

УДК 551.511+534.8

Высотные профили структурной характеристики температуры воздуха в пограничном слое атмосферы по содарным измерениям

А.П. Камардин, С.Л. Одинцов*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 4.04.2016 г.

Обсуждаются результаты анализа высотных профилей нормированных значений структурной характеристики температуры воздуха C_T^2 в пограничном слое атмосферы в условиях дневной конвекции. Экспериментальные данные получены с помощью акустического доплеровского локатора (сонара) «Волна-4М» (г. Томск, Академгородок). Автономировка профилей производилась на значение C_T^2 на высоте $H = 100$ м. Для анализа использовались результаты, полученные в дневное время (11:00–16:00, местное время) в теплый период (июль–август) 2015 г. Проведено сравнение форм высотных профилей C_T^2 , полученных содаром, и подобных профилей, полученных другими авторами. Отмечается наличие «излома» профилей C_T^2 на высотах 60–80 м.

Ключевые слова: атмосферный пограничный слой, содар, структурная характеристика температуры; atmospheric boundary layer, sodar, structure characteristic of temperature.

Изучение высотно-временных профилей характеристик температурной турбулентности в атмосферном пограничном слое (АПС) является важной задачей при решении общей проблемы распространения оптического излучения в случайно-неоднородных средах. Одним из полезных инструментов для решения этой задачи является метод дистанционного акустического зондирования АПС. Технические средства, реализующие данный метод, — метеорологические акустические локаторы (сонары) — способны обеспечить измерение высотно-временных профилей структурной характеристики температурной турбулентности $C_T^2(H, t)$ в АПС с удовлетворительным пространственно-временным разрешением. Существенную роль при решении различных задач оптики атмосферы играет структурная характеристика показателя преломления оптических волн C_n^2 , которая прямо пропорциональна C_T^2 . По этой причине результаты акустической диагностики АПС могут быть использованы для изучения условий, в которых предполагается применять оптические приборы, а также для интерпретации результатов оптических наблюдений [1–3]. Например, в работах [4, 5] рассматривается использование содаров для тестирования возможных пунктов размещения трехметрового астрономического телескопа, включая оценки высотных профилей C_T^2 и C_n^2 . Более подробный перечень работ, связанных с дистанционным акустическим зондированием структурной характеристики C_T^2 , имеется в [6].

Высотные профили C_T^2 (и C_n^2) и модели этих профилей в пограничном слое атмосферы были предметом исследований в течение многих лет. Применялись различные методы и технические средства измерений, включая лазерные (см., например, [7]). В итоге в настоящее время используются эмпирические модели, основой которых является степенная зависимость от высоты: $C_n^2 \propto C_T^2 \propto H^m$. При этом показатель степени m для приземного слоя может отличаться от показателя степени в более высоких слоях атмосферы. Например, в [3] для приземного слоя ($H \leq 50$ м) применяется значение $m = -2/3$, а для диапазона высот $50 < H \leq 1000$ м — значение $m = -4/3$. Наличие излома в профиле C_T^2 на небольших высотах над подстилающей поверхностью обусловлено, по-видимому, изменением режима генерации температурной турбулентности при переходе от приземного слоя атмосферы (его высота составляет обычно 50–100 м) непосредственно к «ядру» АПС. Отметим, что указанная модель применима только для конвективных условий в АПС.

Основная цель нашей работы заключалась в анализе формы высотных профилей $C_T^2(H)$, полученных с использованием содара в условиях дневной конвекции в теплое время года над урбанизированной территорией. Измерения проводились содаром «Волна-4М», разработанным и изготовленным в ИОА СО РАН.

Кратко изложим методику определения $C_T^2(H, t)$ по результатам акустического зондирования АПС. Сodar регистрирует высотно-временное распределение амплитуды (эхограмму) рассеянного турбулентными пульсациями температуры воздуха звукового

* Андрей Павлович Камардин; Сергей Леонидович Одинцов (odintsov@iao.ru).

