

Анализ производных в уравнениях гидротермодинамики атмосферы с использованием экспериментальных данных. Часть 1: Уравнение для температурного поля

В.А. Гладких¹, А.А. Мамышева¹, И.В. Невзорова¹,
С.Л. Одинцов^{✉ 1, 2*}

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

²Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Поступила в редакцию 25.05.2022 г.;
после доработки 20.07.2022 г.;
принята к печати 22.09.2022 г.

Анализируются производные по времени и пространственным координатам от произведений температуры воздуха и компонентов вектора ветра при их разложении на детерминированные, мезо-гамма-масштабные и турбулентные составляющие. Для анализа использовались экспериментальные данные, полученные в приземном слое атмосферы с помощью ультразвуковых анемометров-термометров. Проведены оценка величин и диапазонов изменения производных, содержащих вариации полей температуры и ветра мезо-гамма-масштаба, а также их сравнение с производными от компонентов, включающих только турбулентные составляющие.

Ключевые слова: ветер, мезо-гамма-масштаб, приземный слой, серая зона, температура, турбулентность; wind, meso-gamma scale, surface layer, gray zone, temperature, turbulence.

Введение

Совершенствование методов, алгоритмов и программ моделирования (прогноза) состояния пограничного слоя атмосферы включает решение задач с высоким пространственно-временным разрешением (см., например, [1–4] и обзоры литературы в них). Это подразумевает, в частности, необходимость корректного учета процессов пространственными масштабами от нескольких сот метров до нескольких километров. Такие масштабы относят к «серой зоне» (gray zone) и в последнее время достаточно активно изучают [5–8]. Существенной проблемой при этом является, на наш взгляд, недостаточность эмпирических данных как о самих процессах такого масштаба, так и о том, какое они оказывают влияние на итоговые решения дифференциальных уравнений гидротермодинамики атмосферы. Публикаций, связанных с результатами лабораторных или натуральных исследований «серой зоны» [9–13], к сожалению, не достаточно.

* Владимир Александрович Гладких (glvl@iao.ru); Алина Александровна Мамышева (alina434@iao.ru); Ирина Витальевна Невзорова (nevzorova@iao.ru); Сергей Леонидович Одинцов (odintsov@iao.ru).

Основная цель настоящей работы – оценить производные по времени и по пространственным координатам входящих в уравнения гидротермодинамики величин с использованием эмпирических данных о температуре воздуха и компонентах вектора ветра в приземном слое атмосферы. Это позволит сформировать представление, с какими величинами приходится иметь дело при реализации вычислительных алгоритмов. По аналогии, например, с подходом, используемым в [2, 9], будем полагать, что температура воздуха и компоненты вектора ветра разлагаются на три составляющие: детерминированную, мезо-гамма-масштабную и турбулентную. Здесь мы используем термин «мезо-гамма-масштаб» для пространственных масштабов от нескольких сот метров до нескольких километров. Однако если принять во внимание классификацию масштабов, используемую в литературе (см., например, [1]), то фактически этот термин будет содержать в себе масштабы начиная с микро-бета (масштаб от нескольких десятков до нескольких сот метров при «времени жизни» от 1 до 30 мин). В дальнейшем для упрощения изложения используется только термин «мезо-гамма-масштаб». Отметим, что турбулентная часть вариаций метеорологических параметров относится к микро-гамма-масштабу.

Исходные уравнения

Исходными для анализа являются уравнения движения и уравнение теплопроводности. Запишем уравнения движения в виде [14]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tilde{u}_i \tilde{u}_j) = \\ = -\frac{1}{\bar{\rho}} \cdot \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \tilde{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} + g_i - 2\varepsilon_{ijk} \Omega_j \tilde{u}_k, \end{aligned} \quad (1)$$

где \tilde{u}_i — компоненты вектора ветра в декартовой системе координат x_i ($i, j = 1, 2, 3$); \bar{p} и $\bar{\rho}$ — атмосферное давление и плотность воздуха соответственно; ν — коэффициент кинематической вязкости воздуха; $g_i = (0, 0, -g)$ — ускорение силы тяжести; Ω_j — компоненты вектора угловой скорости вращения Земли; ε_{ijk} — тензор подстановки. «Волна» над символами обозначает «исходное» значение величины. В дальнейшем будем рассматривать только левую часть системы уравнений (1). Предполагается, что $\tilde{u}_i(t) = U_i(t) + \bar{U}_i(t) + u_i(t)$, где U_i — составляющая синоптического масштаба (детерминированная); \bar{U}_i — составляющая мезо-гамма-масштаба (будем также называть ее локальной); u_i — турбулентная составляющая. В итоге левую часть системы уравнений (1) можно переписать в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tilde{u}_i \tilde{u}_j) = \frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i}{\partial t} + \\ + \frac{\partial}{\partial x_j} \{U_i U_j + U_i \bar{U}_j + U_i u_j + \bar{U}_i U_j + \bar{U}_i \bar{U}_j + \\ + \bar{U}_i u_j + u_i U_j + u_i \bar{U}_j + u_i u_j\}. \end{aligned} \quad (2)$$

Наша основная задача состоит в оценке частных производных по времени ($\partial/\partial t$) и пространственным координатам ($\partial/\partial x_j$) с целью выяснить необходимость учета вариаций поля ветра мезо-гамма-масштаба. Перед этим сделаем переход от «стационарной» (не зависящей от времени) системы координат к «сопровождающей», связанной со средним направлением ветра за некоторый интервал времени. Более детально такой переход описан в [15, 16]. При таком переходе в рассмотрение вводятся продольный $\tilde{u}_1 = U + \bar{U} + u'$ (ось x_1), поперечный $\tilde{u}_2 = V + \bar{V} + v'$ (ось x_2) и вертикальный $\tilde{u}_3 = W + \bar{W} + w'$ (ось x_3) компоненты вектора ветра с разделением на детерминированную, локальную и турбулентную составляющие соответственно.

