

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2021.06.034>

УДК 551.590.24;551.524.3

Л. Ф. Черногор

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

Тепловий ефект сонячного затемнення 10 червня 2021 р. у приземній атмосфері

Особливість сонячного затемнення (СЗ) 147 сароса полягала в тому, що воно було кільцеподібним. СЗ почалося 10 червня 2021 р. о 08:12:20 UT, а закінчилося о 13:11:19 UT. Кільцеве СЗ спостерігалось з 09:49:50 UT до 11:33:43 UT. Фаза максимального покриття диска Сонця мала місце з 10:33:16 до 10:36:56 UT. Затемнення почалося над територією Канади. Тінь рухалась через Гренландію (де відзначалася найбільша фаза), Північний Льодовитий океан, Північний полюс, островів Нова Сибір і Росію. Часткове СЗ відмічалось у Монголії, на більшій частині Китаю, на північному сході США, на півночі Аляски, у всьому Північному Льодовитому океані, у північній частині Атлантики. Часткове СЗ спостерігалось і на більшій частині України. Виняток склали лише південні частини Одеської, Миколаївської та Херсонської областей, а також Крим. Метою цієї роботи є виклад результатів спостереження теплового (температурного) ефекту СЗ 10 червня 2021 р. в Харкові у приземній атмосфері, а також результатів порівняння теплових ефектів восьми затемнень, які спостерігалися в одній і тій же місцевості у 1999—2021 рр. Спостереження ефектів у приземній атмосфері виконано в Радіофізичній обсерваторії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна (поблизу м. Харків). Вимірюванням підлягали температура, тиск, вологість повітря, напрямок і сила вітру. Точність вимірювання температури становила 0.1 °С. Оцінено енергетичні характеристики сонячних затемнень. Показано, що в результаті затемнення внутрішня енергія газу у приземній атмосфері зменшується приблизно на $5.3 \cdot 10^{18}$ Дж, чому відповідає середня потужність 1.2 ТВт. Питомі значення енергії і потужності становлять 4.5 кДж/м^3 і 1.4 Вт/м^3 . Проведено спостереження варіацій температури повітря у приземній атмосфері в

день сонячного затемнення та в контрольні дні, а також виконаний аналіз цих варіацій. Проаналізовано стан атмосферної погоди в день затемнення та сусідні з ним дні. Відзначено, що стан погоди був не дуже сприятливим для спостережень теплового ефекту затемнення. Оцінено охолодження атмосфери поблизу фази максимального покриття диска Сонця. Зменшення температури становило близько 1 °С. Проведено порівняльний аналіз температурного ефекту у приземній атмосфері для восьми сонячних затемнень, які спостерігались в одній і тій же обсерваторії в 1999—2021 рр. Відмінності ефектів пояснюються різними сезонами року, часом доби, наявністю хмарної структури, станом поверхні Землі і різною інтенсивністю атмосферної конвекції.

Ключові слова: сонячне затемнення, приземна атмосфера, варіації температури, конвекція, порівняльний аналіз.

ВСТУП

Сонячне затемнення (СЗ), як відомо, досить рідкісне природне явище для конкретної місцевості. Повне СЗ триває 2...3 хв, а часткове — близько 2...3 год. Смуга повного СЗ має ширину близько 100 км, а часткового — близько 4...5 тис. км. Довжина смуги близька до 10 тис. км. Залежно від широти швидкість руху місячної тіні по поверхні Землі становить 0.5...1 км/с.

Енергетика СЗ — значна, що призводить до варіацій усіх геофізичних полів, зміни параметрів процесів у всіх підсистемах системи Земля — атмосфера — іоносфера — магнітосфера (ЗАІМ) [23, 29].

Відомо, що кілька тисячоліть вивчення СЗ було справою астрономів.

В даний час дослідження реакції всіх земних оболонок на СЗ стали міждисциплінарними. До астрономів і геофізиків приєдналися метеорологи, біологи, екологи, медики (офтальмологи, оптометристи і навіть психологи), соціологи та інші фахівці [41].

СЗ дає дослідникам унікальну можливість простежити за динамікою навколосезонного середовища та геофізичних полів при значній (до 100 %) зміні освітленості Землі при майже незмінному (не більше 10 %) зенітному куті Сонця. В цілому повне СЗ подібне до настання короткочасної ночі, тому і супутні ефекти частково подібні. Часткове СЗ призводить до аналогічних ефектів, але менших за величиною.

Дослідженню ефектів СЗ в атмосфері присвячено велику кількість наукових робіт. Встановлено, що СЗ викликає цілий комплекс фізичних процесів в атмосфері [1—5, 7, 13, 19, 23, 25], іоносфері [6—31, 34, 37, 40—44] і геомагнітному полі [32, 35, 36, 38, 39]. До них належать: охолодження поверхні Землі, порушення режиму конвекції, охолодження повітря (атмосферного газу), генерація акустико-гравітаційних хвиль, зменшення концентрації електронів та іонів у іоносфері, змен-

шення їхніх температур, порушення динаміки іоносферної плазми, генерація збурень магнітного й електричного полів, зміна взаємодії підсистем у системі ЗАІМ. Важливо, що реакція цієї системи суттєво залежить не тільки від магнітуди СЗ, але і від активності Сонця, стану космічної та атмосферної погоди, місця спостереження тощо. Тому задача дослідження реакції навколосемного середовища на кожне нове СЗ залишається актуальною.

Метою цієї роботи є виклад результатів спостереження теплового (температурного) ефекту СЗ 10 червня 2021 р. в Харкові у приземній атмосфері, а також результатів порівняння теплових ефектів восьми затемнень, які спостерігалися в одній і тій же місцевості у 1999—2021 рр.

