

УДК 551.551.2:535.326

Экспериментальные оценки структурной характеристики показателя преломления оптических волн в приземном слое атмосферы

В.А. Гладких, В.П. Мамышев, С.Л. Одинцов*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 5.02.2015 г.

Рассматриваются результаты анализа структурной характеристики показателя преломления оптических волн C_n^2 в приземном слое атмосферы, вычисляемой по структурной характеристике температуры воздуха C_T^2 . Приводятся результаты сопоставления оценок C_n^2 на основе оптического дифференциального измерителя турбулентности и ультразвуковых анемометров-термометров. Отмечается систематическое различие этих оценок при высокой степени корреляции. Получен и проанализирован средний суточный ход C_n^2 в различные сезоны года на территориях с естественным ландшафтом и на урбанизированной территории.

Ключевые слова: показатель преломления, приземный слой атмосферы, структурная характеристика, суточный ход, ультразвуковой анемометр-термометр; refractive index, surface air layer, structure parameter, diurnal behavior, ultrasonic anemometer-thermometer.

Введение

Одним из важных факторов, существенно влияющих на распространение оптического излучения в атмосфере, являются неоднородности показателя преломления. Случайные составляющие показателя преломления определяются в основном турбулентными пульсациями плотности воздуха, связанными, в свою очередь, с пульсациями температуры. Поскольку температура воздуха, в отличие от его плотности, может быть непосредственно измерена, то показатель преломления и его флуктуации вычисляются на основе результатов диагностики температурного поля. Широко распространенный параметр, характеризующий величину случайных неоднородностей показателя преломления, — структурная характеристика C_n^2 . Данная величина появляется при параметризации структурной функции показателя преломления и активно используется в различных теоретических и прикладных задачах. Структурная характеристика C_n^2 пропорциональна структурной характеристике температурного поля C_T^2 , поэтому выводы по закономерностям какой-либо из этих величин можно с определенной долей уверенности применять и к другой величине.

Анализ величин C_n^2 и/или C_T^2 проводился и проводится многими исследовательскими группами в различных странах. Для примера можно указать ряд недавних публикаций, связанных с исследова-

нием характеристики C_n^2 в приземном (приводном) слое атмосферы. В частности, в [1] представлены результаты измерений этой величины в разных пунктах наблюдений в разные сезоны года с помощью сцинтилляционных детекторов (сцинтиллометров). Экспериментальные данные сравниваются с результатами модельных (прогностических) расчетов C_n^2 , в том числе в виде среднего суточного хода. В [2, 3] также приводятся результаты с суточным ходом C_n^2 на основе измерений сцинтиллометрами на трассах длиной до нескольких километров. Отметим, кроме того, работу [4], где результаты локальной диагностики C_n^2 в летнее и зимнее время применяются для анализа качества астрономического видения на территории Байкальской астрофизической лаборатории на площадке Большого солнечного вакуумного телескопа.

Помимо исследования непосредственно C_n^2 в ряде публикаций данная величина используется для определения структурной характеристики температурного поля C_T^2 , для оценок вертикального турбулентного потока тепла и в различных прогностических моделях (см., например, [5–8]). Закономерности вариаций C_T^2 , описанные в указанных работах, могут быть использованы и для интерпретации изменений C_n^2 .

Основная цель нашей статьи — анализ структурной характеристики C_n^2 , полученной на основе экспериментальных данных по температурным пульсациям в приземном слое атмосферы над урбанизированной территорией и над естественным ландшафтом. Главная задача заключалась в построении и анализе усредненного суточного хода C_n^2 в различные сезоны года.

* Владимир Александрович Гладких (glvl@iao.ru); Владимир Петрович Мамышев (mvp78ioa@iao.ru); Сергей Леонидович Одинцов (odintsov@iao.ru).

Исходные соотношения

Прежде всего, приведем некоторые общие положения относительно структурных характеристик полей температуры и показателя преломления оптических волн. Структурная характеристика C_T^2 случайного температурного поля $T(\mathbf{R})$ является следствием параметризации соответствующей структурной функции

$$D_T(\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2) = \left\langle [T(\mathbf{R}_1) - T(\mathbf{R}_2)]^2 \right\rangle,$$

где $\mathbf{R}_2 = \mathbf{R}_1 + \mathbf{r}$, \mathbf{R}_1 и \mathbf{R}_2 – координаты точек измерения температуры (начало системы координат – произвольное), \mathbf{r} – соединяющий эти точки вектор. Угловые скобки обозначают осреднение по ансамблю реализаций. В предположении однородности (локальной однородности) и изотропии температурного поля структурная функция будет зависеть только от модуля вектора \mathbf{r} :

$$D_T(\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2) \Rightarrow D_T(r = |\mathbf{r}|).$$

Согласно теории Колмогорова–Обухова в случае статистически развитой турбулентности структурная функция может быть параметризована в некоторой области $l_0 \ll r \ll L_0$ в виде [9]:

$$D_T(r) = C_T^2 r^{2/3}. \quad (1)$$

Здесь C_T^2 – константа, $\text{K}^2 \cdot \text{м}^{-2/3}$; l_0 и L_0 – внутренний и внешний масштабы температурной турбулентности, м. Согласно (1) величина C_T^2 равна значению структурной функции при $r = 1$ м.

Проведенные нами ранее исследования показали [10, 11], что параметризация структурной функции температурного поля в форме (1) в приземном слое атмосферы с усложненной текстурой подстилающей поверхности выполняется лишь в редких случаях. На основе экспериментальных данных были получены уточненные параметризации $D_T(r)$, описывающие три различных типа структурных функций, включающие и параметризацию (1). В обобщенном виде эти параметризации имеют форму

$$D_T(r) \approx C_{Tp}^2 F(r). \quad (2)$$

Вид безразмерной функции $F(r)$ различен для разных типов. Однако для всех типов выполняются равенства $F(r = 1) = 1$ и $C_{Tp}^2 \approx D_T(r = 1)$, причем C_{Tp}^2 имеет размерность структурной функции температурного поля (K^2). Для подтверждения достоверности параметризации (2) сошлемся на работу [12], где приводятся результаты анализа структурных функций $D_T(r)$, полученных с использованием беспилотного летательного аппарата и ультразвуковых анемометров-термометров на метеорологической мачте. Эти данные демонстрируют, в том числе, закономерность $D_T(r)r^{-2/3} = G(r) \neq \text{const}$. Различие функций $G(r)$ для ультразвуковых измерителей и летательного аппарата при небольших значениях r авторы [12] объясняют инерционностью температурных датчиков последнего.

