

ОПТИКА И ФИЗИКА СЛУЧАЙНО-НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД

УДК 551.551.2 + 551.554

Спектральный состав температурной турбулентности при различных типах стратификации приземного слоя атмосферы

Д.А. Маракасов, А.Л. Афанасьев[✉], Е.В. Гордеев*

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

Поступила в редакцию 03.05.2024;
после доработки 25.06.2024;
принята к печати 11.10.2024

Параметры спектральной модели мелкомасштабной турбулентности — важнейшие характеристики, используемые при описании распространения света и звука в атмосфере. Одним из определяющих факторов, которые влияют на спектральный состав турбулентности, является режим стратификации. В настоящей статье на основе результатов обработки временных рядов флуктуаций метеопараметров, регистрируемых акустическими метеостанциями, исследовано влияние стратификации в приземном слое атмосферы на отклонения спектра турбулентности от модели Колмогорова—Обухова. При сопоставлении временной динамики характеристики устойчивости (числа Монина—Обухова) и показателя степенной модели спектра флуктуаций температуры установлена значимая корреляция между ними. Предложена эмпирическая модель зависимости показателя спектра от параметра устойчивости. Модель позволяет на основе оценок величины и направления турбулентных потоков тепла и импульса судить об изменениях параметров спектральной структуры мелкомасштабной турбулентности. Полученная зависимость отражает особенности формирования температурной турбулентности при различной стратификации в приземном слое. Информация о турбулентных спектральных параметрах, полученная на основе оценки стратификации, в дальнейшем может быть использована при решении задач распространения оптического и акустического излучения, а также зондирования атмосферы.

Ключевые слова: неколмогоровская турбулентность, энергетический спектр, стратификация, число Монина—Обухова, акустическая метеостанция; non-Kolmogorov turbulence, energy spectrum, stratification, Monin-Obukhov number, sonic weather stations.

Введение

Развитие атмосферной турбулентности в значительной степени определяется величиной и направлением потоков тепла и импульса. В приземном слое (ПС) толщиной в несколько десятков метров основную роль в формировании этих потоков играет взаимодействие атмосферы с поверхностью Земли [1–5]. Распределение температуры в ПС задает соотношение между силой тяжести и архимедовой силой, воздействующих на частицу воздуха, и определяет энергетическую эффективность конвективных движений. Превалирование силы плавучести интенсифицирует конвективный обмен теплом в ПС и соответствует неустойчивой стратификации. При обратном соотношении конвекция подавляется, что соответствует устойчивой стратификации. Безразличная стратификация в ПС означает пример-

ный баланс сил. При количественном описании стратификации необходимо также учесть дополнительную интенсификацию конвективного переноса тепла за счет турбулентности, порождаемой неоднородностью средней скорости воздуха.

Мерой устойчивости ПС являются число Ричардсона, при вычислении которого используются средние вертикальные градиенты потенциальной температуры и горизонтальной скорости ветра и масштаб Монина—Обухова (МО), рассчитываемый через статистические характеристики турбулентных потоков тепла и импульса. Физический смысл этих величин достаточно близок и при определенных допущениях их можно считать линейно зависимыми. Различия при практических экспериментальных оценках заключаются в том, что для расчета градиентного числа Ричардсона необходимы измерения как минимум в двух разнесенных по высоте точках, а масштаб МО вычисляется по пульсационным данным, полученным лишь в одной точке, однако при этом желательна более высокая частота оцифровки временных рядов.

* Дмитрий Анатольевич Маракасов (mda@iao.ru); Алексей Леонидович Афанасьев (afanasiev@iao.ru); Евгений Викторович Гордеев (gordeev@iao.ru).

В настоящее время накоплены многочисленные массивы данных акустических измерений метеопараметров для различных ветровых и турбулентных условий. Их обработка показала, что ситуация, когда обеспечиваются условия однородной и изотропной турбулентности, реализуется далеко не всегда. На практике степенная зависимость структурных функций и энергетических спектров турбулентных микропульсаций может заметно отличаться от колмогоровской. Одним из определяющих факторов, влияющих на спектральный состав турбулентности в приземном слое атмосферы, является режим стратификации. В ряде источников отмечаются появление неколмогоровской турбулентности при наличии крупномасштабных неоднородностей подстилающей поверхности [3], формирование двухкомпонентных спектров в условиях неустойчивой стратификации [4, 6]. В настоящее время не существует единого подхода, позволяющего описать связь турбулентных спектров метеопараметров (температуры, давления, скорости ветра) со стратификацией в ПС. Для ряда оптических и акустических приложений его разработка была бы весьма полезной, поскольку оценки статистических характеристик оптических и акустических волн, распространяющихся в атмосфере, существенно меняются [7–9] даже при относительно небольших отклонениях турбулентных спектров от модели развитой турбулентности Колмогорова–Обухова.