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО СОНЯЧНЕ ЗАТЕМНЕННЯ ТА ЗАСОБИ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

Особливість СЗ 147-го сароса полягала в тому, що воно було кільцеподібним.

СЗ почалося 10 червня 2021 р. о 8:12:20 UT (UT — всесвітній час), а закінчилося о 13:11:19 UT. Кільцеве СЗ спостерігалось з 09:49:50 UT до 11:33:43 UT. Фаза максимального покриття диска Сонця мала місце з 10:33:16 до 10:36:56 UT. Затемнення почалося над територією Канади. Тінь рухалась далі через Гренландію (де відзначалась найбільша фаза), Північний Льодовитий океан, Північний полюс, острів Нова Сибір і Росію (Якутію, Чукотку, Магаданську область, Камчатський край). Часткове СЗ спостерігалось у північній і середній частинах Європи, крім півдня Апеннін і Балкан, Криму, Кавказу, південних районів Середньої Азії, Приморського краю, Сахаліну, півдня Чукотки. Часткове СЗ відмічалось у Монголії, на більшій частині Китаю, на північному сході США, на півночі Аляски, у всьому Північному Льодовитому океані, у північній частині Атлантики.

Часткове СЗ спостерігалось і на більшій частині України. Виняток склали лише південні частини Одеської, Миколаївської та Херсонської областей, а також Крим.

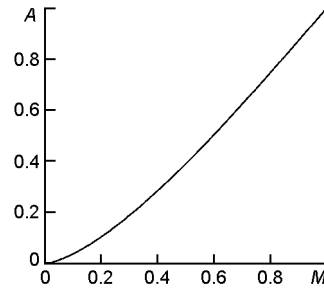
Кількісно затемнення характеризується магнітудою (фазою) M , яка дорівнює відносному зменшенню діаметра диска Сонця. При повному СЗ $M = 1$. Крім магнітуди, затемнення характеризують параметром A , що дорівнює долі затіненої площі диска. Між A і M є такий функціональний зв'язок [33]:

$$A = \frac{2}{\pi} (\arcsin \sqrt{2M - M^2} - (1 - M) \sqrt{2M - M^2}).$$

Залежність $A(M)$ наведено на рис. 1.

Протягом СЗ 10 червня 2021 р. в Харкові $M_{\max} = 0.11$ (точніше 0.112), а $A_{\max} = 4.4\%$. Затемнення почалося о 10:42 UT (13:42 LT), а

Рис. 1. Залежність долі A покритої площі сонячного диска від фази затемнення M



закінчилося о 12:12 UT (15:12 LT). Максимальна фаза мала місце о 11:28 UT (14:28 LT).

Спостереження ефектів у приземній атмосфері виконано в Радіофізичній обсерваторії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна (поблизу м. Харків). Вимірюванням підлягали температура t_a , тиск, вологість повітря, напрям і сила вітру. Для цього використовувалися стандартні вимірювальні прилади. Точність вимірювання температури становила $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

ЕНЕРГЕТИЧНІ ОЦІНКИ

СЗ належать до високоенергетичних джерел збурень, що впливають на систему ЗАІМ [23]. Найбільша енергетика притаманна приземній атмосфері. Оцінимо зміну теплової (внутрішньої) енергії повітря у приземній атмосфері протягом СЗ. Врахуємо, що повітря нагрівається від поверхні Землі за рахунок конвекції, теплопередачі і випромінювання. Головним механізмом вважатимемо конвекцію. За час t_0 тривалості СЗ в даній місцевості конвективні потоки змінюються у приземному шарі атмосфери товщиною

$$L_{t_{\max}} = \sqrt{D_t t_0}, \quad (1)$$

де D_t — коефіцієнт теплообміну. При $D_t = 1\text{ м}^2/\text{с}$ і $t_0 = 2.5\text{ год}$ з (1) маємо $L_{t_{\max}} = 95\text{ м}$.

Зміна теплової енергії дорівнює

$$E = C_0 V T, \quad (2)$$

де C — питома теплоємність повітря при постійному тиску, ρ_0 — густина повітря біля поверхні Землі, V — об'єм охолодженого затемнення газу, T — зменшення температури повітря за рахунок затемнення. Значення T змінюється від нуля на межі затіненої області поверхні Землі до T_{\max} . У літню пору при $M = 1$ на території повного затемнення маємо $T_{\max} = 10\text{ К}$ [23]. Покладемо, що в середньому $T = 5\text{ К}$.

При діаметрі затіненої частини поверхні Землі $D = 4$ тис. км і середньому значенні $\bar{L}_t = 2L_{t_{\max}}/3$ маємо $V = 8.2 \cdot 10^{14} \text{ м}^3$. Тоді при $\rho =$

1.3 кг/м^3 і $T = 5 \text{ К}$ з (2) отримаємо $E = 5.3 \cdot 10^{18} \text{ Дж} = 1.3 \text{ Гт ТНТ}$. При характерній тривалості СЗ $t = t_0/2$ маємо потужність

$$P = \frac{E}{t} = 1.2 \text{ ПВт.}$$

Зауважимо, що все людство споживає потужність близько 20 ТВт, тобто у 60 разів менше від характерної потужності теплового процесу у приземній атмосфері, викликаної СЗ. Енергію в $5.3 \cdot 10^{18} \text{ Дж}$ воно споживає приблизно за три доби.

Питома теплова енергія

$$\frac{E}{V}, \quad (3)$$

і питома потужність

$$P = \frac{P}{V}. \quad (4)$$

З (3) і (4) маємо $\frac{E}{V} = 6500 \text{ Дж/м}^3$, $P = 1.4 \text{ Вт/м}^3$.

