

УДК 551.558, 551.596, 534.221

А. Л. Акимов, Л. Ф. Черногор

Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина
61077 Харьков, пл. Свободы, 4
e-mail: Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua

Эффекты солнечного затмения 1 августа 2008 г. в приземной атмосфере

Описаны результаты оптических наблюдений и анализа динамики эффектов в приземной атмосфере, сопровождавших частное (фаза около 0.42) затмение Солнца вблизи г. Харькова 1 августа 2008 г. в сравнении с эффектами частных затмений 11 августа 1999 г. и 3 октября 2005 г. Все три затмения имели место в околополуденное время. Обнаружено, что 3 октября 2005 г., 1 августа 2008 г. и 11 августа 1999 г. при максимальном значении функции покрытия, равном 0.13, 0.31 и 0.73, среднее квадратичное отклонение σ_s смещения края солнечного диска уменьшилось соответственно на 0.13, 0.30 и 0.68. Уменьшение температуры приземной атмосферы t_a при этом составило 1.3, 2.0 и 7.3 К. Времена запаздываний уменьшений σ_s и t_a составляли около 15 и 5 мин соответственно.

ЕФЕКТИ СОЛЯЧНОГО ЗАТЕМНЕННЯ 1 СЕРПНЯ 2008 Р. У ПРИЗЕМНІЙ АТМОСФЕРІ, Акімов О. Л., Черногор Л. Ф. — Описано результати оптичних спостережень і аналізу динаміки ефектів у приземній атмосфері, що супроводжували часткове (фаза близько 0.42) затемнення Сонця поблизу м. Харкова 1 серпня 2008 р. у порівнянні з ефектами часткових затемнень 11 серпня 1999 р. і 3 жовтня 2005 р. Усі три затемнення мали місце біля опівдня. Виявлено, що 3 жовтня 2005 р., 1 серпня 2008 р. і 11 серпня 1999 р. за максимального значення функції покриття, що дорівнювало 0.13, 0.31 і 0.73, середнє квадратичне відхилення σ_s зсуву краю сонячного диска зменшилося відповідно на 0.13, 0.30 і 0.68. Зменшення температури приземної атмосфери t_a під час цього складало 1.3, 2.0 і 7.3 К. Часи запізнювань зменшень σ_s та t_a склали близько 15 та 5 хв відповідно.

SOME EFFECTS OF THE SOLAR ECLIPSE ON 1 AUGUST 2008 AT THE AIR-EARTH BOUNDARY, by Akimov A. L., Chernogor L. F. — The ground-based optical observations made during the partial (42% of the solar disk diameter) solar eclipse on 1 August 2008 and the analysis of the dynamics of associated effects at the air-Earth boundary near the Kharkiv city are compared with effects of the solar eclipses observed on 11 August 1999 and 3 October 2005. All three solar eclipses occurred around midday. The rms value of the solar limb during the eclipses on 3 October 2005, 1 August 2008 and 11 August 1999 is revealed to decrease by 0.13, 0.30 and 0.68 arcsec at the maximum of visible solar surface coverage of 0.13, 0.31 and 0.73, respectively. The atmospheric temperature at the air-Earth boundary was decreased by 1.3, 2.0 and 7.3 K. The time lags of t_s and t_a decreases were about 15 and 5 min, respectively.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что затмение Солнца (ЗС) сопровождается существенными изменениями параметров среды и геофизических полей, а также вариациями в структуре системы Земля (подстилающая поверхность) — атмосфера — ионосфера — магнитосфера [23—27, 29, 36]. Наблюдения за различными физическими явлениями во время затмения позволяют проследить за динамикой взаимодействия подстилающей поверхности и атмосферы, за вариациями параметров различных геофизических полей (электрических, тепловых и т. д.). В общем ЗС подобно переходу сначала ото дня к ночи, а затем от ночи ко дню, поэтому и сопутствующие эффекты в обоих случаях отчасти подобны. Однако динамические процессы при конкретном затмении существенно зависят от метеорологической и геофизической обстановки, от степени возмущенности Солнца и околоземной среды, от времени суток и т. д. Наблюдения при каждом ЗС позволяют уточнить сопутствующие физические процессы и динамику среды.

Еще в 1920-х гг. предпринимались первые попытки проследить за вариациями параметров атмосферы во время полных или частных затмений Солнца. Наблюдения были успешно продолжены в 1950—1960-х гг. [12, 13, 28, 31]. В 1970-е гг. и позднее изучение процессов, сопутствующих затмениям, заметно активизировалось. Для этого использовался весь арсенал астрономических, радиофизических, а также ракетных и спутниковых методов [30, 35].

Благодаря указанным исследованиям установлено, что ЗС вызывает целый комплекс физических процессов во всех геофизических полях, в атмосфере, ионосфере и магнитосфере. К ним относятся: охлаждение атмосферы, уменьшение давления воздуха, генерация ударной волны плотности и, как результат, акустико-гравитационных волн (АГВ) в атмосфере, уменьшение концентрации электронов во всех областях ионосферы, уменьшение температур электронов и ионов в ионосфере и др. В результате этих процессов активизируется взаимо-

действие подсистем в системе Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера (ЗАИМ) [23—27, 29, 36]. В частности, изменяются тепловой режим и турбулентные процессы в системе «подстилающая поверхность — приземная атмосфера». Генерируемые в тропосфере, озоносфере и термосфере АГВ, распространяясь вверх, переносят энергию и импульс, модулируют параметры ионосферы и геомагнитного поля. Возникающие геомагнитные пульсации и альвеновские волны взаимодействуют с заряженными частицами радиационного пояса. За счет изменения направления потока плазмы из ионосферы в плазмосферу активизируется взаимодействие на уровне ионосфера — плазмосфера и т. д.

Эффектам затмений посвящен ряд новых работ [1, 3—7, 9—11, 14—17, 20, 22, 32—34]. Большинство из них описывают эффекты в верхней атмосфере и геокосмосе. Эффекты в приземной атмосфере обсуждаются в работах [1, 3—7, 15, 20]. В них показано, что ЗС приводит к изменению термического режима пограничного слоя атмосферы, изменению параметров механической и термической турбулентности, влажности воздуха, размеров аэрозолей и т. п. Изменяются также электрические характеристики приземной атмосферы [1].