Цель настоящей работы – установление эмпирической связи между характеристикой устойчивости ПС и параметрами степенной модели спектра турбулентности (показатель степени ν) для температурных флуктуаций в ПС атмосферы на основе пульсационных данных акустических метеостанций. В качестве параметра, характеризующего стратификацию, использован масштаб МО и его безразмерный аналог – число МО. Для оценки параметров турбулентных спектров и структурных функций температуры применялись алгоритмы обработки данных, представленные в [10]. На основе обработки массивов экспериментальных данных, полученных в разное время года, при различном характере окружающей местности и разных высотах в приземном слое демонстрируется наличие статистически значимой взаимосвязи между показателем степени спектра температурных флуктуаций и числом Монина–Обухова.

1. Основные соотношения

1.1. Оценка стратификации по данным АМК-03

Результаты измерений метеокомплекса АМК-03 [11] представляют собой ряды мгновенных значений метеопараметров (вертикальная w , южная V_s и восточная V_e компоненты скорости ветра, температура T , давление, относительная влажность), сгруппированные в файлы по интервалам наблюдения заранее выбранной длительности. В [10] разработаны методы постдетекторной (компьютерной)

обработки данных акустических метеостанций, позволяющие вычислять различные статистические параметры ветра и турбулентности на основе временных рядов флуктуаций метеопараметров. На заданном интервале осреднения осуществляются расчеты энергетических спектров и структурных функций, по которым путем степенной аппроксимации оцениваются параметры обобщенной степенной модели с показателем степени, структурной характеристикой и внешним масштабом, оцениваемым непосредственно по измеренным временным рядам выборки мгновенных значений регистрируемых метеопараметров.

Особенностью используемого алгоритма спектральной обработки является определенная гибкость задания ключевых параметров: возможность варьирования интервала осреднения, задание границ пространственного интервала при оценке степенной зависимости структурных функций и интервала пространственных частот при оценке наклонов энергетических спектров. При произвольном задании интервала осреднения также реализована процедура расчета числовых параметров атмосферной турбулентности на основе вторых моментов флуктуаций температуры воздуха и трех компонент скорости ветра. В частности, вычисляются одноточечные моменты для трех компонент скорости ветра и температуры, вертикальные турбулентные потоки количества движения $\tau = -\rho \langle u'w' \rangle$ и тепла $H = C_p \rho \langle T'w' \rangle$, а также масштаб скорости (скорость трения) $u_*^* = \sqrt{-\langle u'w' \rangle}$, масштаб температуры $T_*^* = -\langle T'w' \rangle / u_*^*$, масштаб Монина–Обухова $L_*^* = -\langle T \rangle \cdot (u_*^*)^2 / (0,4gT_*^*)$, где u' , w' и T' – пульсации продольной, вертикальной компонент скорости и температуры воздуха; $\langle T \rangle$ – среднее значение абсолютной температуры; c_p – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении; ρ – плотность воздуха; g – ускорение свободного падения.

На практике расчет скорости трения $u_*^* = \sqrt{\tau/\rho}$ по рядам измеряемых пульсаций u' и w' в атмосфере осложняется тем, что при нарушении положений теории подобия [1] в некоторых случаях знак τ становится отрицательным, из чего в рамках классического определения следует невозможность дальнейших оценок таких характеристик, как T_*^* и L_*^* . С целью исключения таких ситуаций при оценке масштаба скорости, производимой, например, ПО метеокомплекса АМК-03, берется модуль $\langle u'w' \rangle$, т.е. ее знак игнорируется:

$$u_1^* = \sqrt{|\langle u'w' \rangle|}. \quad (1)$$

Тогда

$$T_1^* = -\langle T'w' \rangle / u_1^*. \quad (2)$$

Появление таких ситуаций, по-видимому, свидетельствует о нарушении условий горизонтальной изотропности, когда нужно учитывать и другие составляющие турбулентного потока импульса [12]. В [5, 13] для оценки скорости трения используется комбинация из двух смешанных моментов $u_*^* =$

$= (\langle u'w' \rangle^2 + \langle u'v' \rangle^2)^{1/4}$, где v' — пульсации поперечной скорости, тем самым исключаются проблемы со знаком под корнем. По аналогии также можно ввести полную динамическую скорость

$$u_2^* = (\langle u'w' \rangle^2 + \langle u'v' \rangle^2 + \langle v'w' \rangle^2)^{1/4} \quad (3)$$

и полный масштаб температуры

$$T_2^* = \frac{1}{u_2^*} \sqrt{\langle T'w' \rangle^2 + \langle T'v' \rangle^2 + \langle T'u' \rangle^2}, \quad (4)$$

где учитываются все возможные направления турбулентного переноса. В дальнейшем при практических оценках мы будем использовать два варианта расчета: классический масштаб МО L_1^* на основе определений (1), (2), описывающий вертикальную стратификацию ПС, и его аналог L_2^* на основе (3), (4) с учетом всех компонент турбулентных потоков тепла и импульса

$$L_{1,2}^* = \frac{\langle T \rangle (u_{1,2}^*)^2}{0,4gT_{1,2}^*}. \quad (5)$$

Отметим, что масштаб L_2^* не является характеристикой вертикальной стратификации ПС и даже для горизонтально изотропной среды знак у масштаба температуры (4) не меняется, т.е. устойчивая и неустойчивая стратификации по данному параметру не различаются.