СТАН АТМОСФЕРНОЇ ПОГОДИ

Відмінною особливістю погоди з 7 по 13 червня 2021 р. було те, що з ранку небо було на 60...90 % покрите купчастими хмарами. Тиск атмосферного повітря був близьким до 1015 гПа, швидкість вітру $w = 0$ м/с. У середині дня (приблизно о 12:00 LT = 09:00 UT) виникали купчасто-дощові хмари. При цьому $w = 4...6$ м/с. Після цього спостерігалися опади. Зазвичай дощ тривав близько 20...30 хв. Температура повітря зменшувалася на 2 °С, а після зливи 12 червня 2021 р. — на 3 °С. Вологість повітря становила 90...95 %.

Покриття Сонця хмарами призводило до зменшення температури повітря від 2 до 3 °С.

Стан атмосферної погоди в день СЗ був таким. З 09:00 LT небо на 70 % було покрите купчастими хмарами, швидкість вітру $w = 0$ м/с, тиск повітря — близько 1015 гПа, вологість — 80...85 %. О 09:15, 09:30, 10:00, 10:30, 10:45, 11:15, 11:45, 12:30, 13:15, 13:30, 13:45, 14:00...17:00 LT хмарність становила відповідно 70, 60, 50, 90, 60, 40, 20, 20, 10...15, 40, 70...80, 85 %. З 13:15 до 13:37 LT та з 14:23 до 14:45 LT Сонце хмарами не закривалося.

З 17:30 LT до 19:00 LT епізодично спостерігалися слабкі опади у вигляді дощу.

Таким чином, стан погоди протягом СЗ не цілком сприяв спостереженню теплового ефекту затемнення.

ВАРІАЦІЇ ТЕМПЕРАТУРИ ПОВІТРЯ

Часова залежність температури повітря для денного часу для доби з СЗ та сусідніх з ним наведена на рис. 2. Крім того, на рис. 2 показано часові варіації цієї температури, усереднені за 30 днів (з 1 по 30 червня 2021 р.). Видно, що в ранковий час і у першій половині дня температура повітря в середньому зростала. Її тимчасові зменшення були пов'язані з наявністю хмар, які епізодично закривали Сонце. Після 13:00...14:00 LT відзначалося зменшення температури через вплив хмар. Після 15:30 LT температура протягом трьох годин змінювалася слабо. Винятком було 11 червня 2021 р. О 17:45 LT небо вкрилося купчасто-дошовими хмарами. О 18:42 LT почалася злива.

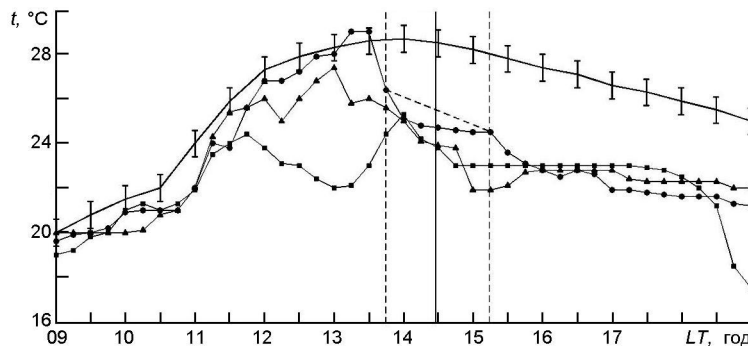


Рис. 2. Часова залежність температури повітря за інтервал часу 09:00...19:00 LT (06:00...16:00 UT). Трикутники — для 9 червня 2021 р., точки — 10 червня, квадратики — 11 червня. Суцільна лінія з довірчими інтервалами — середнє за 1...30 червня 2021 р. Штрихові вертикальні лінії — моменти початку і кінця СЗ, що спостерігалось над м. Харків, суцільна вертикальна лінія — момент максимального покриття. Штрихова лінія в інтервалі часу 13:45...15:15 LT — очікувана поведінка температури повітря за відсутності затемнення

Розглянемо докладніше поведінку температури повітря поблизу СЗ. О 13:37 LT Сонце покрила велика хмара. За 15 хв температура зменшилася від 29 до 26.4 С. Після 13:45 LT тривало падіння температури. Тепер воно було викликано затемненням. Поблизу максимальної фази СЗ температура становила 24.7 С, в кінці СЗ вона дорівнювала 24.5 С. Якщо інтерполювати значення температури для інтервалу часу 13:45...15:15 LT (див. на рис. 2, штрихова лінія), то виявиться, що затемнення призвело до зменшення температури $t_{a \max}$ приблизно на 1 С.

ОБГОВОРЕННЯ

У 1999—2021 рр. виконано однотипні спостереження зменшення температури повітря t_a в одній і тій же обсерваторії (поблизу м. Харків) для восьми СЗ. Максимальні зменшення $t_{a \max}$ для цих

затемнень наведено в таблиці. Відомості про $t_{a \max}$ для перших шести затемнень запозичені з монографії [23], для сьомого СЗ (20 березня 2015 р.) — з роботи [25].

Для літнього часу поблизу опівдня в роботі [23] отримано регресію

$$t_{a \max} = t_{mm} A_{\max}, \quad (5)$$

де t_{mm} , °С — параметр регресії, $A_{\max} = 0 \dots 1$. З виразу (5) випливає граничне значення $t_{a \max} = 10$ С при $A_{\max} = 1$ (= 100 %). Таке значення $t_{a \max}$ зумовлене інтенсивною конвекцією в середині літнього дня. Для інших сезонів та іншого часу доби значення t_{mm} значно менші. Крім того, t_{mm} не враховує можливу наявність хмар, що екранують Сонце, і опадів.

31 травня 2003 р. $A_{\max} = 66$ %, а $t_{a \max} = 2.1$ С. Такий відносно слабкий тепловий ефект пояснюється тим, що СЗ мало місце незабаром після сходу Сонця, коли конвекція ще виражена слабо.

