

Анализ производных в уравнениях гидротермодинамики атмосферы с использованием экспериментальных данных. Часть 2: Уравнения для поля ветра

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 16.10.2022 г.

Проведен анализ производных по времени и пространственным координатам от компонентов вектора ветра и их произведений при разложении этих компонентов на детерминированные, мезо-гамма-масштабные и турбулентные составляющие. Использовались экспериментальные данные о компонентах вектора ветра, полученные в приземном слое атмосферы с помощью ультразвуковых анемометров-термометров. Сравнивались диапазоны изменения этих производных и производных, относящихся к «классическому» варианту (учет только детерминированных и турбулентных компонентов вектора ветра). Показано, что вариации компонентов ветра мезо-гамма-масштаба могут быть не менее важны, чем турбулентные составляющие, включенные в «классические» схемы решения задачи моделирования (прогноза) поля ветра с высоким пространственно-временным разрешением.

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

Введение

В первой части статьи [1] сформулирована задача количественной оценки производных, входящих в уравнения гидротермодинамики атмосферы с учетом введенных в рассмотрение вариаций полей ветра и температуры воздуха мезо-гамма-масштаба с пространственными размерами от сотен метров до нескольких километров, относящихся к так называемой «серой зоне» (gray zone). Такая постановка задачи обусловлена активным развитием алгоритмов и программ моделирования процессов и полей в пограничном слое атмосферы с высоким пространственно-временным разрешением, ориентированным, в частности, на решение проблемы городских циркуляций.

Краткий обзор литературы по данной проблеме приведен в первой части статьи [1]. Для успешного решения поставленных задач полезной может оказаться экспериментальная информация о величинах, входящих в соответствующие дифференциальные уравнения гидротермодинамики. Это особенно

актуально для не очень хорошо изученных (и параметризованных) процессов мезо-гамма-масштаба. Результаты предварительного анализа данной проблемы были опубликованы нами ранее [2]. Специфика этого анализа заключалась в оценках производных от величин, предварительно подвергнутых усреднению с помощью скользящих средних за 10 мин; расчеты проводились для короткого (5 дней) эпизода в летнее время.

Исходные уравнения

Рассмотрим производные от величин, усредненных за короткий промежуток времени (1 с) и за длительные сроки наблюдений в разные сезоны года. Как и в [1], будем ориентироваться на запись уравнения движения в виде [3]:

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

где \tilde{u}_i — составляющие вектора ветра в декартовой системе координат x_i ($i, j, k = 1, 2, 3$); \tilde{p} и $\tilde{\rho}$ — атмосферное давление и плотность воздуха соответственно; ν — коэффициент кинематической вязкости

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

воздуха; $g_i = (0, 0, -g)$ – ускорение силы тяжести; Ω_j – компонент вектора угловой скорости вращения Земли; ε_{ijk} – тензор подстановки. «Волна» над символами обозначает исходное («мгновенное») значение.

Далее рассматривается только левая часть уравнений (1). Предполагается, что $\tilde{u}_i(t) = U_i(t) + \bar{U}_i(t) + u_i(t)$, где U_i – детерминированная составляющая; \bar{U}_i – составляющая мезо-гамма-масштаба; u_i – турбулентная составляющая. Тогда левую часть уравнений системы (1) можно переписать в виде

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

В [1] была поставлена задача оценить частные производные по времени ($\partial/\partial t$) и пространственным координатам ($\partial/\partial x_j$) от входящих в уравнение (2) величин для определения важности учета вариаций поля ветра мезо-гамма-масштаба. Перед этим сделан 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 [4, 5]. В отличие от [4], здесь, как и в [1], для оценки среднего направления ветра использовался не «интервальный» подход, а «скользящая» медиана длительностью $\Delta t = 30$ мин. В результате 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, мезо-гамма-масштабную и турбулентную составляющие соответственно.

