

Влияние солнечного затмения на процессы в пограничном слое атмосферы

Г.И. Горчаков¹, А.К. Петров², А.А. Исаков¹, Е.Н. Кадыгров³,
А.В. Карпов¹, А.С. Козлов², В.М. Копейкин¹, Г.А. Курбатов⁴,
С.Б. Малышкин², Е.А. Миллер³, А.В. Троицкий^{5*}

¹Учреждение Российской академии наук Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3

²Учреждение Российской академии наук Институт химической кинетики и горения СО РАН
630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 3

³Государственное учреждение «Центральная аэрологическая обсерватория»
141700, г. Долгопрудный Московской обл., ул. Первомайская, 3

⁴МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет
119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1, стр. 2

⁵ФГУ НИРФИ
603950, г. Нижний Новгород, ул. Печерская, 25

Поступила в редакцию 13.11.2009 г.

Выполнено исследование затменных эффектов в пограничном слое атмосферы в г. Новосибирске во время полного солнечного затмения 1 августа 2008 г. Определены обусловленные затмением изменения приземной температуры, вертикальных профилей температуры в пограничном слое атмосферы и параметров турбулентности. Проанализированы вариации общего содержания водяного пара и параметров аэрозоля в приземном слое атмосферы во время солнечного затмения.

Ключевые слова: солнечное затмение, пограничный слой атмосферы, затменные эффекты, турбулентность, аэрозоль; solar eclipse, boundary layer, eclipse effects, turbulence, aerosol.

Введение

В работах [1, 2] на основе анализа данных комплексных наблюдений полного солнечного затмения в г. Кисловодске 29 марта 2006 г. установлено, что благодаря солнечному затмению в пограничном слое атмосферы снижается температура воздуха, повышается его устойчивость и подавляется турбулентность. В настоящей статье сопоставляются результаты комплексного эксперимента в г. Новосибирске во время полного солнечного затмения 1 августа 2008 г. [3] с полученными нами ранее [1, 2], а также оценивается возможное влияние солнечного затмения на характеристики атмосферного аэрозоля в приземном слое атмосферы и на общее содержание водяного пара.

* Геннадий Ильич Горчаков (gengor@ifaran.ru); Александр Константинович Петров (petrov@kinetics.nsc.ru); Андрей Александрович Исаков (a.a.isakov@mail.ru); Евгений Николаевич Кадыгров (src_attex@mtu-net.ru); Алексей Владимирович Карпов (karpov@ifaran.ru); Александр Сергеевич Козлов (kozlov@kinetics.nsc.ru); Владимир Михайлович Копейкин (kopeikin@ifaran.ru); Григорий Александрович Курбатов (kurbatov_ga@physics.msu.ru); Сергей Борисович Малышкин (msb@ngs.ru); Евгений Алланович Миллер (tissary@rambler.ru); Аркадий Всеволодович Троицкий (troitskyav@nirfi.sci-nnov.ru).

Солнечное затмение 1 августа 2008 г. в Новосибирске

Полоса видимости полного солнечного затмения 1 августа 2008 г. прошла по территории Западной Сибири и Алтайского края, в том числе через гг. Нижневартовск, Новосибирск и Барнаул (рис. 1).

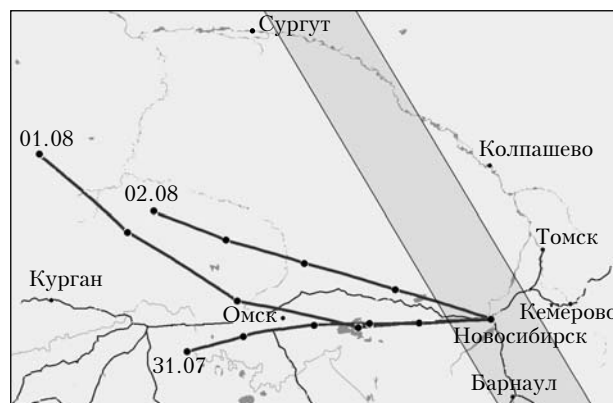


Рис. 1. Карта-схема полного солнечного затмения 01.08.08 г. и обратные траектории воздушных масс для Новосибирска

В Новосибирске солнечное затмение началось в 16:41 и завершилось в 18:45 по местному времени.