3 жовтня 2005 р. $A_{\max} = 13$ %, а $t_{a \max} = 2$ °С, тобто приблизно на 1 °С менше очікуваного. Це пояснюється також досить слабкою конвекцією (осінь, перша половина дня).

29 березня 2006 р. СЗ спостерігалось приблизно опівдні. Однак при $A_{\max} = 72$ % значення $t_{a \max} = 2$ С. Хоча СЗ мало місце поблизу опівдня, температурний ефект був слабо виражений через високу (~80 %) хмарність і пору року (початок весни). Конвекція була виражена слабо.

Температурний ефект сонячних затемнень

Дата	UT	M_{\max}	A_{\max} , %	$t_{a \max}$, °С	Примітка
11.08.1999	09:57...12:29	0.81	73	8	Хмарність від 0 до 15 % Швидкість вітру 5...7 м/с
31.05.2003	02:16...04:17	0.73	65.5	2.1	Хмари відсутні. Швидкість вітру 1...2 м/с. СЗ мало місце в ранковий час
03.10.2005	08:36...10:42	0.24	13	2	Хмарність 30...35 %. Швидкість вітру 3...4 м/с, епізодично — 6...8 м/с
29.03.2006	10:02...12:21	0.77	69.7	2	Хмарність 20...30 %. Швидкість вітру 3...4 м/с. Протягом затемнення Сонце було закрито хмарами
01.08.2008	09:11...11:17	0.42	31	2	Сонце епізодично покривалося хмарами (30 % від часу спостереження). Швидкість вітру 4...6 м/с
04.01.2011	07:30...10:29	0.78	70.2	~ 0.1	Хмарність 100 %. Швидкість вітру 2...3 м/с
20.03.2015	09:09...11:21	0.54	44	1	Все небо закрито напівпрозорим серпанком
10.06.2021	10:42...12:12	0.11	4.4	1	Значна хмарність (до 90 %). Сонце закривалося хмарами

1 серпня 2008 р. при A_{\max} 31 % значення $t_{a \max}$ 2 °С, що пояснюється частковим (близько 10 % часу протягом СЗ) екрануванням Сонця хмарами. Падіння температури, викликане наявністю хмар, що покривають диск Сонця, в залежності від тривалості покриття становило від 1 до 4 °С. Про це свідчать спостереження в контрольні дні [23].

4 січня 2011 р. при A_{\max} 72 % отримано $t_{a \max}$ 0.1 °С. У цей і контрольні дні хмарність становила 100 %, поверхня Землі була покрита снігом. Конвекція була придушена, що відповідало зимовим умовам.

20 березня 2015 р. при A_{\max} 44 % величина $t_{a \max}$ 1 °С. У день СЗ небо було закрито напівпрозорим серпанком. Конвекція поблизу опівдня мала середню інтенсивність, що притаманно початку весни. Важливо, що снігового покриву не було.

10 червня 2021 р. при A_{\max} 4.4 % значення $t_{a \max}$ 1 °С, що пояснюється значною хмарністю (90 %). Протягом СЗ з 13:37 LT до 14:26 LT, а також з 14:45 LT до 15:30 LT Сонце було закрито хмарами. Процес конвекції при цьому сповільнювався, оскільки температура поверхні Землі зменшувалася, а слідом за нею зменшувалася температура повітря.

Ефекти від СЗ і хмар наклалися, що певною мірою ускладнило оцінку величини охолодження приземної атмосфери затемненням.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

1. Оцінено енергетичні характеристики сонячних затемнень. Показано, що в результаті затемнення внутрішня енергія газу у приземній атмосфері зменшується приблизно на $5.3 \cdot 10^{18}$ Дж, чому відповідає середня потужність 1.2 ПВт. Питомі значення енергії і потужності становлять 4.5 кДж/м^3 і 1.4 Вт/м^3 .

2. Проведено спостереження варіацій температури повітря у приземній атмосфері в день сонячного затемнення та у контрольні дні, а також аналіз цих варіацій.

3. Проаналізовано стан атмосферної погоди в день затемнення та сусідні з ним дні. Відзначено, що стан погоди був не дуже сприятливим для спостереження теплового ефекту затемнення.

4. Оцінено охолодження атмосфери поблизу фази максимального покриття диска Сонця. Зменшення температури дорівнювало близько 1 °С.

5. Проведено порівняльний аналіз температурного ефекту у приземній атмосфері для восьми сонячних затемнень, які спостерігалися в одній і тій же обсерваторії в 1999—2021 рр. Різниця в ефектах пояснюється різними сезонами року, часом доби, наявністю хмарної структури, станом поверхні Землі та різною інтенсивністю атмосферної конвекції.

Роботу виконано за фінансової підтримки Національного фонду досліджень України, проєкт 2020.02/0015 «Теоретичні та експериментальні дослідження глобальних збурень природного і техногенного походження в системі Земля — атмосфера — іоносфера», а також частково — у рамках фінансування держбюджетних НДР установ МОН України (номери держреєстрацій 0119U002538, 0121U109881 та 0121U109882 відповідно).