Распишем подробно систему соотношений (2) для каждого из вновь введенных компонентов ветра:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tilde{u}_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\tilde{u}_1 \tilde{u}_j) &= \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}}{\partial t} + \frac{\partial u'}{\partial t} + \\ + \frac{\partial}{\partial x_1} \{ &U^2 + 2(U\bar{U}) + 2(Uu') + 2(\bar{U}u') + \bar{U}^2 + u'^2 \} + \\ + \frac{\partial}{\partial x_2} \{ &UV + U\bar{V} + Uv' + \bar{U}V + \bar{U}\bar{V} + \bar{U}v' + u'V + \\ &+ u'\bar{V} + u'v' \} + \frac{\partial}{\partial x_3} \{ UW + U\bar{W} + Uu' + \\ &+ \bar{U}W + \bar{U}\bar{W} + \bar{U}u' + u'W + u'\bar{W} + u'u' \}; \quad (3) \\ \frac{\partial \tilde{u}_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\tilde{u}_2 \tilde{u}_j) &= \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + \frac{\partial v'}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_1} \{ VU + V\bar{U} + \\ &+ Vu' + \bar{V}U + \bar{V}\bar{U} + \bar{V}u' + v'U + v'\bar{U} + v'u' \} + \\ + \frac{\partial}{\partial x_2} \{ &V^2 + 2(V\bar{V}) + 2(Vv') + 2(\bar{V}v') + \bar{V}^2 + v'^2 \} + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} + \frac{\partial}{\partial x_3} \{ &VW + V\bar{W} + Vw' + \bar{V}W + \bar{V}\bar{W} + \\ &+ \bar{V}w' + v'W + v'\bar{W} + v'w' \}; \quad (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tilde{u}_3}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\tilde{u}_3 \tilde{u}_j) &= \frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial \bar{W}}{\partial t} + \frac{\partial w'}{\partial t} + \\ + \frac{\partial}{\partial x_1} \{ &WU + W\bar{U} + Wu' + \bar{W}U + \bar{W}\bar{U} + \bar{W}u' + \\ &+ \bar{W}u' + w'U + w'\bar{U} + w'u' \} + \frac{\partial}{\partial x_2} \{ WV + W\bar{V} + Wv' + \\ &+ \bar{W}V + \bar{W}\bar{V} + \bar{W}v' + w'V + w'\bar{V} + w'v' \} + \frac{\partial}{\partial x_3} \times \\ \times \{ &W^2 + 2(W\bar{W}) + 2(Ww') + 2(\bar{W}w') + \bar{W}^2 + w'^2 \}. \end{aligned} \quad (5)$$

Наша задача – оценить по экспериментальным данным входящие в (3)–(5) производные по времени и по пространственным координатам. Отметим, что ранее [6] нами был проведен анализ дисперсий и смешанных моментов в фигурных скобках соотношений (3)–(5) при осреднении за 10 мин (были представлены и результаты при более длительных интервалах осреднения). Теперь же сосредоточимся на оценке вклада в текущие изменения поля ветра производных смешанных моментов с вариациями мезо-гамма-масштаба.

Предполагаем, что статистические характеристики параметров, входящих в соотношения (3)–(5), вдоль «поперечной» координаты x_2 не изменяются, т.е. производные $\partial Y/\partial x_2 = 0$. Такое же предположение было сделано и в первой части статьи [1] при работе с уравнением теплопроводности. В итоге получаем следующие соотношения:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tilde{u}_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\tilde{u}_1 \tilde{u}_j) &\approx \frac{a1}{\partial t} + \frac{a2}{\partial t} + \frac{a3}{\partial t} + \\ + \frac{\partial}{\partial x_1} \left[&\frac{a4}{U^2} + \frac{a5}{2(U\bar{U})} + \frac{a6}{2(Uu')} + \frac{a7}{2(\bar{U}u')} + \frac{a8}{\bar{U}^2} + \frac{a9}{u'^2} \right] + \\ + \frac{\partial}{\partial x_3} \left[&\frac{a10}{U\bar{W}} + \frac{a11}{U\bar{W}} + \frac{a12}{Uw'} + \frac{a13}{\bar{U}W} + \frac{a14}{\bar{U}\bar{W}} + \right. \\ &\left. + \frac{a15}{\bar{U}w'} + \frac{a16}{u'\bar{W}} + \frac{a17}{u'\bar{W}} + \frac{a18}{u'w'} \right]; \quad (6) \\ \frac{\partial \tilde{u}_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\tilde{u}_2 \tilde{u}_j) &\approx \frac{b1}{\partial t} + \frac{b2}{\partial t} + \frac{b3}{\partial t} + \\ + \frac{\partial}{\partial x_1} \left[&\frac{b4}{V\bar{U}} + \frac{b5}{V\bar{U}} + \frac{b6}{V\bar{U}} + \frac{b7}{V\bar{U}} + \frac{b8}{V\bar{U}} + \frac{b9}{V\bar{U}} + \right. \\ &\left. + \frac{b10}{v'\bar{U}} + \frac{b11}{v'\bar{U}} + \frac{b12}{v'u'} \right] + \frac{\partial}{\partial x_3} \left[\frac{b13}{V\bar{W}} + \frac{b14}{V\bar{W}} + \frac{b15}{V\bar{W}} + \right. \end{aligned}$$