Подробный анализ производных, входящих в соотношение (2), будет проведен во второй части статьи. Сейчас уделим основное внимание уравнению эволюции температурного поля для сухого воздуха [14]:

$$\frac{\partial \tilde{T}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\tilde{T} \tilde{u}_i) = k \frac{\partial^2 \tilde{T}}{\partial x_i^2} - \frac{1}{\bar{\rho} c_p} \cdot \frac{\partial R_i}{\partial x_i}, \quad (3)$$

где \tilde{T} — температура воздуха, К; k — его молекулярная теплопроводность; $c_p = 1006$ —

удельная теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(кг·К); R_i — i -я составляющая радиационного баланса. На данном этапе нас интересует только левая часть уравнения (3), поэтому правую часть (3) детально анализировать не будем.

Разложим температуру \tilde{T} на детерминированную (T), локальную (\bar{T}) и турбулентную (T') составляющие: $\tilde{T} = T + \bar{T} + T'$. Предположим, что действует «сопровождающая» система координат, для которой компоненты вектора ветра (продольный, поперечные и вертикальный) заданы ранее и также разлагаются на три аналогичных масштаба. Распишем более подробно левую часть (3) с учетом введенных предположений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\tilde{T} \tilde{u}_i) = \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \frac{\partial T'}{\partial t} + \\ + \frac{\partial}{\partial x_1} [TU + T\bar{U} + Tu' + \bar{T}U + \bar{T}\bar{U} + \bar{T}u' + T'U + T'\bar{U} + T'u'] + \\ + \frac{\partial}{\partial x_2} [TV + T\bar{V} + Tv' + \bar{T}V + \bar{T}\bar{V} + \bar{T}v' + T'V + T'\bar{V} + T'v'] + \\ + \frac{\partial}{\partial x_3} [TW + T\bar{W} + Tw' + \bar{T}W + \bar{T}\bar{W} + \\ + \bar{T}w' + T'W + T'\bar{W} + T'w']. \end{aligned} \quad (4)$$

Оценим входящие в (4) производные по времени и по пространственным координатам. Предварительно отметим, что в публикации [17] сделаны оценки смешанных моментов, входящих в квадратные скобки соотношения (4), при осреднении их за некоторый интервал времени (10 и 60 мин). Установлено, что смешанные моменты с компонентами вида « \bar{F} » по величинам могут быть сопоставимы и даже превышать смешанные моменты, связанные только с турбулентными пульсациями полей температуры и ветра, которые используются при «классическом» решении уравнения (3). Одной из целей нашей работы при анализе производных являлась оценка важности учета производных с компонентами « \bar{F} », смешанные моменты которых были сравнимы со смешанными моментами турбулентных составляющих.

Методика расчетов и использованный экспериментальный материал

Применим далее следующий подход для вычисления производных. В продольном направлении (по оси x_1) производную по x_1 от некоторой функции $Y(t, x_1)$ заменим на производную по времени исходя из предположения, что в «сопровождающей» системе координат $\partial Y/\partial x_1 \approx U^{-1}(t) \partial Y/\partial t \approx \approx U^{-1}(t)[Y(t + \delta t) - Y(t)]/\delta t$, где δt — шаг по времени.

Будем полагать, что в поперечном направлении (по оси x_2) перенос отсутствует и производные по x_2 равны нулю. Это предположение может вносить некоторые ошибки в итоговые результаты, но сейчас мы ими пренебрегаем.

В вертикальном направлении при оценках производных $\partial/\partial x_3$ будем использовать измерения на уровнях 5 и 10 м. Производная $Y(t, x_i)$ по координате x_3 рассчитывается по формуле $\partial Y(t)/\partial x_3 \approx [Y(t, 10) - Y(t, 5)]/5$.

Экспериментальный материал для анализа был получен ультразвуковыми анемометрами-термометрами [18], измерявшими 10 раз в секунду компоненты вектора ветра в «стационарной» системе координат (в вертикальном, меридиональном и широтном направлениях), а также температуру воздуха. Измерения проводились на территории Базового экспериментального комплекса (БЭК) ИОА СО РАН вблизи г. Томска (ровная поляна большой площади). Краткое описание пункта приведено в [19]. Результаты получены в январе, феврале, мае, августе и октябре 2021 г.

На основе экспериментальных данных, измеренных на высоте 10 м, определялось «скользящее» среднее направления ветра за промежуток времени $\Delta t = 30$ мин с последующим вычислением продольных и поперечных компонент вектора ветра. Полученные выборки подвергались цифровой фильтрации с помощью фильтра высоких частот (ФВЧ) с граничным значением 2 мин (0,00833 Гц), полосового фильтра (ПФ) с границами 2–60 мин (0,00833–0,000278 Гц) и фильтра низких частот (ФНЧ) с границей 60 мин (0,000278 Гц). Такая фильтрация обеспечивала разделение исследуемых параметров на турбулентную (ФВЧ), мезо-гамма-масштабную (ПФ) и детерминированную (ФНЧ) составляющие. Границы фильтров были заданы в соответствии с ранее проведенными исследованиями [20, 21]. Подобные фильтры были применены нами и в работе [22]. Естественно, что более эффективным было бы задание индивидуальных границ фильтров для температуры, компонентов ветра, однако на данном этапе работы было принято решение для всех параметров использовать один набор цифровых фильтров.

При численных оценках величины, входящие под знаки производных, предварительно усреднялись за 1 с. Напомним, что исходные экспериментальные данные были получены с периодом 0,1 с. Понятно, что оценки производных по осредненным выборкам будут более сглаженными по сравнению с производными, полученными без предварительного осреднения. Однако мы предположили, что осреднение, во-первых, уменьшает влияние возможных неконтролируемых погрешностей при измерениях и, во-вторых, существенно снижает объем итоговых данных, что является важным при обработке длинных рядов наблюдений и большого количества величин.

Как показал предварительный анализ, изменения в результатах вычисления производных, возникающие после применения предварительного осреднения, заметны только в тех случаях, когда дифференцируются величины, содержащие комбинации турбулентных компонентов. При этом общие закономерности, характерные для производных от этих комбинаций, полностью сохраняются. По-

этому мы сочли оправданным провести оценки производных по предварительно осредненным данным с $\delta t = 1$ с.