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—134.
2. Акимов А. Л., 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 аэрономия*. 2005. 45, № 4. С. 526—551.
3. 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.
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. Бурмака В. П., Григоренко Е. И., Емельянов Л. Я., Лысенко В. Н., Ляшенко М. В., Черногор Л. Ф. Радарные наблюдения эффектов в геокосмосе, вызванных частным солнечным затмением 29 марта 2006 г. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2007. № 3. С. 38—53.
7. Бурмака В. П., Лысенко В. Н., Ляшенко М. В., Черногор Л. Ф. Атмосферно-ионосферные эффекты частного солнечного затмения 3 октября 2005 г. в Харькове. 1. Результаты наблюдений. *Космічна наука і технологія*. 2007. 13, № 6. С. 74—86.
8. Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Волновые процессы в ионосфере в спокойных и возмущенных условиях. 1. Результаты наблюдений на харьковском радаре некогерентного рассеяния. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2006. 46, № 2. С. 193—208.
9. Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Волновые процессы в ионосфере в спокойных и возмущенных условиях. 2. Анализ результатов наблюдений и моделирование. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2006. 46, № 2. С. 209—218.
10. Гармаш К. П., Леус С. Г., Черногор Л. Ф. Радиофизические эффекты солнечного затмения 4 января 2011 г. на наклонных радиотрассах. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2011. 16, № 2. С. 164—176.
11. Гокон А. М., Черногор Л. Ф. Результаты наблюдения процессов в нижней ионосфере, сопутствующих затмению Солнца 11 августа 1999 г. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2000. 5, № 4. С. 348—360.
12. Григоренко Е. И., Пазюра С. А., Пуляев В. А., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Динамические процессы в ионосфере во время геокосмической бури 30 мая и затмения Солнца 31 мая 2003 года. *Космічна наука і технологія*. 2004. 10, № 1. С. 12—25.

13. Григоренко Е. И., Ляшенко М. В., Черногор Л. Ф. Эффекты в ионосфере и атмосфере, вызванные солнечным затмением 29 марта 2006 г. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2008. 48, № 3. С. 350—364.
14. Дзюбанов Д. А., Емельянов Л. Я., Черногор Л. Ф. Динамика плазмы ионосферы над Харьковом у период солнечного затмения 1 августа 2008 г. *Космічна наука і технологія*. 2009. 15, № 3. С. 62—69.
15. Домнин И. Ф., Емельянов Л. Я., Черногор Л. Ф. Динамика ионосферной плазмы над Харьковом во время солнечного затмения 4 января 2011 г. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2012. 17, № 2. С. 132—145.
16. Емельянов Л. Я., Ляшенко М. В., Черногор Л. Ф. Эффекты в геокосмической плазме во время частного затмения Солнца 1 августа 2008 г. над Харьковом. 1. Результаты наблюдений. *Космічна наука і технологія*. 2009. 15, № 3. С. 70—81.
17. Емельянов Л. Я., Склярів І. Б., Черногор Л. Ф. Отклик ионосферы на солнечное затмение 1 августа 2008 г.: результаты вертикального зондирования. *Космічна наука і технологія*. 2009. 15, № 4. С. 12—21.
18. Костров Л. С., Черногор Л. Ф. Результаты наблюдения процессов в средней ионосфере, сопутствующих затмению Солнца 11 августа 1999 г. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2000. 5, № 4. С. 361—370.
19. Ляшенко М. В., Черногор Л. Ф. Атмосферно-ионосферные эффекты частного солнечного затмения 3 октября 2005 г. в Харькове. 2. Моделирование и обсуждение результатов. *Космічна наука і технологія*. 2008. 14, № 1. С. 57—64.
20. Ляшенко М. В., Черногор Л. Ф. Эффекты в геокосмической плазме во время частного затмения Солнца 1 августа 2008 г. над Харьковом. 2. Результаты расчетов и обсуждение. *Космічна наука і технологія*. 2009. 15, № 4. С. 3—11.
21. Черногор Л. Ф. Высыпание электронов из магнитосферы, стимулированное затмением Солнца. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2000. 5, № 4. С. 371—375.
22. Черногор Л. Ф. Волновой отклик ионосферы на частное солнечное затмение 1 августа 2008 г. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2010. 50, № 3. С. 361—376.
23. Черногор Л. Ф. *Физические эффекты солнечных затмений в атмосфере и геокосмосе*. Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина. 2013. 480 с.
24. Черногор Л. Ф. Физические процессы в средней ионосфере, сопровождавшие солнечное затмение в Харькове 4 января 2011 г. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2013. 53, № 1. С. 22—34.
25. Черногор Л. Ф. Атмосферно-ионосферный отклик на солнечное затмение 20 марта 2015 г. над Харьковом. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2016. 56, № 5. С. 627—638.
26. Черногор Л. Ф., Барабаш В. В. Отклик средней ионосферы на солнечное затмение 4 января 2011 г. в Харькове: Результаты вертикального зондирования. *Космічна наука і технологія*. 2011. 17, № 4. С. 41—52.
27. Черногор Л. Ф., Гармаш К. П. Магнито-ионосферные эффекты солнечного затмения 20 марта 2015 г. над Харьковом. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2017. 57, № 1. С. 79—90.
28. Черногор Л. Ф., Милованов Ю. Б. Ионосферні ефекти сонячного затемнення 11 серпня 2018 року над Китаєм. *Кінематика і фізика небес. тїл.* 2020. 36, № 6. С. 37—64.
29. Chernogor L. F. The Earth-atmosphere-geospace system: main properties and processes. *Int. J. Remote Sensing*. 2011. 32, № 11. P. 3199—3218.
30. Chernogor L. F., Domnin I. F., Emelyanov L. Ya., Lyashenko M. V. Physical processes in the ionosphere during the solar eclipse on March 20, 2015 over Kharkiv, Ukraine (49.6°N, 36.3°E). *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2019. 182. P. 1—9.
31. Coster A. J., Goncharenko L., Zhang S. R., Erickson P. J., Rideout W., Vierinen J. *ISSN 0233-7665. Кінематика і фізика небес. тїл.* 2021. Т. 37, № 6

