конвекція виражена слабо через відносно невелике прогрівання земної поверхні. Все це істотно змінило тепловий баланс в системі земна поверхня — приземна атмосфера, а це спричинило зміни турбулентних і конвективних процесів і, в кінцевому рахунку, зміни в залежності $m(t)$.

Таблиця 3. Максимальні значення середнього квадратичного відхилення m_{\max} для різних СЗ

Дата, LT	M_{\max}	A_{\max} , %	m_{\max}	T_{\max} , К	Примітки
11.08.1999 12:57...15:29	0.79	73	0.70	8	Хмарність не більше 15 %. Конвекція інтенсивна
31.05.2003 05:16...07:17	0.73	66	0.30	2.1	Хмарність була відсутня. Конвекція помірна
03.10.2005 11:36...13:42	0.24	13	0.16	2	Хмарність — до 35 %. Конвекція помірна
29.03.2006 13:02...15:21	0.77	72	0.10	2	Хмарність — до 30 %. Конвекція слабка
01.08.2008 12:11...14:17	0.42	31	0.30	2	Епізодично Сонце покривалося хмарами. Конвекція інтенсивна
20.03.2015 12:09...14:21	0.54	44	0.08	1	Усе небо покрите напівпрозорим серпанком. Конвекція слабка
10.06.2021 13:42...15:21	0.11	4.4	0.025	1	Хмарність — до 90 %. Сонце покривалося хмарами. Конвекція слабка

СЗ 1 серпня 2008 р. Затемнення мало місце поблизу опівдня. Конвекція була досить інтенсивною. Затемнення лише частково її придушило. Зменшення $m_{\max} = 0.30$, хоча $M_{\max} = 0.42$.

СЗ 20 березня 2015 р. У контрольні дні значення m приблизно до 15:00 LT збільшувалися, а потім зменшувалися. Така поведінка є типовою для денного часу, вона зумовлена добовими варіаціями температури повітря та пов'язаними з ними варіаціями інтенсивності конвекції. Остання найбільше виражена поблизу опівдня.

У день СЗ поведінка m була іншою (див. рис. 1). З 09:00 LT до 11:00 LT спостерігалось збільшення значень m . Приблизно за 15 хв після початку СЗ значення m зменшувалися до 12:30 LT, де відзначався їхній мінімум. Після 12:30 LT і до 14:30 LT спостерігалось зростання значень m . Далі мало місце зменшення m від 0.49 до 0.445 о 17:00 LT. Залежність $m(t)$ якісно повторювала часові зміни освітленості поверхні Землі та температури повітря у приземному шарі атмосфери, запізнюючись по відношенню до зміни освітленості на 15 хв. При $t_{a \max} = 1$ С маємо $m_{\max} = 0.06$.

Як впливає з табл. 1, часові варіації параметрів атмосферної конвекції $C_n(t)$, $C_T(t)$, $t_{a \max}(t)$ і $m(t)$ приблизно повторювали часові варіації $m(t)$. Поблизу 12:30 LT $m_{\min} = 0.43$, $C_{n \min} = 4.2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^{-1/3}$, $C_{T \min} = 0.45 \text{ К м}^{-1/3}$, $t_{a \min} = 0.48 \text{ К}$ і $m_{\min} = 0.14 \text{ К м}^{-1}$.

СЗ 10 червня 2021 р. У контрольні дні значення m збільшувалися приблизно від 0.8 до 1.05 і 1.0 9 і 11 червня 2021 р. відповідно (див. рис. 2). 11 червня 2021 р. близько 13:00 LT спостерігалось значне зменшення m , зумовлене екрануванням сонячного диска великою хмарою. Це тривало близько 2 год. Менше падіння, пов'язане з екрануванням хмарою, відмічалось в інтервалі часу 14:30...15:30 LT. Посилення хмарної структури як 9 червня 2021 р., так і 11 червня 2021 р. призводило до зменшення величини m після 12:30 LT та 14:30 LT відповідно.

Поведінка $m(t)$ у день СЗ була дещо іншою. До 13:00 LT відмічалось швидке зростання m від 0.8 до 1.13. Після цього диск Сонця спочатку закрився хмарами, а після 13:42 LT розпочалось СЗ. У результаті цих факторів значення m зменшились від 1.13 до 1.02. За оцінками, безпосередньо з затемненням пов'язане зменшення m приблизно на 0.025. При цьому $t_{a \max} = 1$ С. Через малі значення $M = 0.11$ величина $m = 0.025$, що помітно менше, ніж ця величина 20 березня 2015 р.

З табл. 2 і рис. 2 видно, що поблизу головної фази СЗ, тобто приблизно о 14:30 LT, $m = 1.05$, $C_n = 10.5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^{-1/3}$, $C_T = 1.11 \text{ К м}^{-1/3}$, $t_{a \max} = 1.18 \text{ К}$ і $m_{\max} = 0.33 \text{ К м}^{-1}$. Ці значення дещо більші від аналогічних значень 20 березня 2015 р., оскільки навесні через нижчі температури конвективні процеси менш виражені.

