

Параметры турбулентных процессов в атмосфере, сопровождаящих затмения Солнца

А. Л. Акимов, Л. А. Акимов, Л. Ф. Черногор

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

Статья поступила в редакцию 12 февраля 2007 г.

Приведены результаты однотипных оптических наблюдений, анализа и сравнения динамики эффектов в приземной атмосфере, сопровождавших четыре частных затмения Солнца вблизи г. Харькова (Украина) 11 августа 1999 г., 31 мая 2003 г., 3 октября 2005 г. и 29 марта 2006 г. Эффекты в утреннее, околополуденное и послеполуденное время заметно отличались. По результатам измерений статистических характеристик уровня дрожания края солнечного диска оценены параметры динамических процессов в приземной атмосфере.

Введение

Атмосфера традиционно используется в качестве телекоммуникационных каналов (см., например, [1]). Качественные показатели соответствующих телекоммуникационных систем существенно ограничиваются наличием в атмосфере турбулентных и конвективных процессов. Для исследования последних применяются радиофизические, радарные, акустические, радиоакустические и другие методы [2-11].

В настоящей работе для исследования турбулентных и конвективных процессов в атмосфере использовался оптический метод, который описан в наших статьях [12-15]. Суть его заключается в следующем. При помощи оптического телескопа измерялась амплитуда дрожания края солнечного диска, обусловленного атмосферными процессами (турбулентностью, конвекцией и адвекцией). Одновременно с оптическими наблюдениями контролировалась метеобстановка (облачность, температура воздуха и скорость ветра). Для расширения возможностей оптического метода, и, в частности, для разделения вклада турбулентных

и конвективных процессов использовались измерения перед наступлением, во время затмений Солнца (ЗС) и после них.

Целью работы является изложение результатов наблюдений, анализа и сравнения параметров турбулентных и конвективных процессов, сопровождавших ЗС в разное время суток вблизи г. Харькова (Украина) 11 августа 1999 г., 31 мая 2003 г., 3 октября 2005 г. и 29 марта 2006 г.

1. Общие сведения о затмениях Солнца

Для земного наблюдателя угловые размеры Солнца и Луны, как известно, близки между собой. Это обстоятельство приводит к возможности полных ЗС, которые в данной географической местности случаются редко. Чаще всего наблюдаются частные ЗС.

Пространственно-временные характеристики. Полное ЗС на земном шаре длится около 3.5 ч, частное – до 5.5 ч. Разумеется, для неподвижного наблюдателя продолжительность полного затмения не превышает 2÷2.5 мин (в зависимости от места наблюдения), продолжительность частного

затмения $t_0 = 2 \div 2.5$ ч. Максимальная ширина полосы полного затмения не превышает 270 км, а ширина полосы частных затмений достигает многих тысяч километров. Длина полосы $l_1 \approx 15000$ км.

Лунная тень скользит по поверхности Земли с запада на восток со скоростью, равной орбитальной скорости Луны (около 1000 м/с). Земля, как известно, вращается в том же направлении. Скорость вращения земной поверхности постепенно уменьшается от 460 м/с (на экваторе) до 0 м/с (на полюсах). По этой причине в приэкваториальной области лунная тень скользит с относительной скоростью около 540 м/с, т. е. вдвое медленнее, чем в области полюсов. В окрестности г. Харькова эта относительная скорость близка к 750 м/с.

Интересно, что возможна ситуация, когда она превышает скорость звука v_s в атмосфере, которая в зависимости от высоты изменяется от 300 до 800 м/с. При этом в газе может генерироваться ударная волна плотности, которая по мере распространения от источника превращается в акустико-гравитационную волну [16, 17].

При покрытии диском Луны солнечного диска поверхность Земли, нижняя часть ее атмосферы (до озоносферы включительно) и термосфера охлаждаются.

Энергетические характеристики. Все описываемые ниже ЗС при наблюдении вблизи г. Харькова были частными (табл. 1). Максимальное значение функции покрытия Солнца $\tilde{A}(t) = S_{obs}/S_s$, где S_{obs} , S_s – площадь покрытой части Солнца и его пол-

Таблица 1. Основные данные о ЗС и атмосферных эффектах

Характеристики и параметры	11.08.1999 г.	31.05.2003 г.	3.10.2005 г.	29.03.2006 г.
Начало ЗС	09:57	02:10	08:36	10:02
Конец ЗС	12:29	04:20	10:42	12:21
Момент наступления максимального покрытия	11:13	03:10	09:38	11:12
Максимальное значение функции покрытия Солнца	0.73	0.64	0.24	0.77
Максимальное уменьшение освещенности, разы	3.9	3.6	1.3	5.2
Средняя скорость ветра, м/с	5 ÷ 6	5 ÷ 6	3 ÷ 4	4 ÷ 5
Порывы ветра, м/с	15 ÷ 16	8	6 ÷ 8	7
Облачность	Появилась после 13:00	Практически отсутствовала	Практически отсутствовала	Присутствовала в более 80 % от времени наблюдения
Максимальное значение температуры воздуха $t_a, ^\circ$	32	20	18	14
Максимальное уменьшение $t_a, ^\circ$	7.3	2.1	1.3	2.3
Значение $\sigma_{S_{min}}$, угл. с	0.38 ± 0.01	0.60 ± 0.01	0.58 ± 0.01	0.35 ± 0.01
Максимальное уменьшение σ_S , угл. с	0.68 ± 0.03	0.30 ± 0.02	0.14 ± 0.02	–

Примечание: σ_S^2 – дисперсия смещения края солнечного диска, $\sigma_{S_{min}}^2$ – ее минимальное значение (при подавленной конвекции).

ная площадь, не превышало 0.77, а минимальное равнялось 0.24. Освещенность поверхности Земли в моменты максимального покрытия диска Солнца уменьшалась в 1.3÷5.2 раза по сравнению с фоновыми днями. Это приводило к уменьшению абсолютной температуры газа в приземной атмосфере T_a по сравнению с контрольными днями на 1.3÷7.3 К в течение времени $t_0 \approx 1.5$ ч. Исходя из этого, оценим энергетические характеристики возмущенной приземной атмосферы. Для изменения объемной плотности внутренней энергии газа $\epsilon_T = C_p \rho \overline{\Delta T_a}$ имеем $\epsilon_T \approx 0.9 \cdot 10^3 \div 4.7 \cdot 10^3$ Дж/м³. Здесь $C_p \approx 10^3$ Дж/(кг·К) – теплоемкость газа при постоянном давлении, $\rho \approx 1.3$ кг/м³ – плотность газа у поверхности Земли, $\overline{\Delta T_a} \approx \Delta T_a / 2 \approx 0.7 \div 3.6$ К – среднее изменение T_a . Такому значению ϵ_T и $t_0 \approx 2$ ч соответствует изменение удельной мощности $p_T = \epsilon_T / t_0 \approx 0.1 \div 0.7$ Вт/м³. Полученное значение ϵ_T близко к величине изменения удельной энергии движения газа в циклоне (антициклоне). В то же время $p_T \approx 0.1 \div 0.7$ Вт/м³ на 1–2 порядка превышает изменение удельной мощности движения газа в циклоне и соизмерима с аналогичной характеристикой для ураганов (тайфунов) и шквалов.

Оценим изменение внутренней энергии E_a газа в приземной атмосфере и соответствующую мощность P_a . Для этого вначале оценим объем V_a газа в затененной области атмосферы. При диаметре зоны затмения $l_2 \approx 4000$ км (по уровню $\tilde{A} \approx 0.6$) имеем площадь частично затененной атмосферы $S_a \approx 1.3 \cdot 10^{13}$ м². Высотный масштаб убывания возмущений T_a порядка $L_t = (K_t t_0 / 2)^{1/2}$, где K_t – коэффициент турбулентного обмена. При типичном значении $K_t = 1$ м²/с имеем $L_t \approx 50$ м. Тогда $V_a = 2 \cdot 10^{15}$ м³. При этом $E_a \approx 6 \cdot 10^{17} \div 3 \cdot 10^{18}$ Дж, $P_a \approx 8 \cdot 10^{13} \div 4 \cdot 10^{14}$ Вт. Полученное значение E_a близко к энергии циклона и соответствует энерговыделению 150÷750-мегатонной термоядерной бомбы. Величина P_a в 4÷20 раз превышает мощность, потребляемую человечеством в настоящее время (около $2 \cdot 10^{13}$ Вт). С учетом движения лун-

ной тени для оценки интегрального эффекта значение E_a необходимо увеличить в $l_1/l_2 \approx 4$ раза.

В озоносфере (средняя высота $z \approx 45$ км) значение $\rho \approx 10^{-3}$ кг/м³, а вертикальный масштаб близок к 10 км. Тогда при $\overline{\Delta T_a} \approx 1$ К приведенные выше удельные энергетические характеристики для озоносферы будут на 3 порядка меньше. Значение $E_a \approx 4 \cdot 10^{17}$ Дж, $P_a \approx 8 \cdot 10^{13}$ Вт.