Структурная характеристика показателя преломления воздуха C_n^2 определяется по той же методике, что и структурная характеристика температурного поля. Случайные неоднородности показателя преломления воздуха для оптических волн связаны в основном со случайными неоднородностями температурного поля. Поэтому в случае развитой («колмогоровской») турбулентности параметризация структурной функции показателя преломления $D_n(r)$ подчиняется формуле, аналогичной (1). При этом связь между C_n^2 и C_T^2 задается формулой [13]:

$$C_n^2 = \kappa C_T^2. \quad (3)$$

Здесь C_n^2 имеет размерность $\text{м}^{-2/3}$; множитель $\kappa = \mu P^2 T^{-4}$ – размерность K^{-2} , величины T и P – средняя температура воздуха (К) и атмосферное давление (мбар) соответственно, $\mu = 6,241 \cdot 10^{-9}$ – размерная константа, $\text{K}^2 \text{мб}^{-2}$. Формула (3) получена для длины волны красного света (0,66 мкм).

Согласно [13] можно положить, что $D_n(r) = \kappa D_T(r)$, поэтому если применяется уточненная параметризация структурной функции температуры воздуха (2), то и для структурной функции показателя преломления оптических волн будет справедлива подобная параметризация:

$$D_n(r) \approx \kappa C_{Tp}^2 F(r) = C_{np}^2 F(r), \quad (4)$$

где безразмерная величина C_{np}^2 определяется как $C_{np}^2 = \kappa C_{Tp}^2 \approx \kappa D_T(r = 1)$. В дальнейшем именно C_{np}^2 подвергается статистическому анализу.

Приборы и места проведения измерений, оценка достоверности результатов

В качестве измерительных приборов нами использовались ультразвуковые анемометры-термометры (далее УЗМ) типа «Метео-2» [14], обеспечивающие получение данных с частотой порядка 10 Гц. Помимо температуры воздуха и компонентов вектора ветра УЗМ измеряли атмосферное давление и относительную влажность воздуха. Это обеспечивало возможность оценивать абсолютные значения C_{np}^2 без привлечения каких-либо других приборов.

Измерения проводились на территориях с различными типами подстилающей поверхности. Один из пунктов наблюдения («Томск») располагался на урбанизированной территории: г. Томск, Академгородок, плоская крыша здания, высота мачты над крышей 5 м, общая высота УЗМ над подстилающей поверхностью 17 м. Два других пункта находились на территориях обсерваторий ИОА СО РАН «Фоновая» и «Базовый экспериментальный комплекс» («БЭК») с естественным ландшафтом (открытые поляны большой площади). Более подробно о структуре подстилающей поверхности на этих площадках можно узнать, например, в [11, 15]. Высота размещения УЗМ в основных сериях наблюдений со-

ставляла 5 и/или 10 м от уровня подстилающей поверхности (17 м на урбанизированной территории). Подробное изложение применяемой методики вычисления структурных функций температуры воздуха (следовательно, и структурной характеристики показателя преломления) приведено в работе [10].

Достоверность оценок C_{np}^2 проверялась путем сравнения их с результатами измерения величин C_n^2 оптическими средствами – дифференциальным измерителем турбулентности (ДИТ), разработанным в ИОА СО РАН. Методическая основа и технические характеристики ДИТ, а также сравнение акустических и оптических оценок C_n^2 опубликованы в работах [16–19]. Приведем некоторое обобщение имеющихся сравнений.

Прежде всего, отметим высокую степень корреляции C_n^2 и C_{np}^2 . Она превышает, как правило, значение 0,8. В качестве примера на рис. 1, а показаны C_n^2 и C_{np}^2 , полученные при измерениях 15.08.2014 г. на территории «БЭК». Коэффициент корреляции

в этом эпизоде составил 0,96. Как в данном примере, так и в других экспериментах имеет место систематическое отклонение величины C_{np}^2 , полученной с использованием УЗМ, по сравнению с величиной C_n^2 , полученной с помощью ДИТ. Высота оптической трассы (длина 100 м) составляла 1,65 м над подстилающей поверхностью, а высота УЗМ – 1,85 м. Точка размещения УЗМ находилась на расстоянии около 15 м от оптической трассы (примерно в ее середине). На рис. 1, б дано отношение C_n^2/C_{np}^2 для приведенного на рис. 1, а эпизода. В качестве дополнительных примеров этого отношения на рис. 1, в, г показаны результаты оценок для серии измерений летом 2013 г. [19]. Место и «геометрия» экспериментов были такими же (с несущественными различиями). На основе всех проведенных сравнений (суммарно около 20 ч) мы можем сделать вывод, что до 90% времени наблюдений выполняется неравенство $1 < C_n^2 / C_{np}^2 < 8$ при среднем значении этого отношения 3,8.