Результаты расчетов

С учетом предположения о нулевых значениях частных производных по координате x_2 представим соотношение (4) в форме

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\tilde{T} \tilde{u}_i) &\approx \frac{1}{\partial t} + \frac{2}{\partial t} + \frac{3}{\partial t} + \\ + \frac{\partial}{\partial x_1} &\left[\frac{4}{TU} + \frac{5}{T\tilde{U}} + \frac{6}{T\tilde{u}'} + \frac{7}{T\tilde{U}} + \frac{8}{T\tilde{U}} + \frac{9}{T\tilde{u}'} + \frac{10}{T\tilde{U}} + \frac{11}{T\tilde{U}} + \frac{12}{T\tilde{u}'} \right] + \\ + \frac{\partial}{\partial x_3} &\left[\frac{13}{T\tilde{W}} + \frac{14}{T\tilde{W}} + \frac{15}{T\tilde{w}'} + \frac{16}{T\tilde{W}} + \frac{17}{T\tilde{W}} + \frac{18}{T\tilde{w}'} + \right. \\ &\left. + \frac{19}{T\tilde{W}} + \frac{20}{T\tilde{W}} + \frac{21}{T\tilde{w}'} \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

Каждое слагаемое (производная) в этом соотношении пронумеровано для упрощения последующих иллюстраций. Напомним, что в приближении Рейнольдса, когда учитываются только детерминированные и турбулентные изменения температуры и компонентов ветра, все слагаемые, содержащие величины вида « \tilde{F} », из этого соотношения исключаются. То есть при «классическом» подходе в анализ включаются только производные № 1, 3, 4, 6, 10, 12, 13, 15, 19, 21.

Согласно соотношению (5) необходимо сравнить между собой 21 производную. Как уже указывалось ранее, основной задачей являлась оценка важности учета при решении исходных уравнений (1), (3) величин, содержащих мезо-гамма-масштабные вариации полей температуры и ветра (« \tilde{F} »). Наиболее эффективным инструментом для решения этой задачи мы сочли сравнение интегральных функций распределения (ИФР) производных. Сравнение диапазонов изменения ИФР производных позволяет сделать вывод о важности (необходимости) их учета. В частности, мы предполагаем, что если «ширина» диапазона ИФР какой-либо производной сопоставима или превышает «ширину» диапазона ИФР производных от произведений $T'u'$ и $T'w'$, то эта производная должна включаться в анализ.

Прежде чем перейти к изложению полученных результатов, сделаем некоторое разъяснение относительно производных по пространственным координатам от произведений, содержащих детерминированную температуру T . Напомним, что в исходном уравнении (3) температура \tilde{T} измеряется в градусах Кельвина. Это означает, что диапазон ИФР производных по пространственным координатам от смешанных моментов вида $T\tilde{u}_{1,3}$, входящих в (5), будет существенно превышать диапазон ИФР производных от $\tilde{T}\tilde{u}_{1,3}$ и $T\tilde{u}_{1,3}$. Исключение составляют

производные по координате x_3 от комбинаций $\bar{T}W$, где детерминированная составляющая вертикального ветра W в пункте наблюдения БЭК близка к нулю (отсутствуют какие-либо регулярные вертикальные движения). Кроме того, производная по координате x_1 от произведения TU также будет небольшой (но сравнимой по диапазону ИФР с другими производными), поскольку изменения U и T достаточно медленные. Понятно также, что значения составляющих \bar{T} и T' существенно меньше T .

Приступая непосредственно к изложению результатов, приведем примеры величин, формирующих компоненты соотношения (5). В частности, на рис. 1 показаны вариации температуры воздуха (разных масштабов) на высоте 10 м в период 5–13 октября 2021 г. В правой колонке графиков приведены соответствующие производные по времени с указанием номера, проставленного в соотношении (5). Кроме того, на рис. 1, ж приведены ИФР этих производных (оценки ИФР сделаны именно по этому периоду). Представленные результаты позволяют оценить в общих чертах диапазоны вариаций температурного поля разных масштабов и производных по времени от них. Это полезно для сопоставления с производными по пространственным координатам, входящими в соотношение (5) и являющимися основной целью нашего анализа.

Поскольку пространственные производные, входящие в (5), берутся от смешанных моментов температуры с продольным и вертикальным ветром, приведем примеры вариаций этих компонентов. На рис. 2, а, б показаны графики скорости и направления (азимут, откуда дует ветер) детерминированной составляющей продольного ветра U , а на рис. 2, в–е – локальные (\bar{U} и \bar{W}) и турбулентные (u' и w') составляющие продольного и вертикального ветра. Детерминированная составляющая вертикальной скорости W в измерениях всегда была близка к нулю и на рисунке не приводится. Эпизод, представленный на рис. 2, характерен, во-первых, заметным различием детерминированной скорости U на разных интервалах времени (рис. 2, а), а во-вторых – существенными изменениями среднего направления ветра (рис. 2, б).

Продемонстрировав поведение ключевых параметров, формирующих смешанные моменты, обратимся непосредственно к оценкам пространственных производных. Рассмотрим вначале производные по координате x_1 (№ 4–12). Напомним, что в расчетах этих производных использовалось приближение $\partial/\partial x_1 \approx U^{-1}\partial/\partial t$. На рис. 3 приведены графики производных (обобщенно обозначим как Y) от произведений, содержащих детерминированную температуру T , т.е. производных № 4–6 в соотношении (5). В правой колонке рис. 3 представлены ИФР этих производных, а также некоторые статистические характеристики обработанных выборок. В частности, средние и медианные значения Y , значения Y , соответствующие первому ($Q_1 = 25\%$) и третьему ($Q_3 = 75\%$) квартилям, разность значений Y для этих квартилей $\delta Q = Y(Q_3) - Y(Q_1)$, ИФР на уровнях 5% ($P5$) и 95% ($P95$), а также

величина («ширина») диапазона $\delta P = Y(P95) - Y(P5)$ (К/с). В дальнейшем именно величину δP мы будем считать «шириной» диапазона ИФР. Исключение из анализа производных, величины которых меньше 5% и больше 95% их ИФР, обусловлено стремлением избавиться от данных, которые могут быть связаны как с техническими ошибками, так и с нетипичными ситуациями («выбросами»).