Фаза полного солнечного затмения длилась примерно 3 мин – с 17:43 по 17:46.

Метеорологические условия 1 августа 2008 г. в Новосибирске для наблюдения солнечного затмения и затменных эффектов в атмосфере были вполне благоприятными. В этот день город находился в малоградиентном барическом поле, сравнительно далеко от центров ближайших циклонов и антициклонов. Днем наблюдалась переменная облачность. Во время затмения балл облачности заметно уменьшился.

О характере изменения воздушных масс в Новосибирске до и после затмения можно судить по обратным траекториям переноса воздушных масс на уровне 750 мбар (см. рис. 1).

Даты при траекториях указывают на время прихода воздушной массы в Новосибирск. Временной интервал между точками на траекториях составляет 6 ч.

Комплексный эксперимент по исследованию затменных эффектов в пограничном слое атмосферы

В третьей декаде июля и первые дни августа 2008 г. в двух районах г. Новосибирска (в Академгородке на территории Института химической кинетики и горения СО РАН и в центральной части города на ул. Советской) проводились измерения вертикальных профилей температуры воздуха с помощью СВЧ-профилеметров МТП-5 [4] и потоков солнечной и инфракрасной радиации с помощью балансомера CNR1 (Kipp&Zonen) и пиранометра М50.

В Академгородке проводились измерения метеопараметров и характеристик турбулентности с помощью акустической метеостанции Метео-2 (ИОА СО РАН) [5]. Для выявления возможного влияния вариаций относительной влажности воздуха, обусловленных солнечным затмением, на свойства приземного аэрозоля измерялся коэффициент направленного светорассеяния $K(\varphi, \lambda)$ для угла рассеяния $\varphi = 45^\circ$ и длины волны света $\lambda = 630$ нм с помощью малогабаритного нефелометра [6], снабженного низкотемпературным нагревателем, позволяющим варьировать относительную влажность воздуха, прокачиваемого через нефелометр.

Одновременно с подготовкой и проведением затменного эксперимента в Академгородке сотрудниками ИФА РАН и ИХКиГ СО РАН проводились сравнения счетчиков частиц аэрозоля, включая два диффузионных спектрометра аэрозолей ДСА-1 (диапазон размеров частиц 3–200 нм), лазерный спектрометр аэрозолей ЛАС-П (0,15–1,50 мкм), оптико-электронный счетчик частиц ОЭАС-05 (0,5–10,0 мкм) и фотоэлектрический счетчик фирмы GRIMM (Германия), модель № 1.109 (0,2–20,0 мкм).

В центре Новосибирска с помощью СВЧ-радиометра (частота 22,2 ГГц) [7] во время солнечного затмения проводились измерения общего содержания водяного пара.

Затменные эффекты в приземном и пограничном слоях атмосферы

Потоки солнечной и инфракрасной радиации

Экранирование солнечного диска Луной во время солнечного затмения приводит к уменьшению потока суммарной коротковолновой солнечной радиации F_1 . Соответственно уменьшается и поток солнечной радиации F_2 , отраженный от подстилающей поверхности. Уменьшение притока тепла $\Delta F = F_1 - F_2$ к подстилающей поверхности приводит к ее постепенному охлаждению и, как следствие, к уменьшению потока F_3 теплового излучения [8] подстилающей поверхности. Последующее снижение температуры в пограничном слое атмосферы [1, 2] проявляется в уменьшении направленного к подстилающей поверхности F_4 противоизлучения атмосферы [8] (в инфракрасной области спектра). В результате во время солнечного затмения должен уменьшаться и радиационный баланс B [8]:

$$B = F_1 - F_2 - F_3 + F_4. \quad (1)$$

Результаты измерений в приземном слое атмосферы с помощью балансомера CNR1 потока F_1 нисходящей коротковолновой солнечной радиации (погрешность измерений 10 Вт/м^2) и радиационного баланса B в Новосибирске во время солнечного затмения представлены на рис. 2 (кривые 1 и 2).