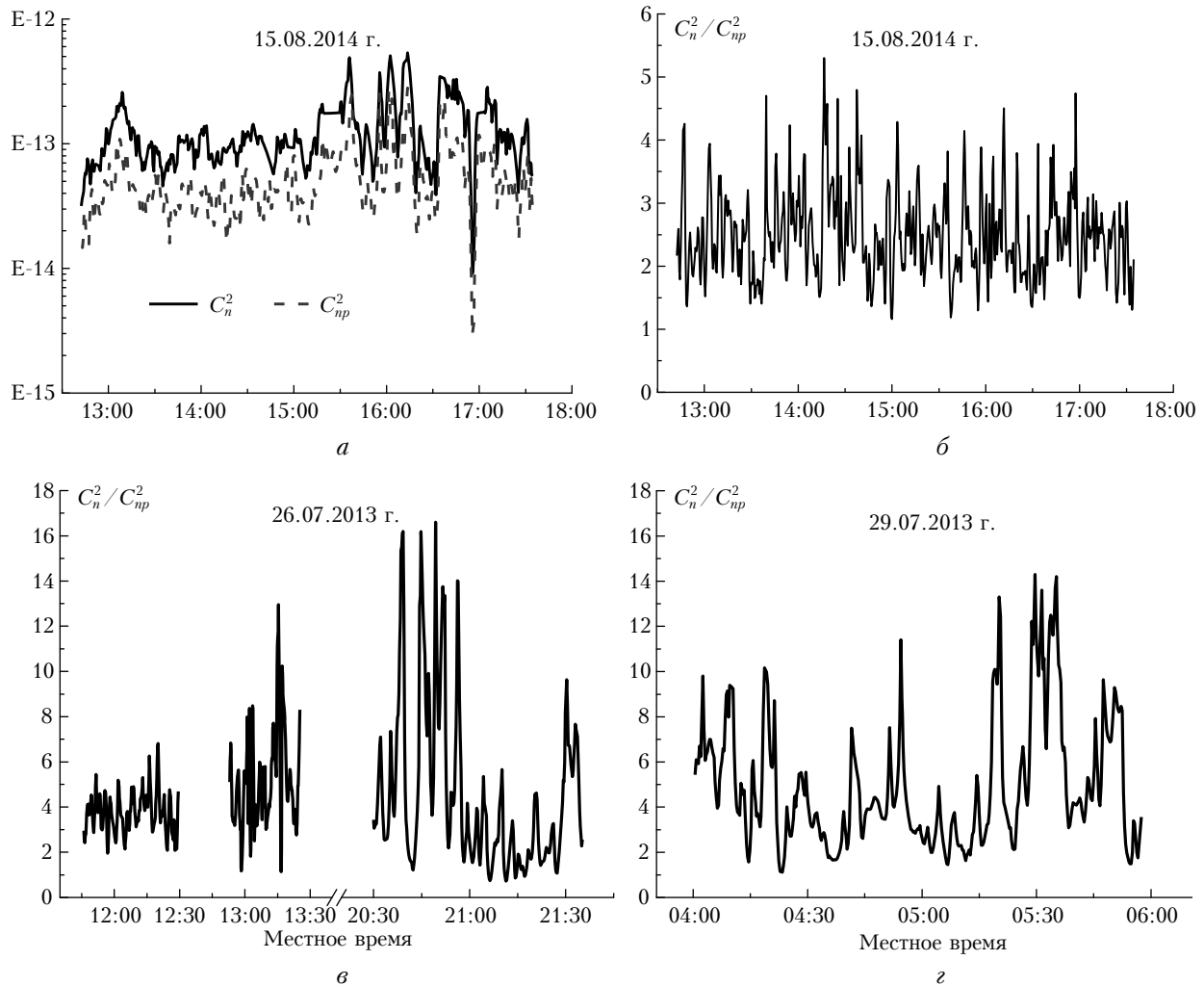


Рис. 1. Сравнение структурных характеристик показателя преломления воздуха, определенных с помощью оптических (сплошная линия) и акустических (штриховая линия) средств измерения (а); отношение этих характеристик в различные сроки наблюдения (б, в, г)

Следует также принять во внимание, что возможность представить структурные функции в виде (2) или (4), т.е. успешно их параметризовать, реализуется далеко не всегда. Это отмечалось в работе [10]. Как следствие, и адекватность собственно величин C_n^2 и C_{np}^2 в этих случаях может быть под сомнением.

Причины систематического отклонения C_{np}^2 от C_n^2 нами пока не установлены. Тем не менее высокая степень их корреляции на значительных интервалах времени, а также относительно устойчивое различие позволяют надеяться, что статистика величин C_{np}^2 , полученных с использованием УЗМ, будет хотя бы качественно отражать те закономерности, которые присущи «истинной» величине C_n^2 . Это является актуальным и потому, что оптические средства измерений структурной характеристики показателя преломления (в частности ДИТ) пока невозможно применять в сложных метеорологических условиях (низкие температуры, осадки) и в непрерывном круглогодичном режиме.

Результаты анализа

Поскольку УЗМ обеспечивает измерения «в точке», то для получения структурной функции приходится использовать временные ряды и вводить некоторые предположения, обеспечивающие выполнение равенства $D_n(r) = D_n(\tau)$. Здесь $\tau = r/\bar{V}$ — сдвиг во времени (r — сдвиг в пространственной области), \bar{V} — средняя скорость горизонтального ветра за интервал времени Δt . Основным условием, необходимым для выполнения этого равенства, является эргодичность выборки (процесса). Второе важное условие — статистические характеристики поля показателя преломления не изменяются в пространственной области, размеры которой меньше внешнего масштаба турбулентности L_0 . При обработке экспериментальных данных мы предполагали автоматическое выполнение указанных условий (без проверки). Это может вносить некоторое искажение в оценки, но в целом общая статистика остается прежней. Данный вывод сделан нами на основе анализа экспериментальных результатов при подготовке публикаций [10, 11].

Представленный далее материал по статистике величины C_{np}^2 был получен при длительности элементарного интервала обработки $\Delta t = 10$ мин. По этому интервалу также определялись средние значения скорости ветра, температуры воздуха и атмосферного давления, необходимые для определения C_{np}^2 по значениям $C_{\tau p}^2$.

Переходя непосредственно к изложению результатов анализа величины C_{np}^2 , рассмотрим ее средний суточный ход (ССХ) в различные месяцы года и в различных пунктах наблюдений. Отметим, что круглогодичные измерения были только в пунктах «Томск» и «БЭК». В пункте «Фоновая» измерения проводились лишь в теплое время года.

Средний суточный ход C_{np}^2 характеризует средние значения данной величины в одни и те же интервалы суток (например, в каждом часовом интервале) за какой-либо период. Мерой отклонения от среднего значения в каждом временном интервале за этот период является среднеквадратическое отклонение (СКО). В качестве примера на рис. 2, а приведено изменение C_{np}^2 за период 11–24.06.2014 г. в пункте наблюдения «Томск». Гистограмма значений $\lg(C_{np}^2)$ за этот период представлена на рис. 2, б.

В свою очередь, рис. 2, в демонстрирует распределение значений C_{np}^2 по времени суток на протяжении рассматриваемого эпизода. Каждая точка на этом рисунке соответствует значению C_{np}^2 , полученному по интервалу времени $\Delta t = 10$ мин. На рис. 2, в также показаны средние (арифметические) и медианные значения C_{np}^2 для каждого из часовых интервалов. В дальнейшем средний суточный ход C_{np}^2 будет определяться именно для средних значений. На рис. 2, г показаны ССХ C_{np}^2 за рассматриваемый период и соответствующие значения СКО в виде «полуотрезков».

Представленные далее ССХ C_{np}^2 вычислялись за периоды, соответствующие календарным месяцам года. В результате установлено, что вид ССХ C_{np}^2 существенно отличается в теплое и холодное время года. В частности, в теплое время имеются акцентированные экстремумы ССХ C_{np}^2 , как это демонстрирует рис. 2, г. В холодный период такие экстремумы отсутствуют. На рис. 3, а приведены ССХ C_{np}^2 в пункте наблюдений «Томск» для всех месяцев 2014 г., соответствующие им значения СКО даны на рис. 3, б. Согласно рис. 3, а с мая по октябрь 2014 г. ССХ C_{np}^2 имеет акцентированный максимум в дневное время. С другой стороны, с января по март и в ноябре–декабре явно выраженный суточный ход практически отсутствует. Апрель и ноябрь в пункте наблюдения «Томск» можно отнести к «переходному периоду» в режимах формирования суточного хода C_{np}^2 . Существенное превышение значений C_{np}^2 в зимнее время по сравнению с теплым периодом года связано с активным влиянием урбанизированной территории, формирующей значительные потоки тепла зимой в любое время суток. Среднеквадратические отклонения величины C_{np}^2 , приведенные на рис. 3, б и характеризующие степень ее вариации за обрабатываемый период, сравнимы с собственно величиной C_{np}^2 . При этом явно выраженного суточного хода СКО C_{np}^2 нет.

Представленные на рис. 3 данные о форме среднего суточного хода C_{np}^2 в разные месяцы 2014 г. являются типичными для пункта наблюдения «Томск». Этот вывод сделан на основе сравнения с измерениями в данном пункте в 2011–2013 гг. На рис. 4, а сравниваются ССХ C_{np}^2 для трех различных месяцев 2011–2014 гг. Среднеквадратические отклонения на этом рисунке не приводятся, поскольку они имеют типичные значения, показанные на рис. 3, б. Вычисления ССХ C_{np}^2 по результатам 2011–2012 гг. велись для интервалов времени 30 мин.