1.2. Модель спектра температуры и оценка ее параметров

Будем описывать температурные спектры изотропной степенной моделью [14, 15], которая, как продемонстрировано в [10], неплохо соответствует результатам измерений. Для структурной функции на степенном интервале пространственных разностей ρ имеем

$$D_T(\rho) \sim \rho^\mu, \quad (6)$$

а в соответствующем интервале пространственных частот спектр флуктуаций температуры также имеет степенной вид:

$$\Phi_T(\kappa) \sim \kappa^{-\nu}. \quad (7)$$

В интервале $1 < \nu < 3$ показатели в (6) и (7) связаны соотношением $\mu = \nu - 1$, но, как показано в [10], в атмосфере могут реализовываться ситуации,

когда $\nu < 1$. В этом случае линейная связь между показателями пропадает, а показатель структурной функции слабо меняется в интервале $0 < \mu < 0,2$.

Для оценки показателей μ , ν из рядов температуры и компонент скорости ветра будем использовать алгоритм, изложенный в [10] и основанный на аппроксимации степенными зависимостями рассчитанных по экспериментальным данным структурной функции

$$D_T(\rho_l) = \frac{\sum_{j=0}^{N-l-1} (T'_j - T'_{j+l})^2}{N-l}, \quad l = 0, \dots, N-1 \quad (8)$$

и спектра

$$\Phi_T(\kappa_m) = \frac{f}{\langle V \rangle s} \sum_{\alpha=0}^{s-1} \left| \sum_{j=0}^{N/s-1} T'_{j+\frac{\alpha}{s}N} e^{-\frac{2\pi i s m j}{N}} \right|^2, \quad m = 0, \dots, N_s - 1. \quad (9)$$

Здесь f — частота регистрации метеопараметров; $\rho_l = fl/\langle V \rangle$ — пространственный разнос; $\langle V \rangle$ — средняя скорость ветра на интервале осреднения Δt ; $N = f\Delta t$ — количество отсчетов в интервале осреднения; s — число подынтервалов длиной $N_s = N/s$ в интервале осреднения; $\kappa_m = \frac{mf}{N_s \langle V \rangle}$ — пространственная частота.

2. Результаты обработки экспериментальных данных

2.1. Условия проведения измерений

Представлены результаты обработки рядов метеоданных, полученных при измерениях в различных топографических условиях в разное время года. Измерения проводились на полигоне Базового экспериментального комплекса (БЭК) ИОА СО РАН (лето 2017 г.), в южной башне ИОА СО РАН (зима 2020 г.), на берегу оз. Байкал у подножия и на верхней площадке здания Большого солнечного вакуумного телескопа (БСВТ) (лето 2020 и 2023 гг.). Перечень анализируемых эпизодов измерений и высоты расположения метеостанций представлены в табл. 1.

В ходе измерений частота оцифровки временных рядов метеопараметров составляла $f = 80$ Гц,

Таблица 1

Время и место измерений рядов метеопараметров

Обозначение эпизода	Время измерений	Место измерений	Высота над поверхностью земли, м
БЭК2017_3	03–22.08.2017 г.	Полигон БЭК ИОА СО РАН	3
ИОА2020_20	29.01–10.02.2020 г.	Южная башня ИОА СО РАН	20
Б2020_27	10–26.07.2020 г.	Берег оз. Байкал, площадка БСВТ	27
Б2023_3	30.05–05.06.2023 г.	Берег оз. Байкал у подножия БСВТ	3
Б2023_27	30.05–05.06.2023 г.	Берег оз. Байкал, площадка БСВТ	27

длительность интервала осреднения $\Delta t = 20$ мин, что соответствует $N = 96000$ отсчетам. Спектры вычислялись по подынтервалам длиной 2 мин, так что их усреднение проводилось по $s = 10$ участкам исходного временного ряда длиной $N/s = 9600$ отсчетов.

2.2. Динамика стратификации ПС

Классический масштаб МО рассчитывался из рядов метеоданных на основе соотношения (5). Все значения сгруппированы в три интервала: I: $-135 < L_1^* < 0$ м, II: $L_1^* < -135$ и $L_1^* > 65$ м, III: $0 < L_1^* < 65$ м. По классификации типов стратификации [2] интервал I соответствует неустойчивой, интервал II – безразличной, интервал III – устойчивой стратификации. Пример временного хода масштаба МО в эпизоде Б2023_3 показан на рис. 1, где верхняя часть графика соответствует положительным значениям L_1^* , нижняя – отрицательным.