Из-за сложности сопутствующих затмению процессов и их многообразия уровень понимания всей картины происходящих в приземной атмосфере явлений далек от желаемого. К этому следует добавить, что солнечные затмения в данной местности бывают относительно редко. Поэтому задача исследования эффектов ЗС в атмосфере и геокосмосе остается актуальной.

Ценность исследований возрастает при применении новых методов, открывающих недоступные ранее возможности. Одним из таких методов является используемый авторами метод анализа флуктуаций смещения края солнечного диска. Он хорошо себя зарекомендовал при изучении эффектов затмений в приземной атмосфере, динамики ее турбулентности и т. д. [2—7].

Цель работы — изложение результатов однотипных оптических наблюдений, а также анализа и сравнения динамики атмосферных эффектов трех ЗС, имевших место в околополуденное время вблизи г. Харькова 11 августа 1999 г., 3 октября 2005 г. и 1 августа 2008 г.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Сведения о затмении 1 августа 2008 г. ЗС началось в 08:04 (здесь и далее — мировое время UT) в северной части Канады, а закончилось в 12:38 в Китае. Центральная линия затененной области пересекла Гренландию, Арктику, Новую Землю, Центральную Россию, Монголию и Китай. Ширина этой области составляла 237 км, а скорость ее движения — около 900 м/с. Максимальная продолжительность полного ЗС имела место в 10:21.

Частное затмение наблюдалось в северной части Европы, включая Украину. В месте расположения Астрономической обсерватории, вблизи г. Харьков, ЗС началось в 09:11, закончилось в 11:17. Максимальное покрытие диаметра диска Солнца составляло около 0.42. Оно имело место в 10:15 (13:15 по киевскому времени, или около 13:37 местного времени).

Обстоятельства затмений 11 августа 1999 г. и 3 октября 2005 г., которые используются для сравнения, описаны в работе [7].

Функция покрытия Солнца. Освещенность поверхности Земли. Для описания освещенности поверхности Земли положим

$$E(t) = E(0)(1 - \tilde{A}(t))\cos \theta,$$

где $E(0) = E(\theta = 0)$, $\theta(t)$ — зенитный угол, \tilde{A} — функция покрытия диска Солнца при равномерном распределении яркости по нем. 1 августа 2008 г. освещенность достигала максимального значения E_{\max} при $\theta_{\min} = 31.8^\circ$.

При более точном описании в выражении (1) $\tilde{A}(t)$ следует заменить на $A(t)$, которая учитывает распределение яркости по диску Солнца. Учет последнего осуществлялся при помощи безразмерной функции

$$i(r) = \theta_0 (1 - \theta_0)(1 - r^2).$$

Здесь r — безразмерное расстояние до данной точки на диске Солнца от его центра, $\theta_0 = 0.46$ — коэффициент [8]. Связь между $A(t)$ и $\tilde{A}(t)$ следующая:

$$A(t) = \tilde{A}(t) i(r),$$

где $0 \leq r \leq 1$. При равномерном распределении очевидно, что $\theta_0 = 1$, а $A(t) = \tilde{A}(t)$. Заметим, что различие между функциями $A(t)$ и $\tilde{A}(t)$ может быть существенным, особенно на последних стадиях покрытия Солнца или при его незначительном затенении, как это было 1 августа 2008 г.

Энергетические характеристики. Описываемое ниже ЗС 1 августа 2008 г. было частным (см. таблицу). Максимальное значение функции покрытия Солнца $\tilde{A}(t) = S_{\text{obs}}/S_s$, где S_{obs} , S_s — площадь покрытой части Солнца и его полная площадь, не превышало 0.31. Освещенность поверхности Земли в момент максимального покрытия диска Солнца уменьшалась в 1.6 раза по сравнению с фоновыми днями. Это привело к уменьшению абсолютной температуры воздуха T_a по сравнению с контрольными днями на 2.0 К. Существенное охлаждение атмосферы имело место в течение времени $t_0 = 1.5$ ч. Исходя из этого, оценим энергетические характеристики возмущенной приземной атмосферы.

Для изменения объемной плотности внутренней энергии газа $\rho_T = C_p \rho \overline{T_a}$ имеем $\rho_T = 1.3 \text{ кДж/м}^3$. Здесь $C_p = 1 \text{ кДж/(кг К)}$ — теплоем-

кость газа при постоянном давлении, $\rho = 1.3 \text{ кг/м}^3$ — плотность приземного воздуха, $\overline{T_a} = T_a/2 = 1 \text{ К}$ — среднее изменение T_a за время t_0 . Такому значению $\overline{T_a}$ соответствует изменение удельной мощности $p_T = \overline{T_a}/t_0 = 0.24 \text{ Вт/м}^3$. Полученное значение $\overline{T_a}$ близко к изменению удельной энергии движения газа в циклоне (антициклоне). В то же время $p_T = 0.24 \text{ Вт/м}^3$ на 1—1.5 порядка превышает изменение удельной мощности движения газа в циклоне и соизмерима с аналогичной характеристикой для ураганов (тайфунов) и шквалов.

Оценим уменьшение внутренней энергии E_a приземной атмосферы и соответствующую мощность P_a . Оказалось, что $E_a = 2.1 \cdot 10^{19} \text{ Дж}$, $P_a = 3.9 \cdot 10^{15} \text{ Вт}$. Полученное значение E_a близко к энергии циклона. Величина P_a в 200 раз превышает мощность, потребляемую человечеством в настоящее время (около $2 \cdot 10^{13} \text{ Вт}$).

В озоносфере (высота $z = 30 \text{ км}$) значение $\rho = 10 \text{ г/м}^3$, а вертикальный масштаб близок к 10 км. Тогда при $\overline{T_a} = 1 \text{ К}$ приведенные выше удельные энергетические характеристики для озоносферы будут на два порядка меньше ($E_a = 3.3 \cdot 10^{18} \text{ Дж}$, $P_a = 6.1 \cdot 10^{14} \text{ Вт}$).