Представленные на рис. 3, в, д результаты, содержащие большие (по абсолютным величинам) значения производных, можно дополнительно прокомментировать, если преобразовать эти производные:

$$\text{№ 5} \Rightarrow \frac{\partial(T\bar{U})}{\partial x_1} = \bar{U} \frac{\partial T}{\partial x_1} + T \frac{\partial \bar{U}}{\partial x_1} \approx U^{-1} \left(\bar{U} \frac{\partial T}{\partial t} + T \frac{\partial \bar{U}}{\partial t} \right), \quad (6)$$

$$\text{№ 6} \Rightarrow \frac{\partial(Tu')}{\partial x_1} = u' \frac{\partial T}{\partial x_1} + T \frac{\partial u'}{\partial x_1} \approx U^{-1} \left(u' \frac{\partial T}{\partial t} + T \frac{\partial u'}{\partial t} \right). \quad (7)$$

Согласно результатам, приведенным на рис. 1, б, производные $\partial T/\partial t$ имеют небольшие (по модулю) значения. Стоящие перед ними множители \bar{U} и u' в (6), (7), согласно рис. 2, в, д, также имеют небольшие значения. Это приводит и к небольшим (по модулю) значениям первых слагаемых в круглых скобках в (6) и (7). В свою очередь, производные по времени от \bar{U} и u' изменяются в широких пределах. Без дополнительных графических иллюстраций укажем, что в рассматриваемом эпизоде «ширина» диапазона ИФР производной по времени от \bar{U} составляет $\delta P \approx 0,052$, а производной от u' – $\delta P \approx 1,186$. Понятно, что умножение этих производных на детерминированную температуру T порядка 265–285 К (см. рис. 1, а) может приводить к большим (по модулю) значениям производных № 5 и 6.

Рассмотрим теперь производные по вертикальной координате x_3 (№ 13–21). Напомним, что эти производные оценивались с помощью приближенного соотношения $\partial Y(t)/\partial x_3 \approx [Y(t, 10) - Y(t, 5)]/5$ (по измерениям на 5 и 10 м). Очевидно, что общее поведение метеорологических параметров на высоте 5 м будет подобно их поведению на высоте 10 м, которое представлено на рис. 1, 2. Поэтому каких-либо дополнительных иллюстраций для температуры воздуха и компонентов вектора ветра на высоте 5 м приводить не будем. Ограничимся только сравнением δP диапазонов ИФР производных по x_3 . Исключаем при этом из рассмотрения производные № 13, 16, 19, поскольку они содержат нулевые значения W . Результат сравнения представлен на рис. 4, на котором даны величины δP производных по времени (№ 1–3), по координатам x_1 (№ 4–12) и x_3 (№ 14, 15, 20, 21). Обратим внимание на то, что значения δP производных № 14 и 15 сравнимы с δP производных № 5 и 6 и существенно больше δP других производных. Это связано с присутствием в произведениях $T\bar{W}$ и Tw' , от которых берутся соответствующие производные, детерминированной температуры T в Кельвинах и может быть объяснено с помощью преобразований, подобных (6) и (7).