сигнала в смеси с помехами (аппаратными и «внешними»): $A_S = A_C + A_N$, где A_C – амплитуда «полезного» сигнала; A_N – амплитуда помехи (в полосе приема).

Структурная характеристика температурного поля $C_T^2(H, t)$ ($K^2 \cdot m^{-2/3}$) в пограничном слое атмосферы вычисляется на основе сигнала A_C по формуле [8, 9]:

$$C_T^2(H, t) = B_0(f) \tau f^{-1/3} T^{5/3}(H, t) H^2 \times \exp[2H \alpha_p(f, T, P, U)] A_C^2(H, f, t). \quad (1)$$

Здесь $B_0(f)$ – аппаратная функция, которая определяется при абсолютной калибровке содара; τ – длительность зондирующего импульса, с; f – несущая частота звука, Гц; T – температура воздуха, К; H – высота, м; $\alpha_p(f, T, P, U)$ – коэффициент ослабления мощности звука, m^{-1} ; P – атмосферное давление, Па; U – относительная влажность воздуха, %. Температура и влажность воздуха, а также атмосферное давление зависят от времени и высоты.

Методика определения амплитуды помехи A_N базировалась на статистических оценках ее уровня в полосе приема в тех диапазонах высот, где полезный сигнал отсутствовал. На первом этапе «очистки» сигнала от шума полагалось, что в отдельном акте зондирования $A_N = \text{const}$. После вычитания помехи A_N из исходного сигнала A_S проводился дополнительный статистический анализ, позволявший устранить (в основном) вклад нестационарной составляющей помехи.

Для вычисления коэффициента ослабления $\alpha_p(f, T, P, U)$ использовались только приземные данные о метеорологических параметрах. Изменение этих параметров по высоте не учитывалось. Возможные погрешности, возникающие при таком подходе, обсуждались в [10, 11].

Был проведен анализ высотных профилей C_T^2 , полученных при помощи содара «Волна-4М» в летнее время (июль–август 2015 г.) в г. Томске (Академгородок). Контролировался диапазон высот 45–700 м. Использовались эхограммы вертикально ориентированного канала зондирования при несущей частоте сигнала $f = 2100$ Гц и длительности зондирующего импульса $\tau = 150$ мс. Для анализа были выбраны измерения в период 11:00–16:00 местного времени с хорошо выраженной конвективной структурой пограничного слоя атмосферы. Всего обработано 24 эпизода (дня) измерений. Отметим, что при выборе эпизодов для обработки использовались также профили температуры воздуха, полученные с помощью температурного профилера МТР-5 [12]. Данный прибор обеспечивал измерение профилей температуры с шагом по высоте 50 м и шагом по времени 5 мин.

На рис. 1, а приведен типичный пример «очищенной» от помех эхограммы (A_C), а на рис. 1, б – пример ее преобразования к $C_T^2(H, t)$ с использованием формулы (1).

Для дальнейшего анализа формы профилей $C_T^2(H, t)$ удобнее привести их к нормированному

виду. С этой целью была проведена автонормировка $C_T^2(H, t)$ на значение этого параметра на высоте 100 м. Поскольку «мгновенные» профили $C_T^2(H, t)$ обладают высокой степенью случайности, предварительно выполнено их осреднение по интервалам времени 10 мин. Данный интервал осреднения выбран исходя из компромисса между задачей «отслеживания» изменчивости формы профилей на протяжении эпизода (дня) измерений и «статистической» природой параметра C_T^2 . Аналогичный подход был использован нами и при анализе приземных значений C_T^2 [13]. На рис. 1, в представлены нормированные и осредненные за 10 мин профили $C_{Tn}^2(H, t_{10})$, соответствующие распределению, показанному на рис. 1, б. В дальнейшем аргумент t_{10} , указывающий на длительность интервала, по которому определялись профили C_{Tn}^2 , опущен.