В начале термосферы, т. е. на высотах 100—120 км, $\rho = 10^{-7} \dots 10^{-6} \text{ кг/м}^3$, $\overline{T_a} = 50 \text{ К}$, и соответствующие удельные энергетические характеристики на 4—5 порядков меньше, чем эти же характеристики в приземной атмосфере. Поскольку вертикальный масштаб порядка 10 км, то $E_a = 1.7 \cdot 10^{15} \text{ Дж}$ и $P_a = 3.1 \cdot 10^{11} \text{ Вт}$.

Таким образом, ЗС приводят к существенным изменениям энергетики физических процессов в атмосфере и в системе ЗАИМ в целом, вызывая их перестройку. Изучению некоторых из этих процессов в приземной атмосфере и посвящена настоящая работа.

МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА

Состояние погоды, существенное для оптических наблюдений, было следующим (см. также таблицу). В день ЗС с 05:00 до 06:00 небо было безоблачным. Ветер — северный, слабый, при порывах его скорость достигала $u = 3 \dots 4 \text{ м/с}$. В 07:00 появились первые облака. В последующем облачность постепенно усиливалась. Так, в 07:15, 08:00 и 08:25 она уже составляла 5—10, 10—15 и 35—40 % соответственно. Солнце при этом оставалось открытым. В 08:35 к нему приблизилось большое (угловой размер $\approx 20^\circ$) темное, преддождевое облако. В 08:45 облако переместилось на юг. В 08:55 новое облако закрыло Солнце, но через две минуты светило открылось. Облачность составляла около 50 %. В 09:02 Солнце было закрыто сначала небольшим облаком, а в 09:06 — облаком с угловым размером около 20° . В 09:15 светило очистилось. В 09:26 оно было закрыто новым облаком с 30° . Скорость северного ветра составляла 5—6 м/с. В 09:38 Солнце откры-

Основные данные о затмениях Солнца и атмосферных эффектах

Характеристики и параметры	11 августа 1999 г.	3 октября 2005 г.	1 августа 2008 г.
Начало ЗС	09:57	08:36	09:11
Конец ЗС	12:29	10:42	11:17
Момент максимального покрытия	11:13	09:38	10:15
A_{\max}	0.73	0.13	0.31
E_{\max}/E_{\min}	3.9	1.3	1.6
\bar{u} , м/с	5—6		4—5
u_{\max} , м/с	15—16	1—2	5—6
Облачность	Появилась после 13:00	Практически ясно	>10 % от времени наблюдения (50 мин)
t_a , °C (max)	32	18	25
t_a , °C (max)	7.3	1.3	2.0
s_{\max}	1.15 ± 0.01	0.84 ± 0.01	1.37 ± 0.01
s_{\min}	0.38 ± 0.01	0.58 ± 0.01	1.06 ± 0.01
s (max)	0.68 ± 0.03	0.13 ± 0.02	0.30 ± 0.02

лось. Скорость ветра уменьшилась до 2—3 м/с. В 09:41, 09:45 и 10:22 светило покрывалось полупрозрачными облачками, которые незначительно изменяли освещенность поверхности Земли. В интервале времени 11:01—11:07 Солнце экранировалось облаком с $\tau = 15$. Следующий раз оно покрывается новым облаком в интервале времени 11:11—11:15. После этого момента времени Солнце долго остается открытым.

В 12:41 скорость порывов ветра составляла 6—7 м/с. В интервалах времени 12:55—12:57 и 13:20—13:22 светило было закрыто облаками. Постепенно ветер изменил направление и стал северо-западным, $u = 5 \dots 6$ м/с. С 14:02 до 14:10 Солнце было частично закрыто облаком.

Опишем кратко метеорологическую обстановку в фоновые дни. В качестве таковых выберем дни 28 июля и 2 августа 2008 г. Дни 29, 30 и 31 июля нецелесообразно использовать как фоновые, потому что в эти дни была значительная облачность в течение 60—70 % времени наблюдения.

Днем 28 июля облачность была слабой. Направление ветра — преимущественно северо-восточное, его скорость — около 6—8 м/с. Лишь к 11:00 облачность заметно увеличилась, но не превышала 10 %. Только к 13:00 она достигла 30—40 %, а к 13:25 облачность превысила 50—60 %. Огромная ($\tau = 30$) туча закрыла Солнце. Облачность продолжала увеличиваться до 13:40, после чего стала постепенно уменьшаться. К 14:30 облаками было закрыто не более 40—50 % неба.

2 августа 2008 г. небо было безоблачным до 07:15. После этого облачность постепенно увеличивалась. К 08:00 она составляла около 20 %, но уже к 12:30 облачность достигла 40—50 %.

В этот день погода была безветренной до 09:00. Затем появился ветер с $u = 1...2$ м/с, он стал постепенно усиливаться. В 10:00 и 12:30 скорость ветра составляла 2...3 и 4...5 м/с соответственно.

Опишем кратко метеоусловия для двух других ЗС, которые ниже используются для сравнения.

Утром 11 августа 1999 г. до 05:00 дул слабый восточный ветер. Затем его направление изменилось на юго-западное. В атмосфере отмечалась слабая дымка. Около 09:00 появились конвективные облака. К 10:00 ветер значительно усилился, большая часть неба была покрыта облаками. В 10:40 ветер достиг максимальной силы ($u = 15$ м/с). При сильных порывах ветра отмечалось дрожание телескопа с частотой около 8 Гц. В 11:00 ветер существенно ослабел, облака начали «рассыпаться», «таять», превращаться в дымку, и исчезать. К моменту максимальной фазы ЗС облака полностью исчезли, и прекратился ветер. Температура воздуха на высоте 2 м уменьшилась почти на 7.3 °С. Около 12:00 началось усиление ветра, появились небольшие облака. Примерно в 13:00 небо покрылось хорошо развитыми кучевыми облаками.