$$+ \left[\frac{b_{16}}{VW} + \frac{b_{17}}{V\bar{W}} + \frac{b_{18}}{V\bar{w}'} + \frac{b_{19}}{v'W} + \frac{b_{20}}{v'\bar{W}} + \frac{b_{21}}{v'\bar{w}'} \right]; \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}_3}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_3 \bar{u}_j) &\approx \frac{c_1}{\partial t} + \frac{c_2}{\partial t} + \frac{c_3}{\partial t} + \\ &+ \frac{\partial}{\partial x_1} \left[\frac{c_4}{WU} + \frac{c_5}{W\bar{U}} + \frac{c_6}{Wu'} + \frac{c_7}{W\bar{U}} + \frac{c_8}{W\bar{U}} + \frac{c_9}{Wu'} + \right. \\ &+ \left. \frac{c_{10}}{w'U} + \frac{c_{11}}{w'\bar{U}} + \frac{c_{12}}{w'u'} \right] + \frac{\partial}{\partial x_3} \left[\frac{c_{13}}{W^2} + \frac{c_{14}}{2(W\bar{W})} + \right. \\ &+ \left. \frac{c_{15}}{2(Ww')} + \frac{c_{16}}{2(W\bar{w}')} + \frac{c_{17}}{W^2} + \frac{c_{18}}{w'^2} \right]. \quad (8) \end{aligned}$$

Всего в анализ включены 57 производных. Для более удобного представления результатов они пронумерованы в виде \bar{Y}^k с разделением индекса k по компонентам ветра (a, b, c). Следует сразу же оговорить, что в месте измерений отсутствует регулярный (детерминированный) вертикальный ветер ($W = 0$). Кроме того, в «сопровождающей» системе координат также отсутствует детерминированная составляющая поперечного ветра ($V = 0$). С учетом этих условий соотношения (6)–(8) упрощаются. Перепишем их, сделав одновременно группировку слагаемых согласно критерию «есть/нет» сомножитель, связанный с мезо-гамма-масштабными вариациями (группируются величины, над которыми есть -):

$$\frac{\partial \bar{u}_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_1 \bar{u}_j) \approx \Sigma_A^{Cl} + \Sigma_A^\gamma,$$

$$\Sigma_A^{Cl} = \frac{a_1}{\partial t} + \frac{a_3}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_1} \left[\frac{a_4}{U^2} + \frac{a_6}{2(Uu')} + \frac{a_9}{u'^2} \right] + \frac{\partial}{\partial x_3} \left[\frac{a_{12}}{Uw'} + \frac{a_{18}}{u'w'} \right],$$

$$\begin{aligned} \Sigma_A^\gamma &= \frac{\partial \bar{U}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_1} \left[\frac{a_5}{2(U\bar{U})} + \frac{a_7}{2(\bar{U}u')} + \frac{a_8}{\bar{U}^2} \right] + \\ &+ \frac{\partial}{\partial x_3} \left[\frac{a_{11}}{U\bar{W}} + \frac{a_{14}}{\bar{U}\bar{W}} + \frac{a_{15}}{\bar{U}w'} + \frac{a_{17}}{u'\bar{W}} \right]; \quad (9) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \bar{u}_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_2 \bar{u}_j) \approx \Sigma_B^{Cl} + \Sigma_B^\gamma,$$

$$\Sigma_B^{Cl} = \frac{b_3}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_1} \left[\frac{b_{10}}{v'U} + \frac{b_{12}}{v'u'} \right] + \frac{\partial}{\partial x_3} \left[\frac{b_{21}}{v'w'} \right],$$

$$\begin{aligned} \Sigma_B^\gamma &= \frac{b_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_1} \left[\frac{b_7}{VU} + \frac{b_8}{V\bar{U}} + \frac{b_9}{V\bar{u}'} + \frac{b_{11}}{v'U} \right] + \\ &+ \frac{\partial}{\partial x_3} \left[\frac{b_{17}}{V\bar{W}} + \frac{b_{18}}{V\bar{w}'} + \frac{b_{20}}{v'\bar{W}} \right]; \quad (10) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \bar{u}_3}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_3 \bar{u}_j) \approx \Sigma_C^{Cl} + \Sigma_C^\gamma,$$

$$\Sigma_C^{Cl} = \frac{c_3}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_1} \left[\frac{c_{10}}{w'U} + \frac{c_{12}}{w'u'} \right] + \frac{\partial}{\partial x_3} \left[\frac{c_{18}}{w'^2} \right],$$

$$\begin{aligned} \Sigma_C^\gamma &= \frac{c_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_1} \left[\frac{c_7}{WU} + \frac{c_8}{W\bar{U}} + \frac{c_9}{Wu'} + \frac{c_{11}}{w'U} \right] + \\ &+ \frac{\partial}{\partial x_3} \left[\frac{c_{16}}{2(Ww')} + \frac{c_{17}}{W^2} \right]. \quad (11) \end{aligned}$$