В нижних слоях термосферы $\rho \approx 10^{-7} \div 10^{-6}$ кг/м³, $\overline{\Delta T_a} \approx 10$ К и соответствующие удельные энергетические характеристики на 5÷7 порядков меньше, чем эти же характеристики в приземной атмосфере. Поскольку вертикальный масштаб порядка 10 км, $E_a \approx 4 \cdot 10^{14} \div 4 \cdot 10^{15}$ Дж и $P_a \approx 8 \cdot 10^{10} \div 8 \cdot 10^{11}$ Вт.

Ощутимая часть (около $10^{-3} \div 10^{-1}$) оцененной энергии затрачивается на перестройку динамических процессов в атмосфере. Изучению некоторых из них посвящена настоящая работа.

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

$$E_E(t) = E_E(0) (1 - \tilde{A}(t)) \cos \chi, \quad (1)$$

где $E_E(0) = E_E(\chi = 0)$, $\chi = \chi(t)$ – зенитный угол.

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

$$i(r) = \mu_0 + (1 - \mu_0)(1 - r^2),$$

где r – безразмерное расстояние до данной точки на диске Солнца от его центра, $\mu_0 = 0.46$ – коэффициент [18]. Связь между $A(t)$ и $\tilde{A}(t)$ следующая:

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

где $0 \leq r \leq 1$. При равномерном распределении очевидно, что $\mu_0 = 1$, 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.

Метеорологическая обстановка. Обсерватория, где выполнены оптические и метеорологические наблюдения, находится в основном в открытой ровной степи в 70 км на юго-восток от г. Харькова. Вблизи обсерватории расположена лесопосадка, высота деревьев достигает $5 \div 6$ м. Высота построек на территории обсерватории не превышает $3 \div 4$ м.

Состояние погоды, существенное для оптических наблюдений, было следующим (см. также табл. 1).

Утром 11 августа 1999 г. до 05:00 (здесь и далее время мировое – UT) 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 ($u \approx 15$ 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° . Около 12:00 началось усиление ветра, появились небольшие облака. Примерно в 13:00 небо покрылось хорошо развитыми кучевыми облаками.

В течение всего времени наблюдения утром 31 мая 2003 г. небо было практически безоблачным. Примерно до 03:00 ветер отсутствовал, после 03:00 скорость юго-западного ветра постепенно увеличивалась и к 06:00 достигла $5 \div 6$ м/с. Эпизодически (в интервалах времени 03:30 – 04:20 и 05:30 – 06:00) отмечались порывы ветра со скоростью до 8 м/с.

Днем 3 октября 2005 г. небо было безоблачным, скорость северо-западного ветра

обычно не превышала $3 \div 4$ м/с. Некоторое усиление ветра имело место примерно в 07:30 и в интервале времени 08:50 – 08:55. При этом $u \approx 6 \div 8$ м/с.

В дневное время 29 марта 2006 г. облачность была существенной: временами более половины неба было покрыто плотными облаками. Оптические измерения эффектов затмения были возможны лишь в интервале времени с 11:00 до 12:00. Скорость западного ветра $u \approx 6$ м/с. После 14:15 начался небольшой дождь. Небо покрылось плотными облаками.

Добавим, что метеорологическая обстановка в контрольные дни 10 и 12 августа 1999 г., 30 мая, 1 и 2 июня 2003 г., 2 и 4 октября 2005 г. была примерно такой же, как и в дни затмений. Для ЗС 29 марта 2006 г. в качестве контрольных суток выбраны 25, 26 и 27 марта, которые отличались достаточно низким уровнем облачности. День 28 марта был пасмурным, Солнце появлялось лишь изредка. День 30 марта в первой половине также был пасмурным. После полудня появилось Солнце, стало тепло и сухо.

2. Средства и методы

Средства наблюдения. Эффекты четырех 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: $49^\circ 38'$ с. ш., $36^\circ 56'$ в. д. Эквивалентное фокусное расстояние телескопа составляло 7 м. Объектив расположен на высоте $z_0 \approx 3$ м. Основу измерительного комплекса составили телескоп, регистрирующая система и компьютер.

Оптические измерения сопровождалась регистрацией температуры воздуха каждые 15 мин. Для этого использовались серийные термометры, погрешность измерения которых составляла 0.1° .

Методики измерения и обработки данных. Измерения температуры воздуха, скорости ветра и наблюдения за состоянием

погоды были выполнены накануне, в день ЗС и после него. Измерения амплитуды дрожания края солнечного диска производились обычно за несколько часов до наступления, в течение затмения и после него.

Апертура телескопа ограничивалась диафрагмой диаметром $d_d = 3$ см в измерениях 1999 г. и $d_d = 5$ см в последующем. В фокусе телескопа устанавливалась прямоугольная диафрагма размером $20 \times 50''$ вдоль лимба Солнца и перпендикулярно к нему. Край Солнца выступал на $30''$ от края диафрагмы. Измерялась амплитуда дрожания края Солнца, обусловленного турбулентными и конвективными процессами в приземной атмосфере. Для этого световой сигнал, прошедший через диафрагму, фильтр (эффективная длина волны $5.6 \cdot 10^{-7}$ м), фотоэлектронный множитель (ФЭУ) и широкополосный операционный усилитель со 100 %-й отрицательной обратной связью, подавался на интегратор с временем интегрирования 10 мс. После оцифровки с частотой 50 Гц амплитуда сигнала $s(t)$ сохранялась на магнитном носителе. Одна реализация, составленная из 512 отсчетов, имела длительность около 10 с. Продолжительность серии, образованной 18 реализациями, равнялась 3 мин. Обычно серии повторялись через $8 \div 20$ мин.

Полученная зависимость $s(t)$ использовалась для вычисления автокорреляционной функции K_s и энергетического спектра, причем

$$K_s(j) = \frac{1}{N\bar{s}^2} \sum_{n=1}^{n=N-j} (s(n) - \bar{s})(s(n+j) - \bar{s}),$$

где \bar{s} – среднее значение сигнала; n – номер отсчета сигнала; j – номер отсчета аргумента $\tau = j\Delta\tau$, $\Delta\tau = 20$ мс; $N = 512$ – полное число отсчетов. Значение $K_s(0)$ пропорционально дисперсии смещения σ_s^2 края солнечного диска, причем $K_s(0) = 10^{-4}$ соответствует $\sigma_s = 0.25''$.

Отметим, что перемещение края Солнца в диафрагме практически пропорциональ-

но изменению сигнала на выходе ФЭУ, поскольку изменение яркости фотосферы на угловом расстоянии $30''$ от края не превышает 1 % на $1''$ дуги. При смещении до $5''$ эту яркость можно считать линейной функцией смещения. При этом перемещение на $1''$ приводит к изменению уровня сигнала на 4 % [12].

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

3. Результаты наблюдений

ЗС 11 августа 1999 г. Рассмотрим временные вариации среднего квадратического отклонения смещения края солнечного диска σ_s .

В день ЗС (рис. 1) величина σ_s постепенно увеличивалась от значения $0.62'' \pm 0.01''$ (04:22) до $1.15'' \pm 0.04''$ (09:00). Интересно, что в интервале времени 04:22 – 07:00 величина σ_s почти не зависела от зенитного угла Солнца χ , хотя освещенность поверхности Земли при этом возросла вдвое. 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 падение σ_s . В интервале времени 11:16 – 11:32 оно достигло минимального значения порядка $0.4''$. Примерно с 11:49 и до 13:00 имело место возрастание σ_s . Такое поведение величины σ_s было лишь в среднем. В 10:45 и 11:07 наблюдался рост σ_s до значений $0.98'' \pm 0.03''$ и $0.61'' \pm 0.01''$ соответственно. Примерно после 11:10 в течение 2 ч наблюдались квазипериодические вариации $\sigma_s(t)$, величина квазипериода составляла $20 \div 25$ мин, относительная амплитуда колебаний была близка к $6 \div 8$ %. Такие параметры, как известно, свойственны атмосферным гравитационным волнам (АГВ). По-видимому, их появление связано с ЗС [16, 17]. Разумеется, однопозиционные измерения не позволяют различать колебательные и волновые процессы.