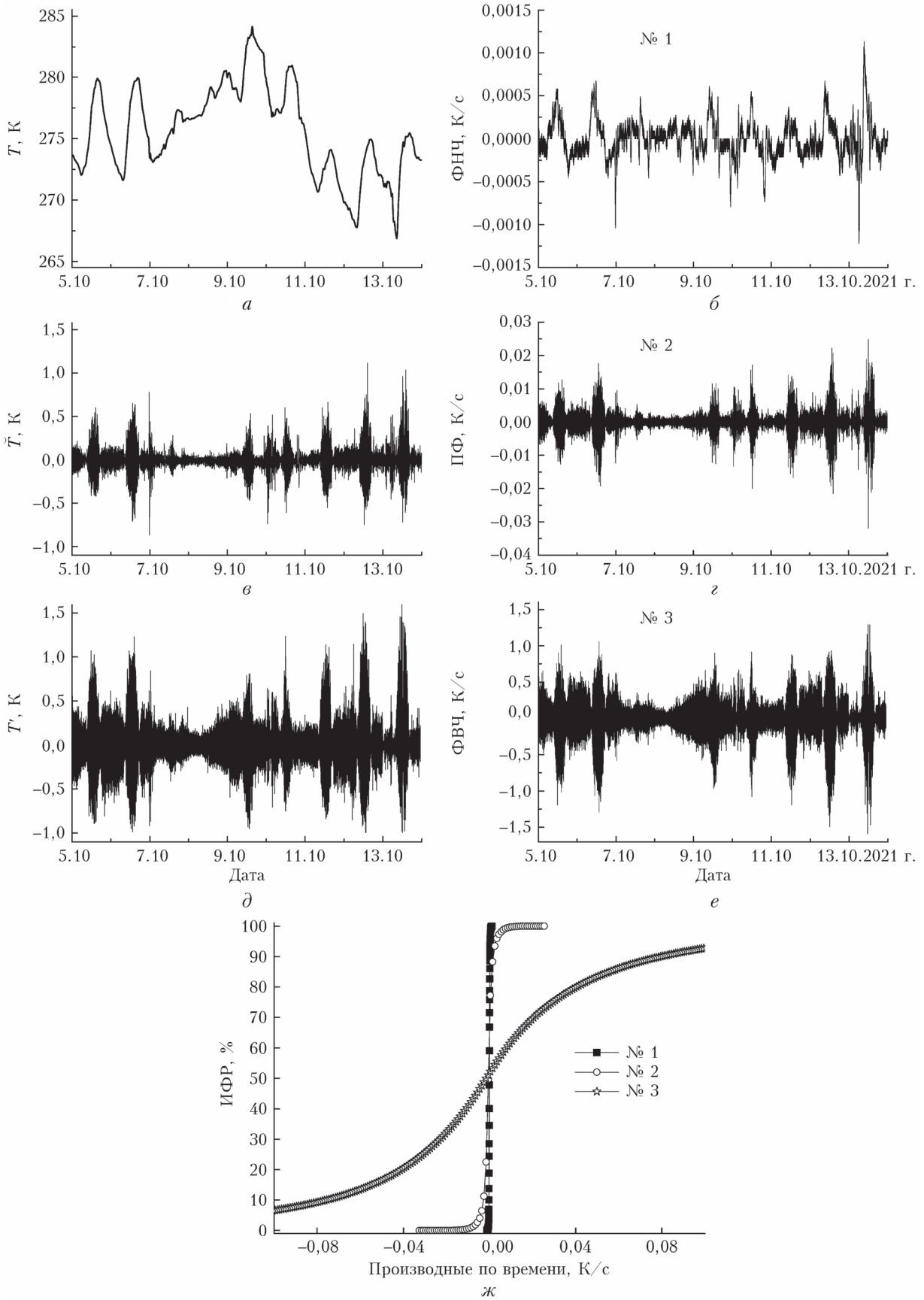


Рис. 1. Изменения температуры воздуха разных масштабов (а, в, д) и их производные по времени (б, г, е); ИФР этих производных (ж)

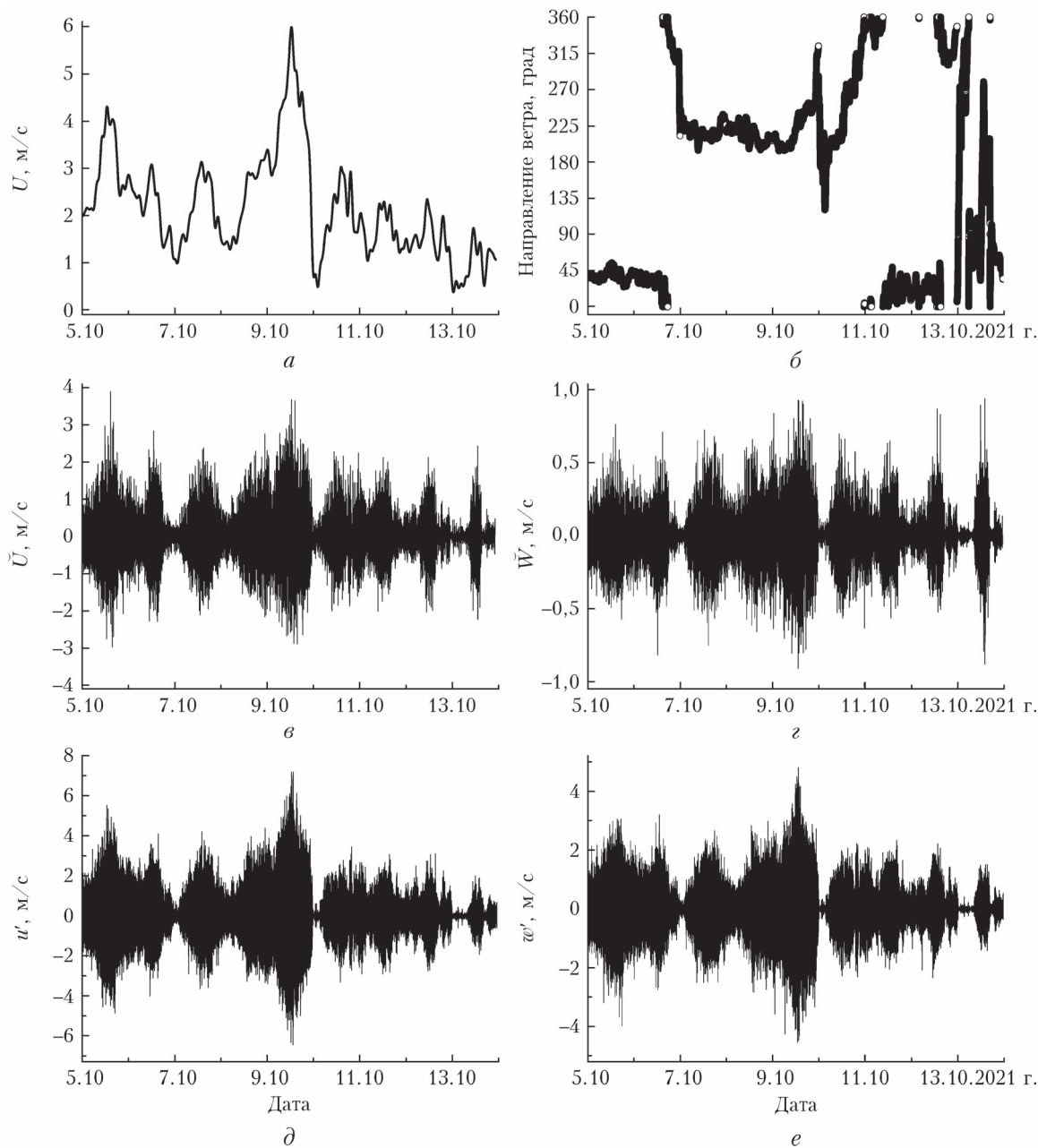


Рис. 2. Компоненты вектора ветра в продольном (а, в, д) и вертикальном (з, е) направлениях; азимут направления ветра (б)

Приведенные на рис. 4 результаты позволяют сделать предварительное заключение о том, что введенные в рассмотрение мезо-гамма-масштабы изменений температуры воздуха и компонентов вектора ветра (\bar{T} , \bar{U} , \bar{W}) могут заметно влиять на формирование поля температуры. Обратим внимание на то, что диапазоны δP вариаций производных от смешанных моментов $\bar{T}\bar{U}$ (№ 8) и $\bar{T}\bar{W}$ (№ 17) существенно меньше, чем диапазоны δP «классических» производных от $T'u'$ (№ 12) и $T'w'$ (№ 21), хотя сами произведения $\bar{T}\bar{U}$ и $\bar{T}\bar{W}$ могут быть сопоставимы по величинам с произведениями $T'u'$ и $T'w'$, как это было показано в [22].