Как правило, профили $C_T^2(H)$ и $C_n^2(H)$ определялись в различных исследованиях как средние значения данных величин за достаточно длительный промежуток времени. Например, в [7] приводятся профили $C_n^2(H)$, полученные в дневное время в приземном слое как средние значения за 3–5 ч. И именно такие усредненные профили служили для формулировки моделей вида $C_n^2 \propto H^m$. Мы тоже усреднили профили $C_{Tn}^2(H)$ за интервал времени 11:00–16:00 (назовем их среднесуточными). На рис. 1, г приведен среднесуточный профиль $\overline{\lg C_{Tn}^2(H)}$, полученный по профилям на рис. 1, в. Совокупность всех 24 среднесуточных профилей $\overline{\lg C_{Tn}^2(H)}$ приведена на рис. 2. Обратим внимание на то, что в диапазоне высот 60–80 м наблюдается явный систематический «излом» всех профилей $\overline{\lg C_{Tn}^2(H)}$.

Более детально структуру профилей $C_{Tn}^2(H)$ можно исследовать, переходя к логарифму данной величины и анализу ее связи с логарифмом высоты $\lg H$. В частности, если ввести обозначения $y = \lg C_{Tn}^2(H)$ и $x = \lg H$, то производная

$$y'_x = \partial \lg C_{Tn}^2 / (\partial \lg H) = m(H) \quad (2)$$

позволяет оценить характер изменения $C_{Tn}^2(H)$ на основе формулы

$$C_{Tn}^2(H) = C H^{m(H)}, \quad (3)$$

где C – некоторая константа. Пример оценок $m(H)$ по формуле (2) приведен на рис. 3, а. На высотах выше 250 м разброс значений m существенно увеличивается. Исходные профили $C_{Tn}^2(H)$, на основе которых получены $m(H)$, представлены на рис. 1, в. На рис. 3, б показан осредненный (медианный) за день профиль $m_p(H)$. Средние профили $m_p(H)$ для каждого из 24 эпизодов измерений приведены на рис. 3, в. Согласно рис. 3, в среднесуточные профили $m_p(H)$ имеют достаточно устойчивую форму до высот порядка 300 м. Выше этого уровня разброс значений $m_p(H)$ существенно увеличивается. Усредненная форма профилей $m_p(H)$ за все 24 эпизода измерений, обозначенная как $m_c(H)$, представлена на рис. 3, г.