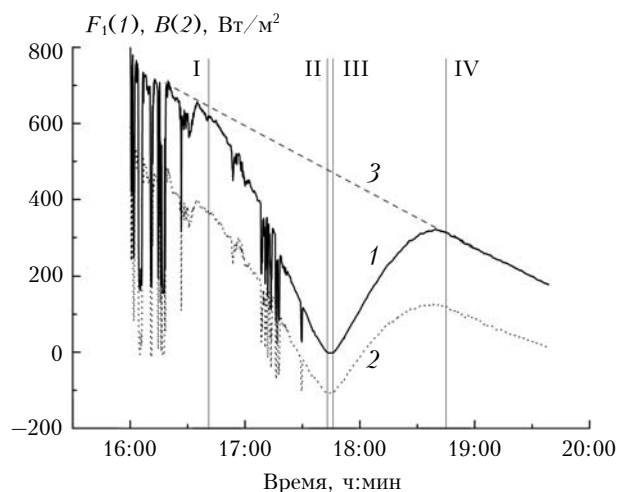


Рис. 2. Поток нисходящей коротковолновой солнечной радиации (1) и радиационный баланс (2) 01.08.08 г. в Новосибирске; поток солнечной радиации без учета затмения и облачности (3); I и IV – моменты начала и окончания затмения, II и III – начало и окончание полной фазы затмения

Видно, что вариации F_1 и B промодулированы разрывной облачностью.

Кривая 3 (рис. 2) показывает предполагаемую временную изменчивость потока F_1 в отсутствие затмения и облачности. Начало и окончание затмения помечены римскими цифрами I и IV, а начало и окончание его полной фазы – II и III (рис. 2).

Как и следовало ожидать, во время полной фазы поток F_1 снижается до нуля (в пределах точности измерений). Результаты измерений показали, что в эту фазу затмения радиационный баланс B достиг своего минимального значения -115 Вт/м^2 . Радиационный баланс B во время затмения был отрицательным примерно в течение 35 мин. Наблюдаемые во время полного солнечного затмения изменения составляющих радиационного баланса F_1, F_2, F_3 и F_4 качественно подобны изменениям указанных параметров при смене дня и ночи [8].

Метеорологические параметры в приземном слое атмосферы

Вариации приземной температуры воздуха T_0 в Новосибирске 1 августа 2008 г. на уровне 3 м с временным разрешением 1 с (кривая 1) и с временным разрешением 1 мин (кривая 2) показаны на рис. 3.

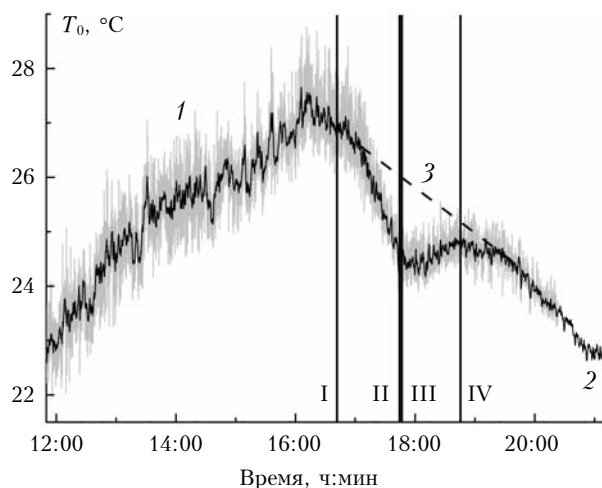


Рис. 3. Вариации температуры воздуха в приземном слое атмосферы 01.08.08 г. в Новосибирске: 1 – временное разрешение 1 с; 2 – разрешение 2 мин; 3 – приземная температура без учета затмения и облачности

Кривая 3 на рис. 3 – результат интерполяции сглаженного дневного хода температуры воздуха в отсутствие солнечного затмения.

Осредненные значения T_0 и модуля скорости ветра V для нескольких периодов времени приведены в таблице.