Естественно, возникает вопрос о том, насколько типичны результаты, полученные за относительно короткий осенний период (рис. 4). Для ответа на этот вопрос были проведены расчеты производных, входящих в соотношение (5), для разных сезонов 2021 г. в пункте БЭК: январь, февраль, май, август и октябрь (полные месяцы). Как и ранее, будем полагать, что наиболее эффективным параметром таких сравнений является δP . В таблице приведены оценки δP для указанных месяцев в пункте БЭК.

Согласно таблице, «ширина» δP ИФР той или иной производной в пункте БЭК несколько изменяется в зависимости от сезона года, но в целом по-

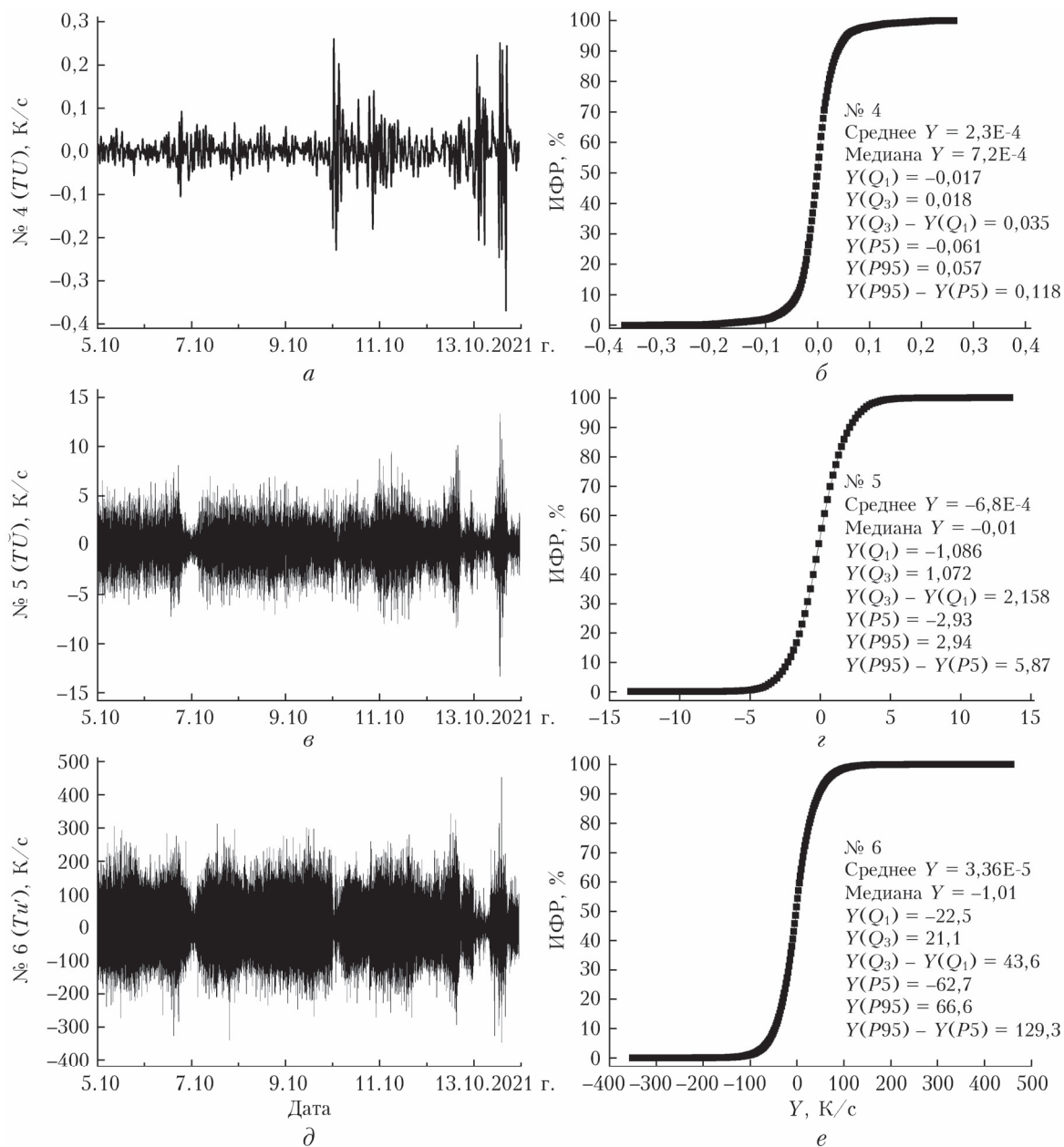


Рис. 3. Производные по координате x_1 от произведений, содержащих детерминированную температуру (а, в, д), и ИФР этих производных (б, г, е)

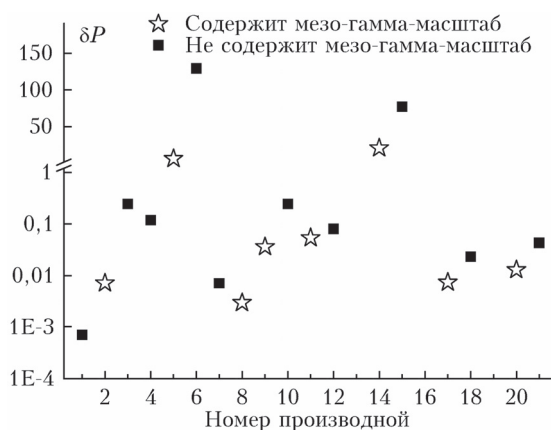


Рис. 4. «Ширина» диапазонов изменения производных

рядок ее величины остается прежним. Отметим лишь, что зимой (январь, февраль) практически все величины δP немного меньше, чем в теплое время года.

В период с 5 по 16 июня 2021 г. у нас была возможность провести одновременные измерения метеорологических параметров на уровнях 5 и 10 м в пункте с естественным ландшафтом, расположенном на берегу р. Оби (территория обсерватории «Фоновая» ИОА СО РАН [19]). Результаты оценок δP для этого пункта приведены в последней колонке таблицы. Если сравнить эти данные с оценками для пункта БЭК, то можно сделать вывод, что диапазон изменения многих производных в пункте «Фоновая» несколько больше (примерно в 2–3 раза), чем в пункте БЭК, хотя порядок величин δP остается прежним.