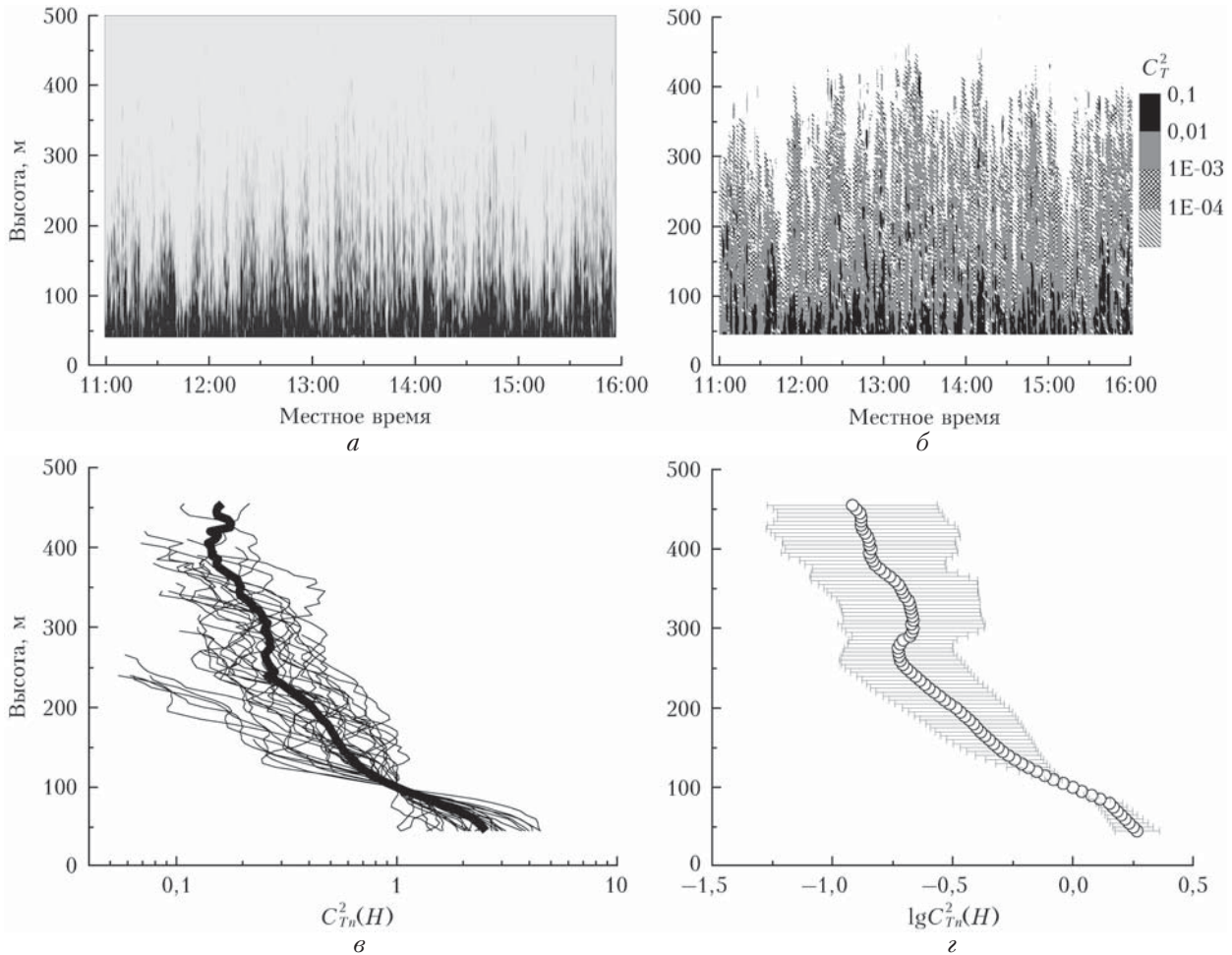


Рис. 1. Эхограмма содара «Волна-4М» (а); высотное-временное распределение $C_T^2(H, t)$ (б); профили $C_{Tn}^2(H)$ (тонкие линии) и средний (за день) профиль $\overline{C_{Tn}^2(H)}$ (толстая линия) (в); профиль $\lg C_{Tn}^2(H)$ с указанием СКО (г). 20.07.2015 г. (г. Томск, Академгородок)

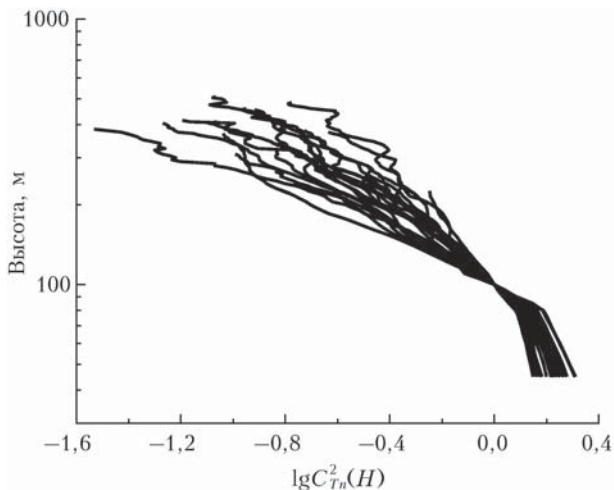


Рис. 2. Сводка нормированных «среднесуточных» профилей $\lg C_{Tn}^2(H)$

Высокая степень изменчивости среднесуточных профилей $m_p(H)$ выше уровня 300 м связана, по всей видимости, с большой вариативностью («переменяе-

мостью») структуры температурных неоднородностей (см., например, рис. 1, б), с техническими возможностями использовавшегося для измерений профилей C_T^2 содара (недостаточный потенциал по критерию сигнал-шум), а также с несовершенством алгоритма обработки экспериментальных данных (выделение полезного сигнала A_C из исходного сигнала A_S). В рассмотренных эпизодах достаточно достоверными можно считать результаты, полученные в диапазоне высот до 300 м. В более высоких слоях атмосферы величины $m_p(H)$ следует рассматривать только как оценочные. Отметим, что в диапазоне 80–300 м как среднесуточные профили $m_p(H)$, так и суммарный за все эпизоды измерений профиль $m_c(H)$ группируются около величины $m = -4/3 \approx -1,33$.