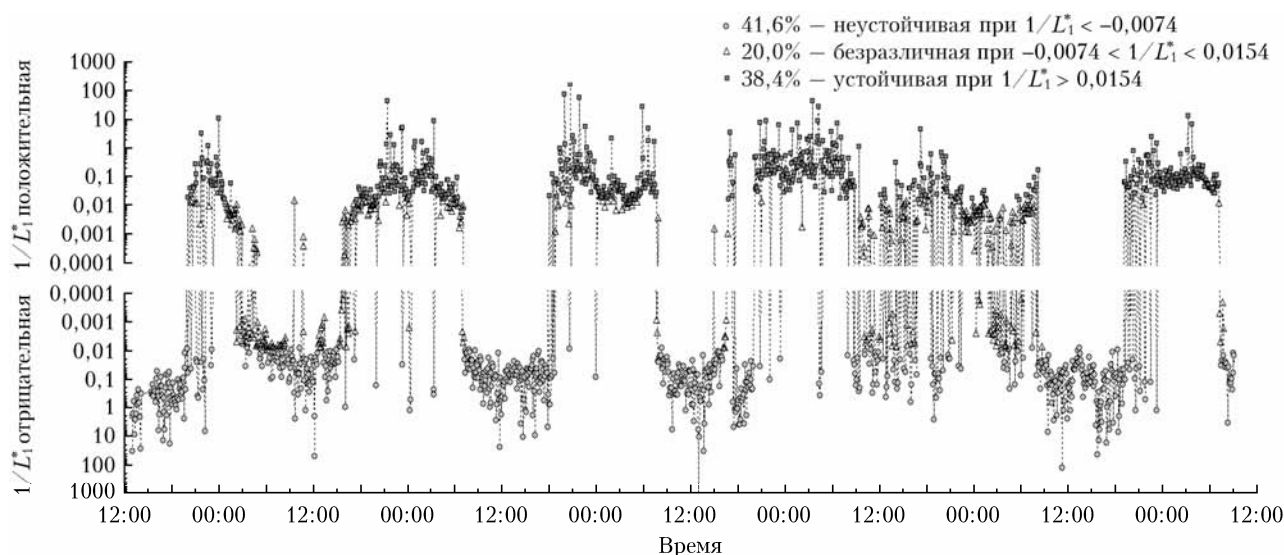


Рис. 1. Пример временной динамики стратификации приземного слоя на основе полученных значений L_1^*

В данном примере за все время наблюдений безразличный режим стратификации II возникал реже остальных. Неустойчивый и стабильный режимы I и III зарегистрированы в примерно одинаковом числе интервалов осреднения. Хорошо выражен суточный ход с режимом I в дневные часы и III в ночные.

Были также проанализированы и другие достаточно длительные эпизоды измерений (см. табл. 1). Статистика появления типов стратификации представлена в табл. 2. Несмотря на разнообразие вариаций, можно отметить некоторые характерные закономерности. Доли устойчивой и неустойчивой стратификации в большинстве случаев близки, что обусловлено влиянием суточных ходов температурных градиентов.

Таблица 2

Частота наблюдения типов стратификации, %			
Эпизод	Неустойчивая	Безразличная	Устойчивая
БЭК2017_3	33	17	50
ИОА2020_20	31	62	7
Б2020_27	42	37	21
Б2023_3	42	20	38
Б2023_27	17	67	16
В среднем	33	41	26

Также вблизи земной поверхности безразличная стратификация встречается реже устойчивой и неустойчивой, а с увеличением высоты измерений и усилением интенсивности ветрового перемешивания ее доля существенно повышается.

2.3. Динамика показателя степени в модели спектра температуры

За время наблюдения структурные функции (СФ) и спектры флуктуаций температуры значительно варьировались. В интервале пространствен-

ных разносов 0,3–3 м в подавляющем большинстве обработанных 20-минутных промежутков СФ хорошо описываются степенной моделью (6) с показателем $0 < \mu < 1$. В соответствующем интервале пространственных частот спектры также имеют степенной вид (7), но значения показателя распределены по более протяженному интервалу $0 < \mu < 2$. Отметим, что если значения ν попадают в промежуток $1,2 < \nu < 2$, то с хорошей точностью выполняется соотношение $\mu = \nu - 1$. При уменьшении ν показатель СФ насыщается на уровне $\mu \approx 0,1$ и линейная связь между показателями спектра и СФ пропадает.

По результатам всех измерений наблюдается подобие поведения показателей СФ и спектров для режимов устойчивой и неустойчивой стратификации.