Значения δP , измеренные в пункте БЭК и на территории обсерватории «Фоновая» в 2021 г.

Номер производной (по координате)	Параметр	БЭК					«Фоновая»
		Январь	Февраль	Май	Август	Октябрь	5–16.06
1 (t)	T	0,0007	0,0008	0,0012	0,0011	0,0008	0,0013
2 (t)	\bar{T}	0,0046	0,0052	0,0127	0,0091	0,0068	0,0184
3 (t)	T'	0,1662	0,1794	0,3542	0,2393	0,2327	0,4103
4 (x_1)	TU	0,1062	0,0935	0,1537	0,2053	0,1271	0,1903
5 (x_1)	$T\bar{U}$	4,1	4,32	6,02	6,29	5,44	7,59
6 (x_1)	Tu'	97,8	102,6	135,7	129,2	119,9	153,7
7 (x_1)	$\bar{T}U$	0,0046	0,0052	0,0127	0,0091	0,0068	0,0184
8 (x_1)	$\bar{T}\bar{U}$	0,0022	0,0018	0,0059	0,0049	0,0028	0,0090
9 (x_1)	$\bar{T}u'$	0,0415	0,0293	0,074	0,0567	0,0348	0,1025
10 (x_1)	$T'U$	0,1662	0,1794	0,3542	0,2393	0,2327	0,4103
11 (x_1)	$T'\bar{U}$	0,0282	0,0311	0,0822	0,0613	0,0482	0,1150
12 (x_1)	$T'u'$	0,0420	0,0458	0,1162	0,0766	0,0690	0,1592
14 (x_3)	$T\bar{W}$	13,0	14,5	20,0	16,1	22,3	19,5
15 (x_3)	$T\bar{w}'$	57,4	63,9	78,7	54,1	77,3	64,3
17 (x_3)	$\bar{T}\bar{W}$	0,0054	0,0050	0,0150	0,0094	0,0073	0,0176
18 (x_3)	$\bar{T}\bar{w}'$	0,0185	0,0173	0,0485	0,0255	0,0210	0,0462
20 (x_3)	$T'\bar{W}$	0,0059	0,0072	0,0199	0,0119	0,0117	0,0242
21 (x_3)	$T'w'$	0,0271	0,0321	0,0705	0,0343	0,0384	0,0671

Заключение

Подводя итоги проделанной работы, можно сделать вывод, что для решения задач по моделированию и прогнозу состояния пограничного слоя атмосферы с высоким пространственно-временным разрешением, в частности для прогноза температурного поля, необходимо включение в анализ изменений температуры и ветра мезо-гамма-масштаба. Этот вывод сделан на основании результатов сравнения диапазонов изменения производных, входящих в левую часть уравнения (3) (или (4), или (5)) и содержащих вариации температуры и компонентов вектора ветра этого масштаба, с производными от смешанных моментов, содержащих только турбулентные составляющие температуры и ветра. Очевидно, что приведенные в статье результаты дают только общее представление о необходимости учета вариаций метеорологических параметров мезо-гамма-масштаба. Можно предположить, что в конкретных ситуациях (время суток, текущая стратификация, скорость и направление среднего ветра, высота над уровнем подстилающей поверхности и т.п.) влияние таких масштабов на общее поведение температурного поля может несколько отличаться. Но такой анализ не входил в круг наших задач на данном этапе работы. Мы также не рассматривали вероятность устойчивой противоположности знаков тех или иных производных, что должно уменьшать их влияние на изменение средней температуры воздуха.

Отметим, что в перспективе требуется уточнение характеристик ПФ, применяемых для выделения мезомасштабных вариаций температуры и ветра. В нашей работе мы использовали «фиксированную» полосу 2–60 мин/0,00833–0,000278 Гц как для температуры, так и для компонентов вектора ветра. Однако более корректным был бы подбор границ ПФ для каждого параметра отдельно. Это специальная задача, которая также может быть рассмотрена в дальнейшем.

Требует дополнительного обсуждения и процедура исключения из анализа производных по «поперечной» координате x_2 , которую мы применили при переходе от соотношения (4) к (5), предполагая, что по этой координате параметры не изменяются. Возможно, имеет смысл в перспективе включить эту производную в анализ, чтобы оценить поток тепла в поперечном направлении за счет мезомасштабных вариаций скорости и направления ветра.

Финансирование. Измерения проводились с использованием приборной базы Центра коллективного пользования «Атмосфера» ИОА СО РАН при финансовой поддержке РНФ (грант № 19-71-20042). Разработка методических аспектов исследований выполнена в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

Список литературы

1. Лыкоsov В.Н., Глазунов А.В., Кулямин Д.В., Мортников Е.В., Степаненко В.М. Суперкомпьютерное моделирование в физике климатической системы. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2012. 406 с.
2. Волков К.Н., Емельянов В.Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 368 с.
3. Старченко А.В., Кушевская И.В., Кижнер Л.И., Барашкова Н.К., Волкова М.А., Барт А.А. Оценка успешности численного прогноза элементов погоды по мезомасштабной модели атмосферы высокого разрешения TSUNM3 // Оптика атмосф. и океана. 2019. Т. 32, № 1. С. 57–61. DOI: 10.15372/AOO20190108.
4. Ривин Г.С., Розинкина И.А., Вильфанд Р.М., Киктев Д.Б., Тудрий К.О., Блинов Д.В., Варенцов М.И., Захарченко Д.И., Самсонов Т.Е., Ретина И.А., Артамонов А.Ю. Разработка оперативной системы численного прогноза погоды и условий возникновения опасных явлений с высокой детализацией для Московского мегаполиса // Метеорол. и гидрол. 2020. № 7. С. 5–19.