Метеопараметры и параметры турбулентности в приземном слое атмосферы 01.08.2008 в г. Новосибирске

Время	T_0 , °C	V , м/с	E , $\text{м}^2/\text{с}^2$	σ_w^2 , $\text{м}^2/\text{с}^2$	σ_T^2 , $(\text{°C})^2$
13:30 – 14:35	25,6	1,9	1,55	0,69	0,170
16:00 – 16:40	27,1	1,6	1,04	0,61	0,144
16:45 – 17:10	26,7	1,6	1,28	0,51	0,124
17:20 – 17:40	25,3	1,3	1,12	0,58	0,158
17:50 – 18:10	24,4	1,1	0,62	0,24	0,054
18:10 – 18:40	24,6	0,8	0,40	0,15	0,052
18:40 – 19:00	24,8	0,8	0,48	0,21	0,046
19:55 – 20:15	23,8	0,8	0,28	0,14	0,030

В качестве предзатменных будем рассматривать результаты измерений в период с 16:00 до 16:40. Минимальные значения температуры воздуха ($24,4 \text{ °C}$) наблюдались в течение примерно 20 мин в период с 17:50 до 18:10 практически сразу после полной фазы затмения. Обусловленное затмением снижение ΔT_0 приземной температуры достигало $2,2 \text{ °C}$. В Кисловодске максимальное снижение температуры воздуха составило около 3 °C [1, 2]. Другими авторами отмечалось понижение температуры воздуха во время полного солнечного затмения на $1,3\text{--}7,3 \text{ °C}$ [9].

В Новосибирске во время солнечного затмения наблюдалось постепенное снижение (таблица) скорости ветра в приземном слое атмосферы в отличие от солнечного затмения 26 марта 2006 г. в Кисловодске [1, 2].

Относительная влажность воздуха во время затмения была больше, чем до затмения, но не превысила $55\text{--}60\%$.

Вариации температуры воздуха в пограничном слое атмосферы

Температура воздуха в пограничном слое атмосферы измерялась с помощью двух СВЧ-профилемеров: на территории ИХКиГ до высоты 600 м и в центре города до высоты 1000 м. Один профилемер размещался на крыше одного из корпусов ИХКиГ выше акустической метеостанции примерно на 15 м. На рис. 4 представлены результаты измерений температуры воздуха (ИХКиГ) на уровне профилемера T_1 (кривая 1) и на более высоких уровнях (2–5) до 400 м (с шагом 100 м).

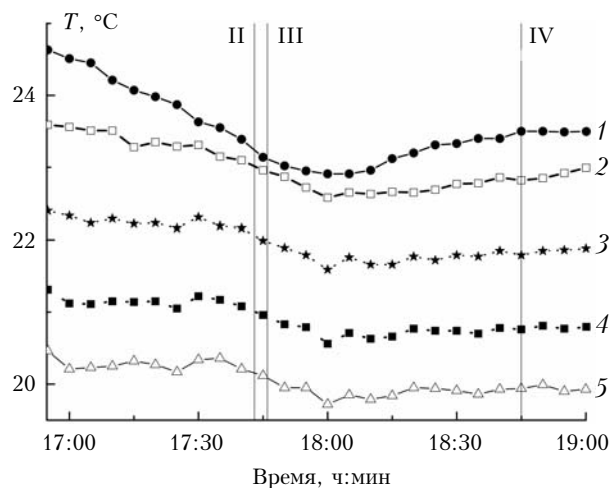


Рис. 4. Вариации температуры воздуха в пограничном слое атмосферы 01.08.08 г. в Новосибирске по данным измерений в Академгородке на уровне 20 (1), 100 (2), 200 (3), 300 (4) и 400 м (5)

Максимальное снижение температуры воздуха на уровне профилемера ΔT_1 равно $1,2\text{--}1,4 \text{ °C}$. Влияние затмения на температуру воздуха прослеживается до высот $400\text{--}500 \text{ м}$, где ΔT составляло около $0,2 \text{ °C}$. В центре Новосибирска на нижнем уровне снижение температуры оказалось равным $1,2 \text{ °C}$,

а на высоте 400 м — 0,1 °С. В Кисловодске [1, 2] температурные эффекты солнечного затмения в пограничном слое атмосферы по амплитуде были примерно в 2 раза больше. Минимум температуры воздуха в пограничном слое достигался через 15–20 мин после полной фазы затмения, что согласуется с результатами работ [1, 2].

Трансформация вертикального профиля температуры в пограничном слое атмосферы (по данным измерений в центре города) во время солнечного затмения показана на рис. 5.