Днем 3 октября 2005 г. небо было безоблачным, скорость северо-западного ветра обычно не превышала 3...4 м/с. Некоторое усиление ветра имело место примерно в 07:30 и в интервале времени 08:50—08:55. При этом $u = 6...8$ м/с.

Добавим, что метеорологическая обстановка в контрольные дни 10 и 12 августа 1999 г., 2 и 4 октября 2005 г. была примерно такой же, как и в дни затмений.

СРЕДСТВА И МЕТОДЫ

Средства наблюдения. Эффекты трех ЗС в приземной атмосфере наблюдались при помощи оптического телескопа АФР-2, установленного в Астрономической обсерватории Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина (ХНУ), вблизи г. Харькова. Ее координаты следующие: 49 38 с. ш., 36 56 в. д.

Обсерватория, где выполнены оптические и метеорологические наблюдения, находилась в открытой ровной степи в 70 км на юго-восток от г. Харькова.

Эквивалентное фокусное расстояние телескопа составляло 7 м. Объектив расположен на высоте $z_0 = 3$ м (над поверхностью Земли). Основу измерительного комплекса составили телескоп, регистрирующая система и компьютер [3, 4].

Оптические измерения сопровождалась регистрацией каждые 5 мин (в фоновые дни — 15 мин) температуры воздуха. Для этого использовались разнесенные по горизонтали на расстояние около 10 м серийные термометры, погрешность измерения которых составляла 0.1 °С.

Методики измерения и обработки данных. Измерения температуры воздуха и уровня дрожания края солнечного диска выполнены накануне, в день ЗС и после него.

Световой сигнал $s(t)$ использовался для вычисления автокорреляционной функции $K_s(\tau)$ и энергетического спектра. Величина $K_s(0)$ пропорциональна дисперсии смещения σ_s^2 края солнечного диска, причем $K_s(0) = 10^{-4}$ соответствует $\sigma_s = 0.25''$.

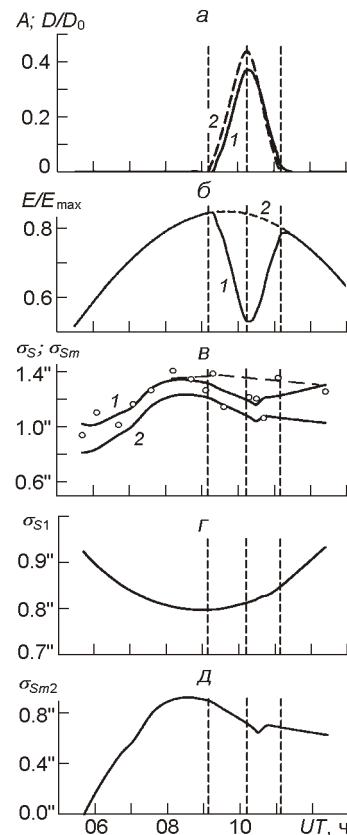
Объектом исследования в настоящей работе были временные вариации σ_s^2 , а также вызывающие их физические процессы.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Затмение Солнца 1 августа 2008 г. Временные вариации среднего квадратичного отклонения смещения края солнечного диска σ_s показаны на рис. 1. Видно, что значения σ_s испытывали случайные флуктуации вокруг усредненной кривой 1.

Усредненная по трем соседним значениям временная зависимость σ_s имела следующие особенности. Примерно с 05:40 до 08:10 значения σ_s увеличивались от 1.00 до 1.34. Примерно за один час до начала ЗС в месте наблюдения значения σ_s стали уменьшаться от 1.34 до

Рис. 1. Временные вариации: а — функции покрытия A Солнца (1) и отношения D/D_0 покрытого и полного диаметров диска Солнца (2); б — относительной освещенности E/E_{\max} поверхности Земли в день затмения Солнца 1 августа 2008 г. (1) и контрольный день (2); в — среднего квадратичного отклонения σ_s смещения края солнечного диска (кружки — результаты наблюдения, сплошная кривая 1 — результат сглаживания методом наименьших квадратов), кривая 2 — сглаженные значения σ_{sm} после исключения влияния уменьшения толщины атмосферного слоя, штриховая линия — ожидаемые значения σ_{sm} в отсутствие затмения; г — составляющей σ_{s1} , связанной с турбулентностью; д — составляющей σ_{sm2} , обусловленной конвекцией, после исключения влияния уменьшения толщины атмосферного слоя. Здесь и далее вертикальные линии отмечают моменты начала, максимального покрытия и окончания ЗС



1.14 . Последнее значение имело место примерно в 10:30, т. е. через 15 мин после наступления главной фазы затмения.

Заметим, что вблизи главной фазы ЗС имеет место характерный излом в усредненной зависимости $s(t)$. Он вызван наличием минимума в этой зависимости и неодинаковостью временных интервалов измерений (вблизи главной фазы этот интервал уменьшался). В интервале времени 10:42—11:40 значения s увеличивались от 1.14 до 1.30 . Таким образом, ЗС сопровождалось сначала уменьшением s примерно на 0.16 , а затем его увеличением на 0.16 . Такое поведение было лишь в среднем. Максимальное уменьшение s составило 0.30 ± 0.02 .

Рассмотрим далее вариации температуры воздуха. Усредненные за 20—26 июля 2008 г. временные вариации температуры воздуха приведены на рис. 2, а. Видно, что до 12 ч температура увеличивалась до 25.8 ± 0.4 С, а затем уменьшалась. В момент времени, близкий к затмению, она составляла 25.7 ± 0.4 С.