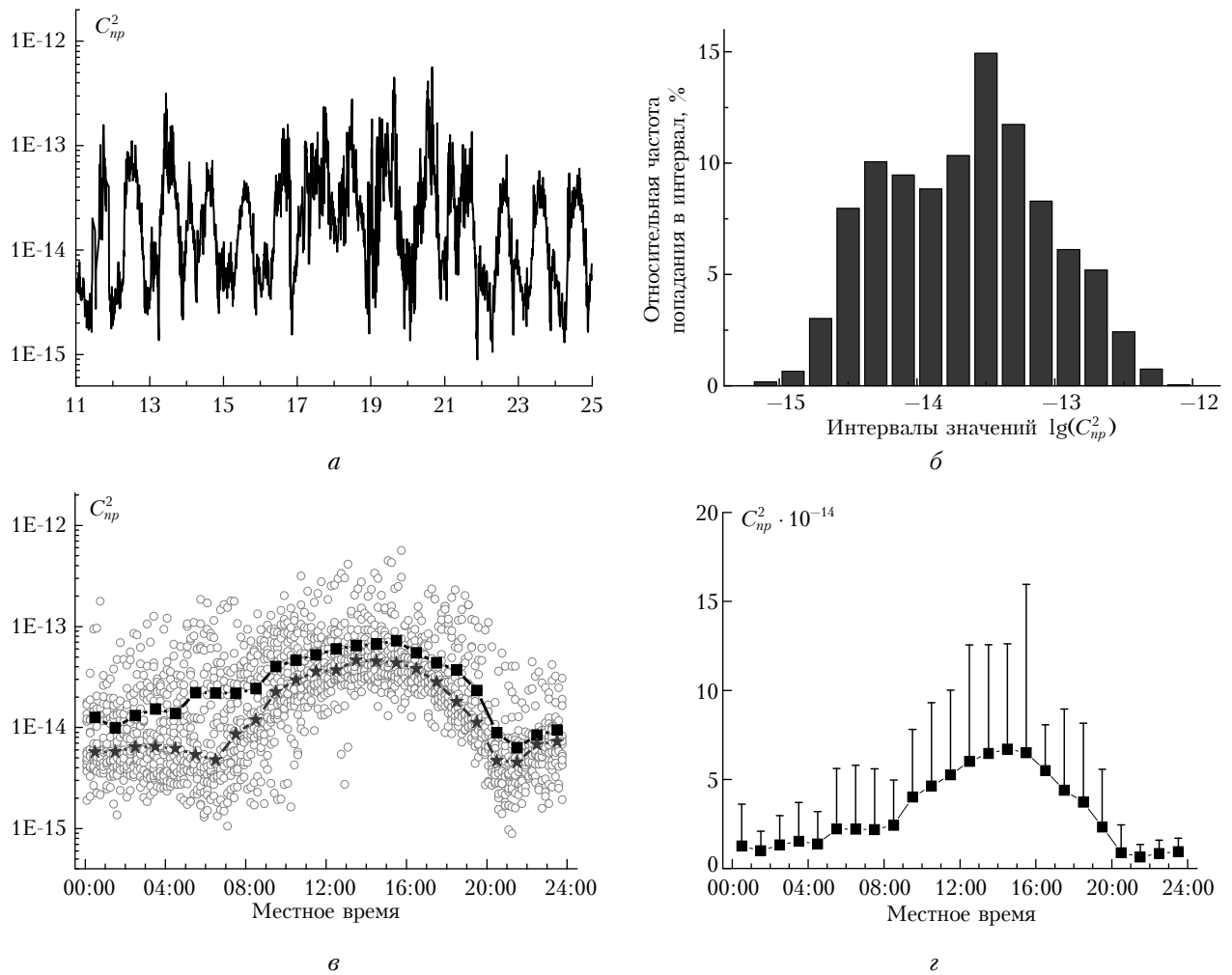


Рис. 2. Изменение величины C_{np}^2 за период 11–24.06.2014 г. в пункте наблюдения «Томск» (а); гистограмма логарифма C_{np}^2 за этот период (б); значения C_{np}^2 в различное время суток за этот период (открытые точки), а также средние (квадраты) и медианные (звездочки) значения в часовых интервалах (в); средние за часовой интервал значения C_{np}^2 с указанием СКО в виде «полуотрезков» (г)

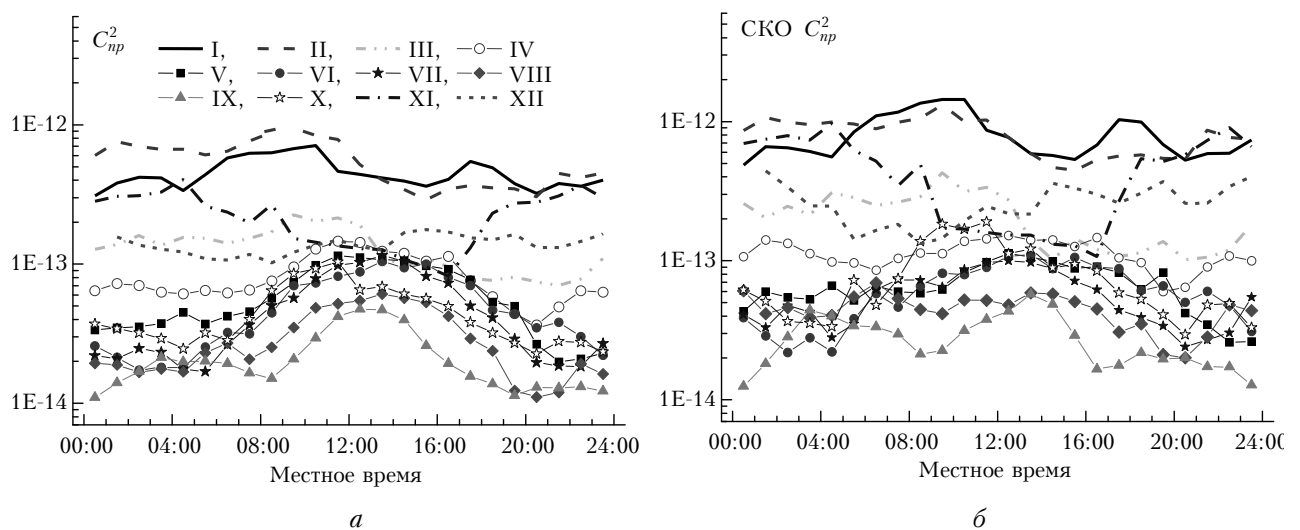


Рис. 3. Средние суточные ходы C_{np}^2 в разные месяцы 2014 г. в пункте наблюдения «Томск» (а) и соответствующие среднеквадратические отклонения (б)

Еще одним подтверждением высокой повторяемости C_{np}^2 в разные сезоны года может служить рис. 4, б, на котором показано изменение данной величины на протяжении 2011–2014 гг. в пункте наблюдения «Томск» (при построении этого графика применено сглаживание скользящим средним с временным «окном» 24 ч). Отметим, что помимо суточного хода C_{np}^2 в теплое время года имеется более медленная гармоника изменения данной величины, составляющая по предварительным оценкам примерно 9–10 сут. Ее наличие обусловлено, по-видимому, периодичностью смены воздушных масс. Подробный анализ данного факта нами пока не проводился.