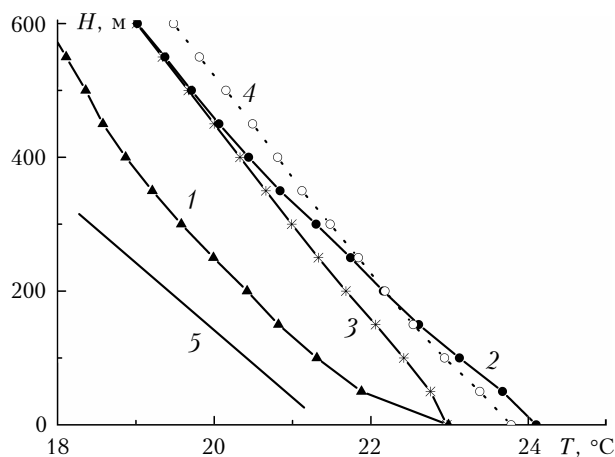


Рис. 5. Вертикальные профили температуры воздуха в пограничном слое атмосферы 01.08.08 г. в центре Новосибирска в 13:00 (1), 16:42 (2), 18:04 (3) и 19:00 (4). Прямая 5 соответствует сухадиабатическому градиенту температуры

Днем в 13:00 (кривая 1) пограничный слой на высотах больше 50 м практически нейтральный, а выше 200 м — устойчивый. Слабонеустойчивым был только нижний 50-метровый слой. В начале затмения (в 16:42) вертикальный профиль температуры (кривая 2) в нижнем 200-метровом слое был нейтрально стратифицированным, а выше — слабоустойчивым. По достижении температурного минимума в 18:04 (кривая 3) до высоты 400 м заметно повысилась устойчивость пограничного слоя атмосферы. После затмения в 19:00 (кривая 4) стратификация в нижнем 200-метровом слое стала близкой к нейтральной (кривая 5 на рис. 5 — сухая адиабата). Такие вариации профиля температуры во время затмения 1 августа 2008 г. в Новосибирске качественно согласуются с закономерностями, выявленными 26 марта 2006 г. в Кисловодске. Следует отметить, что 1 августа, включая период времени с 13:00 до 19:00 (рис. 5), в пограничном слое атмосферы над г. Новосибирском наблюдался постепенный рост температуры воздуха, обусловленный адвекцией термически неоднородной воздушной массы.

Влияние солнечного затмения на режим турбулентности в приземном слое атмосферы

Во время затмения на территории ИХКиГ проводились измерения турбулентных пульсаций (с вре-

менным разрешением 0,1 с) трех компонент скорости ветра и температуры воздуха. В таблице для некоторых периодов времени приведены значения дисперсии σ_w^2 пульсаций w' вертикальной компоненты скорости ветра, дисперсии σ_T^2 пульсаций T_0' приземной температуры и турбулентной кинетической энергии $E = 0,5[(u')^2 + (v')^2 + (w')^2]$ (в кинематических единицах), где u' и v' — пульсации продольной и поперечной компонент скорости ветра соответственно. Минимальные значения E и σ_w^2 наблюдались в период с 18:10 по 18:40 примерно через 30 мин после полной фазы затмения. Что касается интенсивности температурных пульсаций (σ_T^2), то она монотонно уменьшалась как во время затмения, так и после него, что обусловлено, в частности, ослаблением конвекции в приземном слое атмосферы в вечерние часы. В целом, во время солнечного затмения в приземном слое атмосферы наблюдалось заметное подавление турбулентности, как это и должно быть при повышении устойчивости пограничного слоя атмосферы.

Вариации общего содержания водяного пара и параметров аэрозоля во время солнечного затмения

Общее содержание водяного пара Q измерялось в центре г. Новосибирска с помощью СВЧ-спектро-радиометра на частоте резонансного перехода линии водяного пара 22,2 ГГц [7] с временным разрешением 4 с (рис. 6).