У цілому результати спостереження протягом СЗ 20 березня 2015 р. і 10 червня 2021 р. узгоджуються з результатами наших спостережень у періоди інших затемнень [1—5, 11—14].

Часові варіації температури повітря та ефект конвекції у приземній атмосфері були близькими до прогнозованих. Вони залежали від часу доби, сезону, ступені покриття диска Сонця та від інтенсивності хмарної структури [1—5, 11—14].

Отримані результати свідчать про те, що спостереження тремтіння краю сонячного диска під час затемнень можна використовувати для досліджень динаміки приземної атмосфери.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

1. Проведено спостереження тремтіння краю сонячного диска в дні СЗ 20 березня 2015 р. та 10 червня 2021 р., а також в контрольні дні, що мають на меті оцінити основні параметри атмосферної конвекції.

2. Варіації параметрів конвекції якісно подібні варіаціям освітленості земної поверхні та температури повітря у приземному шарі атмосфери.

3. У літню пору всі параметри, пов'язані з конвекцією, приблизно удвічі більші, ніж навесні.

4. Вплив СЗ 10 червня 2021 р. на атмосферну конвекцію був істотно меншим, ніж вплив затемнення 20 березня 2015 р. Це пояснюється незначною фазою СЗ (0.11 проти 0.54).

5. Хмари, що екранували сонячний диск, помітно придушували атмосферну конвекцію.

6. Проведений порівняльний аналіз ефекту конвекції для семи СЗ, які мали місце в 1999—2021 рр., показав, що величина ефекту істотно залежала від стану атмосферної погоди, хмарності, часу доби, пори року та фази СЗ.

Роботу виконано за фінансової підтримки Національного фонду досліджень України, проект 2020.02/0015 «Теоретичні та експериментальні дослідження глобальних збурень природного і техногенного походження в системі Земля — атмосфера — іоносфера». Роботу також частково підтримано в рамках держбюджетної НДР, заданої МОН України (номери держреєстрації 0119U002538, 0121U109881 та 0121U109882).

1. Акимов А. Л., Акимов Л. А., Черногор Л. Ф. Параметры турбулентных процессов в атмосфере, сопровождавших затмения Солнца. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2007. 12, № 2. С. 117—135.
2. Акимов А. Л., Черногор Л. Ф. Эффекты солнечного затмения 1 августа 2008 г. у приземной атмосфере. *Кинематика и физика небес. тел.* 2010. 26, № 3. С. 58—74.
3. Акимов Л. А., Боговский В. К., Григоренко Е. И., Таран В. И., Черногор Л. Ф.

- Атмосферно-ионосферные эффекты солнечного затмения 31 мая 2003 года в Харькове. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2005. 45, № 4. С. 526—551.
4. Акимов Л. А., Григоренко Е. И., Таран В. И., Тырнов О. Ф., Черногор Л. Ф. Комплексные радиофизические и оптические исследования динамических процессов в атмосфере и геокосмосе, вызванных солнечным затмением 11 августа 1999 года. *Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники*. 2002. № 2. С. 25—63.
 5. Акимов Л. А., Григоренко Е. И., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Особенности атмосферно-ионосферных эффектов солнечного затмения 31 мая 2003 года: результаты оптических и радиофизических наблюдений в Харькове. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2005. № 3. С. 55—70.
 6. Клиффорд С. Ф. Классическая теория распространения волн в турбулентной среде. *Распространение лазерного пучка в атмосфере*. М.: Мир, 1981. С. 18—60.
 7. Колчинский И. Г. *Оптическая нестабильность земной атмосферы по наблюдениям звезд*. Киев: Наукова думка, 1967. 184 с.
 8. Лукин В. П. Коррекция случайных угловых смещений оптических пучков. *Квантовая электроника*. 1980. 7. С. 1270—1279.
 9. Монин А. С., Яглом А. М. *Статистическая гидромеханика*. М.: Наука. Ч. 1. 1965. 640 с., Ч. 2. 1967. 720 с.
 10. Татарский В. И. *Распространение волн в турбулентной атмосфере*. М.: Наука, 1967. 548 с.
 11. Черногор Л. Ф. Эффекты солнечных затмений у приземной атмосфере. *Известия Академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2008. 44, № 4. С. 467—482.
 12. Черногор Л. Ф. Динамические процессы у приземной атмосфере у период солнечного затмения 1 августа 2008 г. *Известия Академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2011. 47, № 1. С. 84—95.
 13. Черногор Л. Ф. *Физические эффекты солнечных затмений в атмосфере и геокосмосе: Монография*. Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2013. 480 с.
 14. Черногор Л. Ф. Атмосферно-ионосферный отклик на солнечное затмение 20 марта 2015 г. над Харьковом. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2016. 56, № 5. С. 627—638.