- GNSS observations of ionospheric variations during the 21 August 2017 solar eclipse. *Geophys. Res. Lett.* 2017. 44, № 24. P. 12041—12048.
32. Curto J. J., Heilig B., Piñol M. Modeling the geomagnetic effects caused by the solar eclipse of 11 August 1999. *J. Geophys. Res.* 2006. 111. A07312.
33. Egedal J., Ambolt N. The effect on geomagnetism of the solar eclipse of 30 June 1954. *J. Atmos. and Terr. Phys.* 1955. 7. C. 40—48.
34. Guo Q., Chernogor L. F., Garmash K. P., Rozumenko V. T., Zheng Y. Radio Monitoring of Dynamic Processes in the Ionosphere Over China During the Partial Solar Eclipse of 11 August 2018. *Radio Sci.* 2020. 55, № 2.
35. Ladynin A. V., Semakov N. N., Khomutov S. Yu. Changes in the daily geomagnetic variation during the total solar eclipse of 1 August 2008. *Russian Geology and Geophys.* 2011. 52. P. 343—352.
36. Malin S. R. S., Özcan O., Tank S. B., Tunçer M. K., Yazici-Çakin O. Geomagnetic Signature of the 11 August 1999 Total Eclipse. *Geophys. J. Int.* 2000. 140, № 3. F13—F16.
37. Marlton G. J., Williams P. D., Nicoll K. A. On the detection and attribution of gravity waves generated by the 20 March 2015 solar eclipse. *Phil. Trans. R. Soc. A.* 2016. 374.
38. Onovughe E. V. Geomagnetic signature of the total solar eclipse of 29 March 2006 over Africa and the comprehensive model prediction. *Universal J. Geosci.* 2013. 1, № 2. P. 77—83.
39. Özcan O., Aydoğdu M. Possible effects of the total solar eclipse of August 11, 1999 on the geomagnetic field variations over Elazığ-Turkey. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2004. 66, № 11. P. 997—1000.
40. Panasenko S. V., Otsuka Y., van de Kamp M., Chernogor L. F., Shinbori A., Tsugawa T., Nishioka M. Observation and characterization of traveling ionospheric disturbances induced by solar eclipse of 20 March 2015 using incoherent scatter radars and GPS networks. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2019. 191.
41. *Special Issue of Atmospheric Chemistry and Physics.* 2007. 7.
42. Stankov S. M., Bergeot N., Berghmans D., Bolsée D., Bruyninx C., Chevalier J. M., Clette F., De Backer H., De Keyser J., D’Huys E., Dominique M., Lemaire J. F., Magdalenic J., Marqué C., Pereira N., Pierrard V., Sapundjiev D., Seaton D. B., Stegen K., Linden R. V., Verhulst T. G. W., West M. J. Multi-instrument observations of the solar eclipse on 20 March 2015 and its effects on the ionosphere over Belgium and Europe. *J. Space Weather Space Clim.* 2017. 7. A19.
43. Uryadov V. P., Kolchev A. A., Vybornov F. I., Shumaev V. V., Egoshin A. I., Chernov A. G. Ionospheric effects of a solar eclipse of March 20, 2015 on oblique sounding paths in the Eurasian longitudinal sector. *Radiophys. Quantum Electron.* 2016. 59, № 6. P. 431—441.
44. Verhulst T. G. W., Sapundjiev D., Stankov S. M. High-resolution ionospheric observations and modeling over Belgium during the solar eclipse of 20 March 2015 including first results of ionospheric tilt and plasma drift measurements. *Adv. Space Res.* 2016. 57, № 11. P. 2407—2419.

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—134 [in Russian].
2. Akimov L. A., Chernogor L. F., Bogovskii V. K., Grigorenko E. I., Taran V. I. (2005). Atmospheric-ionospheric effects of the solar eclipse of May 31, 2003, in Kharkov. *Geomagnetism and Aeronomy.* 45(4). 494—518.