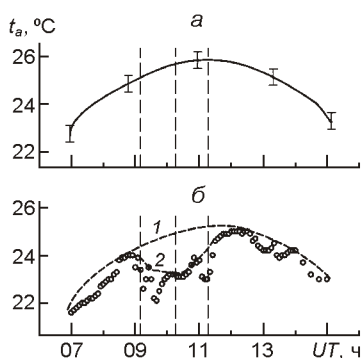


Рис. 2. Временные вариации температуры приземной атмосферы: а — вариации усредненной температуры 20—26 июля 2008 г., б — вариации температуры в день затмения 1 августа 2008 г. Штриховая кривая 1 — ожидаемая температура в отсутствие облачности, 2 — наблюдаемая температура

В день ЗС с 05:00 до 06:00 температура воздуха t_a увеличивалась от 18 до 19.5 С со средней скоростью 1.5 С/ч (рис. 2, б). В течение последующего получаса она увеличилась еще на 1.3 С (скорость увеличения 2.6 С/ч). В 07:00 температура равнялась 21.6 С. В интервале времени 07:00—08:55 она монотонно увеличивалась от 21.6 до 24 С со средней скоростью около 1.2 С/ч. С 09:00 до 09:40 температура уменьшалась от 24 до 22.1 С со средней скоростью -3 °С/ч. За время с 09:11 до 09:40 относительная открытая площадь диска Солнца уменьшилась от 1 до 0.896, т. е. диск был закрыт не более чем на 10.4 %. Эффект затмения не может объяснить такое значительное уменьшение температуры воздуха. Оно было вызвано экранировкой солнечного излучения облаками.

В интервале времени 09:40—10:05 температура воздуха увеличивалась с 22.1 до 23.2 С (скорость увеличения составляла 2.6 °С/ч). Это увеличение было связано с прогревом воздуха солнечным излучением после ухода облаков. Далее в течение 10 мин $t_a = 23.2$ С. С 10:15 и до 10:20 температура воздуха уменьшилась примерно на 0.1 С и оста-

валась такой в течение еще 10 мин. Поскольку главная фаза ЗС имела место в 10:15, время запаздывания температуры (тепловой инерции) составляло около 5 мин.

Увеличение t_a началось с 10:35, т. е. через 20 мин после момента наступления главной фазы затмения. Температура воздуха продолжала увеличиваться в интервале времени 10:30—12:00 с 23.1 до 25.0 С со средней скоростью 1.3 С/ч. Это увеличение прерывалось облачностью с 11:05 до 11:15. «Последствие» облаков продолжалось в среднем около 25 мин. Влияние облачности, эпизодически проявлявшейся в интервале времени 08:55—09:38, примерно к 10:00 закончилось. Дальнейшие вариации t_a определялись в основном ЗС. Существенное уменьшение t_a , вызванное облачностью, имело место в интервале времени 11:01—11:25.

Максимальное значение t_a 25 С наблюдалось в интервале времени 12:00—12:30. Такое же поведение температуры в среднем было характерным и в другие дни с 20 июля по 10 августа 2008 г. Если бы затмения не было, температура воздуха в 10:15 была бы близка к 25.1 С (как это было с 20 по 26 июля 2008 г., см. рис. 2, а). Реально же температура составляла 23.1 С. На основании этого можно утверждать, что затмение привело к максимальному уменьшению температуры воздуха на 2.0 С.

Далее для сравнения кратко опишем результаты наблюдения эффектов ЗС 11 августа 1999 г. и 3 октября 2005 г., которые также имели место примерно в околосолнечное время (см. таблицу).

Затмение Солнца 11 августа 1999 г.

Рассмотрим временные вариации среднего квадратичного отклонения смещения края солнечного диска σ_s . Изменения A и D/D_0 показаны на рис. 3, а, относительной освещенности — на рис. 3, б.

В день ЗС величина σ_s постепенно увеличивалась от значения 0.62 0.01 (04:22) до 1.15 0.04 (09:00) (рис. 3, в). Интересно, что в интервале времени 04:22—07:00 величина σ_s почти не зависела от зенитного угла Солнца, хотя освещенность поверхности Земли при этом увеличилась вдвое (см. рис. 3, б). С 07:00 до 09:00 величина σ_s удвоилась, а освещенность увеличилась лишь на 20 %. Начиная с 09:00, наблюдалось сначала медленное (до 10:00), а затем быстрое

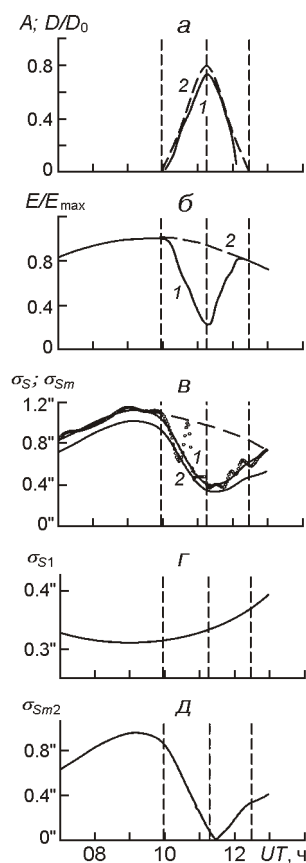


Рис. 3. То же, что и на рис. 1, для ЗС 11 августа 1999 г.

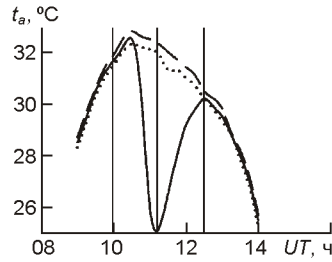


Рис. 4. Временные вариации температуры приземной атмосферы в день затмения 11 августа 1999 г. (сплошная), 10 августа 1999 г. (штрихи) и 12 августа 1999 г. (пунктир)

уменьшение значений s . В интервале времени 11:16—11:32 оно достигло минимального значения 0.4. Примерно с 11:49 и до 13:00 имело место увеличение s . Такое поведение величины s было лишь в среднем (см. кривую 1 на рис. 3, в). В 10:45 и 11:07 наблюдалось увеличение s до 0.98 и 0.03 и 0.61 и 0.01 соответственно.

После 11:10 в течение 2 ч наблюдались квазипериодические вариации $s(t)$. Среднее значение квазипериода составляло 20—25 мин, амплитуда — примерно 6—8%. Такие параметры, как известно, свойственны внутренним гравитационным волнам (ВГВ). По-видимому, их появление (или усиление) связано с ЗС [4, 19, 33].