REFERENCES

1. Akimov A. L., Akimov L. A., Chernogor L. F. (2007). Turbulence Parameters in the Atmosphere Associated with Solar Eclipses. *Radio Phys. and Radio Astron.* 12(2). 117—135 (In Russian).
2. Akimov A. L., Chernogor L. F. (2010). Effects of the solar eclipse of August 1, 2008 on the Earth's lower atmosphere. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies*. 26 (3). 135—145.
3. Akimov L. A., Bogovskii V. K., Grigorenko E. I., Taran V. I., Chernogor L. F. (2005). Atmospheric — Ionospheric Effects of the Solar Eclipse of May 31, 2003, in Kharkov. *Geomagnetism and Aeronomy*. 45 (4). 494—518.
4. Akimov L. A., Grigorenko E. I., Taran V. I., Tyrnov O. F., Chernogor L. F. (2002). The complex radio physical and optical studies of dynamic processes in the atmosphere and geospace caused by a solar eclipse August 11, 1999. *Zarubezhnaya radioelektronika. Uspekhi sovremennoy radioelektroniki*. 2. 25—63 (in Russian).
5. Akimov L. A., Grigorenko E. I., Taran V. I., Chernogor L. F. (2005). Features atmospheric-ionospheric effects of the solar eclipse of May 31, 2003: The results of

- the optical and radio physical observations in Kharkov. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*. (3). 55—70 (in Russian).
6. Klifford S. F. (1981). *The classical theory of wave propagation in a turbulent medium*. In.: *Laser Beam Propagation in the Atmosphere*. Berlin, Heidelberg: Springer, 9—43.
 7. Kolchinskii I. G. (1967). *Optical Instability of the Earth's Atmosphere from Observations of Stars*. Kiev: Naukova Dumka. [in Russian].
 8. Lukin V. P. (1980). Correction of random angular displacements of optical beams. *Soviet J. Quantum Electronics*. 10 (6). 727—732.
<http://dx.doi.org/10.1070/QE1980v010n06ABEH010279>
 9. Monin A. S., Yaglom A. M. (1971—2013). *Statistical Fluid Mechanics. The Mechanics of Turbulence*. Vol. I. 1971. Cambridge, MA: MIT Press. 769; Vol. II. 2013. Dover Publications. 896.
 10. Tatarski V. I. (1961). *Wave Propagation in a Turbulent Medium*. New-York: McGraw-Hill. 285 p.
 11. Chernogor L. F. (2008). Effects of solar eclipses in the surface atmosphere. *Izvestiya, Atmos. and Oceanic Phys.* 44 (4). 432—447.
 12. Chernogor L. F. (2011). Dynamic processes in the near-ground atmosphere during the solar eclipse of August 1, 2008. *Izvestiya. Atmos. and Oceanic Phys.* 47 (1). 77—86.
 13. Chernogor L. F. (2013). *Physical effects of solar eclipses in atmosphere and geospace: monograph*. Kharkiv. V. N. Karazin Kharkiv National University Publ. 480 p. (in Russian).
 14. Chernogor L. F. (2016). Atmosphere — Ionosphere response to solar eclipse over Kharkiv on March 20, 2015. *Geomagnetism and Aeronomy*. 56 (5). 592—603.

L. F. Chernogor

V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

CONVECTION EFFECT IN THE ATMOSPHERIC SURFACE LAYER IN THE COURSE OF SOLAR ECLIPSES OF 20 MARCH 2015 AND 10 JUNE 2021

The parameters of geophysical fields and numerous parameters of the Earth — atmosphere — ionosphere — magnetosphere system undergo significant changes in the course of a solar eclipse (SE). In particular, the planet surface temperature decreases, the convection and turbulent processes slow down, and the atmospheric temperature near the ground reduces during an eclipse. The inhomogeneous structure of the atmospheric surface layer notably changes, the role of temperature fluctuations in this layer reduces, and consequently, the role of fluctuations in the atmospheric refractive index diminishes. The purpose of this work is to present the analysis of observational data about solar limb flickering during the two last partial SE that took place near the city of Kharkiv on 20 March 2015 and 10 June 2021 and to analyze the estimates of the statistical parameters governing air convection. The SE effects in the atmospheric surface layer were observed via the optical AFR-2 chromospheric-photospheric telescope at the V. N. Karazin National University Kharkiv Astronomical Observatory 70 km from the city of Kharkiv in the southeast direction. The flickering of the solar limb was measured on the days of the SE of 20 March 2015 and of 10 June 2021, as well as on the reference days in order to determine the basic parameters of the atmospheric convection. The variations in the convection parameters are qualitatively similar to variations in illumination of the Earth's surface and in the air temperature in the atmospheric surface layer. In the summertime, all parameters concerning convection are a factor of approximately 2 greater than those in the springtime. The influence of the SE of 10 June 2021 on atmospheric convection was considerably smaller than the influence of

the 20 March 2015 eclipse, which is explained by an insignificant magnitude of SE (0.11 vs. 0.54), and by a cloudy sky screening the solar disk, which appreciably suppressed atmospheric convection. The comparative study of convection during seven SE that took place during 1999—2021 has shown that the magnitude of the effect significantly depended on season, local time, the state of tropospheric weather, the magnitude of a solar eclipse, and the thickness of the cloud cover.

Keywords: solar eclipse, statistical parameters of turbulence, air temperature variations, atmospheric convection, solar eclipse magnitude.

Стаття надійшла до редакції 01.07.2021

Після доопрацювання: 01.07.2021

Прийнята до друку: 19.08.2021