Поведение $K_s(j)$ было следующим. Утром (04:22 – 04:25) в условиях слабо выраженной конвекции $K_s(0) \approx 609 \pm 19$ (здесь

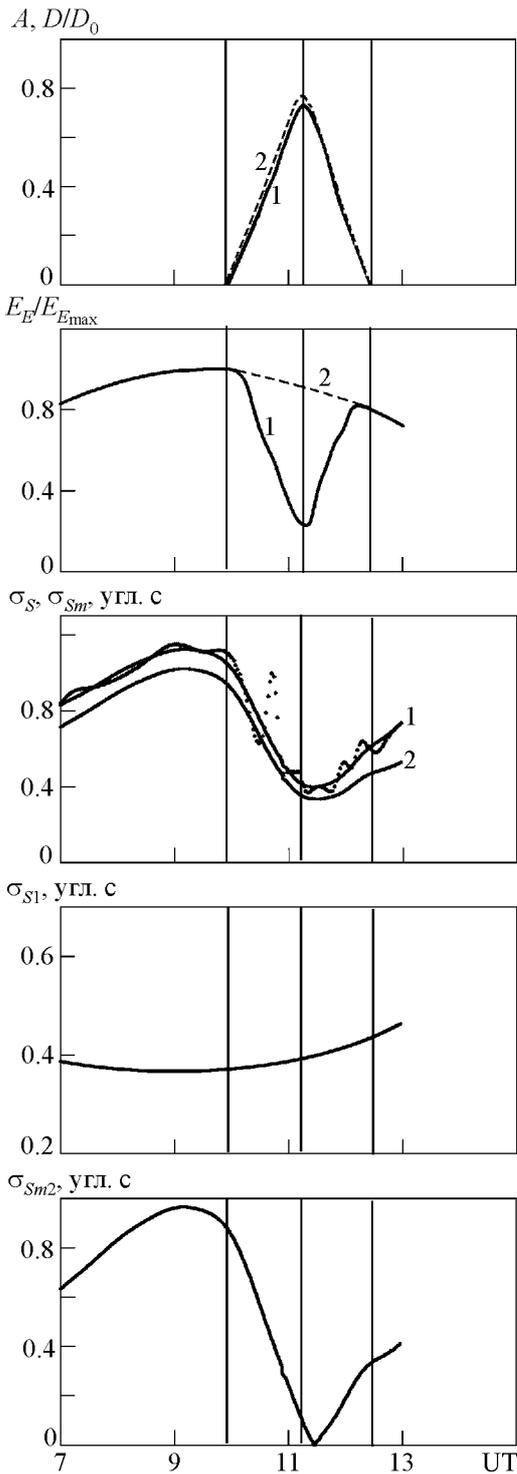


Рис. 1. Временные вариации (панели сверху вниз): функции покрытия Солнца (1), отношения покрытия D и полного D_0 диаметров диска Солнца (2); относительной освещенности поверхности Земли в день ЗС 11 августа 1999 г. (1) и контрольный день (2); среднего квадратического отклонения смещения края солнечного диска σ_S (1), то же

после исключения влияния уменьшения толщины атмосферного слоя (2); составляющей σ_S , связанной с механической турбулентностью (σ_{S1}), и составляющей σ_S , обусловленной конвекцией (σ_{Sm2}), после исключения влияния уменьшения толщины атмосферного слоя. Здесь и далее вертикальные линии отмечают моменты начала, максимального покрытия и окончания ЗС

и далее в единицах 10^{-6}), интервал автокорреляции $\tau_k \approx 60$ мс (на уровне уменьшения $K_s(j)$ вдвое). В окрестности местного полудня (08:31 – 08:34) $K_s(0) \approx 1790 \pm 100$, $\tau_k \approx 30$ мс. При этом имела место наибольшая активность конвекции. Вскоре после максимального покрытия диска Солнца (11:32 – 11:35) $K_s(0) \approx 259 \pm 6$, $\tau_k \approx 50$ мс. Полученные значения τ_k отражают скорость перестройки атмосферных процессов (напомним, что временной интервал дискретизации составлял 20 мс). Усиление конвекции в середине дня привело к росту $K_s(0)$ примерно в 3 раза. В максимальной фазе ЗС конвекция была подавлена, и $K_s(0)$ уменьшилась в 2.3 раза по сравнению с утренним значением и в 7 раз по сравнению с полуденным значением.

Временные вариации температуры воздуха t_a накануне, в день ЗС и после него приведены на рис. 2. Видно, что ЗС обусловило падение температуры на 7.3° . Ско-

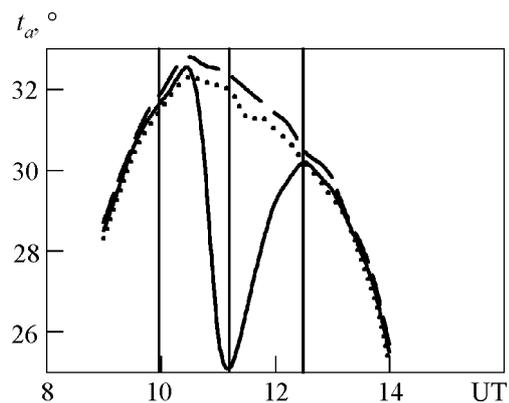


Рис. 2. Временные вариации температуры газа в приземной атмосфере в день затмения 11 августа 1999 г. (сплошная кривая), 10 августа 1999 г. (штрих) и 12 августа 1999 г. (точки)

рость уменьшения, а затем увеличения значений t_a в этот день была рекордной: 11 и $5^\circ/\text{ч}$ соответственно. В фоновые дни эта скорость была близка к $1^\circ/\text{ч}$.

Добавим, что большой интервал (15 мин) в измерениях t_a не позволил изучить АГВ по температурным данным, хотя относительная погрешность измерения температуры (около $0.3 \pm 0.4\%$) позволяла это сделать.

ЗС 31 мая 2003 г. Временные вариации среднего квадратического отклонения смещения края солнечного диска представлены на рис. 3. Вскоре после начала ЗС значение $\sigma_s \approx 0.9''$. Далее имело место его падение до минимального значения $\sigma_s \approx 0.6''$, которое наблюдалось около 03:25, т. е. примерно через 15 мин после наступления фазы максимального покрытия диска светила. После этого значения σ_s , несколько флуктуируя, увеличивались до $1.2''$. В момент окончания ЗС $\sigma_s \approx 0.9''$, т. е. стало таким же, как и в начале затмения.

Временные вариации температуры воздуха t_a в приземном слое атмосферы приведены на рис. 4. Видно, что в день ЗС t_a уменьшилась на 2° .

ЗС 3 октября 2005 г. Временные вариации $\sigma_s(t)$ представлены на рис. 5. Видно, что значения σ_s оставались практически неизменными в интервале времени с 07:00 до 09:00. Примерно с 09:00 до 09:38 наблюдалось падение σ_s . Моменты наступления минимума в зависимости $\sigma_s(t)$ и максимального покрытия диска Солнца практически совпали. При этом $\sigma_{s\min} \approx 0.58''$. После 09:38 имел место рост $\sigma_s(t)$, который сменился падением σ_s после окончания ЗС.

Заметное уменьшение температуры воздуха началось лишь после наступления фазы максимального покрытия диска Солнца (рис. 6). При этом t_a уменьшилась примерно на 1.3° . 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 роста t_a была около $4^\circ/\text{ч}$, в то время как в фоновые дни эта величина составляла $1^\circ/\text{ч}$.

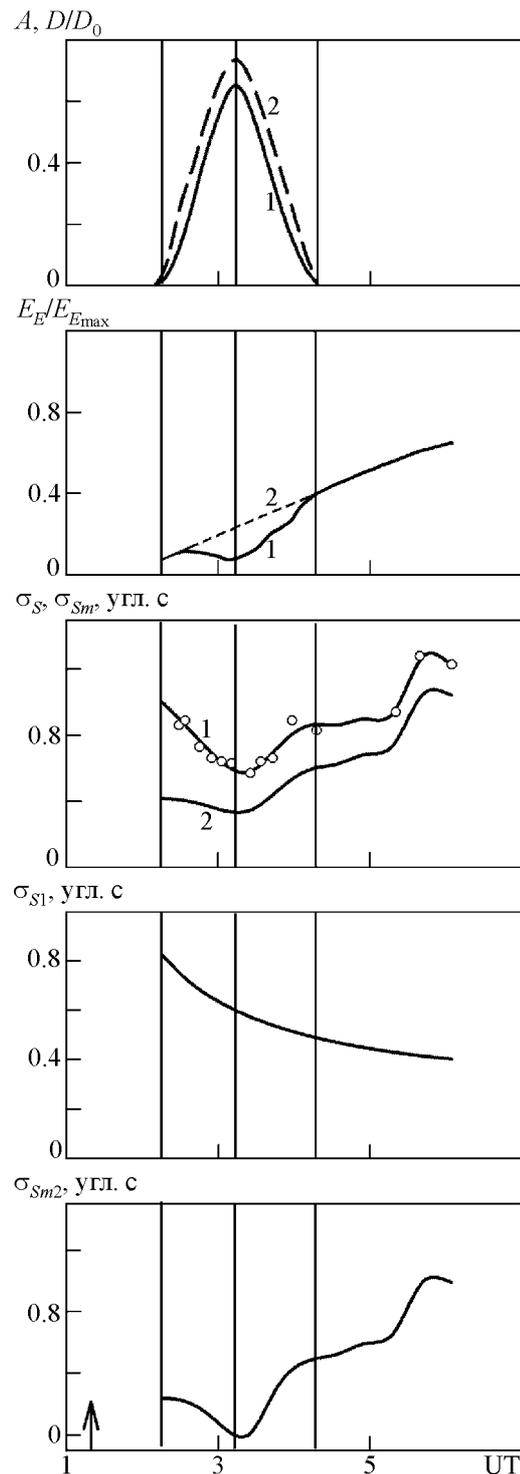


Рис. 3. Те же зависимости, что на рис. 1, для ЗС 31 мая 2003 г. Здесь и далее стрелка обозначает момент восхода Солнца на поверхности Земли в обсерватории