В этих соотношениях сохранена нумерация производных, введенных в (6)–(8), а также используются обозначения для сумм сгруппированных производных, соответствующих «классическому» (детерминированные + турбулентные компоненты) набору параметров ($\Sigma_{A,B,C}^{Cl}$) и набору параметров с мезо-гамма-масштабными вариациями ветра ($\Sigma_{A,B,C}^\gamma$). Нижний индекс A соответствует (9), B – (10), C – (11). При «классическом» подходе к решению системы уравнений (1) сохраняются только производные, входящие в суммы $\Sigma_{A,B,C}^{Cl}$. Естественно, что величины $\Sigma_{A,B,C}^{Cl}$ и $\Sigma_{A,B,C}^\gamma$ являются «мгновенными», т.е. отвечают тому моменту времени, для которого вычисляются формирующие их производные. Введенные группировки (суммы) позволяют в обобщенной форме оценить необходимость учета мезо-гамма-масштабных вариаций ветра. Если $\Sigma_{A,B,C}^{Cl}$ и $\Sigma_{A,B,C}^\gamma$ (или входящие в них производные) сопоставимы по (абсолютным) величинам в некоторый момент времени, то учет этих вариаций обоснован. Ответ именно на этот вопрос был ключевым при решении поставленной задачи.

Методика расчетов и использованный экспериментальный материал

Поскольку экспериментальные данные для оценок производных были получены только в двух фиксированных точках пространства (на высотах 5 и 10 м), то, как и в [1], предположим, что в «сопровождающей» системе координат возможна замена производной по x_1 приближенной формулой $\partial Y / \partial x_1 \approx U^{-1}(t) \partial Y / \partial t \approx U^{-1}(t) [Y(t + \delta t) - Y(t)] / \delta t$, где U – детерминированная составляющая скорости продольного ветра; δt – шаг по времени. Добавим, что в представленных далее результатах производная $\partial / \partial x_1$ соответствует измерениям на высоте 10 м. Производная по вертикали вычислялась по приближенной формуле $\partial Y / \partial x_3 \approx [Y(10) - Y(5)] / 5$, где величина $Y(10)$ соответствует высоте 10 м, а $Y(5)$ – 5 м.

Экспериментальные данные для оценок производных, связанных с компонентами вектора ветра, соответствуют тем же данным, которые были использованы для анализа производных, содержащих температуру воздуха и обсуждавшихся в [1]. Напомним, что измерения проводились на территории Базового экспериментального комплекса (БЭК) ИОА

СО РАН в пригороде Томска. Использовались ультразвуковые анемометры-термометры «Метео-2» [7], размещенные на одной мачте на высотах 5 и 10 м. В анализ включены измерения в январе, феврале, мае, августе и октябре 2021 г. Частота получения данных составляла 10 Гц. Для выделения детерминированных, мезо-гамма-масштабных и турбулентных составляющих при обработке экспериментальных данных использовались цифровые фильтры высоких частот с граничными значениями 2 мин/0,00833 Гц, полосовые фильтры 2–60 мин/0,00833–0,000278 Гц и фильтры низких частот 60 мин/0,000278 Гц. Шаг по времени при вычислении производной $\partial Y/\partial x_1 \approx U^{-1}(t)[Y(t+\delta t) - Y(t)]/\delta t$ составлял 1 с. Это означает, что все компоненты вектора ветра перед вычислением производных были предварительно усреднены за период 1 с. Такое усреднение несколько уменьшает величину турбулентных пульсаций, но к качественным изменениям в производных не приводит.

Результаты расчетов

Перейдем теперь непосредственно к изложению полученных результатов. Поскольку рассматриваются достаточно длительные периоды измерений, то они охватывают все возможные направления ветра и широкий диапазон его скоростей. Мы не будем приводить примеры скоростей и направлений ветра, как это было сделано на рис. 2 в [1].

Прежде всего, сопоставим величины $\Sigma_{A,B,C}^{Cl}$ и $\Sigma_{A,B,C}^Y$. Возьмем в качестве примера результаты за май 2021 г. На рис. 1 приведены развертки по времени этих сумм. В левой колонке графиков показаны суммы $\Sigma_{A,B,C}^{Cl}$, относящиеся к «классическому» варианту, а в правой – суммы $\Sigma_{A,B,C}^Y$, содержащие производные от величин с мезо-гамма-масштабными вариациями ветра. Графики в левой и правой колонках приведены в соизмеримых (по оси ординат) масштабах для более удобного визуального сопоставления. Фактически результаты на рис. 1 демонстрируют изменение во времени левых частей уравнений (1), равных сумме $\Sigma_{A,B,C}^{Cl} + \Sigma_{A,B,C}^Y$, где нижние индексы соответствуют тому или иному компоненту вектора ветра.

Согласно приведенным на рис. 1 результатам, диапазоны изменения сумм $\Sigma_{A,B,C}^Y$ существенно меньше, чем $\Sigma_{A,B,C}^{Cl}$. Тем не менее к пренебрежимо малым значениям их относить нельзя в случае моделирования с высоким пространственно-временным разрешением. Более того, если сравнивать отдельные производные, входящие в (9)–(11), то выясняется, что диапазоны изменения некоторых производных от величин, содержащих мезо-гамма-масштабы, могут быть сопоставимы с диапазонами изменения «классических» производных.