Как уже отмечалось выше, примерно на уровне 60–80 м наблюдается явный систематический «излом» всех профилей $\lg C_{Tn}^2(H)$ (см. рис. 2). Предположим, что выше и ниже этого уровня профили $\lg C_{Tn}^2(H)$ могут быть аппроксимированы линейными функциями. Это означает, что каждый среднесуточный профиль $m(H)$, представленный на рис. 3, в, в диапазоне высот 80–300 м группируется около

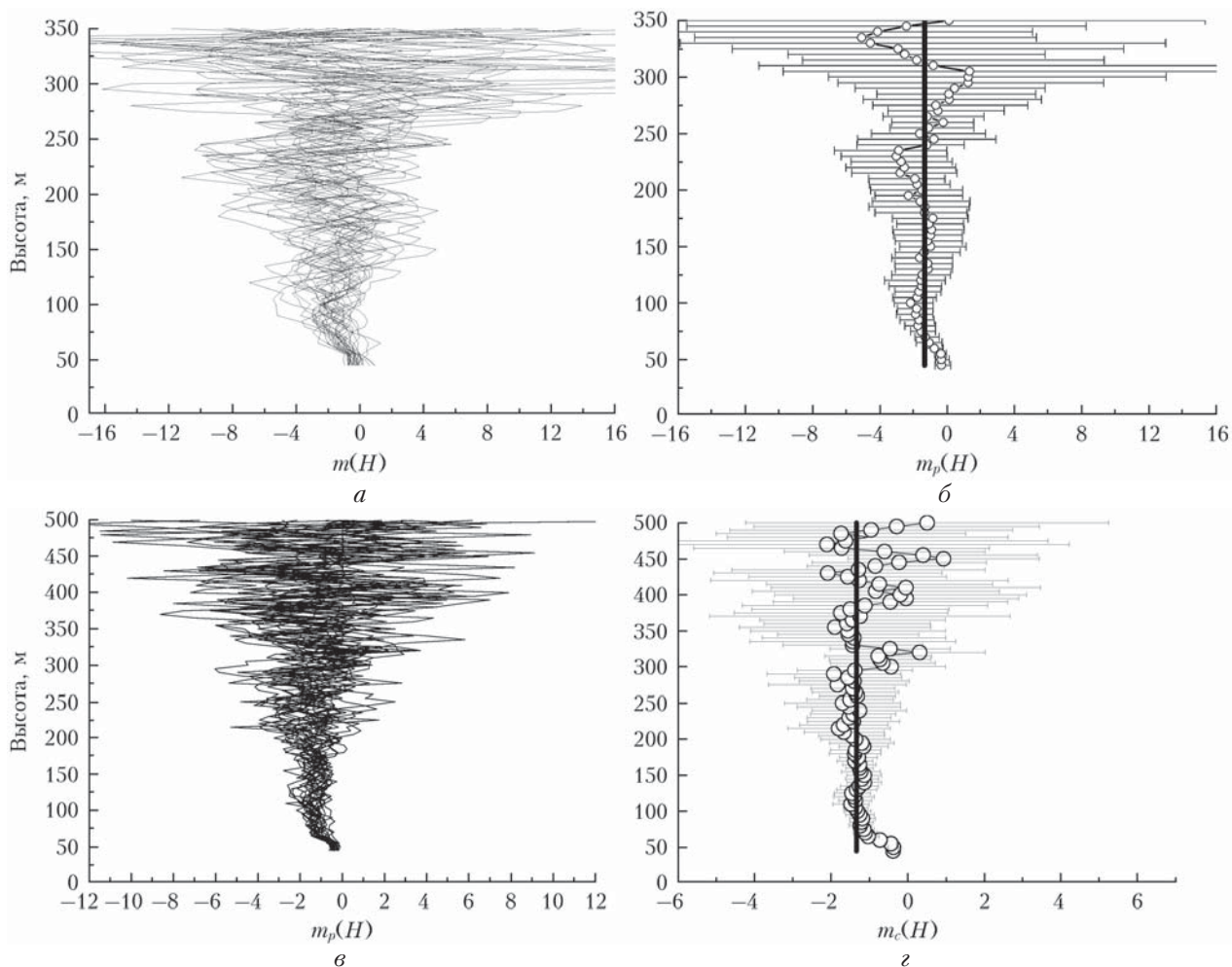


Рис. 3. Совокупность профилей $m(H)$ по результатам измерений 20.07.2015 г. (11:00–16:00) (а); средний за 20.07.2015 г. профиль $m_p(H)$ (отрезками указаны СКО) (б); профили $m_p(H)$ за все дни наблюдений (июль–август 2015 г. (11:00–16:00)) (в); усредненный за все дни наблюдений профиль $m_c(H)$ (с указанием СКО) (г). Вертикальная линия – значение $m = -4/3$

некоторого постоянного значения m_u , а на высотах ниже 80 м – около постоянного значения m_d . Результаты линейных аппроксимаций функций $\lg C_{Tn}^2(H)$ в диапазонах высот выше и ниже 80 м приведены на рис. 4. В частности, на рис. 4, а показаны линейные аппроксимации профилей, представленных на рис. 2, а на рис. 4, б – среднесуточные значения параметров m_u и m_d для 24 эпизодов измерений. Даты проводившихся измерений указаны на оси абсцисс рис. 4, б. Пунктирная и сплошная горизонтальные линии на этом рисунке – медианные значения m_u и m_d (–1,42 и –0,38 соответственно).

