

Оценка и сравнение смешанных моментов компонентов вектора ветра турбулентного и мезометеорологического масштабов в приземном слое атмосферы

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 7.04.2022 г.;
после доработки 7.06.2022 г.;
принята к печати 15.07.2022 г.

Представлены результаты сравнения смешанных моментов компонентов вектора ветра турбулентного и мезо-гамма-масштабов, вычисленных с использованием экспериментальных данных, полученных в приземном слое атмосферы на высоте 10 м. Приведена статистика смешанных моментов для нескольких месяцев в разные сезоны 2021 г. Проведен краткий анализ их зависимости от скорости ветра и стратификации температуры воздуха в приземном слое. Сделан вывод о сопоставимости величин смешанных моментов, сформированных компонентами поля ветра мезо-гамма-масштаба, со смешанными моментами турбулентных составляющих вектора ветра.

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

Введение

Моделированию и прогнозу состояния пограничного слоя атмосферы с высоким пространственно-временным разрешением в последние годы уделяется повышенное внимание. В частности, обсуждается необходимость введения в алгоритмы моделирования составляющих полей температуры и ветра мезометеорологического масштаба (в литературе для обозначения таких масштабов используется также термин «серая зона/gray zone»). В публикациях последних лет (см., например, [1–11]) рассмотрены различные аспекты учета «серой зоны» в расчетных схемах и получаемые при этом результаты. Однако и в упомянутой литературе, и в других публикациях мало представлены экспериментальные данные, непосредственно связанные с оценками смешанных моментов (корреляций), обусловленных вариациями полей температуры и ветра мезометеорологического масштаба, хотя такая информация, по нашему мнению, может быть полезной для улучшения алгоритмов моделирования с учетом процессов, относящихся по масштабам к «серой зоне». Поэтому основная

цель нашей работы — оценка смешанных моментов, содержащих вариации ветра мезо-гамма-масштаба (с пространственными размерами от сотен метров до нескольких километров), и их сравнение с величинами смешанных моментов, образованных только турбулентными пульсациями ветра. Оценки были выполнены с использованием экспериментальных данных, полученных в приземном слое атмосферы. Краткий анализ потоков тепла, образованных вариациями температуры и компонентов вектора ветра мезо-гамма-масштаба, был проведен нами в [12].

1. Постановка задачи

Исходными для последующего анализа являются уравнения движения в форме [13]:

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

где \tilde{u}_i — составляющие 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 — вектор угловой скорости вращения Земли;

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

ε_{ijk} – тензор подстановки. «Волна» над символами обозначает исходное («мгновенное») значение величины. Нас будет интересовать только левая часть уравнений (1), поэтому правую оставим без комментариев.

Предположим, что компоненты вектора ветра \tilde{u}_i являются суммой трех составляющих: $\tilde{u}_i(t) = U_i(t) + \bar{U}_i(t) + u_i(t)$, U_i – составляющая синоптического масштаба (детерминированная), \bar{U}_i – составляющая мезо-гамма-масштаба (далее мы будем называть ее «локальной»), u_i – турбулентная составляющая. Зависимость от времени t всех составляющих вектора ветра далее не указываем. В итоге левую часть уравнений системы (1) можно переписать в виде

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

Далее анализируются только слагаемые в фигурных скобках в соотношении (2). Однако сначала уточним систему координат, в которой будут рассматриваться составляющие вектора ветра. Предположим, что система координат является «сопровождающей», т.е. направление оси x_1 совпадает с направлением среднего (горизонтального) ветра за некоторый интервал времени. В свою очередь, ось x_2 перпендикулярна оси x_1 (в горизонтальной плоскости). Ось x_3 – вертикальная (знак «+» – направление вверх). В этой системе координат $\tilde{u}_1 = U_1 + \bar{U}_1 + u_1$ – продольный ветер; $\tilde{u}_2 = U_2 + \bar{U}_2 + u_2$ – поперечный ветер; $\tilde{u}_3 = U_3 + \bar{U}_3 + u_3$ – вертикальный ветер. Технологии перехода от фиксированной во времени системы координат к «сопровождающей» могут быть различными. Мы использовали методику, изложенную в [14], но для «скользящих» интервалов времени с длительностью «окна» $\Delta t = 30$ мин.

Введем далее для компонентов ветра специальные обозначения: $\tilde{u}_1 = U + \bar{U} + u'$, $\tilde{u}_2 = V + \bar{V} + v'$, $\tilde{u}_3 = W + \bar{W} + w'$. Первые слагаемые в правых частях этих равенств – детерминированные составляющие, вторые – локальные, третьи – турбулентные. Распишем содержимое фигурной скобки соотношения (2) для каждого из вновь введенных компонентов вектора ветра (для каждого из трех уравнений системы (1)):

$$\begin{aligned} \tilde{u}_1 & \Rightarrow \frac{\partial}{\partial x_1} \{K_{U_1}\} + \frac{\partial}{\partial x_2} \{K_{U_2}\} + \frac{\partial}{\partial x_3} \{K_{U_3}\}, \\ \tilde{u}_2 & \Rightarrow \frac{\partial}{\partial x_1} \{K_{V_1}\} + \frac{\partial}{\partial x_2} \{K_{V_2}\} + \frac{\partial}{\partial x_3} \{K_{V_3}\}, \\ \tilde{u}_3 & \Rightarrow \frac{\partial}{\partial x_1} \{K_{W_1}\} + \frac{\partial}{\partial x_2} \{K_{W_2}\} + \frac{\partial}{\partial x_3} \{K_{W_3}\}, \end{aligned} \quad (3)$$