Рассмотрим теперь ССХ C_{np}^2 в пунктах наблюдений, имеющих естественный ландшафт (территории обсерваторий ИОА СО РАН «Фоновая» и «БЭК»). Сезонные изменения ССХ C_{np}^2 над естественным

ландшафтом мы имели возможность исследовать только для пункта «БЭК» (высота измерений 5,7 м) и только в период с октября 2013 г. по сентябрь 2014 г. Сразу же отметим, что общие формы ССХ C_{np}^2 в этом пункте для разных сезонов года в целом согласуются с тем, что имеется в пункте «Томск» (над урбанизированной территорией). Однако их величины существенно различаются. На рис. 5, а для подтверждения сделанных выводов сравниваются ССХ C_{np}^2 для нескольких месяцев в пунктах «Томск» и «БЭК». Среднеквадратические отклонения C_{np}^2 в пункте «БЭК» имеют такую же закономерность, как и в пункте «Томск», – по величине они примерно равны или немного превышают собственно значения C_{np}^2 .

Отметим две важные особенности среднего суточного хода C_{np}^2 , различающие пункты «БЭК» и «Томск».

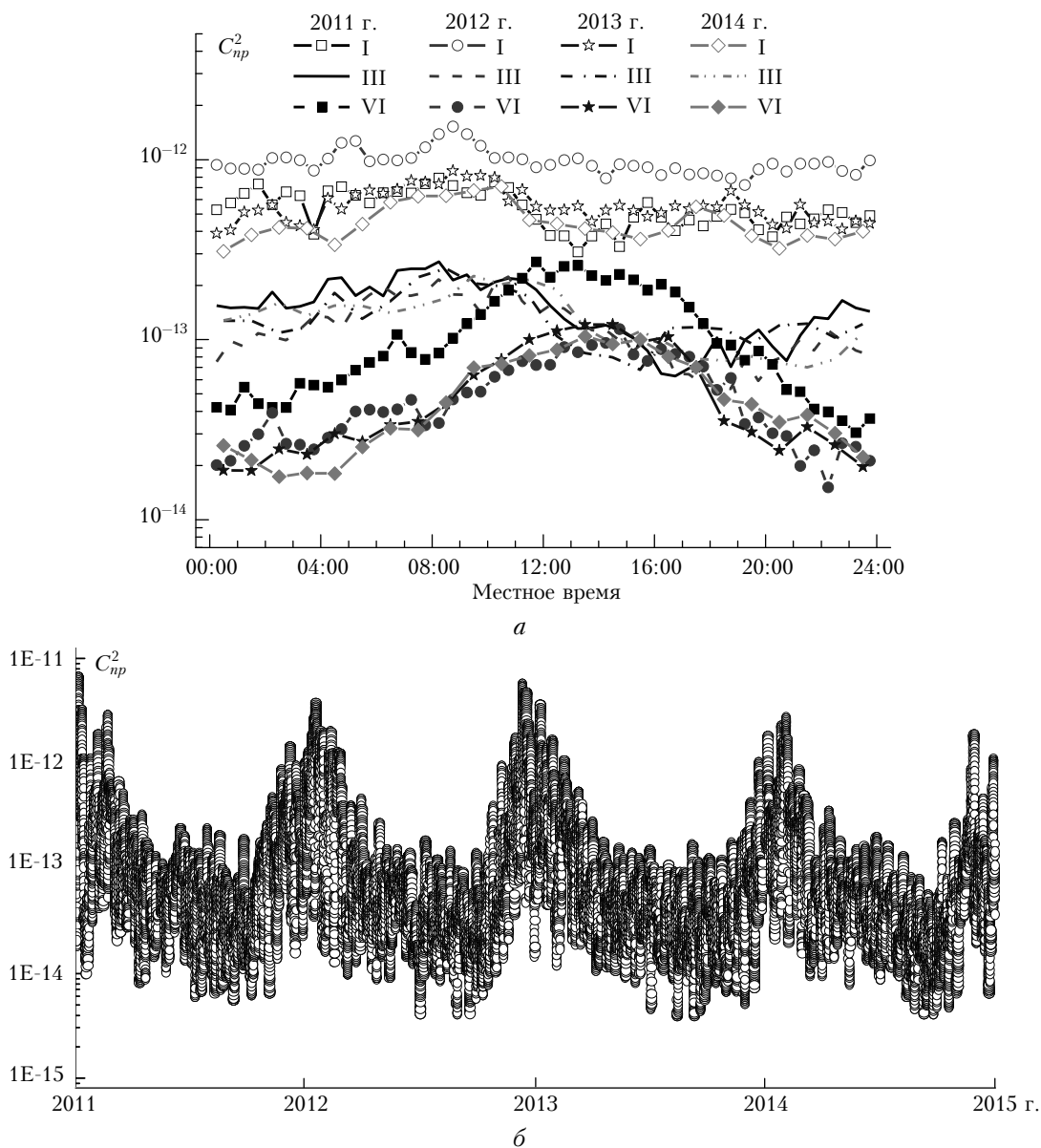


Рис. 4. Пункт наблюдения «Томск». Средний суточный ход C_{np}^2 (а); график изменения C_{np}^2 за период 2011–2014 гг. (б)

Первая особенность заключается в том, что величина C_{np}^2 в пункте «БЭК» меньше, чем в пункте «Томск». Это прежде всего касается холодного времени года (различие до двух порядков величины). Для подтверждения данного вывода на рис. 5, б показано сравнение C_{np}^2 в указанных пунктах с октября 2013 г. по август 2014 г. (при построении графика применено сглаживание скользящим средним с временным «окном» 12 ч).

Вторая особенность ССХ C_{np}^2 в пункте «БЭК» – наличие хорошо выраженных локальных минимумов в утренние и вечерние часы теплого времени года, которые практически отсутствуют в пункте «Томск». Более того, в ночное время значения C_{np}^2 в отдельные периоды на территориях с естественным ландшафтом могут быть сопоставимы по вели-

чине с дневными максимумами. Для иллюстрации данного вывода приведен рис. 6, а, на котором в форме круговой диаграммы представлены нормированные на свои максимумы ССХ $C_{np,N}^2$ в июле 2014 г. в пунктах «БЭК» и «Томск». В качестве примера сравнимости величин дневных и ночных максимумов C_{np}^2 на рис. 6, а показан нормированный ССХ $C_{np,N}^2$ за короткий период в пункте «БЭК» (02–05.07.2014 г.). В этом эпизоде ночной максимум C_{np}^2 всего лишь на 30% меньше дневного. Над урбанизированной территорией («Томск») такие случаи практически не встречались.