5. Kealy J.C., Efstathiou G.A., Beare R.J. The onset of resolved boundary-layer turbulence at grey-zone resolutions // *Bound.-Layer Meteorol.* 2019. V. 171, N 1. P. 31–52. DOI: 10.1007/s10546-018-0420-0.
6. Lancz D., Szintai B., Honnert R. Modification of a parametrization of shallow convection in the grey zone using a mesoscale model // *Bound.-Layer Meteorol.* 2018. V. 169, N 3. P. 483–503. DOI: 10.1007/s10546-018-0375-1.
7. Honnert R., Couvreux F., Masson V., Lancz D. Sampling the structure of convective turbulence and implications for grey-zone parametrizations // *Bound.-Layer Meteorol.* 2016. V. 160, N 1. P. 133–156. DOI: 10.1007/s10546-016-0130-4.
8. Doubrawa P., Muñoz-Esparza D. Simulating real atmospheric boundary layers at gray-zone resolutions: How do currently available turbulence parameterizations perform? // *Atmosphere.* 2020. V. 11, N 4(345). DOI: 10.3390/atmos11040345.
9. Blackman K., Perret L., Savory E. Effects of the upstream-flow regime and canyon aspect ratio on non-linear interactions between a street-canyon flow and the overlying boundary layer // *Bound.-Layer Meteorol.* 2018. V. 169, N 3. P. 537–558. DOI: 10.1007/s10546-018-0378-y.
10. Inagaki A., Kanda M. Organized structure of active turbulence over an array of cubes within the logarithmic layer of atmospheric flow // *Bound.-Layer Meteorol.* 2010. V. 135, N 2. P. 209–228. DOI: 10.1007/s10546-010-9477-0.
11. Boyko V., Vercauteren N. Multiscale shear forcing of turbulence in the nocturnal boundary layer: A statistical analysis // *Bound.-Layer Meteorol.* 2021. V. 179, N 1. P. 43–72. DOI: 10.1007/s10546-020-00583-0.
12. Rai R.K., Berg L.K., Kosovic B., Mirocha J.D., Pekour M.S., Shaw W.J. Comparison of measured and numerically simulated turbulence statistics in a convective boundary layer over complex terrain // *Bound.-Layer Meteorol.* 2017. V. 163, N 1. P. 69–89. DOI: 10.1007/s10546-016-0217-y.
13. De Bode M., Hedde T., Roubin P., Durand P. Fine-resolution WRF simulation of stably stratified flows in shallow pre-alpine valleys: A case study of the KASCADE-2017 campaign // *Atmosphere.* 2021. V. 12, N 8(1063). DOI: 10.3390/atmos12081063.
14. *Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей* // под ред. Ф.Т.М. Ньистадта и Х. Ван Допа. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 352 с.
15. Гладких В.А., Невзорова И.В., Одинцов С.Л. Структура порывов ветра в приземном слое атмосферы // *Оптика атмосфер. и океана.* 2019. Т. 32, № 4. С. 304–308. DOI: 10.15372/AOO20190408.
16. Гладких В.А., Мамышева А.А., Невзорова И.В., Одинцов С.Л. Сравнение вкладов турбулентных и мезомасштабных процессов в поле ветра приземного слоя атмосферы // *Оптика атмосфер. и океана. Физика атмосф.: Материалы XXVIII Международного симпозиума. 4–8 июля 2022 г., Томск. (В печати).*
17. Гладких В.А., Невзорова И.В., Одинцов С.Л. Потoki тепла в приземном слое атмосферы с разложением исходных компонентов на различные масштабы // *Оптика атмосфер. и океана.* 2021. Т. 34, № 2. С. 129–142; Gladkikh V.A., Nevzorova I.V., Odintsov S.L. Heat fluxes in the surface air layer with decomposition of initial components into different scales // *Atmos. Ocean. Opt.* 2021. V. 34, N 6. P. 658–671.
18. Гладких В.А., Макиенко А.Э. Цифровая ультразвуковая метеостанция // *Приборы.* 2009. № 7. С. 21–25.
19. Аршинов М.Ю., Белан Д.Б., Давыдов Д.К., Савкин Д.Е., Сляднева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофонов А.В. Мезомасштабные различия в концентрации озона в приземном слое воздуха в Томском регионе (2010–2012 гг.) // *Тр. ИОФАН.* 2015. Т. 71. С. 106–117.
20. Одинцов С.Л., Федоров В.А. Исследование вариаций скорости ветра мезометеорологического масштаба по содарным наблюдениям // *Оптика атмосфер. и океана.* 2007. Т. 20, № 11. С. 986–993.
21. Гладких В.А., Невзорова И.В., Одинцов С.Л. Статистика внешних масштабов турбулентности в приземном слое атмосферы // *Оптика атмосфер. и океана.* 2019. Т. 32, № 3. С. 212–220; Gladkikh V.A., Nevzorova I.V., Odintsov S.L. Statistics of outer turbulence scales in the surface air layer // *Atmos. Ocean. Opt.* 2019. V. 32, N 4. P. 450–458.
22. Гладких В.А., Мамышева А.А., Невзорова И.В., Одинцов С.Л. Оценка и сравнение смешанных моментов компонентов вектора ветра турбулентного и мезометеорологического масштаба в приземном слое атмосферы // *Оптика атмосфер. и океана.* 2022. Т. 35, № 9. С. 735–747.

V.A. Gladkikh, A.A. Mamysheva, I.V. Nevzorova, S.L. Odintsov. Analysis of derivatives in atmospheric hydrothermodynamics equations with the use of experimental data. Part 1: Equation for the temperature field.

The time and space derivatives of the air temperature and its products with the wind vector components are analyzed for the cases where the temperature and wind fields are resolved into the deterministic, meso-gamma scale, and turbulent parts. Ultrasonic thermoanemometer measurements in the surface air layer are used for the analysis. The variability ranges of the derivatives are estimated including meso-gamma scale variations in the temperature and wind fields. The variability ranges of these derivatives are compared with those of the “classical” derivatives (when only deterministic and turbulent parts are considered). The derivatives of the components which contain meso-gamma scales are shown to be comparable with the components which include only turbulent parts.