3. 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.
4. Akimov L. A., Grigorenko E. I., Taran V. I., Tyrnov O. F., Chernogor L. F. (2002). Complex radar and optical studies of dynamic processes in the atmosphere and geospace, related to the solar eclipse of August 11, 1999. *Zarubezhnaya radioelektronika. Usp. Sovrem. Radioelektron.* (2). 25—63 [in Russian].
5. Akimov L. A., Grigorenko E. I., Taran V. I., Chernogor L. F. (2005). The features of atmosphere and ionosphere effects of May 31, 2003 solar eclipse: optical and radiophysical observations results in Kharkiv. *Usp. Sovrem. Radioelektron.* (3). 55—70 [in Russian].
6. Burmaka V. P., Grigorenko Ye. I., Emel'yanov L. Ya., Lysenko V. N., Lyashenko M. V., Chernogor L. F. (2007). Radar observations of effects in geospace caused by a partial Solar eclipse on 29 March 2006. *Usp. Sovrem. Radioelektron.* (3). 38—53 [in Russian].
7. Burmaka V. P., Lysenko V. N., Lyashenko M. V., Chernogor L. F. (2007). Tropospheric-ionospheric effects of the 3 October 2005 partial solar eclipse in Kharkiv. 1. Observations. *Kosm. nauka tehnol.* [Space science and technology]. 13(6). 74—86 [in Russian].
8. Burmaka V. P., Taran V. I., Chernogor L. F. (2006). Wave-like processes in the ionosphere under quiet and disturbed conditions. 1. Kharkov incoherent scatter radar observations. *Geomagnetism and Aeronomy.* 46(2). 183—198.
9. Burmaka V. P., Taran V. I., Chernogor L. F. (2006). Wave-like processes in the ionosphere under quiet and disturbed conditions. 2. Analysis of observations and simulation. *Geomagnetism and Aeronomy.* 46(2). 199—208.
10. Garmash K. P., Leus S. G., Chernogor L. F. (2011). January 4, 2011 solar eclipse effects over radio circuits at oblique incidence. *Radio Phys. and Radio Astron.* 16(2). 164—176 [in Russian].
11. Gokov A. M., Chernogor L. F. (2000). Processes in Lower Ionosphere during August 11, 1999 Solar Eclipse. *Radio Phys. and Radio Astron.* 5(4). 348—360 [in Russian].
12. Grigorenko Ye. I., Pazura S. A., Puliaiev V. A., Taran V. I., Chernogor L. F. (2004). Dynamic processes in the ionosphere during the geospace storm on 30 May and Solar eclipse on 31 May 2003. *Kosm. nauka tehnol.* [Space science and technology]. 10(1). 12—25 [in Russian].
13. Grigorenko E. I., Lyashenko M. V., Chernogor L. F. (2008). Effects of the Solar eclipse of March 29, 2006, in the ionosphere and atmosphere. *Geomagnetism and Aeronomy.* 48(3). 337—351.
14. Dzyubanov D. A., Emelyanov L. Ya., Chernogor L. F. (2009). Plasma dynamics of the ionosphere above Kharkiv during the solar eclipse of 1 august 2008. *Kosm. nauka tehnol.* [Space science and technology]. 15(3). 62—69 [in Russian].
15. Domnin I. F., Emelyanov L. Ya., Chernogor L. F. (2012). The Dynamics of Ionosphere Plasma over Kharkiv during the Solar Eclipse of January 4, 2011. *Radio Phys. and Radio Astron.* 17(2). 132—145 [in Russian].
16. Emelyanov L. Ya., Lyashenko M. V., Chernogor L. F. (2009). Some effects in the geospace plasma during partial Solar eclipse of 1 august 2008 above Kharkiv. 1. The observation results. *Kosm. nauka tehnol.* [Space science and technology]. 15(3). 70—81 [in Russian].
17. Emelyanov L. Ya., Sklyarov I. B., Chernogor L. F. (2009). Ionosphere response to the solar eclipse on 1 august 2008: Some results of vertical sounding. *Kosm. nauka tehnol.* [Space science and technology]. 15(4). 12—21 [in Russian].
18. Kostrov L. S., Chernogor L. F. (2000). Processes in Bottomside Ionosphere during August 11, 1999 Solar Eclipse. *Radio Phys. and Radio Astron.* 5(4). 361—370 [in Russian].

- sian].
19. Lyashenko M. V., Chernogor L. F. (2008). Tropospheric-ionospheric effects of the 3 October 2005 partial solar eclipse in Kharkiv. 2. Modeling and discussion. *Kosm. nauka tehnol.* [Space science and technology]. 14(1). 57—64 [in Russian].
 20. Lyashenko M. V., Chernogor L. F. (2009). Some effects in the geospace plasma during the partial Solar eclipse of 1 August 2008 above Kharkov. 2. Calculation results and discussion. *Kosm. nauka tehnol.* [Space science and technology]. 15(4). 3—11 [in Russian].
 21. Chernogor L. F. (2000). Magnetosphere electron precipitation induced by a solar eclipse. *Radio Phys. and Radio Astron.* 5(4). 371—375 [in Russian].
 22. Chernogor L. F. (2010). Wave response of the ionosphere to the partial Solar eclipse of August 1, 2008. *Geomagnetism and Aeronomy.* 50(3). 346—361.
 23. Chernogor L. F. (2013). *Physical effects of solar eclipses in atmosphere and geospace.* (Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University) [in Russian].
 24. Chernogor L. F. (2013). Physical processes in the middle ionosphere accompanying the Solar eclipse of January 4, 2011, in Kharkov. *Geomagnetism and Aeronomy.* 53(1). 19—31.
 25. Chernogor L. F. (2016). Atmosphere-ionosphere response to solar eclipse over Kharkiv on March 20, 2015. *Geomagnetism and Aeronomy.* 56(5). 592—603.
 26. Chernogor L. F., Barabash V. V. (2011). The response of the middle ionosphere to the solar eclipse of 4 January 2011 in Kharkiv: some results of vertical sounding. *Kosm. nauka tehnol.* [Space science and technology]. 17(4). 41—52 [in Russian].
 27. Chernogor L. F., Garmash K. P. (2017). Magneto-ionospheric effects of the solar eclipse of March 20, 2015, over Kharkov. *Geomagnetism and Aeronomy.* 57(1). 72—83.
 28. Chernogor L. F., Mylovanov Yu. B. (2020). Ionospheric effects of the August 11, 2018, solar eclipse over the People's Republic of China. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies.* 36(6). 274—290.
 29. Chernogor L. F. (2011). The Earth-atmosphere-geospace system: main properties and processes. *Int. J. Remote Sensing.* 32(11). 3199—3218.
 30. Chernogor L. F., Domnin I. F., Emelyanov L. Ya., Lyashenko M. V. (2019). Physical processes in the ionosphere during the solar eclipse on March 20, 2015 over Kharkiv, Ukraine (49.6°N, 36.3°E). *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 182. 1—9.
 31. Coster A. J., Goncharenko L., Zhang S. R., Erickson P. J., Rideout W., Vierinen J. (2017). GNSS observations of ionospheric variations during the 21 August 2017 solar eclipse. *Geophys. Res. Lett.* 44(24). 12041—12048.
 32. Curto J. J., Heilig B., Piñol M. (2006). Modeling the geomagnetic effects caused by the solar eclipse of 11 August 1999. *J. Geophys. Res.* 111. A07312.
 33. Egedal J., Ambolt N. (1955). The effect on geomagnetism of the solar eclipse of 30 June 1954. *J. Atmos. and Terr. Phys.* 7. 40—48.
 34. Guo Q., Chernogor L. F., Garmash K. P., Rozumenko V. T., Zheng Y. (2020). Radio monitoring of dynamic processes in the ionosphere over China during the partial solar eclipse of 11 August 2018. *Radio Sci.* 55(2).
 35. Ladynin A. V., Semakov N. N., Khomutov S. Yu. (2011). Changes in the daily geomagnetic variation during the total solar eclipse of 1 August 2008. *Russian Geology and Geophys.* 52. 343—352.
 36. Malin S. R. S., Özcan O., Tank S. B., Tunçer M. K., Yazıcı-Çakin O. (2000). Geomagnetic Signature of the 11 August 1999 Total Eclipse. *Geophys. J. Int.* 140(3). F13—F16.
 37. Marlton G. J., Williams P. D., Nicoll K. A. (2016). On the detection and attribution of gravity waves generated by the 20 March 2015 solar eclipse. *Phil. Trans. R. Soc. A.* 374.