Приведенные на рис. 4, а графики соответствуют модели высотных профилей вида $C_n^2(H) \propto H^m$ с наличием «излома» на некоторой высоте в приземном слое. Этот результат в целом согласуется с результатами других авторов. Например, в работе [7] приводятся экспериментальные данные по профилям $C_n^2(H)$ в диапазоне высот ниже 80 м (измерения летом в дневное время над ровной подстилающей поверхностью). Согласно этим результатам в слое до 30 м изменение профилей $C_n^2(H)$ происходит по за-

кону, близкому к степенному с показателем степени в диапазоне $-0,33 \leq m_d \leq -0,66$. Выше уровня 30 м – также по степенному закону, но с показателем степени (в среднем) $m_u = -4/3 \approx -1,33$. Приведенные на рис. 4, б значения m_u и m_d достаточно близки к аналогичным величинам, опубликованным в [7]. Только уровень «излома» полученных нами профилей C_n^2 примерно в 2 раза превышает уровень, приведенный в [7]. Возможно, это связано с тем, что наши измерения проводились над урбанизированной территорией, где размеры приземного слоя и характеристики турбулентности в нем могут заметно отличаться от условий над ровной подстилающей поверхностью.

Подводя итог, можно сделать следующие основные выводы. Во-первых, технология дистанционного акустического зондирования атмосферы способна обеспечить достоверные оценки высотного профиля структурной характеристики температурного поля (и структурной характеристики показателя преломления оптических волн) с удовлетворительным пространственно-временным разрешением. Во-вторых,