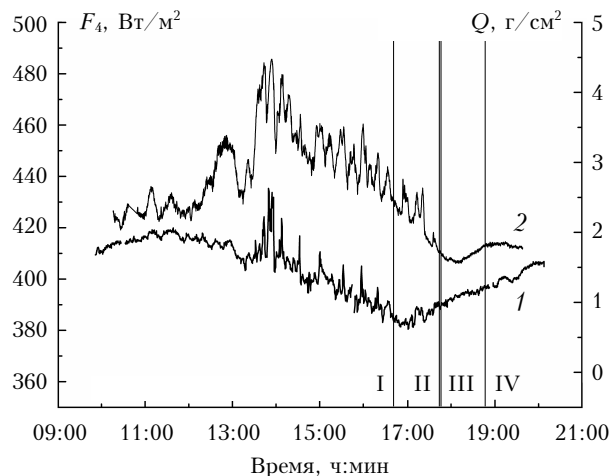


Рис. 6. Общее содержание водяного пара Q (1) и противозлучение F_4 (2) 01.08.08 г. в Новосибирске

Наблюдается минимум общего содержания водяного пара Q , равный $\Delta Q \approx 0,65$ г/см², примерно за 40 мин до полной фазы затмения. В день затмения 1 августа, начиная с 13:00 до полной фазы солнечного затмения, наблюдались значительные турбулентные пульсации Q величиной $\Delta Q \approx 0,1-0,25$ г/см². Амплитуда этих пульсаций монотонно уменьшалась

во время и после затмения, что коррелирует с временной картиной интенсивности температурных пульсаций σ_T^2 и пульсаций вертикальной компоненты скорости ветра σ_w^2 (см. таблицу). Это свидетельствует об ослаблении конвекции не только в приземном слое, но и в пограничном слое (до высоты примерно 2 км). Наблюдаемые квазипериодические пульсации содержания водяного пара Q с периодом около 30 мин могут косвенно указывать на наличие внутренних гравитационных волн в нижней тропосфере [11]. Механизм этого явления и его связь с солнечным затмением нуждаются в специальном исследовании.

Пульсации Q во время затмения коррелируют с флуктуациями потоков коротковолновой и инфракрасной радиации, в том числе и с противозлучением (кривая 2 на рис. 6), в частности потому, что балансмер CNR1 измеряет полусферические потоки радиации, а СВЧ-спектрометр — микроволновое излучение в небольшом телесном угле вблизи зенита [7].

Коэффициент направленного светорассеяния

С помощью малогабаритного спектрофелометра [6], снабженного низкотемпературным регулируемым нагревателем, 1 августа на территории ИХКиГ измерялись коэффициент направленного светорассеяния K [10] (рис. 7, кривая 1) для угла рассеяния 45° и длины волны света 630 нм и параметр конденсационной активности аэрозоля.

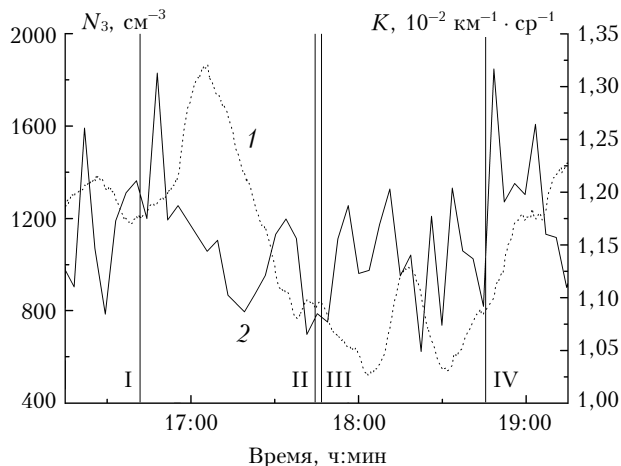


Рис. 7. Вариации коэффициента направленного светорассеяния (1) и концентрации частиц аэрозоля размерами от 30 до 125 нм (2) 01.08.08 г. в Новосибирске

На начальной стадии затмения наблюдался отчетливый максимум K , а во второй половине затмения — минимум коэффициента направленного светорассеяния. В целом во время затмения величина K менялась на 25%. Поскольку максимальное значение относительной влажности воздуха не превышало 60%, оптический отклик аэрозоля на обусловленные затмением вариации приземной температуры обнаружить не удалось. Показанные на рис. 7 вариации K могут быть связаны, в частности, с изме-

нениями мезомасштабной циркуляции, вызванными затмением. Однако задача исследования мезомасштабной циркуляции выходит за рамки настоящей статьи.

Микроструктура аэрозоля

Во время солнечного затмения функция распределения частиц атмосферного аэрозоля измерялась в диапазоне размеров от 3 нм до 20 мкм. Анализ вариаций функции распределения в период с 15:30 до 19:30 показал, что дифференциальные счетные концентрации частиц аэрозоля N_i можно распределить на 4 фракции (рис. 7, 8).