Однако прежде приведем результаты статистической обработки величин $\Sigma_{A,B,C}^{Cl}$ и $\Sigma_{A,B,C}^Y$, показанных на рис. 1. Наиболее эффективным для иллюстраций мы сочли использование интегральных функций распределения (ИФР) рассматриваемых

величин. Эти функции позволяют оценить как диапазон вариаций данных, так и ряд статистических характеристик (например, медианы, квартили и т.д.). На рис. 2 приведены ИФР сумм $\Sigma_{A,B,C}^{Cl}$ и $\Sigma_{A,B,C}^Y$ производных, представленных на рис. 1. В дальнейшем будет рассматриваться «ширина» диапазона изменения той или иной величины. Мы сочли оптимальным использовать для этого разность значений, соответствующих уровням 95% ($P95$) и 5% ($P5$) ИФР, т.е. «ширина» вариаций будет определяться разностью $\delta P = P95 - P5$. Пример определения «ширины» для Σ_C^Y (из уравнения для вертикального ветра) приведен на рис. 2, б (исходные данные см. на рис. 1, е).

Подводя промежуточный итог, можно сделать достаточно очевидный вывод, что включение в анализ вариаций компонентов вектора ветра мезо-гамма-масштаба не приведет к кардинальному изменению в оценках поля ветра. Однако учет этих вариаций может обеспечить уточнение характеристик ветра при моделировании (прогнозе) с высоким пространственно-временным разрешением.

Рассмотрим теперь отдельные производные из (9)–(11). Это позволит сравнить между собой производные по времени и пространственным координатам (продольным и вертикальным) от слагаемых с турбулентными («классическими») и мезо-гамма-масштабными вариациями компонентов вектора ветра. Одновременно оценим влияние сезона года на эти диапазоны (январь, февраль, май, август, октябрь 2021 г.). Для такого сопоставления будем использовать величины δP каждой производной отдельно для каждого месяца. На рис. 3 (цв. вкладка) приведены результаты расчетов δP , а также для справки (в правой колонке графиков) – соответствующие формулы с пронумерованными производными (на основе (6)–(8)).

Согласно приведенным на рис. 3 результатам, диапазоны изменения некоторых производных от слагаемых с вариациями мезо-гамма-масштаба сопоставимы с диапазонами изменения производных от слагаемых, содержащих только турбулентные («классические») пульсации компонентов вектора ветра. Это имеет место для всех составляющих вектора ветра (продольной, поперечной и вертикальной скоростей). Значительное количество производных от слагаемых, содержащих компоненты мезо-гамма-масштаба, имеют совсем небольшие диапазоны изменений, что может быть поводом для их исключения из дальнейшего рассмотрения.

Обратим внимание на то, что, согласно рис. 3, большие диапазоны изменения $\Sigma_{A,B,C}^{Cl}$, которые наблюдаются на рис. 1, а, в, д, определяются в основном производными по времени от турбулентных составляющих (это $\delta P(a3)$, $\delta P(b3)$, $\delta P(c3)$), а также производными по координате x_1 от произведений этих турбулентных составляющих с детерминированной продольной скоростью U (это $\delta P(a6)$, $\delta P(b10)$, $\delta P(a10)$). По рис. 3, в разные сезоны года различие диапазонов изменения для всех категорий производных хотя и наблюдается, но оно не очень велико.