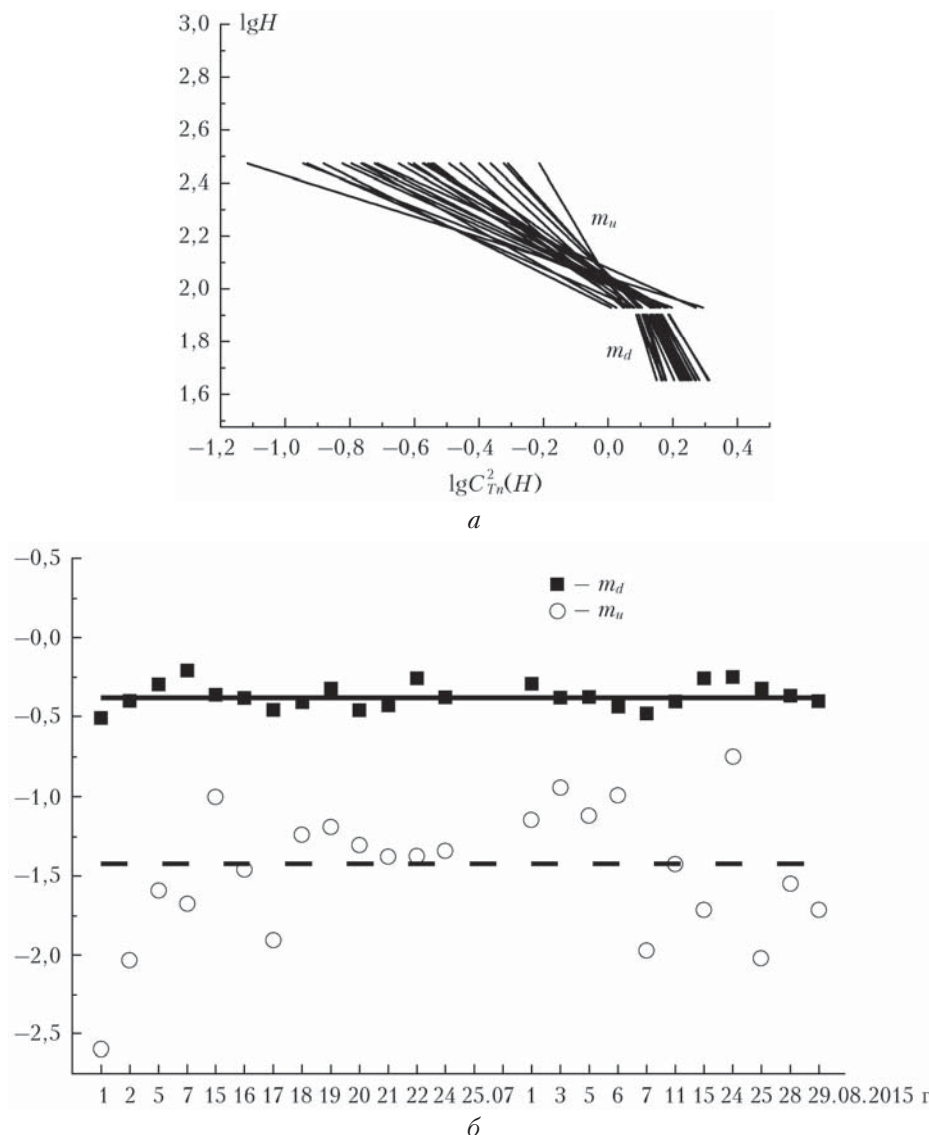


Рис. 4. Линейные аппроксимации $\overline{\lg[C_{Tn}^2(\lg H)]}$ в двух диапазонах высот (июль–август 2015 г. (11:00–16:00)) (а); значения m_u и m_d (б)

использование модельных профилей C_T^2 (или C_n^2) вида $C_T^2(H) \propto H^m$ с заранее заданным значением m не сможет обеспечить корректный учет влияния пульсаций температурного поля при решении задач, требующих использования оперативных данных по величинам и профилям C_T^2 (или C_n^2), поскольку текущее высотное распределение исследуемой величины может существенно отличаться от модельного профиля.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение № 14.604.21.0100 – уникальный идентификатор RFMTFI60414X0100).

1. Лукин В.П., Ильясов С.П., Носов В.В., Одинцов С.Л., Тиллаев Ю.А. Изучение астроклимата региона юга Сибири и Средней Азии // Оптика атмосфер. и океана. 2009. Т. 22, № 10. С. 973–980.

2. Носов В.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В. Рекомендации по выбору мест размещения наземных астрономических телескопов // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 12. С. 1099–1110.