Следует подчеркнуть, что отмеченные особенности ССХ C_{np}^2 в теплое время года в пункте «БЭК» характерны и для пункта «Фоновая» (естественный ландшафт). Это демонстрирует рис. 6, б,

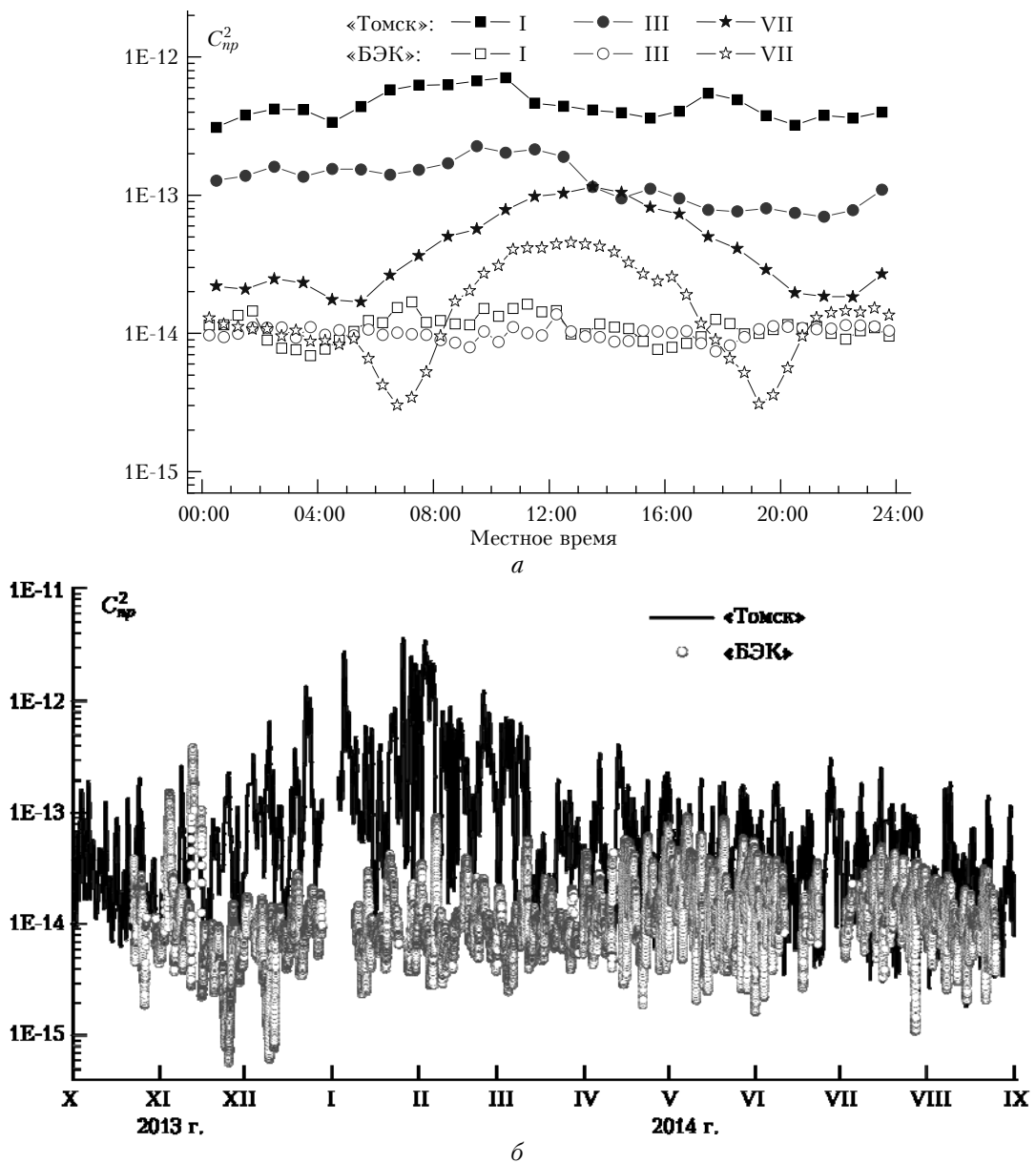


Рис. 5. Средний суточный ход C_{np}^2 для нескольких месяцев 2014 г. в пунктах наблюдения «Томск» и «БЭК» (а); изменения C_{np}^2 с октября 2013 г. по сентябрь 2014 г. в указанных пунктах (б)

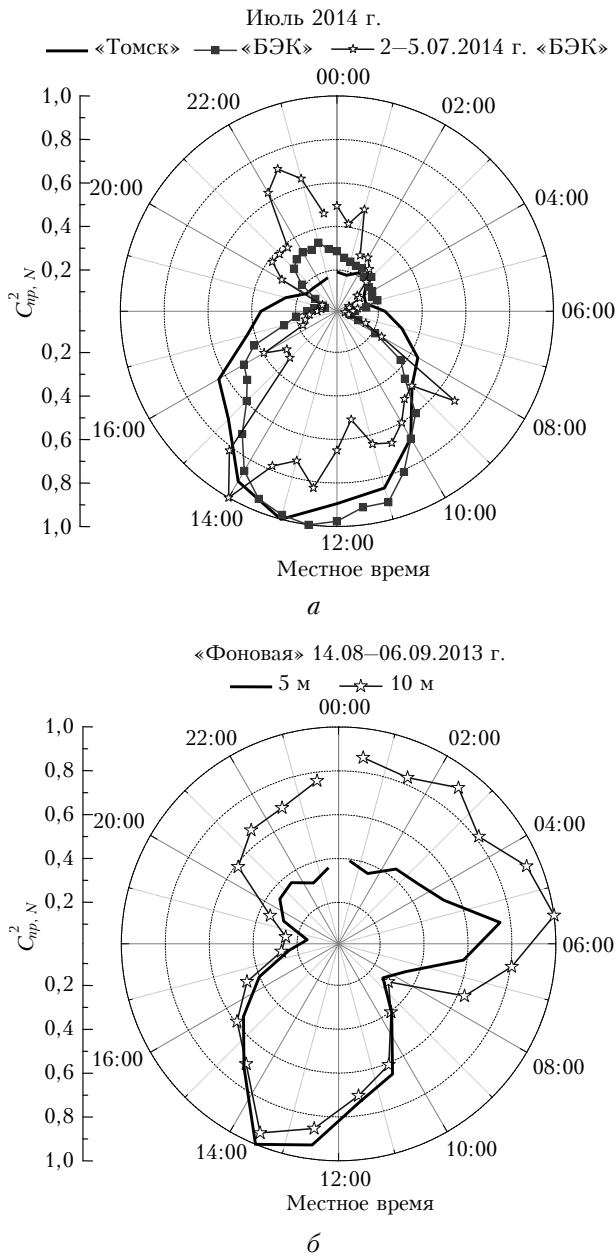


Рис. 6. Нормированные ССХ $C^2_{np,N}$ в пунктах наблюдения «Томск» и «БАК» (а), «Фоновая» (б)

на котором представлены в виде круговых диаграмм нормированные ССХ $C^2_{np,N}$, полученные за период 14.08–06.09.2013 г. одновременно на высотах 5 и 10 м. Согласно данному рисунку в ночное время величины C^2_{np} соизмеримы с дневными, особенно на высоте 10 м. При этом в утренние и вечерние часы в суточном ходе C^2_{np} наблюдаются хорошо выраженные локальные минимумы. Отметим без иллюстраций, что СКО C^2_{np} в данном пункте в дневное время по величине несколько меньше, чем собственно C^2_{np} , а в ночное — больше (примерно в 2 раза).