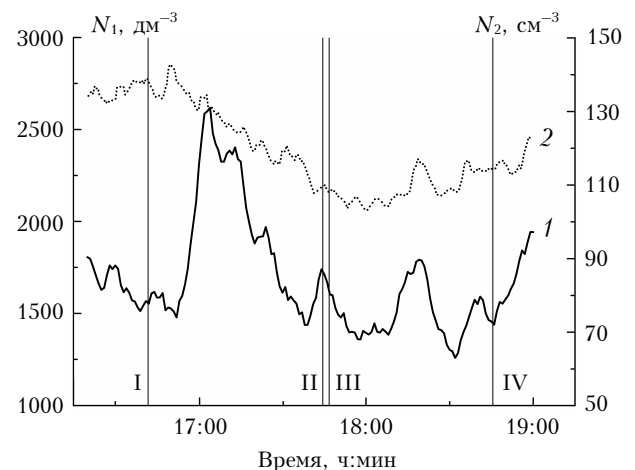


Рис. 8. Вариации концентраций частиц аэрозоля размерами больше 0,65 мкм (1) и от 0,15 до 0,40 мкм (2) 01.08.08 г. в Новосибирске

Временная изменчивость концентрации частиц N_1 размерами больше 0,65 мкм (рис. 8) в рассматриваемый период изменилась примерно в 2 раза. Сильно выраженный максимум N_1 наблюдался с 17:00 до 17:30. Концентрация частиц N_2 размерами от 0,15 до 0,40 мкм (кривая 2, рис. 8), во время затмения изменилась только на 20%. Вариации суммарной концентрации частиц N_3 размерами от 30 до 125 нм показаны на рис. 7 (кривая 2). Во время затмения (с 17:00 до 18:20) среднее значение N_3 уменьшилось на 25% по сравнению с предзатменным значением, а максимальные значения N_3 во время затмения в среднем были в 1,5 раза меньше, чем перед затмением. Сглаженная временная изменчивость N_3 согласуется с временной изменчивостью концентрации субмикронного аэрозоля N_2 . Сильные флуктуации N_3 объясняются, в первую очередь, малостью счетного объема прибора и, как следствие, недостаточной статистической обеспеченностью при счете частиц аэрозоля.

Концентрация частиц «нуклеационной моды» N_4 (размер частиц меньше 20 нм) была невысокой как перед затмением, так и во время затмения.

Временная изменчивость коэффициента направленного светорассеяния объясняется совместным вкладом в наблюдаемое рассеяние частиц субмикронного и грубодисперсного аэрозоля (см. рис. 7 и 8).

О квазипериодических и волновых процессах во время солнечных затмений

Во время солнечных затмений и перед затмениями в ряде работ зарегистрированы квазипериодические вариации (см. рис. 6) параметров нижней и верхней атмосферы, изменения спектров флуктуаций параметров атмосферы, включая напряженность электрического поля [11]. В Новосибирске 1 августа 2008 г. в пограничном слое атмосферы на высотах от 100 до 600 м наблюдались синхронные вариации температуры воздуха с периодами от 10 до 40 мин, которые можно интерпретировать как внутренние гравитационные волны. Однако малая амплитуда вариаций (как правило, не больше 1–2 °С) и сравнительно большое время осреднения (5 мин) при измерении профилей температуры воздуха не позволяют надежно оценить спектральную плотность мощности указанных вариаций.

Основные результаты

1. Во время полного солнечного затмения 1 августа 2008 г. в Новосибирске выполнены измерения нисходящих и восходящих потоков коротковолновой солнечной и тепловой радиации. Установлено, что радиационный баланс в приземном слое атмосферы в течение 30 мин был отрицательным, вплоть до -115 Вт/м^2 .

2. Максимальное снижение температуры приземного воздуха во время затмения составило 2,2 °С.

3. Снижение температуры воздуха в пограничном слое атмосферы, обусловленное затмением, прослеживалось до высот 400–500 м. Наблюдался также переход от нейтральной стратификации пограничного слоя к устойчивой как в центре Новосибирска, так и на территории Академгородка.

4. Во время затмения имело место снижение интенсивности турбулентности, обусловленное повышением устойчивости пограничного слоя атмосферы.