3. 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 атмосфер. и океана. 2013. Т. 26, № 11. С. 942–947; Botygina N.N., Kovaldo P.G., Kopylov E.A., Lukin V.P., Tudev M.V., Shikhovtsev A.Yu. Estimation of the astronomical seeing at the large solar vacuum telescope site from optical and meteorological measurements // Atmos. Ocean. Opt. 2014. V. 27, N 2. P. 142–146.

4. Travouillon T., Schöck M., Els S., Riddle R., Skidmore W. Using a sodar to measure optical turbulence and wind speed for the thirty meter telescope site testing. Part I: Reproducibility // Bound.-Lay. Meteorol. 2011. V. 141, iss. 2. P. 273–288.

5. *Travouillon T., Schöck M., Els S., Riddle R., Skidmore W.* Using a sodar to measure optical turbulence and wind speed for the thirty meter telescope site testing. Part II: Comparison with independent instruments // *Bound.-Lay. Meteorol.* 2011. V. 141, iss. 2. P. 289–300.
6. *Petenko I., Mastrantonio G., Viola A., Argentini S., Pietroni I.* Some statistics of the temperature parameter in the convective boundary layer observed by sodar // *Bound.-Lay. Meteorol.* 2014. V. 150, iss. 2. P. 215–233.
7. *Миронов В.Л.* Распространение лазерного пучка в турбулентной атмосфере. Новосибирск: Наука, 1981. 247 с.
8. *Гладких В.А., Одинцов С.Л.* Калибровка содара «Волна-3» // *Оптика атмосф. и океана.* 2001. Т. 14, № 12. С. 1145–1149.
9. *Kamardin A.P., Odintsov S.L.* Method for automatic absolute calibration of sodar measurement channels // *Proc. SPIE.* 2015. V. 9680 (96805U). DOI: 10.1117/12.2205328.
10. *Nevezorova I.V., Odintsov S.L., Fedorov V.A.* Some methodological aspects of sodar measurements of structural characteristic of temperature pulsation // *Proc. 10th Int. Symp. on Acoust. Remote Sensing of the Atmosphere and Oceans.* Auckland, New Zealand, 27 November – 1 December, 2000. P. 312–315.
11. *Gladkikh V.A., Nevezorova I.V., Odintsov S.L.* VOLNA-3 sodar measurements of structure characteristic of atmospheric boundary layer // *Proc. SPIE.* 2000. V. 4341. P. 343–350.
12. *Кадыгров Е.Н., Ганьшин Е.В., Миллер Е.А., Точилкина Т.А.* Наземные микроволновые температурные профиломеры: потенциал и реальность // *Оптика атмосф. и океана.* 2015. Т. 28, № 6. С. 521–528; *Kadygrov E.N., Ganshin E.V., Miller E.A., Tochilkina T.A.* Ground-based microwave temperature profilers: Potential and experimental data // *Atmos. Ocean. Opt.* 2015. V. 28, N 6. P. 598–605.
13. *Гладких В.А., Невзорова И.В., Одинцов С.Л., Фёдоров 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; *Gladkikh V.A., Nevezorova I.V., Odintsov S.L., Fedorov V.A.* Structure functions of air temperature over an inhomogeneous underlying surface. Part II. Statistics of structure functions' parameters // *Atmos. Ocean. Opt.* 2014. V. 27, N 2. P. 154–163.

A.P. Kamardin, S.L. Odintsov. **Vertical profiles of the structure characteristic of air temperature in the atmospheric boundary layer from sodar measurements.**

The paper discusses results of the analysis of vertical profiles of the normalized structure characteristic of air temperature C_T^2 in the atmospheric boundary layer under conditions of daytime convection. The experimental data have been obtained with Volna-4M acoustic Doppler radar (sodar) (Akademgorodok, Tomsk, Russia). The profiles were auto-normalized to the value of C_T^2 at the height $H = 100$ m. The results obtained in daytime (11:00–16:00 Local Time) in the warm period (July–August) of 2015 have been analyzed. The shape of the sodar vertical profiles of C_T^2 has been compared with results by other authors. The presence of a break in the C_T^2 profile at heights of 60–80 m can be noticed.