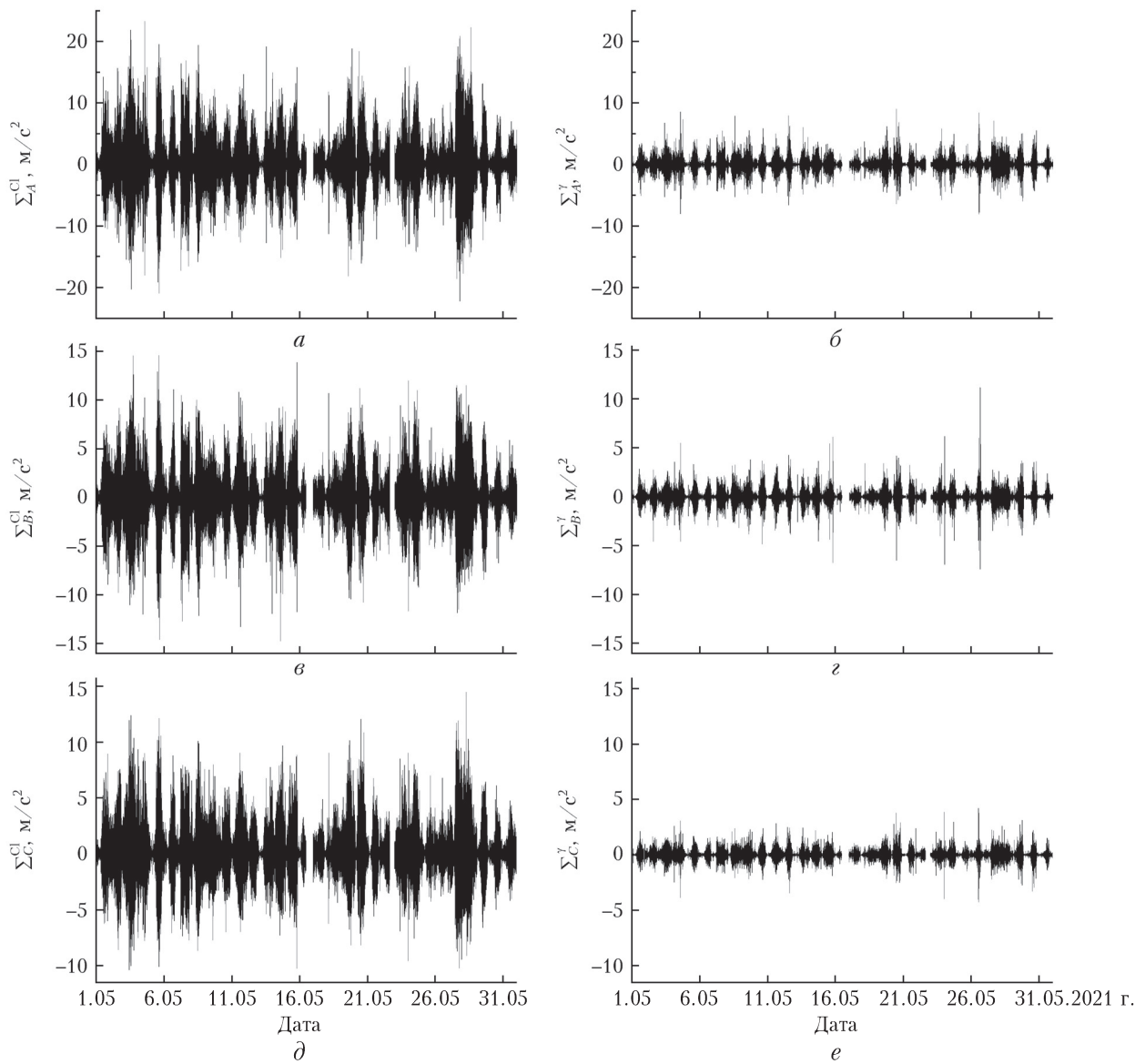


Рис. 1. Сопоставление сумм производных, относящихся к различным компонентам вектора ветра: продольный (*a*, *б*), поперечный (*в*, *з*), вертикальный компоненты ветра (*д*, *е*)

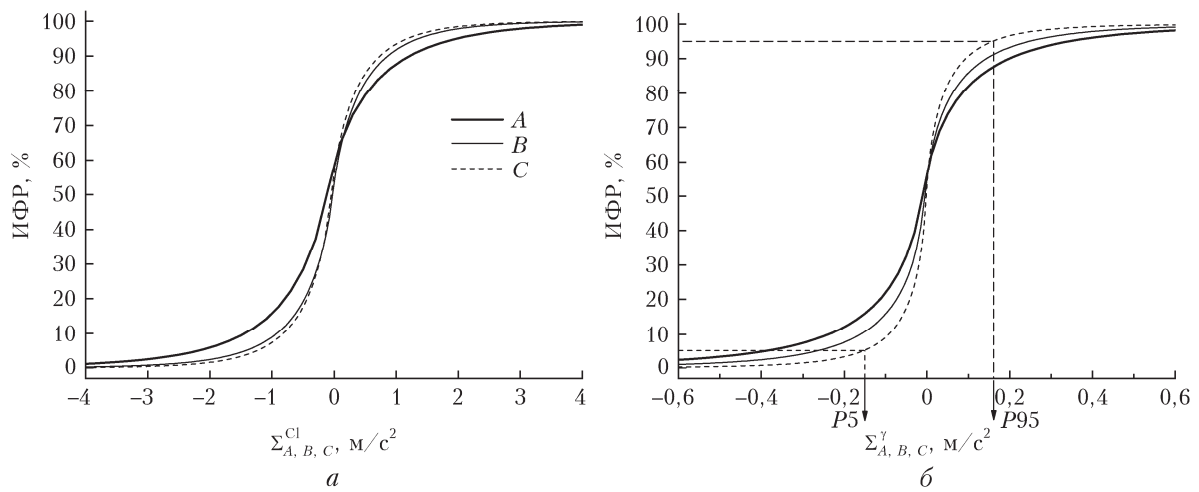


Рис. 2. Интегральные функции распределения сумм производных различных комбинаций компонентов ветра: «классических» (*a*), мезо-гамма-масштабных (*б*). Обозначения см. в тексте

Результаты, представленные на рис. 3, фактически подтверждают необходимость учета вариаций ветра мезо-гамма-масштаба. При этом можно оценить степень важности отдельных производных при моделировании (прогнозе) состояния приземного слоя атмосферы с высоким пространственно-временным разрешением. Понятно, что конкретные значения производных и диапазоны их изменения во многом определяются местом измерений. Однако мы полагаем, что общие закономерности сохраняются и для других пунктов наблюдения. Подтверждением этому служат результаты аналогичного анализа для температурного поля, приведенные в [1].