В этих случаях имеет место линейная связь между μ и ν и могут реализовываться СФ и спектры, близкие к модели развитой турбулентности Колмогорова–Обухова с $\mu = 2/3$ ($\nu = 5/3$). Если сравнивать два режима стратификации с масштабами МО, отличающимися только знаком, то основным отличием СФ и спектров для этих режимов является амплитудный коэффициент (структурная характеристика), в то время как значения показателей степени достаточно близки. С увеличением по абсолютной величине масштаба МО показатели как СФ, так и спектра уменьшаются, причем последний может выходить из интервала $1,2 < \nu < 2$. Примеры СФ и спектров, демонстрирующие эти режимы, приведены на рис. 2.

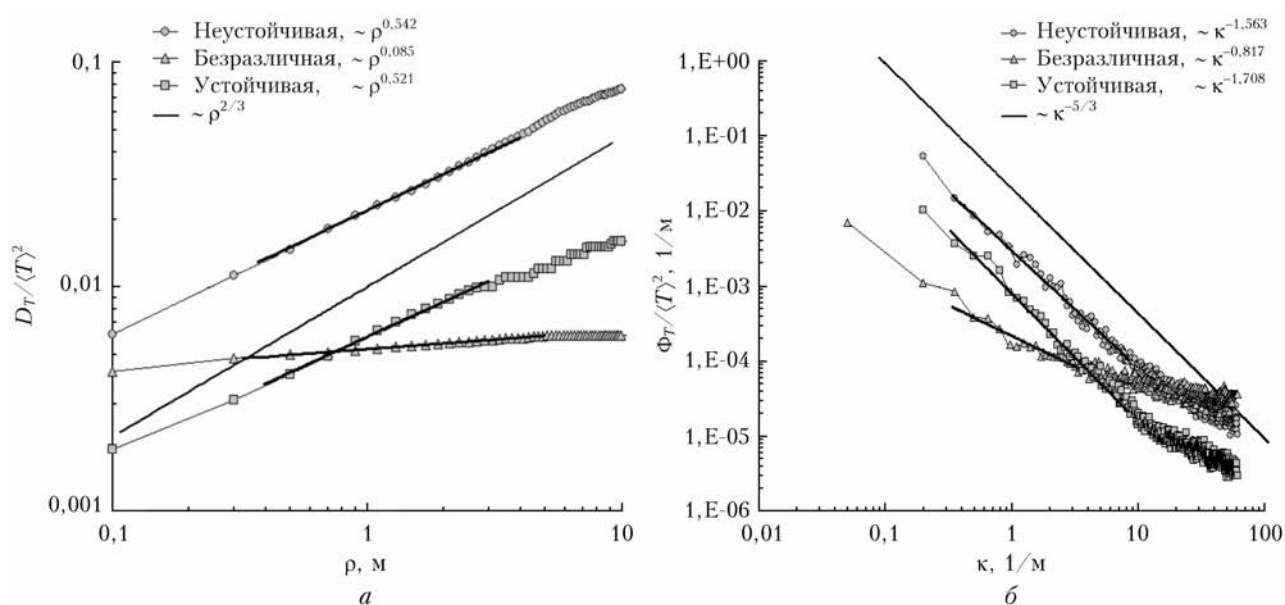


Рис. 2. Структурные функции (а) и спектры (б) флуктуаций температуры при разных типах стратификации; СФ и спектры рассчитаны по 20-минутным интервалам усреднения (измерения ИОА2020) в условиях неустойчивой ($L_1^* = -80$ м), безразличной ($L_1^* = -3650$ м) и устойчивой ($L_1^* = 18,2$ м) стратификации