Одновременные измерения C^2_{np} на разных высотах в приземном слое атмосферы были проведены

нами в основном в пункте наблюдения «Фоновая» и только в теплое время года. При этом объем экспериментального материала не позволяет сделать какие-либо обобщающие выводы. Тем не менее можно сказать, что ССХ C^2_{np} на разных высотах однотипен. Однако в дневное время величины C^2_{np} на нижних уровнях измерений больше, чем на верхних (примерно в 2 раза). Ночью же они достаточно близки друг другу. Иллюстрацией может служить рис. 7, где представлены ССХ C^2_{np} при одновременных измерениях на высотах 5 и 12 м (28.06–29.07.2010 г.); 5 и 10 м (26.06–18.07.2013 г. и 14.08–06.09.2013 г.).

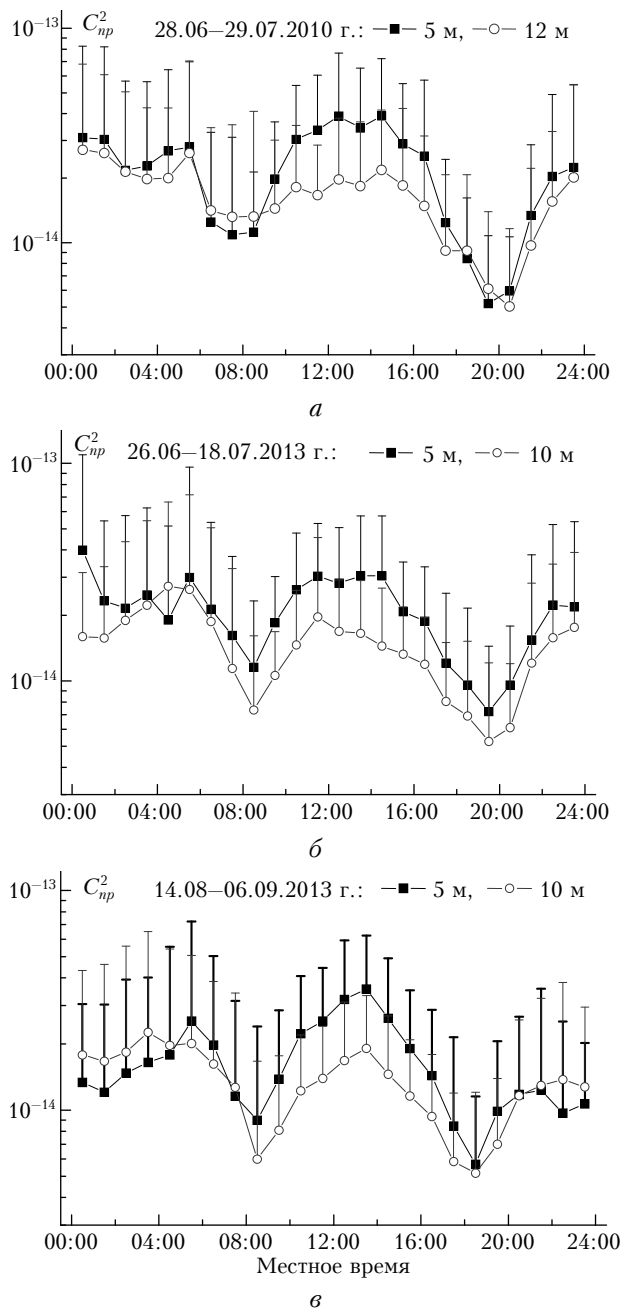


Рис. 7. Средний суточный ход C^2_{np} на разных высотах и в разные годы в пункте наблюдения «Фоновая»

Величины СКО C_{np}^2 показаны на графиках «полуотрезками». Отметим, что графики ССХ C_{np}^2 на рис. 7, в в нормированном виде уже приводились на рис. 6, б (в форме круговых диаграмм).

Считаем необходимым также отметить, что в разных пунктах с естественным ландшафтом величина C_{np}^2 имеет примерно один и тот же диапазон изменений в совпадающие периоды разных лет. Это демонстрирует рис. 8. При построении данного рисунка использовано сглаживание скользящим средним с временным «окном» 24 ч.

Представленный выше материал по среднему суточному ходу C_{np}^2 в различных пунктах наблюдений в различные сезоны года хорошо согласуется с аналогичными данными по C_T^2 и C_n^2 , приведенными в работах [1–3, 7].

Завершая изложение полученных результатов, добавим, что мы провели предварительный анализ взаимосвязи C_{np}^2 с другими характеристиками турбулентности (дисперсиями, потоками, типом стратификации и т.п.). Отметим, в частности, возможность формулировки относительно простых эмпирических зависимостей C_{np}^2 от дисперсий температуры, вертикального турбулентного потока тепла и некоторых других статистических характеристик турбулентности. Однако для полноты картины требуются более детальный анализ и обобщение сделанных выводов, которые мы планируем опубликовать в дальнейшем.

Заключение

Подводя итог, можно сделать следующие основные выводы, касающиеся структурной характе-

ристики показателя преломления оптических волн C_n^2 и ее среднего суточного хода в приземном слое атмосферы (в пределах до 20 м).

– Имеет место систематическое отклонение (занижение) значений C_n^2 , полученных с использованием ультразвуковых анемометров-термометров, по сравнению с полученными оптическим дифференциальным измерителем турбулентности (примерно в 4 раза). При этом корреляция величин C_n^2 при измерениях акустическими и оптическими методами была высокой (коэффициент корреляции обычно превышал значение 0,8).

– Над урбанизированной территорией значение структурной характеристики C_n^2 заметно выше, чем над естественным ландшафтом, особенно в зимнее время.

– Имеет место существенное отличие среднего суточного хода C_n^2 в теплое и холодное время года: в теплое время имеется хорошо выраженный дневной максимум ССХ C_n^2 , в холодное (зимнее) время такого максимума нет.

– В теплое время года на территориях с естественным ландшафтом локальные максимумы ССХ C_n^2 имеются как днем, так и ночью.

– С увеличением высоты измерений значения C_n^2 в дневное время уменьшаются (вывод сделан на основе данных в теплое время года на территориях с естественным ландшафтом). Ночью существенной зависимости от высоты измерений нет.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Атмосфера» ИОА СО РАН на территориях обсерваторий «БЭК» и «Фоновая».