Заключение

Подводя итоги, можно сделать вывод, что при моделировании полей температуры и ветра в пограничном слое атмосферы (и его приземной области в частности) с высоким пространственно-временным разрешением учет мезомасштабных вариаций этих метеорологических параметров может заметно улучшить результаты моделирования. Приведенные в статье результаты позволяют в общих чертах оценить важность отдельных производных при моделировании (или прогнозе) состояния приземного слоя атмосферы.

Естественно, остается еще много частных вопросов, связанных с особенностями учета вариаций ветра мезо-гамма-масштаба. В частности, мы не рассматривали суточный ход производных, хотя он явно виден на рис. 1. Не проводился анализ взаимосвязи производных с текущими скоростями ветра и типом стратификации, как это сделано для температурного поля [1]. Определенный интерес представляет и исследование вероятности «противофазы» (устойчивого различия в знаках) отдельных производных. Требуется дальнейшей проработки вопрос об оптимальном подборе границ цифровых фильтров при разделении вариаций компонентов вектора ветра на детерминированные, мезо-гамма-масштабные и турбулентные (сейчас мы использовали однотипные фильтры для разных компонентов ветра). Полезным может оказаться и более полный анализ статистических характеристик производных (средние, медианы, асимметрия, эксцесс и пр.). Эти и многие другие вопросы, связанные с учетом вариаций поля ветра мезо-гамма-масштаба, будут актуальны, на наш взгляд, при решении ключевой проблемы — «замыкания» системы уравнения (1).

Отметим, что представленные в статье результаты получены при введении в анализ «сопровождающей» системы координат. Это позволило упростить систему соотношений (3)–(5) до уровня (9)–(11). Но если задача должна решаться в «стационарной» системе координат, например с горизонтальными осями «север — юг»/«восток — запад», то производные в этой системе будут иметь уже другие значения и диапазоны вариаций.

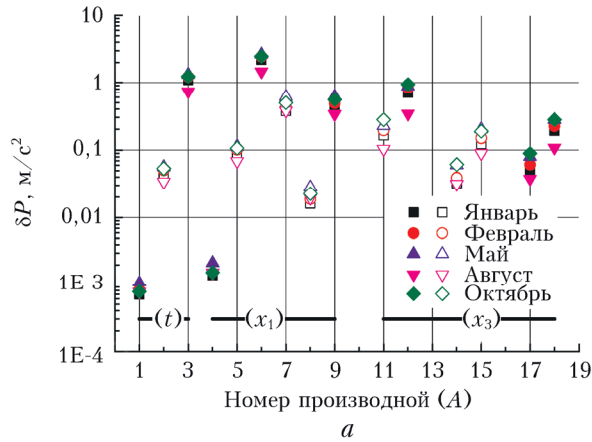
Финансирование. Измерения проводились с использованием приборной базы Центра коллективного пользования «Атмосфера» ИОА СО РАН при финансовой поддержке РФФ (грант № 19-71-20042). Разработка методических аспектов проведенных исследований выполнена в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

Список литературы

1. *Гладких В.А., Мамышева А.А., Невзорова И.В., Одинцов С.Л.* Анализ производных в уравнениях гидротермодинамики атмосферы с использованием экспериментальных данных. Часть 1: Уравнение для температурного поля // *Оптика атмосф. и океана*. 2022. Т. 35, № 11. С. 923–931.
2. *Гладких В.А., Мамышева А.А., Невзорова И.В., Одинцов С.Л.* Оценка производных от смешанных моментов турбулентных и мезомасштабных компонентов вектора ветра в приземном слое атмосферы // *Оптика атмосферы и океана*. Физика атмосферы: Материалы XXVIII Междунар. симп. 4–8 июля 2022 г. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2022. С. D222–D228.
3. *Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей* // под ред. Ф.Т.М. Ньистадта, Х. ван Допа. Л.: Гидрометеониздат, 1985. 352 с.
4. *Гладких В.А., Невзорова И.В., Одинцов С.Л.* Структура порывов ветра в приземном слое атмосферы // *Оптика атмосф. и океана*. 2019. Т. 32, № 4. С. 304–308. DOI: 10.15372/AOO20190408.
5. *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 атмосферы и океана*. Физика атмосферы: Материалы XXVIII Междунар. симп. 4–8 июля 2022 г. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2022. С. D229–D224.
6. *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 атмосф. и океана*. 2022. Т. 35, № 9. С. 735–747.
7. *Гладких В.А., Макиенко А.Э.* Цифровая ультразвуковая метеостанция // *Приборы*. 2009. № 7. С. 21–25.