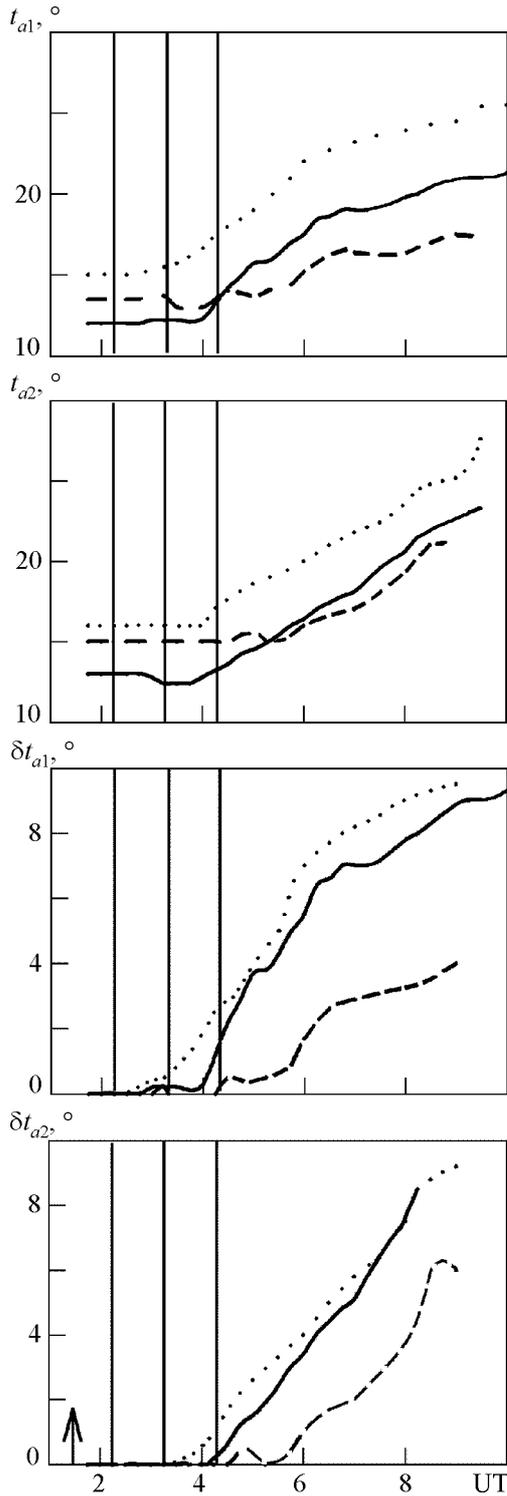


Рис. 4. Временные вариации температуры газа в приземной атмосфере, измеренные разнесенными по горизонтали термометрами (две верхние панели) в день затмения 31 мая 2003 г. (сплошная кривая) и контрольные дни 1 июня

2003 г. (точки) и 2 июня 2003 г. (штрих), а также приращений этой температуры $\delta t_{a1,2}(t) = t_{a1,2} - t_{a1,2}(02:00)$ (две нижние панели)

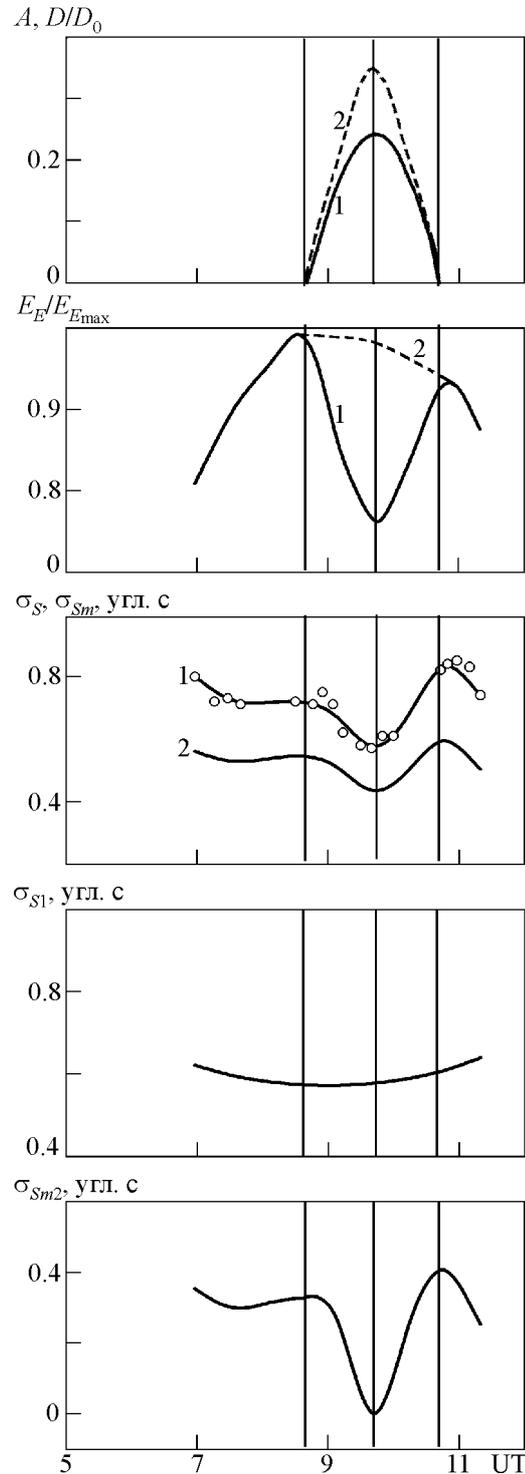


Рис. 5. Те же зависимости, что на рис. 1, для 3С 3 октября 2005 г.

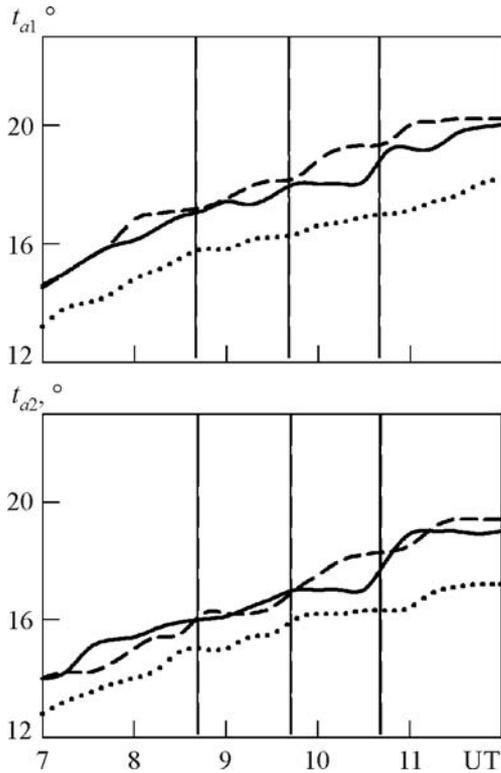


Рис. 6. Временные вариации температуры газа в приземной атмосфере, измеренные разнесенными по горизонтали термометрами в день затмения 3 октября 2005 г. (сплошная кривая) и контрольные дни 2 октября 2005 г. (штрих) и 4 октября 2005 г. (точки)

ЗС 29 марта 2006 г. Из-за значительной облачности зависимость $\sigma_S(t)$ получена лишь в интервале времени 11:00 – 12:00 (рис. 7). Поведение $\sigma_S(t)$ для этого ЗС отличалось от поведения $\sigma_S(t)$ для рассмотренных выше затмений. После наступления фазы максимального покрытия диска Солнца значения $\sigma_S(t)$ продолжали уменьшаться по крайней мере до 12:00.

Температура воздуха в основном отслеживала фазы ЗС (рис. 8). При максимальном покрытии диска Солнца t_a уменьшилась на 2.1° . К концу ЗС она вернулась к своему невозмущенному значению. Скорость уменьшения t_a при затмении составляла около $2^\circ/\text{ч}$, а в соседние дни она обычно не превышала $1^\circ/\text{ч}$.

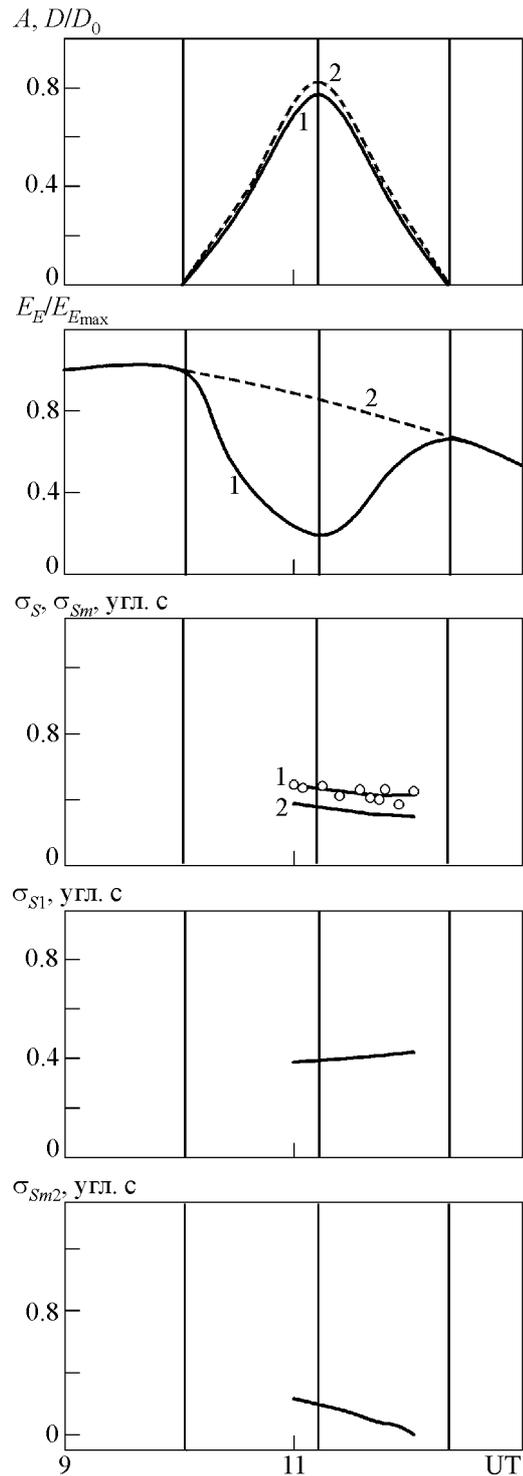


Рис. 7. Те же зависимости, что на рис. 1, для ЗС 29 марта 2006 г.