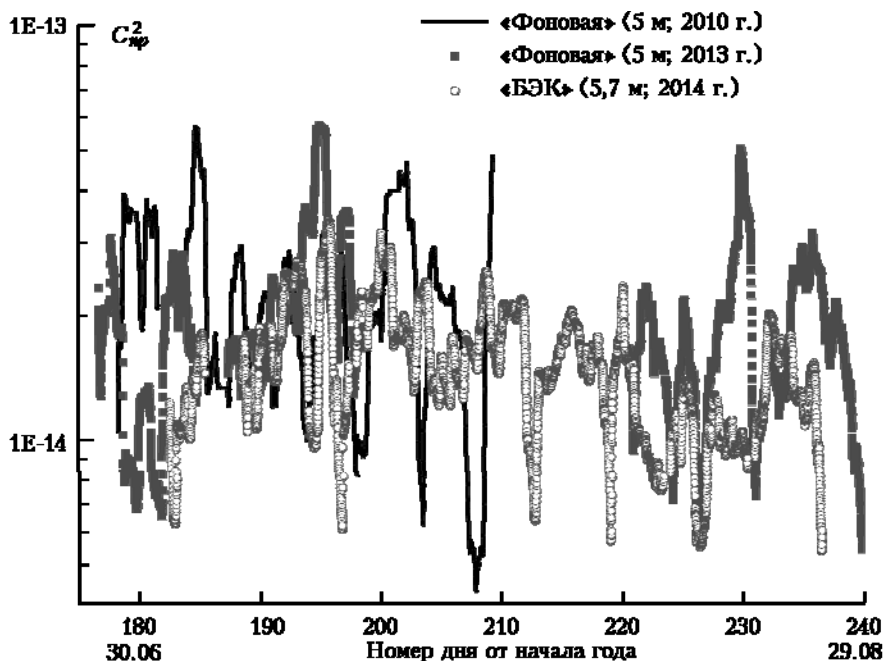


Рис. 8. Сравнение C_{np}^2 в разных пунктах наблюдений с естественным ландшафтом в различные годы в один и тот же период

1. Cheinet S., Beljaars A., Weiss-Wrana K., Hurtaud Y. The use of weather forecasts to characterise near-surface optical turbulence // *Bound.-Lay. Meteorol.* 2011. V. 138, N 3. P. 453–473.
2. Andreas E.L., Fairall C.W., Persson P.O.G., Guest P.S. Probability distribution for inner scale and refractive index structure parameter and their implications for flux averaging // *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 2003. V. 42, N 9. P. 1316–1329.
3. Bendersky S., Kopeika N.S., Blaunstein N. Atmospheric optical turbulence over land in middle east coastal environments: Prediction modeling and measurements // *Appl. Opt.* 2004. V. 43, N 20. P. 4070–4079.
4. Ботыгина Н.Н., Ковадло П.Г., Копылов Е.А., Лукин В.П., Туев М.В., Шиховцев А.Ю. Оценка качества астрономического видения в месте расположения Большого солнечного вакуумного телескопа по данным оптических и метеорологических измерений // *Оптика атмосф. и океана.* 2013. Т. 26, № 11. С. 942–947.
5. Meijninger W.M.L., Hartogensis O.K., Kohsiek W., Hoedjes J.C.B., Zuurbier R.M., De Bruin H.A.R. Determination of area-averaged sensible heat fluxes with a large aperture scintillometer over a heterogeneous surface-flevovaland field experiment // *Bound.-Lay. Meteorol.* 2002. V. 105, N 1. P. 37–62.
6. Beirich F., Bange J., Hartogensis O.K., Raasch S., Braam M., van Dinter D., Gräf D., van Kesteren B., van den Kroonenberg A.C., Maronga B., Martin S., Moene A.F. Towards a validation of scintillometer measurements: The LITFASS-2009 experiment // *Boundary-Layer Meteorol.* 2012. V. 144, N 1. P. 83–112.
7. Braam M., Bosveld F.C., Moene A.F. On Monin–Obukhov scaling in and above the atmospheric surface layer: The complexities of elevated scintillometer measurement // *Bound.-Lay. Meteorol.* 2012. V. 144, N 2. P. 157–177.
8. Braam M., Moene A. F., Beyrich F. Variability of the structure parameters of temperature and humidity observed in the atmospheric surface layer under unstable condition // *Bound.-Lay. Meteorol.* 2014. V. 150, N 3. P. 399–422.
9. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967. 548 с.
10. Гладких В.А., Невзорова И.В., Одинцов С.Л., Федоров В.А. Структурные функции температуры воздуха над неоднородной подстилающей поверхностью. Часть I. Типичные формы структурных функций // *Оптика атмосф. и океана.* 2013. Т. 26, № 11. С. 948–954.
11. Гладких В.А., Невзорова И.В., Одинцов С.Л., Федоров В.А. Структурные функции температуры воздуха над неоднородной подстилающей поверхностью. Часть II. Статистика параметров структурных функций // *Оптика атмосф. и океана.* 2013. Т. 26, № 11. С. 955–963.
12. van den Kroonenberg A.C., Martin S., Beirich F., Bange J. Spatially-averaged temperature structure parameter over a heterogeneous surface measured by an unmanned aerial vehicle // *Bound.-Lay. Meteorol.* 2012. V. 142, N 1. P. 55–77.
13. *Распространение лазерного пучка в атмосфере* / Под ред. Д. Стробена. М.: Мир, 1981. 416 с.
14. Гладких В.А., Макиенко А.Э. Цифровая ультразвуковая метеостанция // *Приборы.* 2009. № 7 (109). С. 21–25.
15. Аршинов М.Ю., Ботыгина Н.Н., Рейно В.В., Одинцов С.Л. Базовый экспериментальный комплекс // *Материалы XVI Междунар. симпози. «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосфер».* Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2009. С. 252–255.
16. Антошкин Л.В., Лавринов В.В., Лавринова Л.Н., Лукин В.П. Дифференциальный метод в измерении параметров турбулентности и скорости ветра датчиком волнового фронта // *Оптика атмосф. и океана.* 2008. Т. 21, № 1. С. 75–80.
17. Лукин В.П. Дифференциальный измеритель турбулентности // *Фотоника.* 2010. № 5. С. 16–23.
18. Лукин В.П., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Антошкин А.В., Коняев П.А., Гладких В.А., Мамышев В.П., Одинцов С.Л. Одновременные измерения структурной характеристики показателя преломления атмосферы оптическим и акустическим методами // *Оптика атмосф. и океана.* 2011. Т. 24, № 10. С. 852–857.
19. Лукин В.П., Ботыгина Н.Н., Гладких В.А., Емалеев О.Н., Коняев П.А., Одинцов С.Л., Торгаев А.В. Сравнительные измерения уровня турбулентности атмосферы с помощью оптических и акустических измерителей // *Оптика атмосф. и океана.* 2015. Т. 28, № 2. С. 163–166.

V.A. Gladkikh, V.P. Mamyshev, S.L. Odintsov. Experimental estimates of the structure parameter of the refractive index for optical waves in the surface air layer.

The paper analyzes the structure parameter of the refractive index of optical waves C_n^2 in the surface air layer calculated from the structure parameter of the air temperature C_T^2 . The C_n^2 estimates obtained from data of an optical differential turbulence meter and ultrasonic anemometer-thermometers are compared. The systematic difference between these estimates at the high degree of correlation is noted. The diurnal mean profile of C_n^2 in different seasons at territories with natural landscape and urban territory is obtained and analyzed.