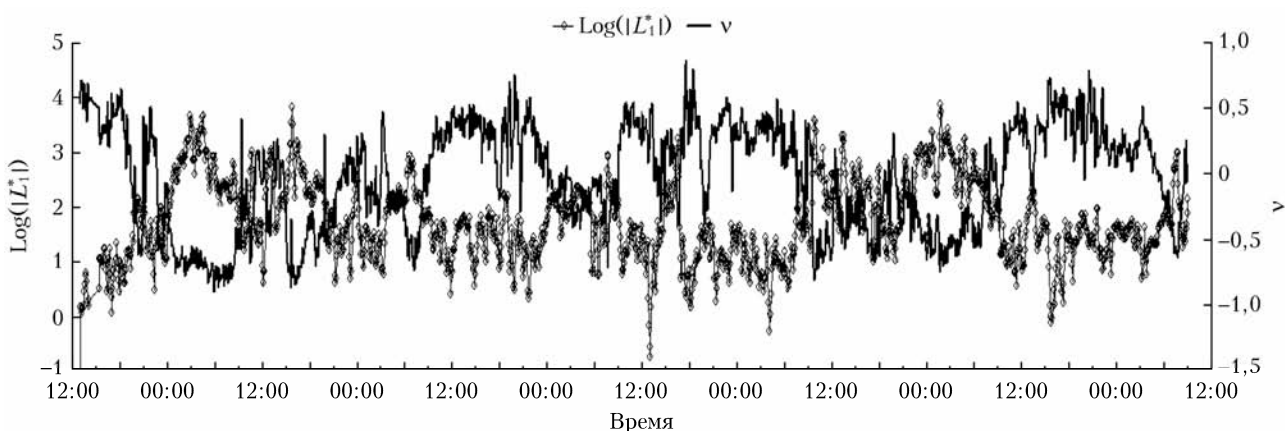


Рис. 3. Временная изменчивость логарифма модуля масштаба МО и показателя степени спектра флуктуаций температуры в эпизоде B2023_3

3. Зависимость показателя спектра температуры от стратификации

Поскольку поведение показателя спектра хорошо коррелирует с динамикой масштаба МО в логарифмическом масштабе, для аппроксимации возможной функциональной связи между этими характеристиками можно предложить модельную зависимость вида

$$\tilde{v}_{1,2} = a \lg(|\xi_{1,2}|) + b, \quad (10)$$

где $\xi_{1,2} = z/L_{1,2}^*$ — безразмерное число МО (индекс 1) и его аналог (индекс 2), учитывающий все компоненты турбулентных потоков. На рис. 4 для разных эпизодов измерений приведены временные ходы показателя v и модельных показателей $\tilde{v}_{1,2}$