Временные вариации температуры воздуха t_a накануне, в день ЗС и после него приведены на рис. 4. Видно, что ЗС обусловило уменьшение температуры на 7.3 °C. Скорость уменьшения, а затем увеличения значений t_a в этот день была рекордной: 11 и 5 °C/ч соответственно. В фоновые дни в околополуденное время эта скорость была близка к 1 °C/ч.

Затмение Солнца 3 октября 2005 г. Временные вариации A , D/D_0 , относительной освещенности и $s(t)$ представлены на рис. 5, а—в. Видно, что значения s оставались практически неизменными в интервале времени с 07:00 до 09:00 (рис. 5, в). Примерно с 09:00 до 09:38 наблюдалось уменьшение s . Моменты наступления минимума в зависимости $s(t)$ и максимального покрытия диска Солнца практически совпали. При этом $s_{\min} = 0.58$. После 09:38 величина $s(t)$ увеличивалась, а после окончания ЗС — уменьшалась.

Незначительно флуктуируя, температура воздуха продолжала увеличиваться до 09:40. Ее увеличение прекра-

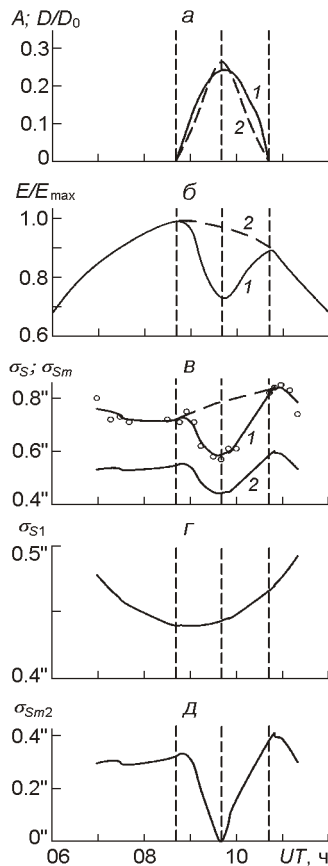
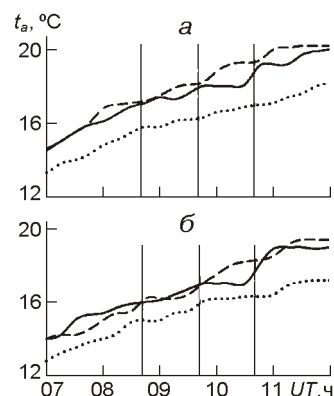


Рис. 5. То же, что и на рис. 1, для ЗС 3 октября 2005 г. Учтено, что $s_1 = 0$

Рис. 6. Временные вариации температуры приземной атмосферы в день затмения 3 октября 2005 г. (сплошная) и контрольные дни 2 октября 2005 г. (штрихи) и 4 октября 2005 г. (пунктир): *a* и *б* — показания разных разнесенных по горизонтали термометров



тилось лишь после наступления фазы максимального покрытия диска Солнца (рис. 6). При этом t_a по сравнению с фоновым днем 2 октября практически к концу ЗС уменьшилась примерно на 1.3 С. Возврат температуры воздуха к невозмущенным значениям начался примерно за 15 мин до окончания ЗС, а закончился через 15 мин после его окончания. При этом скорость увеличения t_a была около 4 С/ч, в то время как в фоновые дни эта величина составляла 1 С/ч.

ОБСУЖДЕНИЕ

Проведем сравнительный анализ эффектов ЗС в приземной атмосфере. Эффекты затмения 11 августа 1999 г. можно рассматривать как эталонные. Причины для этого несколько. Во-первых, в этот день функция покрытия диска Солнца была максимальной. Во-вторых, метеорологическая обстановка в этот день была благоприятной. В-третьих, измерения были проведены наиболее часто: интервал между сериями измерений составлял единицы минут, в дни других ЗС — десятки минут. 11 августа функция $s(t)$ отслеживала постепенное покрытие диска Солнца, а затем и уменьшение степени его покрытия. Минимальное значение функции $s(t)$ наступило примерно через 16–1 мин после наступления главной фазы затмения. Наблюдаемое время запаздывания обусловлено инерционностью конвективной активности приземной атмосферы.

Временной ход $s(t)$ для 11 августа 1999 г. и 1 августа 2008 г. затмений был качественно тем же. Незначительное уменьшение s началось примерно за один час до наступления ЗС. Скорее всего, оно отражает дневной ход зависимости $s(t)$. Дело в том, что максимальный уровень турбулентности атмосферы в летнее время имеет место в интервале времени 08:00—09:00 (около 11:00—12:00 по местному времени). Значение s при этом также максимально.

Минимальное значение s запаздывало по отношению к моменту наступления главной фазы затмения практически на одно и то же значение — 15 мин. Были количественные отличия: 1 августа макси-

мальное значение τ_s превышало примерно на 0.3 значение τ_s , зафиксированное 11 августа. Это обусловлено более выраженной турбулентностью 1 августа 2008 г., вызванной переменной облачностью. Максимальное уменьшение τ_s составляло 0.30 и 0.68 для 1 и 11 августа соответственно. Последнее, естественно, было связано с различием функций покрытия Солнца.

Затмение 3 октября 2005 г. также имело место примерно в околополуденное время. Эффекты в этот день в целом напоминали эффекты ЗС 1 августа 2008 г., но были выражены слабее. Это объясняется отличающимися значениями A_{\max} (0.13 и 0.31 соответственно). Из-за существенных флуктуаций значений τ_s 3 октября не удалось определить величину аналогичного запаздывания в моменте наступления $\tau_{s \min}$ в зависимости $\tau_s(t)$ по отношению к моменту наступления A_{\max} .

Временные вариации температуры газа в приземной атмосфере были близки к прогнозируемым. Они зависели от времени суток, сезона, степени покрытия диска Солнца и от интенсивности облачной структуры. Наибольшие изменения t_a имели место 11 августа 1999 г. (7.3 С) при $A_{\max} = 0.73$, наименьшие — 3 октября 2005 г. (1.3 С) при $A_{\max} = 0.13$. Существенно отличались и скорости изменения t_a : от 2 до 11 С/ч [7].