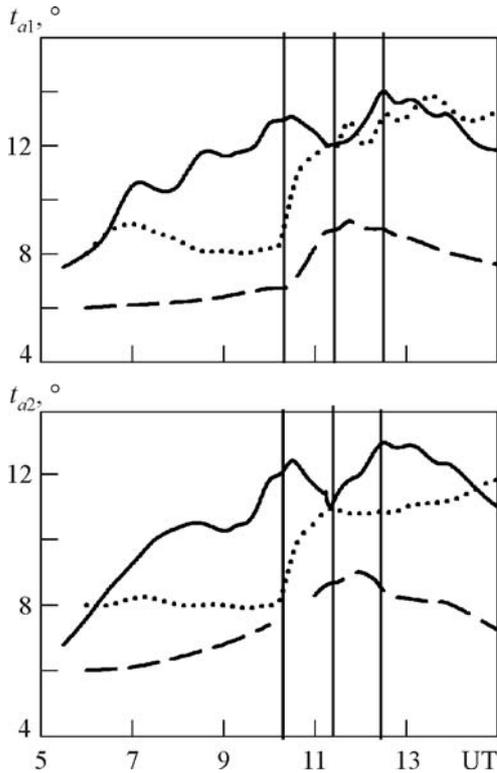


Рис. 8. Временные вариации температуры газа в приземной атмосфере, измеренные разнесенными по горизонтали термометрами 28 марта 2006 г. (тире), 29 марта 2006 г. (сплошная кривая), 30 марта 2006 г. (точки)

4. Результаты моделирования и расчетов

Общие сведения. Известно, что дрожание изображений вызвано флуктуациями угла прихода лучей, обусловленных турбулентными процессами, конвекцией и порывами ветра [19, 20]. В приземной атмосфере внутренний и внешний масштабы турбулентности составляют $1 \div 10$ мм и $1 \div 10$ м соответственно. Дрожание изображений наблюдается при размерах неоднородностей, больших диаметра диафрагмы телескопа $d_d = 0.03 \div 0.05$ м.

Дисперсия флуктуаций угла прихода лучей определяется структурной характеристикой C_n^2 [19]:

$$\sigma_s^2 = 2.84 d_d^{-1/3} \sec \chi \int_0^\infty C_n^2(z) dz.$$

Данная формула справедлива, если слой атмосферы можно считать плоским (т. е. $\chi \leq 75 \div 80^\circ$) и если радиус первой зоны Френеля $r_\Phi < d_d$. В нашем случае $r_\Phi < 1$ см.

Изменения σ_s^2 во времени вызваны как вариациями $C_n^2(t)$, так и изменениями $\chi(t)$, а значит и толщины слоя Δs атмосферы, дающего вклад в интегральный эффект. Поэтому удобно исключить зависимость σ_s^2 от $\chi(t)$, т. е. перейти к

$$\begin{aligned} \sigma_{Sm}^2 &= \sigma_s^2 \cos \chi = \\ &= 2.84 d_d^{-1/3} \int_0^\infty C_n^2(z) dz = 2.84 d_d^{-1/3} C_{n\Sigma}^2, \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$C_{n\Sigma}^2 = \int_0^\infty C_n^2(z) dz.$$

Очевидно, что зависимость $\sigma_{Sm}^2(t)$ обусловлена зависимостью $C_n^2(t)$.

В оптическом диапазоне основной причиной флуктуаций показателя преломления n являются флуктуации абсолютной температуры атмосферного газа T_a [19, 20]. Дисперсия последних $\sigma_T^2 \approx 10^{-3} \div 1$ K². Величина n связана с T_a и давлением газа p следующим образом [19, 20]:

$$n \approx 1 + 80 \frac{p}{T_a} \cdot 10^{-6},$$

где p – в миллибарах, T_a – в кельвинах. Тогда

$$\sigma_n = 80 \frac{p}{T^2} \sigma_T \cdot 10^{-6}$$

или

$$C_n^2 = \left(80 \frac{p}{T^2} \cdot 10^{-6} \right)^2 C_T^2,$$

где σ_n^2 , σ_T^2 – дисперсии n и T_a ; C_n^2 и C_T^2 – их структурные характеристики.

При $p_a \approx 1000$ мбар, $T_a \approx 290$ К имеем $C_n^2 \approx 0.9 \cdot 10^{-12} C_T^2$. Отсюда $C_T \approx 1.05 \cdot 10^6 C_n, \text{К} \cdot \text{м}^{-1/3}$. С другой стороны, структурная характеристика флуктуаций T_a [19]:

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

где $\gamma = \gamma_a + \gamma_{ad}$, $\gamma_{ad} = g/C_p \approx 10^{-2}$ К/м – адиабатический градиент температуры, g – ускорение свободного падения, $\gamma_a = -\partial T_a / \partial z$; $a_t \approx 3$ – турбулентное число Прандтля; $a^2 \approx 2.83$; $L_0 = \kappa z$ – внешний масштаб турбулентности, $\kappa = 0.4$ – постоянная Кармана [19]. При $z_0 = 3$ м имеем $L_0 \approx 1.2$ м, $\gamma \approx 0.3 C_T$.

При этом справедливо следующее соотношение [19]:

$$\sigma_T = C_T L_0^{1/3}.$$

Для $L_0 \approx 1.2$ м имеем $\sigma_T \approx 1.06 C_T$.

Предположим, что в первом приближении процессы механической турбулентности и конвекции (термической турбулентности) статистически независимы. При этом считается, что турбулентность вызывается пульсациями скорости движения газа, а конвекция – градиентом температуры газа. Упомянутые пульсации возникли за счет обтекания ветром неровностей ландшафта, близлежащей лесопосадки, построек и т. п. Даже при скорости ветра $u = 1$ м/с, средней высоте неровностей $\bar{h} \approx 2$ м число Рейнольдса $Re = \rho u \bar{h} / \eta \approx 10^5$. Здесь $\eta \approx 2 \cdot 10^{-5}$ Па·с – коэффициент динамической вязкости. Переход от ламинарного движения воздуха к турбулентному, как известно, наблюдается при $Re_{кр} \approx 10 \div 1000$.

Представим тогда σ_S^2 и σ_{Sm}^2 в виде:

$$\sigma_S^2 = \sigma_{S1}^2 + \sigma_{S2}^2, \quad (4)$$

$$\sigma_{Sm}^2 = \sigma_{Sm1}^2 + \sigma_{Sm2}^2,$$

где σ_{S1}^2 , σ_{S2}^2 – дисперсии флуктуаций угла прихода, обусловленные турбулентностью и конвекцией; σ_{Sm1}^2 и σ_{Sm2}^2 – эти же величины при $\chi = 0$. Для σ_{Sm1}^2 , σ_{Sm2}^2 справедлива формула (2). При расчете σ_{Sm1}^2 основной вклад в интеграл дает приземный слой толщиной $L_1 \approx 0.5 \div 1$ км [19]. Рассчитывая σ_{Sm2}^2 , необходимо учесть особенности конвекции. В случае развитой конвекции [19]

$$C_n^2(z) = C_n^2(z_0) \left(\frac{z}{z_0} \right)^{-4/3}. \quad (5)$$

Из соотношений (2), (5) следует, что

$$\sigma_{Sm2}^2 = 2.84 d^{-1/3} \cdot 3 z_0 C_n^2(z_0), \quad (6)$$

т. е. эффективная толщина L_2 слоя с конвекцией равна $3z_0 \approx 9$ м. Видно, что $L_1 \gg L_2$.

3С 11 августа 1999 г. Результаты расчета $\sigma_{S1}(\chi)$ (а точнее $\sigma_{S1}(t)$) приведены на рис. 1. Для углов $\chi \leq 75 \div 80^\circ$ она имеет вид:

$$\sigma_{S1}(\chi) = \frac{\sigma_{S10}}{\sqrt{\cos \chi}},$$

где $\sigma_{S10} = \sigma_{S1}(\chi_0) \sqrt{\cos \chi_0}$, $\chi_0 = \chi(t_{\min})$. В момент времени $t_{\min} \approx 11$ ч 30 мин имеем $\chi_0 \approx 41^\circ$, $\sigma_{S1}(\chi_0) \approx 0.38''$, $\sigma_{S10} \approx 0.33''$.