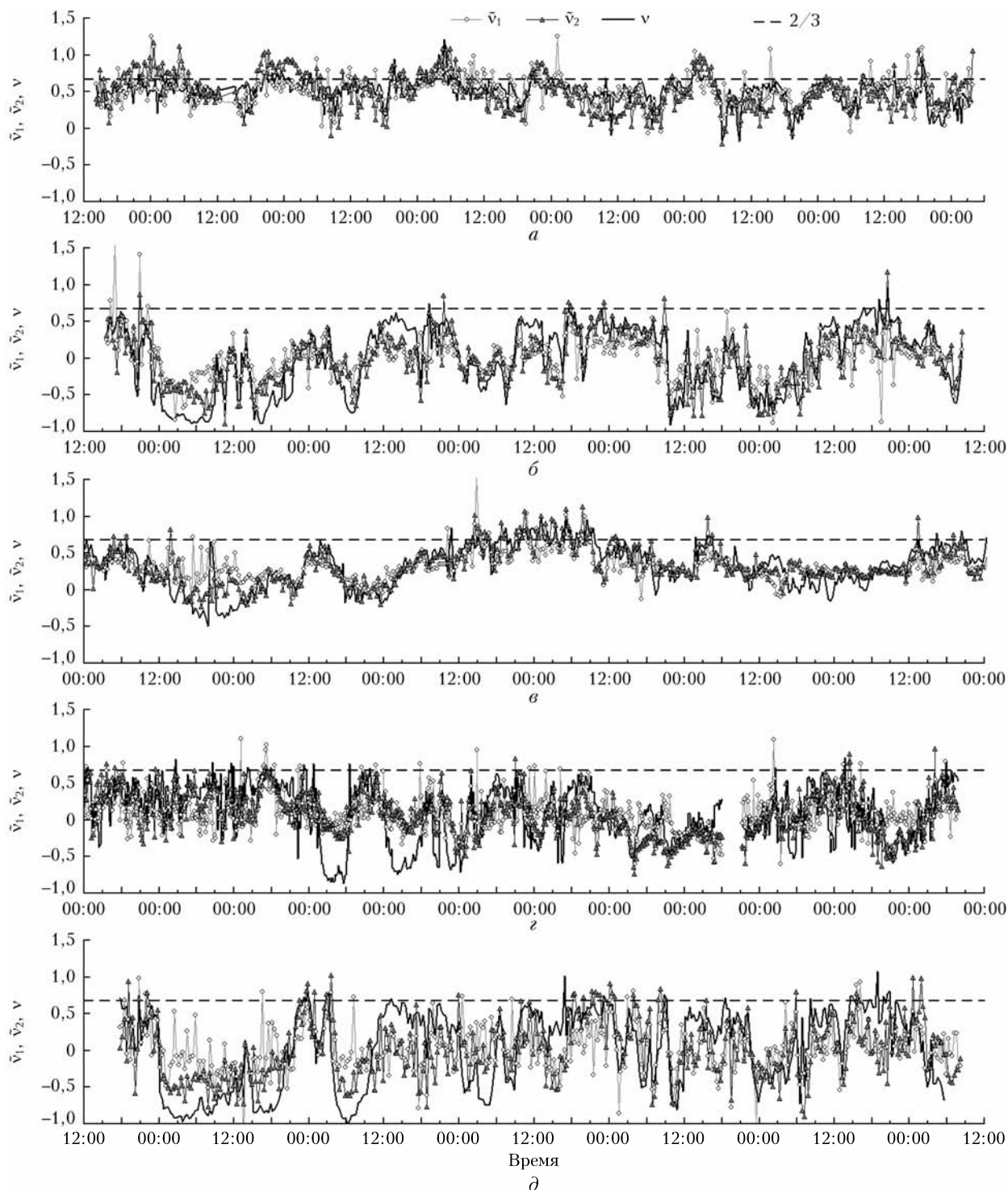


Рис. 4. Временная изменчивость модельного ряда $\tilde{v}_{1,2}$ и показателя степени спектра флуктуаций температуры v : а — эпизод БЭК2017_3; б — Б2023_3; в — ИОА2020_20; г — Б2020_27; д — Б2023_27

с коэффициентами a, b , обеспечивающими минимальное СКО их разности $\sigma_j = \sqrt{\langle (v - \tilde{v}_j)^2 \rangle}$. Рис. 4 демонстрирует хорошее соответствие динамики как для измерений на высоте 3 м вблизи поверхности (рис. 4, а, б), так и на высоте в несколько десятков метров (рис. 4, в, г, д).

В качестве количественных характеристик соответствия были рассчитаны коэффициенты корреляции $r_j = \frac{\langle (v - \langle v \rangle)(\tilde{v}_j - \langle \tilde{v}_j \rangle) \rangle}{\sqrt{\langle (v - \langle v \rangle)^2 \rangle \langle (\tilde{v}_j - \langle \tilde{v}_j \rangle)^2 \rangle}}$ и СКО σ_j временных рядов v и $\tilde{v}_{1,2}$. Данные, приведенные в табл. 3, демонстрируют наличие статистически значимой линейной связи.

Таблица 3
Количественные характеристики соответствия показателя v и модельной аппроксимации $\tilde{v}_{1,2}$ на основе оценки стратификации

Эпизод	r_1	r_2	σ_1	σ_2
БЭК2017	0,45	0,53	0,18	0,22
ИОА2020	0,63	0,79	0,22	0,17
Б2020	0,41	0,70	0,43	0,34
Б2023_3	0,65	0,79	0,35	0,28
Б2023_27	0,34	0,60	0,51	0,43

Отметим, что коэффициенты корреляции r_2 для рядов v и $\tilde{v}_2$ заметно больше, чем r_1 для рядов v и $\tilde{v}_1$. Можно заключить, что в модельной зависимости показателя от стратификации (при линейной аппроксимации по формуле (10)) предпочтительнее использовать масштаб L_2^* , т.е. учитывать все компоненты турбулентных потоков, а не только их вертикальные проекции, как в L_1^* . Значения СКО σ_2 при этом также уменьшаются. Отметим, что достигнутые СКО близки к характерным значениям ошибки для оценки показателя [10], что также свидетельствует в пользу применимости предложенной модельной зависимости (10).

Заключение

На основе статистического анализа экспериментальных данных продемонстрировано наличие линейной связи между показателем степени турбулентных спектров флуктуаций температуры и логарифмом модуля числа Монина–Обухова. Из анализа массивов экспериментальных данных, полученных в разное время года при различном характере окружающей местности и на разных высотах в приземном слое, выявлено, что спектры (и структурные функции) температуры при устойчивой и неустойчивой стратификации подобны по показателю степени, различаясь лишь амплитудным коэффициентом. Можно заключить, что на значение показателя в основном влияет не направление турбулентного потока тепла, а его абсолютная величина.

Показатели, наиболее близкие к значению, предсказываемому моделью развитой турбулентно-

сти Колмогорова–Обухова, чаще всего наблюдаются в условиях устойчивой и неустойчивой стратификации. В случае безразличной стратификации показатели уменьшаются, причем в ряде случаев на временных интервалах порядка нескольких часов наблюдается различная динамика показателей спектров и структурных функций. При существенном увеличении модуля масштаба Монина–Обухова (безразличная стратификация) происходит насыщение показателя СФ на уровне $\sim 0,1$ (в отличие от показателя спектра), вследствие чего в целом динамика показателя спектра более соответствует динамике стратификации. Коэффициент корреляции временных рядов логарифма модуля числа Монина–Обухова и показателя спектров температуры лежит в основном в интервале 0,4–0,7. Корреляция заметно возрастает (до значений 0,6–0,8) при учете всех трех компонент турбулентных потоков тепла и импульса (число ξ_2). По-видимому, расчет на основе полных турбулентных потоков дает лучшие результаты при нарушении условий горизонтальной изотропности приземного слоя.