V.A. Gladkikh, A.A. Mamysheva, I.V. Nevzorova, S.L. Odintsov. Analysis of derivatives in equations of atmospheric hydrothermodynamics with the use of experimental data. Part 2: Equations for the wind field.

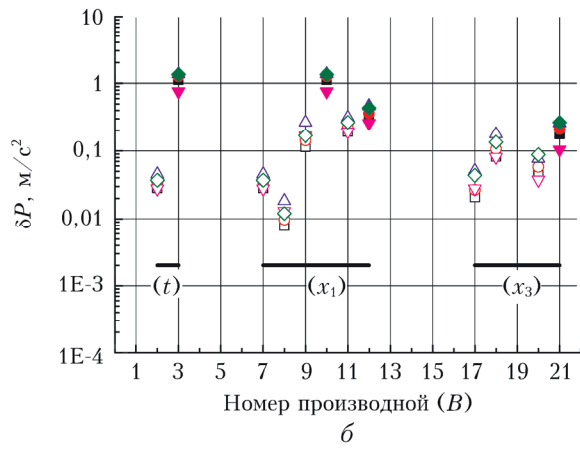
The paper analyzes the time and space derivatives of the wind vector components and the derivatives in the case of resolution into deterministic, meso-gamma-scale, and turbulent parts. Experimental data on the wind vector components obtained in the surface air layer with ultrasonic thermoanemometers were used for the analysis. The main task was to estimate the values and the variability ranges of the derivatives including meso-gamma-scale variations in the wind field. The aim of the study was to compare the variability ranges of these derivatives with those of the “classical” derivatives (when only deterministic and turbulent parts of the wind vector are considered). It is shown that meso-gamma-scale variations in the wind vector components can be no less important than the turbulent parts included in the “classical” schemes used for simulation (prediction) of the wind field with high space and time resolution.



$$\frac{\overline{a1}}{\partial U} + \frac{\overline{a2}}{\partial \overline{U}} + \frac{\overline{a3}}{\partial u'} +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x_1} \left[\overline{U^2} + 2(\overline{U\overline{U}}) + 2(\overline{Uu'}) + 2(\overline{\overline{U}u'}) + \overline{U^2} + \overline{u'^2} \right] +$$

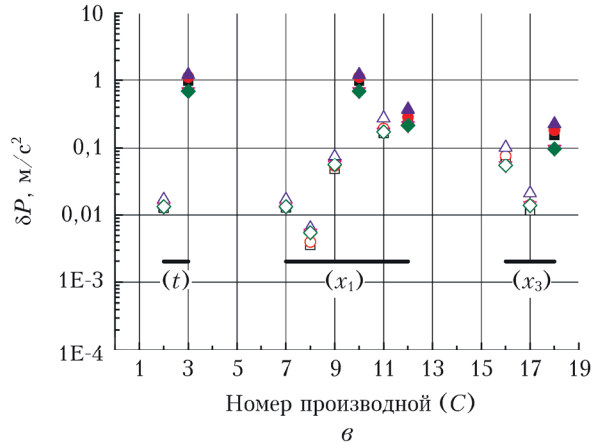
$$+ \frac{\partial}{\partial x_3} \left[\overline{U\overline{W}} + \overline{\overline{U}w'} + \overline{\overline{U}W} + \overline{\overline{U}w'} + \overline{u'\overline{W}} + \overline{u'w'} \right]$$



$$\frac{\overline{b2}}{\partial \overline{V}} + \frac{\overline{b3}}{\partial v'} +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x_1} \left[\overline{V\overline{U}} + \overline{\overline{V}U} + \overline{V\overline{u'}} + \overline{v'\overline{U}} + \overline{v'\overline{U}} + \overline{v'u'} \right] +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x_3} \left[\overline{V\overline{W}} + \overline{\overline{V}w'} + \overline{v'\overline{W}} + \overline{v'w'} \right]$$



$$\frac{\overline{c2}}{\partial \overline{W}} + \frac{\overline{c3}}{\partial w'} +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x_1} \left[\overline{W\overline{U}} + \overline{\overline{W}U} + \overline{W\overline{u'}} + \overline{w'\overline{U}} + \overline{w'\overline{U}} + \overline{w'u'} \right] +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x_3} \left[2(\overline{Ww'}) + \overline{W^2} + \overline{w'^2} \right]$$

Рис. 3. «Ширина» диапазонов изменения производных, входящих в левую часть уравнений (1): для скорости продольного (а), поперечного (б), вертикального ветров (в): сплошные символы — производные с «классическим» набором параметров; открытые символы — производные, содержащие мезо-гамма-масштабы; линиями отмечены группы производных для удобного восприятия. В правой колонке графиков приведены соответствующие пронумерованные производные