Минимальные значения t_a 3 октября и 1 августа наблюдались примерно через 5 мин после наступления главной фазы затмения. 11 августа это запаздывание определить не удалось, поскольку значения t_a измерялись один раз в 15 мин.

Построенная регрессия для $t_{a \min}(A_{\max})$ предсказывает значение $t_{a \min} = 3.1$ С при $A_{\max} = 0.31$. Реально же оно составляло около 2 С. Различие объясняется влиянием облачности, которая перед моментом наступления главной фазы затмения не позволила увеличиться температуре приземной атмосферы до значений, наблюдаемых в фоновые дни.

Используя временную зависимость $\tau_s(t)$, по методике [7] мы оценили ряд параметров динамических процессов в приземной атмосфере, таких как C_n^2 , $C_n(z_0)$, $C_T(z_0)$, $\tau_s(z_0)$ и др. Здесь, как и в работе [7], C_n^2 и C_T^2 — структурные характеристики флуктуаций показателя преломления и температуры воздуха, C_n^2 — интеграл по всем высотам от C_n^2 , $\tau_s(z_0)$ — сумма высотного и адиабатического градиентов t_a . Значения C_n^2 и $C_n(z_0)$ оказались близки к тем, что приводятся в [18, 21]. В условиях развитой конвекции $C_n(z_0)$

$$(2...5) 10^{-7} \text{ м}^{-1/3}, C_T(z_0) 0.2...0.5 \text{ К/м}^{1/3}, \tau_s(z_0) 0.2...0.6 \text{ К}, \tau_s(z_0)$$

0.15...0.20 К/м. В то же время значения C_n , связываемые с атмосферной турбулентностью, были примерно в 10 раз меньше. Заметим, что отношение $\tau_s(z_0)/L_0 0.2...0.5 \text{ К/м}$ в 1—3.3 раза превышало значения $\tau_s(z_0)$.

Отдельно остановимся на возможности генерации АГВ затмениями. Этот вопрос до настоящего времени остается дискуссионным. Например, в работе [33] генерация АГВ в ионосфере была обнаружена, в других исследованиях — нет.

Волновые процессы в приземной атмосфере с периодом 20—25 мин и относительной амплитудой около 6—8 % четко наблюдались в течение ЗС 11 августа 1999 г. Процесс начался примерно в момент наступления главной фазы затмения и продолжался около 2 ч. Судя по значению периода волнового процесса, ЗС стимулировало генерацию ВГВ в приземной атмосфере (периоды ВГВ составляют 5—180 мин).

Таким образом, нам впервые удалось зафиксировать достаточно мощный волновой процесс в приземной атмосфере, сопровождающий ЗС. Заметим, что относительная амплитуда волн в этой части атмосферы редко превышает 1 %.

Изучить аналогичный волновой процесс 1 августа 2008 г. не удалось, так как интервал между сериями измерений обычно составлял 30 мин (и только вблизи главной фазы он равнялся 10 мин).

ВЫВОДЫ

Выполнен сравнительный анализ эффектов в приземной атмосфере, сопровождавших три частных ЗС с $A_{\max} = 0.13 \dots 0.77$. Затмения происходили в околополуденное время. Изменялись уровень дрожания края солнечного диска и температура приземной атмосферы.

1. Как и следовало ожидать, эффекты затмений в приземной атмосфере существенно зависели от степени покрытия диска Солнца. Кроме того, как оказалось, они также определялись метеорологической обстановкой в дни ЗС.

2. Установлено, что при $A_{\max} = 0.13, 0.31$ и 0.73 значения среднего квадратичного отклонения s смещения края солнечного диска уменьшались на $s_{\max} = 0.13, 0.30$ и 0.68 соответственно.

Время запаздывания минимального значения s по отношению к моменту наступления главной фазы затмения составляло для двух событий около 15 мин.

3. Подтверждено, что частное ЗС способно существенно ослабить или даже подавить атмосферную конвекцию. Определено время развития конвекции. Оно оказалось близким к 15—16 мин. Это время зависит от величины коэффициента турбулентного обмена и высоты расположения инструмента наблюдения.

4. Показано, что ЗС сопровождались уменьшением температуры газа в приземной атмосфере на 1.3, 2.0 и 7.3 °С при $A_{\max} = 0.13, 0.31$ и 0.73 соответственно. Определенные для двух ЗС временные вариации температуры с запаздыванием около 5 мин отслеживали величину покрытия диска Солнца.

5. В течение одного из ЗС (11 августа 1999 г.) впервые обнаружен

эффект генерации мощных (с амплитудой 6—8 %) ВГВ с периодом 20—25 мин в приземной атмосфере.

Авторы благодарны Л. А. Акимову за организацию и проведение оптических измерений, а также М. В. Ляшенко и С. В. Панасенко за ценные замечания.