В результате проведенного исследования получена эмпирическая модель зависимости показателей спектров и структурных функций от параметра устойчивости приземного слоя ξ_1 или его аналога ξ_2 . Модель позволяет на основе оценок стратификации судить об изменениях параметров спектральной структуры мелкомасштабной турбулентности.

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания ИОА СО РАН.

Список литературы

1. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. М.: Наука, 1965. Ч. I. 640 с.
2. Бызова Н.Л., Иванов В.Н., Гаргер Е.К. Турбулентность в пограничном слое атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 263 с.
3. Носов В.В., Лукин В.П., Ковадло П.Г., Носов Е.В., Торгаев А.В. Оптические свойства турбулентности в горном пограничном слое атмосферы. Н.: Изд-во СО РАН, 2016. 153 с.
4. Zilitinkevich S., Kadantsev E., Repina I., Mortikov E., Glazunov A. Order out of chaos: Shifting paradigm of convective turbulence // J. Atmos. Sci. 2021. V. 78. P. 3925–3932. DOI: 10.1175/JAS-D-21-0013.1.
5. Stull R.B. An Introduction to Boundary Layer Meteorology. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988. 670 p.
6. Banerjee T., Katul G.G., Salesky S.T., Chamecki M. Revisiting the formulations for the longitudinal velocity variance in the unstable atmospheric surface layer // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2014. V. 141, N 690. P. 1699–1711. DOI: 10.1002/qj.2472.
7. Toselli I., Gladysz S. On the general equivalence of the Fried parameter and coherence radius for non-Kolmogorov and oceanic turbulence // OSA Continuum. 2019. V. 2. P. 43–48. DOI: 10.1364/OSAC.2.000043.
8. Tan L., Du W., Ma J., Yu S., Han Q. Log-amplitude variance for a Gaussian-beam wave propagating through non-Kolmogorov turbulence // Opt. Express. 2010. V. 18, N 2. P. 451–462. DOI: 10.1364/OE.18.000451.

9. Носов В.В., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Торгаев А.В. Атмосферная когерентная турбулентность // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 9. С. 753–759; Nosov V.V., Kovadlo P.G., Lukin V.P., Torgaev A.V. Atmospheric coherent turbulence // Atmos. Ocean. Opt. 2013. V. 26, N 3. P. 201–206.
10. Маракасов Д.А., Афанасьев А.Л., Гордеев Е.В. Оценка параметров инерционного интервала турбулентного спектра температуры из временных рядов данных акустических метеостанций // Оптика атмосф. и океана. 2024. Т. 37, № 3. С. 254–261. DOI: 10.15372/AOO20240309.
11. Азбукин А.А., Богусевич А.Я., Ильичевский В.С., Корольков В.А., Тихомиров А.А., Щелевой В.Д. Автоматизированный ультразвуковой метеорологический комплекс АМК-03 // Метеорол. и гидролог. 2006. № 11. С. 89–98.
12. Репина И.А. Экспериментальные исследования взаимодействия атмосферы и океана в нестационарных условиях: дис. ... д.ф.-м.н. М., 2011. 358 с.
13. Гладких В.А., Мамышев В.П., Невзорова И.В., Одинцов С.Л. Зависимость скорости трения от скорости ветра в приземном слое атмосферы // Оптика атмосф. и океана. 2021. Т. 34, № 6. С. 453–457. DOI: 10.15372/AOO20210611; Gladkikh V.A., Mamyshov V.P., Nevzorova I.V., Odintsov S.L. Dependence of the friction speed on the wind speed in the surface air layer // Atmos. Ocean. Opt. 2021. V. 34, N 5. P. 507–512.
14. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967. 548 с.
15. Исмаири А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. М.: Мир, 1981. Т. 2. 320 с.

D.A. Marakasov, A.L. Afanasiev, E.V. Gordeev. Spectral composition of temperature turbulence for various stratification types of the surface air layer.

The parameters of the spectral model of small-scale turbulence are the most important characteristics used to describe the propagation of light and sound in the atmosphere. One of the determining factors affecting the spectral composition of turbulence is the stratification regime. Based on the processing of time series of fluctuations of meteorological parameters recorded by acoustic weather stations, the effect of stratification of the surface air layer on the deviations of the turbulence spectrum from the Kolmogorov–Obukhov model is investigated. When comparing the time dynamics of the stability characteristic (Monin–Obukhov number) and the index of the power model of the spectrum of temperature fluctuations, a significant correlation between them is established. An empirical model of the dependence of the spectrum index on the stability parameter is proposed. The model makes it possible to estimate changes in the parameters of the spectral structure of small-scale turbulence based on estimates of the magnitude and direction of turbulent heat and momentum fluxes. The dependence reflects the features of generation of temperature turbulence with different stratification in the surface layer. Information on turbulent spectral parameters obtained on the basis of estimation of stratification can be further used to solve problems of propagation, of optical and acoustic waves, as well as sounding of the atmosphere.