5. Выявленные 1 августа 2008 г. в Новосибирске затменные эффекты в пограничном слое атмосферы качественно согласуются с аналогичными эффектами в Кисловодске во время солнечного затмения 29 марта 2006 г.

6. Во время солнечного затмения в Новосибирске наблюдались вариации микроструктуры аэрозоля и коэффициента направленного светорассеяния, а также вариации общего содержания водяного пара, которые не относятся к прямым эффектам солнечного затмения и, возможно, обусловлены мезомас-

штабными неоднородностями состава воздушной массы, а также не связанными с затмением нестационарными процессами в пограничном слое атмосферы.

Авторы благодарят О.А. Дубровскую и В.П. Юшкова за помощь при подготовке и проведении экспедиции, а также И.Н. Кузнецову и Т.Я. Пономареву за участие в анализе метеорологической обстановки в Новосибирской области на период проведения экспедиции.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 08-05-10087-к, 08-0500213_a и Программы ОНЗ РАН «Межгеосферные взаимодействия».

1. Горчаков Г.И., Кадыгров Е.Н., Исаков А.А., Карпов А.В., Миллер Е.А. Влияние солнечного затмения на термическую стратификацию и режим турбулентности // Докл. РАН. 2007. Т. 417. № 1. С. 142–145.
2. Горчаков Г.И., Кадыгров Е.Н., Кортунова З.В., Исаков А.А., Карпов А.В., Копейкин В.М., Миллер Е.А. Затменные эффекты в пограничном слое атмосферы // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2008. Т. 44. № 1. С. 104–111.
3. Горчаков Г.И., Петров А.К., Исаков А.А., Кадыгров Е.Н., Карпов А.В., Козлов А.С., Копейкин В.М., Курбатов Г.А., Малышкин С.Б., Миллер Е.А., Троицкий А.В. Влияние солнечного затмения на процессы в приземном и пограничном слоях атмосферы // Аэрозоли Сибири. XV: Тезисы докл. Томск: ИОА СО РАН, 2008. С. 41–42.
4. Kadygrov E.N., Pick D.R. The potential for temperature retrieval from angular-scanning single-channel microwave radiometer and some comparisons with in situ observation // J. Appl. Meteorol. 1998. V. 37. N 5. P. 393–404.
5. Гладких В.А., Невзорова И.В., Одинцов С.Л., Федоров В.А. Анализ структуры поля ветра в нижнем слое атмосферы на побережье оз. Байкал // Оптика атмосфер. и океана. 2002. Т. 15. № 10. С. 902–908.
6. Исаков А.А. Малогабаритный спектрофелометр для исследования приземного аэрозоля // Естественные и антропогенные аэрозоли: Тезисы докл. СПб.: СПбГУ, 2008. С. 37–38.
7. Рассадовский В.А., Троицкий А.В. Определение влагосодержания атмосферы по разностным двухчастотным измерениям микроволнового излучения // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1984. Т. 20. № 7. С. 566–574.
8. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 640 с.
9. Черногор Л.Ф. Эффекты солнечных затмений в приземной атмосфере // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2008. Т. 44. № 4. С. 467–482.
10. Розенберг Г.В. Сумерки. М.: Физматгиз, 1963. 360 с.
11. Адушкин В.В., Гаврилов Б.Г., Горелый К.И., Каракчиев В.Д., Рыбнов Ю.С., Харламов В.А. Влияние солнечного затмения на геофизические процессы в системе геосфер // Геофизика межгеосферных взаимодействий. М.: ГЕОС, 2008. С. 301–313.

G.I. Gorchakov, A.K. Petrov, A.A. Isakov, E.N. Kadygrov, A.V. Karpov, A.S. Kozlov, V.M. Kopeikin, G.A. Kurbatov, S.B. Malyshev, E.A. Miller, A.V. Troitsky. Solar eclipse influence on processes in the boundary layer.

Investigation of the solar eclipse effects in the atmospheric boundary layer has been carried out on August 1, 2008, in Novosibirsk. Air temperature variation in the surface layer, temperature vertical profilers in the boundary layer and turbulence parameters were determined. Variations of the water vapor amount in the atmospheric column and aerosol parameters in the surface layer were analyzed.