38. Onovughe E. V. (2013). Geomagnetic signature of the total solar eclipse of 29 March 2006 over Africa and the Comprehensive model prediction. *Universal J. Geosci.* 1(2). 77—83.
39. Özcan O., Aydoğdu M. (2004). Possible effects of the total solar eclipse of August 11, 1999 on the geomagnetic field variations over Elaziğ-Turkey. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 66(11). 997—1000.
40. Panasenko S. V., Otsuka Y., van de Kamp M., Chernogor L. F., Shinbori A., Tsugawa T., Nishioka M. (2019). Observation and characterization of traveling ionospheric disturbances induced by solar eclipse of 20 March 2015 using incoherent scatter radars and GPS networks. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 191.
41. *Special Issue of Atmospheric Chemistry and Physics.* (2007) 7.
42. Stankov S. M., Bergeot N., Berghmans D., Bolsée D., Bruyninx C., Chevalier J. M., Clette F., De Backer H., De Keyser J., D’Huys E., Dominique M., Lemaire J. F., Magdalenic J., Marqué C., Pereira N., Pierrard V., Sapundjiev D., Seaton D. B., Stegen K., Linden R. V., Verhulst T. G. W., West M. J. (2017). Multi-instrument observations of the solar eclipse on 20 March 2015 and its effects on the ionosphere over Belgium and Europe. *J. Space Weather Space Clim.* 7(A19).
43. Uryadov V. P., Kolchev A. A., Vybornov F. I., Shumaev V. V., Egoshin A. I., Chernov A. G. (2016). Ionospheric effects of a solar eclipse of March 20, 2015 on oblique sounding paths in the Eurasian longitudinal sector. *Radiophys. Quantum Electron.* 59(6). 431—441.
44. Verhulst T. G. W., Sapundjiev D., Stankov S. M. (2016). High-resolution ionospheric observations and modeling over Belgium during the solar eclipse of 20 March 2015 including first results of ionospheric tilt and plasma drift measurements. *Adv. Space Res.* 57(11). 2407—2419.

L. F. Chernogor

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

THERMAL EFFECT OF THE 10 JUNE 2021 ANNULAR SOLAR ECLIPSE IN THE ATMOSPHERIC SURFACE LAYER

A characteristic feature of the 10 June 2021 solar eclipse (SE) was that it was an annular eclipse and a member of Saros 147. The SE first contact occurred at 08:12:20 UT on 10 June 2021 and the fourth contact occurred at 13:11:19 UT. The maximum magnitude of the annular eclipse was observed from 09:49:50 UT to 11:33:43 UT. The annularity took place from 10:33:16 to 10:36:56 UT. The solar eclipse began over the area of Canada. The shade moved across the Greenland (where the annularity took place), the Arctic Ocean, the North Pole, the New Siberia Island, and the Russian Federation. The partial eclipse was noted in Mongolia, in a major part of the People’s Republic of China, in the North-East of the U.S.A., in the North Alaska, over all of the Arctic Ocean, and in the North Atlantic. The partial solar eclipse was also noted over major part of the Ukraine, except for the Odessa, Nikolaev, and Kherson provinces, as well as Crimea. The purpose of this work is to present the observations of the thermal (temperature) effect of the 10 June 2021 SE in the atmospheric surface layer in the city of Kharkiv, as well as the intercomparison of the thermal effects observed during eight eclipses that occurred in the same area during 1999—2021. The observations of the effects in the atmospheric surface layer were made at the V. N. Karazin National University Radiophysics Observatory, in the vicinity of the city of Kharkiv. The standard instrumentation acquired measurements in the temperature, atmospheric pressure and humidity, and in the direction and speed of the wind. The measurements of the temperature were made to 0.1 °C accuracy. The solar eclipse energy balance has been evaluated. The internal energy of gas in the atmospheric surface layer has been shown to decrease by about $5.3 \cdot 10^{18}$ J as a result of the solar eclipse, which

corresponds to an average power of 1.2 TW. The specific energy and power are 4.5 kJ/m^3 and 1.4 W/m^3 . The observations of variations in the temperature of the atmospheric surface layer were taken during the day of the solar eclipse and on the reference days, as well as the analysis of these variations was conducted. The state of the tropospheric weather on the day of the solar eclipse and on the adjacent days has been analyzed. The state of the weather has been noted not to be conducive to observing the thermal effect of the solar eclipse. The atmospheric cooling occurring during the maximum magnitude of the eclipse has been estimated; a decrease in the temperature amounted to about $1 \text{ }^\circ\text{C}$. The comparative study of the thermal effect in the atmospheric surface layer observed during eight solar eclipses at the same observatory during 1999—2021 has been performed. The differences in the effects arise from variations in the season, local time, the structure of the cloud cover, the state of the Earth's surface, and atmospheric convection.

Key words: solar eclipse, atmospheric surface layer, temperature variations, convection, comparative study.

Стаття надійшла до редакції 01.07.2021

Після доопрацювання 01.07.2021

Прийнята до друку 19.08.2021