Временная зависимость σ_{S2} показана на рис. 1. Интересно, что в интервале времени 04:22 – 10:00 она неплохо аппроксимируется зависимостью $\sigma_{S2}(t) \propto \cos^2 \chi(t)$. Такая зависимость не является универсальной и отражает особенности рельефа земной поверхности в месте наблюдения (междуречье, распаханное поле и лесопосадка). В другой местности она иная [21].

Имея зависимость $\sigma_{Sm2}(t)$, из (6) можно вычислить $C_n(z_0)$, а затем $C_T(z_0)$, $\sigma_T(z_0)$ и $\gamma(z_0)$. Результаты расчетов приведены в табл. 2. Из нее видно, что по мере покрытия диска Солнца C_n , C_T и γ уменьшались, а затем, по мере открытия диска Солнца, –

Таблица 2. Основные параметры, описывающие атмосферную конвекцию днем 11 августа 1999 г.

Время	σ_{Sm2} , угл. с	$C_n(z_0)$, $M^{-1/3}$	$C_T(z_0)$, $K/M^{1/3}$	$\sigma_T(z_0)$, К	$\gamma(z_0)$, К/м
07:00	0.63	$3.1 \cdot 10^{-7}$	0.35	0.37	0.11
07:30	0.73	$3.5 \cdot 10^{-7}$	0.40	0.42	0.12
08:00	0.83	$4.0 \cdot 10^{-7}$	0.46	0.49	0.14
08:30	0.91	$4.5 \cdot 10^{-7}$	0.50	0.53	0.15
09:00	0.96	$4.7 \cdot 10^{-7}$	0.53	0.56	0.16
09:30	0.95	$4.6 \cdot 10^{-7}$	0.53	0.56	0.16
10:00	0.85	$4.1 \cdot 10^{-7}$	0.47	0.50	0.14
10:30	0.57	$2.8 \cdot 10^{-7}$	0.32	0.34	0.10
11:00	0.25	$1.3 \cdot 10^{-7}$	0.20	0.21	0.06
11:30	0.014	$0.7 \cdot 10^{-8}$	$7.7 \cdot 10^{-3}$	$8.2 \cdot 10^{-3}$	$2.3 \cdot 10^{-3}$
12:00	0.19	$9.8 \cdot 10^{-8}$	0.11	0.12	0.03
12:30	0.34	$1.5 \cdot 10^{-7}$	0.18	0.19	0.06

увеличивались. Около 11:30 роль конвекции была пренебрежимо малой.

После вычета вклада конвекции по зависимости $\sigma_{Sm1}(t)$ можно вычислить $C_{n\Sigma}^2(t)$, а также оценить $C_n(t)$ в случае однородности турбулентных свойств в пределах слоя толщиной L_1 . Результаты расчетов для ЗС 11 августа 1999 г. и других ЗС приведены в табл. 3.

ЗС 31 мая 2003 г. Наблюдения 31 мая 2003 г. выполнены в утреннее время. Следовало ожидать, что в начале измерений (пока значение T_a было близко к ночному) конвективные процессы будут несущественными. Вклад в σ_S^2 давала лишь турбулентность.

Таблица 3. Параметры турбулентности (с вычетом вклада конвекции). Толщина атмосферного слоя – 500 м. В скобках приведено скорректированное значение

Дата	σ_{Sm1} , угл. с	$C_{n\Sigma}^2$, $M^{1/3}$	C_n , $M^{-1/3}$
11.08.1999 г.	0.33	$2.4 \cdot 10^{-13}$	$2.2 \cdot 10^{-8}$
31.05.2003 г.	0.30	$2.8 \cdot 10^{-13}$	$2.4 \cdot 10^{-8}$
3.10.2005 г.	0.58 (0.30)	$1.0 \cdot 10^{-12}$ ($2.8 \cdot 10^{-13}$)	$4.5 \cdot 10^{-8}$ ($2.4 \cdot 10^{-8}$)
29.03.2006 г.	0.30	$2.8 \cdot 10^{-13}$	$2.4 \cdot 10^{-8}$

Для подтверждения этого вычислена величина σ_{Sm} (см. рис. 3). Оказалось, что до 03:25 среднее квадратическое отклонение σ_{Sm} практически не зависело от времени. Это, скорее всего, свидетельствовало о незначительной роли конвекции. Вклад в σ_S^2 при этом давал турбулентный слой толщиной $L_1 = 0.5 \div 1$ км [19]. Зная σ_{Sm}^2 , из (2) можно вычислить $C_{n\Sigma}^2$. Для $\sigma_{Sm} = 0.3''$ значение $C_{n\Sigma}^2 \approx 2.4 \cdot 10^{-13} M^{1/3}$. При $L_1 = 0.5$ км имеем $C_n^2 \approx 4.8 \cdot 10^{-16} M^{-2/3}$.

Полагая далее, что справедливо соотношение (4), вычислим $\sigma_{Sm2}^2 = \sigma_{Sm}^2 - \sigma_{Sm1}^2$. Если в интервале наблюдений 03:30 – 06:00 можно полагать σ_{Sm1} постоянным и равным $0.3''$, удастся проследить за временными вариациями σ_{Sm2} . Для σ_{Sm2}^2 также справедлива формула (2). Из нее вычисляются значения $C_{n\Sigma}^2(t)$, обусловленные конвекцией. Для достаточно развитой конвекции справедливы соотношения (5) и (6), где в качестве $z_0 = 3$ м выбрана высота телескопа. При этом $C_{n\Sigma}^2 = 3z_0 C_n^2(z_0)$ и эффективная толщина L_2 слоя с конвекцией примерно равна $3z_0$, т. е. около 9 м. По значениям $C_{n\Sigma}^2(t)$ оценены $C_n(t)$ (табл. 3).

Результаты оценки $C_n(t)$, $C_T(t)$, σ_T и $\gamma(t)$ на высоте z_0 приведены в табл. 4. Видно, что $\gamma \gg \gamma_{ad}$. В переходное время суток (утром

Таблица 4. Основные параметры, описывающие атмосферную конвекцию утром 31 мая 2003 г.

Время	σ_{Sm2} , угл. с	$C_n(z_0)$, м ^{-1/3}	$C_T(z_0)$, К/м ^{1/3}	$\sigma_T(z_0)$, К	$\gamma(z_0)$, К/м
03:30	0.14	$0.8 \cdot 10^{-7}$	0.09	0.10	0.03
04:00	0.44	$2.6 \cdot 10^{-7}$	0.28	0.30	0.08
04:30	0.52	$3.0 \cdot 10^{-7}$	0.32	0.34	0.10
05:00	0.61	$3.5 \cdot 10^{-7}$	0.37	0.39	0.11
05:30	0.83	$4.8 \cdot 10^{-7}$	0.51	0.54	0.15
06:00	0.95	$5.5 \cdot 10^{-7}$	0.59	0.63	0.18

и вечером) $\gamma_a \approx 0$, ночью $\gamma_a \approx -0.1$ К/м, а днем $\gamma_a \approx 0.1$ К/м.

ЗС 3 октября 2005 г. В этот день покрытие диска Солнца было наименьшим ($A \leq 0.24$), и поэтому не приходилось ожидать, что после наступления главной фазы ЗС конвекция будет полностью подавлена. Действительно, $\sigma_{Smin} \approx 0.58$, а $\sigma_{Smmin} \approx 0.44$. Если предположить, что 3 октября 2005 г., как и в день ЗС 11 августа 1999 г., $\sigma_{Sm1} \approx 0.30$ (когда конвекция была практически полностью подавленной), можно вычислить скорректированные значения $\sigma_{Sm2}(t)$, а по ним оценить временные зависимости C_n , C_T , σ_T и γ на высоте z_0 . Результаты таких оценок приведены в табл. 5. Видно, что вблизи главной фазы ЗС (09:30 – 10:00) значения

C_n , C_T , σ_T и γ – минимальны. Это свидетельствует об ослаблении роли конвекции, о ее частичном (около 30 %) подавлении.

ЗС 29 марта 2006 г. Продолжительное существование облачности в этот день полностью изменило временной ход эффектов ЗС. Степень покрытия диска Солнца была наибольшей ($A_{max} \approx 0.77$). При этом, как и 11 августа 1999 г., ожидалось, что вблизи главной фазы затмения конвекция будет полностью подавлена. Этого, однако, не произошло. Значения σ_{Sm2} продолжали уменьшаться до конца измерений. Результаты оценок σ_{Sm2} , C_n , C_T , σ_T и γ на высоте z_0 в предположении, что $\sigma_{Sm1} \approx 0.30''$, приведены в табл. 6. Видно, что с течением времени роль конвекции уменьшалась.