1. Адушкин В. В., Гаврилов Б. Г., Горелый К. И. и др. Геофизические эффекты солнечного затмения 29 марта 2006 г. // Докл. АН.—2007.—**417**, № 4.— С. 535—540.
2. Акимов А. Л., Акимов Л. А. Исследование турбулентной активности атмосферы в день солнечного затмения 11 августа 1999 г. // Кинематика и физика небес. тел.—2001.—**17**, № 2.— С. 182—188.
3. 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.
4. Акимов Л. А., Акимов А. Л., Дятел Н. П. Влияние турбулентного следа разрушившегося облака на качество изображения Солнца // Кинематика и физика небес. тел.—2000.—**16**, № 3.— С. 224—280.
5. Акимов Л. А., Боговский В. К., Григоренко Е. И. и др. Атмосферно-ионосферные эффекты солнечного затмения 31 мая 2003 года в Харькове // Геомагнетизм и аэрономия.—2005.—**45**, № 4.— С. 526—551.
6. Акимов Л. А., Григоренко Е. И., Таран В. И. и др. Комплексные радиофизические и оптические исследования динамических процессов в атмосфере и геокосмосе, вызванных солнечным затмением 11 августа 1999 года // Зарубеж. радиоэлектроника. Успехи соврем. радиоэлектроники.—2002.—№ 2.— С. 25—63.
7. 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 соврем. радиоэлектроники.—2005.—№ 3.— С. 55—70.
8. Аллен К. У. Астрофизические величины. — М.: Мир, 1977.— 372 с.
9. Афраймович Э. Л., Воейков С. В., Перевалова Н. П. и др. Ионосферные эффекты солнечного затмения 29 марта 2006 г. над Казахстаном // Геомагнетизм и аэрономия.—2007.—**47**, № 4.— С. 491—500.
10. Беликович В. В., Вяхирев В. Д., Калинина Е. Е. и др. Отклик ионосферы на частное солнечное затмение 29 марта 2006 г. по наблюдениям в Н. Новгороде и Мурманске // Геомагнетизм и аэрономия.—2008.—**48**, № 1.— С. 103—108.
11. 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.
12. Васильев К. Н., Зелешин А. С., Косенков А. Р. Ионосферный эффект солнечного затмения 15 февраля 1961 г. по наблюдениям в Москве // Геомагнетизм и аэрономия.—1961.—**1**, № 2.— С. 277—278.
13. Васин В. А., Гришкевич Л. В. Об эффектах в ионосфере, наблюдавшихся в период солнечных затмений 2.XII.1956 г. и 15.II.1961 г. в Горьком // Геомагнетизм и аэрономия.—1961.—**1**, № 6.— С. 949—954.
14. Гоков А. М., Черногор Л. Ф. Результаты наблюдения процессов в нижней ионосфере, сопутствовавших затмению Солнца 11 августа 1999 г. // Радиофизика и радиоастрономия.—2000.—**5**, № 4.— С. 348—360.
15. Горчаков Г. И., Кадыгров Е. Н., Исаков А. А. и др. Влияние солнечного затмения

- на термическую стратификацию и режим турбулентности // Докл. АН.—2007.—**417**, № 1.—С. 90—93.
16. Григоренко Е. И., Пазюра С. А., Пуляев В. А. и др. 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.
 17. Каримов Р. Р., Козлов В. И., Муллаяров В. А. Особенности вариаций характеристик ОНЧ-сигналов при прохождении лунной тени по трассе в период солнечного затмения 29 марта 2006 г. // Геомагнетизм и аэрономия.—2008.—**48**, № 2.—С. 250—254.
 18. Клиффорд С. Ф. Классическая теория распространения волн в турбулентной среде. Распространение лазерного пучка в атмосфере. — М.: Мир, 1981.—С. 18—60.
 19. Костров Л. С., Черногор Л. Ф. Результаты наблюдения процессов в средней ионосфере, сопутствовавших затмению Солнца 11 августа 1999 г. // Радиофизика и радиоастрономия.—2000.—**5**, № 4.—С. 361—370.
 20. 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.
 21. Татарский В. И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. — М.: Наука, 1967.—548 с.
 22. Черногор Л. Ф. Высыпание электронов из магнитосферы, стимулированное затмением Солнца // Радиофизика и радиоастрономия.—2000.—**5**, № 4.—С. 371—375.
 23. Черногор Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоастрономия.—2003.—**8**, № 1.—С. 59—106.
 24. Черногор Л. Ф. Земля — атмосфера — геокосмос как открытая динамическая нелинейная система // Космічна наука і технологія.—2003.—**9**, № 5/6.—С. 96—10.
 25. Черногор Л. Ф. Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 1 // Нелинейный мир.—2006.—**4**, № 12.—С. 655—697.
 26. Черногор Л. Ф. Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 2 // Нелинейный мир.—2007.—**5**, № 4.—С.—198—231.
 27. Черногор Л. Ф. Физика и экология системы Земля—атмосфера—ионосфера—магнитосфера // Науки про Землю та космос — суспільству: Праці Першої наук. конф. (Київ, 25—27 червня 2007 р.). — К.: НАНУ-НЦАДЗ ІГН, ГАО, 2007.—С. 86—93.
 28. Шашункина В. М., Турбин Р. И. Предварительные результаты наблюдений ионосферного эффекта солнечного затмения 15.II.1961 г. // Геомагнетизм и аэрономия.—1961.—**1**, № 5.—С. 835—838.
 29. Chernogor L. F., Rozumenko V. Earth — atmosphere — geospace as an open nonlinear dynamical system // Radio Phys. and Radio Astron.—2008.—**13**, N 2.—P. 120—137.
 30. Eclipse Supplement // Nature.—1970.—**226**.—P. 1097—1155.
 31. Evans J. V. An F region eclipse // J. Geophys. Res.—1965.—**70**, N 1.—P. 131—142.
 32. Farges F., Le Pichon A., Blanc E., et al. Response of the lower atmosphere and the ionosphere to the eclipse of August 11, 1999 // J. Atmos. Solar-Terr. Phys.—2003.—**65**, N 6.—P. 717—726.

33. Jones T. B., Wright D. M., Milner J., et al. The detection of atmospheric waves produced by the total solar eclipse of 11 August 1999 // J. Atmos. Solar-Terr. Phys.—2004.—**66**, N 5.—P. 363—374.
34. Özcan O., Aydogdu M. Possible effects of the total solar eclipse of August 11, 1999 on the geomagnetic field variations over Elazig-Turkey // J. Atmos. Solar-Terr. Phys.—2004.—**66**, N 11.—P. 997—1000.
35. *Special Eclipse Issue* (The eclipse of 7 March 1970) // J. Atmos. Terr. Phys.—1972.—**34**.—P. 559—739.
36. Zalyubovsky I., Chernogor L., Rozumenko V. The Earth — atmosphere — geospace system: Main properties, processes and phenomena // Space Research in Ukraine. 2006—2008. The Report Prepared by the Space Research Institute of NASU-NSAU. — Kyiv, 2008.—P. 19—29.

Поступила в редакцию 18.03.09