Таблица 5. Основные параметры, описывающие атмосферную конвекцию днем 3 октября 2005 г. Считалось, что скорректированное значение $\sigma_{Sm1} \approx 0.30''$

Время	σ_{Sm2} , угл. с	$C_n(z_0)$, м ^{-1/3}	$C_T(z_0)$, К/м ^{1/3}	$\sigma_T(z_0)$, К	$\gamma(z_0)$, К/м
07:00	0.47	$2.7 \cdot 10^{-7}$	0.29	0.30	0.09
07:30	0.43	$2.5 \cdot 10^{-7}$	0.27	0.29	0.08
08:00	0.44	$2.6 \cdot 10^{-7}$	0.27	0.29	0.08
08:30	0.45	$2.6 \cdot 10^{-7}$	0.27	0.29	0.08
09:00	0.42	$2.4 \cdot 10^{-7}$	0.24	0.25	0.07
09:30	0.32	$1.9 \cdot 10^{-7}$	0.19	0.20	0.06
10:00	0.34	$2.0 \cdot 10^{-7}$	0.20	0.21	0.06
10:30	0.45	$2.6 \cdot 10^{-7}$	0.27	0.29	0.08
11:00	0.47	$2.7 \cdot 10^{-7}$	0.29	0.30	0.09

Таблица 6. Основные параметры, описывающие атмосферную конвекцию днем 29 марта 2006 г. Считалось, что скорректированное значение $\sigma_{S_{m1}} \approx 0.30''$

Время	$\sigma_{S_{m2}}$, угл. с	$C_n(z_0)$, м ^{-1/3}	$C_T(z_0)$, К/м ^{1/3}	$\sigma_T(z_0)$, К	$\gamma(z_0)$, К/м
11:00	0.26	$1.5 \cdot 10^{-7}$	0.15	0.16	0.05
11:30	0.11	$6.4 \cdot 10^{-8}$	0.06	0.06	0.02
12:00	0	0	0	0	0

5. Динамические процессы, сопровождавшие затмения Солнца

ЗС 11 августа 1999 г. Опишем процессы в самых нижних слоях атмосферы. С затмением связано уменьшение величины σ_S от $1.15''$ до $0.4''$, а затем последующее ее увеличение. В первом приближении $\sigma_S(t)$ качественно повторяет ход функции $(1 - A(t))$, однако $\sigma_{S_{min}}$ запаздывает по отношению к A_{max} примерно на время $t_\sigma \approx (16 \pm 1)$ мин. Уменьшение величины σ_S при ЗС можно объяснить уменьшением ее составляющей σ_{S2} , обусловленной конвективными процессами (см. рис. 1). В самом деле $\sigma_{S2}^2 \propto C_T^2$. В свою очередь, как следует из (3), $C_T^2 \propto \gamma^2$.

Запаздывание реакции атмосферы на ЗС, по-видимому, связано с поднятием нижней границы слоя с конвективными ячейками на стадии покрытия диска Солнца и с его опусканием на стадии уменьшения покрытия. Характерная скорость движения указанной границы $v_K \approx \sqrt{2K_t/t_0}$, где $t_0/2$ время покрытия диска светила. Полагая $K_t \approx 1$ м²/с, $t_0 \approx 2$ ч, получим $v_K \approx 1.5$ см/с. Тогда время движения в слое толщиной $L_2 = 3z_0$ в прямом и обратном направлениях составляет $t_K = 2L_2/v_K = 6z_0/v_K \approx 18$ мин. Видно, что величины t_K и t_σ близки, и поэтому их следует отождествить. Имея $\tau_k \approx 50$ мс и $v_K \approx 1.5$ см/с, можно оценить внутренний масштаб турбулентности $l_0 \approx v_K \tau_k = 0.75$ мм. Такое значение l_0 согласуется с данными работ [19, 20].

Осталось объяснить, почему уменьшение σ_S началось около 10:00, т. е. до заметного покрытия диска Солнца, а также резкие увеличения σ_S в 10:45 и 11:07.

Первый эффект обусловлен покрытием большей части неба облаками, что привело к охлаждению земной поверхности, а значит к некоторому уменьшению $|\gamma|$, C_T и σ_{S2} .

Второй эффект, по-видимому, связан с усилением силы ветра, скорость которого в 10:40 достигла величины $u \approx 15$ м/с. При этом плотность средней кинетической энергии турбулентных пульсаций за время Δt увеличилась на величину [22]

$$\Delta \epsilon_t = \rho u_*^2 \frac{\partial u}{\partial z} \Delta t.$$

Здесь u_* – скорость трения, $\partial u / \partial z$ – вертикальный градиент горизонтальной скорости ветра, ρ – плотность воздуха. Отсюда

$$\frac{1}{\rho} \frac{\Delta \epsilon_t}{\Delta t} = u_*^2 \frac{\partial u}{\partial z}.$$

Полагая $|\partial u / \partial z| \approx u_* / L_0$, $u_* \approx 0.1u \approx 1$ м/с, $L_0 \approx \kappa z_0 \approx 1$ м, получим $|u_*^2 \partial u / \partial z| \approx u_*^3 / L_0 \approx 1$ м²/с³. В спокойных условиях в атмосфере на высоте $z_0 = 3$ м обычно эта величина составляет около $3 \cdot 10^{-2}$ м²/с³ [22], т. е. в 30 раз меньше. Ее увеличение и обусловило рост σ_S (точнее σ_{S1}) в 3–4 раза.

Третий эффект, по-видимому, обусловлен интенсивным процессом “таяния” облаков на пути луча, турбулентные свойства которых заметно отличаются от свойств окружающего газа [21].

ЗС 31 мая 2003 г. К особенностям динамических процессов, сопутствовавших ЗС утром 31 мая 2003 г., необходимо отнести следующее: вначале резкое падение $\sigma_S(t)$, запаздывание примерно на 15 мин наступления минимального значения σ_S после фазы максимального покрытия диска Солнца, сравнительно быстрый рост σ_S в интервале времени 03:25 – 04:00, примерно получасовое прекращение роста σ_S , стремительный рост σ_S с 04:25 до 05:40 и прекращение роста σ_S (см. рис. 3).

Эффект резкого падения, как видно из зависимости $\sigma_{Sm}(t)$, объясняется уменьшением толщины атмосферного слоя $\Delta s = \Delta z \sec \chi$, а не покрытием солнечного диска.

Запаздывание на 15 мин наступления минимального значения σ_S , как и 11 августа 1999 г., объясняется задержкой развития атмосферной конвекции. Знание значения t_σ и отождествление его с t_K позволяет оценить скорость конвекции v_K и коэффициент турбулентного обмена K_t . Оказалось, что $v_K \approx 2$ см/с, $K_t = v_K^2 t_0 / 2 \approx 0.7$ м²/с. При $\tau_k = 50$ мс имеем $l_0 \approx 1$ мм.

Быстрый рост σ_S в интервале времени 03:25 – 04:00 связан с увеличением незатененной площади диска Солнца.

Стремительный рост σ_S после 04:25, а затем прекращение роста, очевидно, обусловлены активизацией конвекции и наступлением стадии развитой конвекции соответственно.

ЗС 3 октября 2005 г. Особенностью динамических процессов, сопутствовавших этому затмению, было то, что из-за незначительного покрытия диска Солнца процесс конвекции не был подавлен, а лишь ослаблен примерно на 30 %. Не обнаружена и задержка в моменте наступления минимального значения σ_S по отношению к моменту наступления главной фазы затмения. Градиент γ также принимал минимальное значение (около 0.06 К/м), а не приближался к нулю.

Эпизодические порывы ветра увеличивали механическую турбулизацию атмос-

феры и, как следствие, рост σ_S на $0.03 \div 0.05''$ (на $5 \div 10$ %).

ЗС 29 марта 2006 г. Реакция $\sigma_S(t)$ на затмение в этот день принципиально отличалась от аналогичной реакции 11 августа 1999 г. Естественно, что отличались и динамические процессы, обусловившие поведение зависимости $\sigma_S(t)$. По всей видимости, это отличие связано с нарушением теплового режима в приземной атмосфере в результате ее длительного экранирования мощной облачной структурой.

6. Обсуждение

Проведенный сравнительный анализ эффектов ЗС в приземной атмосфере показал следующее. Эффекты затмения 11 августа 1999 г. можно рассматривать как эталонные. Зависимость $\sigma_S(t)$ отслеживала постепенное покрытие диска Солнца, а затем и уменьшение степени его покрытия. Минимальное значение в зависимости $\sigma_S(t)$ наступило примерно через (16 ± 1) мин после наступления главной фазы затмения. Практически такое же запаздывание было и 31 мая 2003 г. (близкими были и значения A_{\max} – 0.73 и 0.64). Наблюдаемое время запаздывания обусловлено инерционностью конвективной активности приземной атмосферы.

Временной ход $\sigma_S(t)$ для послеполюденного ЗС 11 августа 1999 г. и утреннего ЗС 31 мая 2003 г. существенно отличался. Во втором случае затмение задержало развитие конвекции, которая активизировалась лишь после 04:00.

Затмение 3 октября 2005 г. имело место примерно в околополюденное время. Эффекты в этот день в целом напоминали эффекты ЗС 11 августа 1999 г., но были выражены слабее. Это объясняется значительно отличающимися значениями A_{\max} (0.24 и 0.73 соответственно). Не было обнаружено также запаздывание момента наступления $\sigma_{S\min}$ в зависимости $\sigma_S(t)$ по отношению к моменту времени наступления A_{\max} . Это объясняется эффектом лишь незначи-

тельного (до 30 %) ослабления конвективных процессов.

Затмения 29 марта 2006 г. и 11 августа 1999 г. по своим параметрам очень близки: значения A_{\max} составили 0.77 и 0.73, времена наступления и окончания ЗС практически не отличались, моменты достижения главной фазы отличались на 1 мин. Зависимости $\sigma_s(t)$ для этих затмений отличались разительно. Дело в том, что мартовское затмение сопровождалось мощной облачностью. Последнее существенно изменило тепловой баланс в системе земная поверхность – приземная атмосфера. Это повлекло за собой изменения турбулентных и конвективных процессов и, в конечном счете, изменения в зависимости $\sigma_s(t)$.

Добавим, что после наступления главной фазы ЗС 11 августа 1999 г. в течение примерно 2 ч наблюдались АГВ с периодом $20 \div 25$ мин и относительной амплитудой $6 \div 8$ %. Перед ЗС в приземной атмосфере также существовали волновые процессы, но их период был более 1 ч, а амплитуда не превышала $3 \div 5$ %.

Временные вариации температуры газа в приземной атмосфере были близки к прогнозируемым. Они зависели от времени суток, сезона, степени покрытия диска Солнца и, частично, от интенсивности облачной структуры. Наибольшие изменения t_a имели место 11 августа 1999 г. (7.3°) при $A_{\max} = 0.73$, наименьшие – 3 октября 2005 г. (1.3°) при $A_{\max} = 0.24$. Существенно отличались и скорости изменения t_a : от 2 до $11^\circ/\text{ч}$.

Используя временную зависимость $\sigma_s(t)$ и теоретические соотношения из [19, 20], удалось оценить ряд параметров динамических процессов в приземной атмосфере, таких как $C_{n\Sigma}^2$, $C_n(z_0)$, $C_T(z_0)$, $\sigma_T(z_0)$, $\gamma(z_0)$ и др. Значения $C_{n\Sigma}^2$ и $C_n(z_0)$ оказались близки к тем, что приводятся в [19, 20]. В условиях развитой конвекции $C_n(z_0) \approx 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^{-1/3}$, $C_T(z_0) \approx 0.5 \text{ К/м}^{1/3}$, $\sigma_T(z_0) \approx 0.5 \text{ К}$, а $\gamma(z_0) \approx 0.16 \text{ К/м}$. В то же время значения C_n , связываемые с механической атмосферной турбулентностью, были в 10–20 раз меньше.

Заметим, что отношение $\sigma_T(z_0)/L_0 \approx 0.4 \text{ К/м}$ в 2.5 раза превышало значения $\gamma(z_0)$.

7. Основные результаты

1. На основе измеренных временных зависимостей температуры воздуха и статистических характеристик уровня дрожания солнечного диска, сопутствующего ЗС, а также с привлечением соотношений из статистической теории распространения оптического излучения в атмосфере Земли разработан метод получения статистических характеристик механической и термической турбулентности в приземной атмосфере. Эти характеристики нужны для описания и прогнозирования распространения радиоволн в реальной атмосфере в широком диапазоне частот.

2. Показано, что наблюдения частных ЗС с достаточно большой ($A_{\max} \geq 0.6 \div 0.7$) степенью покрытия солнечного диска позволяют разделить вклады механической и термической турбулентности, что существенно расширяет возможности разработанного метода и позволяет получить большее число параметров атмосферной турбулентности.

3. Продемонстрировано, что предлагаемый метод становится более информативным при исследовании становления или подавления развитой конвекции.

4. Из экспериментальных данных найдены временные зависимости структурных функций показателя преломления и температуры воздуха в приземной атмосфере, дисперсии флуктуаций и регулярного градиента температуры газа, а также время становления атмосферной конвекции, внутренний масштаб турбулентности и другие параметры приземной атмосферы.

5. Полученные результаты хорошо согласуются с имеющимися в литературе данными об атмосферной турбулентности.

6. По квазипериодическим вариациям среднего квадратического отклонения смещения края солнечного диска, сопутствовавшим ЗС 11 августа 1999 г., определены

периоды и относительные амплитуды колебаний. Они оказались равными $20 \div 25$ мин и $6 \div 8$ %. Такие параметры свойственны АГВ в приземной атмосфере.

Литература

1. Андрианов В. А. Распространение радиоволн в пограничном слое атмосферы // Итоги науки и техники. Радиотехника. – 1994. – Т. 44. – С. 3-80.
2. Special issue on radar meteorology // Radio Sci. – 1980. – Vol. 15, No 2.
3. James P. K. A review of radar observations of the troposphere in clear air conditions // Radio Sci. – 1980. – Vol. 15, No 2. – P. 151-175.
4. Чедуик Р. Б., Госсард Э. Э. Радиолокационное дистанционное зондирование ясного неба: Обзор // ТИИЭР. – 1983. – Т. 71, №6. – С. 59-78.
5. Каллистратова М. А., Кон А. Н. Радиоакустическое зондирование атмосферы. – М.: Наука, 1985. – 197 с.
6. Красненко Н. П. Акустическое зондирование атмосферы. – Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1986. – 165 с.
7. Бойтман О. Н., Калихан А. Д., Тащилин А. В. Среднеширотная ионосфера в период полного солнечного затмения 9 марта 1997 г. 1. Моделирование эффектов затмения // Геомагнетизм и аэронавигация. – 1999. – Т. 39, №6. – С. 45-51. 2. Данные наблюдений и сравнения с результатами моделирования // Геомагнетизм и аэронавигация. – 1999. – Т. 39, №6. – С. 52-60.
8. Урядов В. П., Леонов А. М., Понятов А. А., Бойко Г. Н., Терентьев С. П. О вариациях характеристик КВ сигнала на трассе наклонного зондирования во время солнечного затмения 11 августа 1999 г. // Изв. вузов. Радиофизика. – 2000. – Т. 43, №8. – С. 682-686.
9. Гоков А. М., Черногор Л. Ф. Результаты наблюдения процессов в нижней ионосфере, сопутствующих затмению Солнца 11 августа 1999 г. // Радиофизика и радиоастрономия. – 2000. – Т. 5, №4. – С. 348-360.
10. Костров Л. С., Черногор Л. Ф. Результаты наблюдения процессов в средней ионосфере, сопутствующих затмению Солнца 11 августа 1999 г. // Радиофизика и радиоастрономия. – 2000. – Т. 5, №4. – С. 361-370.
11. Черногор Л. Ф. Высыпание электронов из магнитосферы, стимулированное затмением Солнца. // Радиофизика и радиоастрономия. – 2000. – Т. 5, №4. – С. 371-375.
12. Акимов А. Л., Акимов Л. А. Исследование турбулентной активности атмосферы в день солнечного затмения 11 августа 1999 г. // Кинематика и физика небесных тел. – 2001. – Т. 17, №2. – С. 182-188.
13. 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.
14. 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.
15. 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 аэронавигация. – 2005. – Т. 45, №4. – С. 526-551.
16. Chimonas G., Hines C. O. Atmospheric Gravity Waves Induced by a Solar Eclipse. // J. Geophys. Res. – 1970. – Vol. 75, No. 4. – P. 870-875.
17. Chimonas G. Internal Gravity-Wave Motions Induced in the Earth's Atmosphere by a Solar Eclipse. // J. Geophys. Res. – 1970. – Vol. 75, No. 28. – P. 5545-5551.
18. Аллен К. У. Астрофизические величины. – М.: Мир, 1977. – 372 с.
19. Татарский В. И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. – М.: Наука, 1967. – 548 с.
20. Клиффорд С. Ф. Классическая теория распространения волн в турбулентной среде // Распространение лазерного пучка в атмосфере. – М.: Мир, 1981. – С. 18-60.
21. Акимов Л. А., Акимов А. Л., Дятел Н. П. Влияние турбулентного следа разрушившегося облака на качество изображения Солнца // Кинематика и физика небесных тел. – 2000. – Т.16, №3. – С. 224-280.
22. Монин А. С., Яглом А. М. Статистическая гидродинамика. Ч. 1. – М.: Наука, 1965. – 640 с. Статистическая гидродинамика. Ч. 2. – М.: Наука, 1967. – 720 с.

**Параметри турбулентних процесів
у атмосфері, що супроводжували
затемнення Сонця**

**О. Л. Акимов, Л. О. Акимов,
Л. Ф. Черногор**

Наводяться результати однотипних оптичних спостережень, аналізу та порівняння динаміки ефектів у приземній атмосфері, що супроводжували чотири часткові затемнення Сонця поблизу м. Харкова (Україна) 11 серпня 1999 р., 31 травня 2003 р., 3 жовтня 2005 р. та 29 березня 2006 р. Ефекти у ранковий, колопудневий та післяпудневий час помітно відрізнялися. За результатами вимірювань статистичних характеристик рівня тремтіння краю сонячного диска оцінено параметри динамічних процесів у приземній атмосфері.

**Turbulence Parameters
in the Atmosphere Associated
with Solar Eclipses**

**A. L. Akimov, L. A. Akimov,
and L. F. Chernogor**

The similar type optical measurements of the surface atmosphere effects near Kharkiv city (Ukraine) during August 11, 1999, May 31, 2003, October 3, 2005, and March 29, 2006 solar eclipses are analyzed and compared in dynamics. The effects exhibit distinct diurnal variation during the morning, near-meridian, and post-meridian hours. The variation measured in the statistics of the level of solar limb flickering is employed to estimate dynamic processes in the surface atmosphere.