где

736

$$K_{U_j} \Rightarrow \begin{cases} K_{U_1} = 2U\bar{U} + 2Uu' + 2\bar{U}u' + \bar{U}^2 + u'^2, \\ K_{U_2} = U\bar{V} + Uv' + \bar{U}V + \bar{U}\bar{V} + \bar{U}v' + \\ + u'V + u'\bar{V} + u'v', \\ K_{U_3} = U\bar{W} + Uw' + \bar{U}W + \bar{U}\bar{W} + \bar{U}w' + \\ + u'W + u'\bar{W} + u'w'; \end{cases} \quad (4)$$

$$K_{V_j} \Rightarrow \begin{cases} K_{V_1} = U\bar{V} + Uv' + \bar{U}V + \bar{U}\bar{V} + \bar{U}v' + \\ + u'V + u'\bar{V} + u'v', \\ K_{V_2} = 2V\bar{V} + 2Vv' + 2\bar{V}v' + \bar{V}^2 + v'^2, \\ K_{V_3} = V\bar{W} + Vw' + \bar{V}W + \bar{V}\bar{W} + \bar{V}w' + \\ + v'W + v'\bar{W} + v'w'; \end{cases} \quad (5)$$

$$K_{W_j} \Rightarrow \begin{cases} K_{W_1} = U\bar{W} + Uw' + \bar{U}W + \bar{U}\bar{W} + \bar{U}w' + \\ + u'W + u'\bar{W} + u'w', \\ K_{W_2} = V\bar{W} + Vw' + \bar{V}W + \bar{V}\bar{W} + \bar{V}w' + \\ + v'W + v'\bar{W} + v'w', \\ K_{W_3} = 2W\bar{W} + 2Ww' + 2\bar{W}w' + \bar{W}^2 + w'^2. \end{cases} \quad (6)$$

Отметим, что $K_{V_1} = K_{U_2}$, $K_{W_1} = K_{U_3}$ и $K_{W_2} = K_{V_3}$. При «классическом» подходе («по Рейнольдсу»), когда учитываются только детерминированные и турбулентные составляющие, все слагаемые, содержащие символы вида \bar{F} , отбрасываются. Здесь и далее символ F заменяет тот или иной компонент вектора ветра. Индексы $i, j = 1$ у этого символа соответствуют продольному, 2 – поперечному, 3 – вертикальному ветрам.

Задача нашей работы заключалась в ретроспективном обзоре и сравнении величин, входящих в правые части соотношений (4)–(6).

2. Экспериментальные данные и методика их обработки

Для анализа использовались результаты измерения компонентов вектора ветра в приземном слое атмосферы с помощью ультразвуковой метеостанции (УЗМ) «Метео-2» [15]. Частота измерений составляла 10 отсчетов в секунду (10 Гц). В анализ включены измерения в январе, феврале, мае, августе и октябре 2021 г. на площадке Базового экспериментального комплекса (БЭК) ИОА СО РАН [16] на высоте 10 м. Для обработки экспериментальных данных применялось специализированное программное обеспечение, позволявшее преобразовывать измеренные с помощью УЗМ в «стационарной» системе координат компоненты вектора ветра в «сопровождающую», вычислять продольную и поперечную составляющие вектора ветра, проводить фильтрацию исходных данных в заданных полосах частот,

а также рассчитывать смешанные моменты, необходимые для анализа величин, формирующих группы K_{ij} ($= K_{U_j}, K_{V_j}, K_{W_j}$) (соотношения (4)–(6)).

Для разделения процессов по масштабам было принято решение считать «низкочастотной» границей при выделении локальных (мезо-гамма-масштабных) процессов 60 мин (0,000278 Гц). Эта граница выбрана на основе анализа спектров соответствующих величин с учетом ранее проведенных исследований [17]. Граница, разделяющая турбулентную и локальную части спектра, составляла 2 мин (0,00833 Гц). Эта граница была выбрана на основе результатов работы [18], где исследовались внешние масштабы турбулентности. Таким образом, исходные выборки с продольным, поперечным и вертикальным ветром подвергались цифровой фильтрации с помощью фильтра высоких частот (ФВЧ) с граничным значением фильтра 2 мин/0,00833 Гц, полосового фильтра (ПФ) с границами (2–60) мин/(0,00833–0,000278 Гц) и фильтра низких частот с границей 60 мин/0,000278 Гц. Цифровые фильтры с такими границами применялись ко всем компонентам вектора ветра. Следует отметить, что для каждого компонента более эффективным был бы выбор индивидуальных границ фильтров. Но на данном этапе исследований мы решили использовать одинаковые по параметрам фильтры.

Пример результатов фильтрации (ФВЧ и ПФ) для короткого эпизода измерений в августе 2021 г. приведен на рис. 1 (по оси абсцисс указаны день и месяц). Согласно рис. 1, введенные в рассмотрение локальные масштабы вариаций компонентов вектора ветра соизмеримы с турбулентными составляющими. Поэтому слагаемые с символами вида \bar{F} в соотношениях (4)–(6) могут быть сопоставимы по величине со слагаемыми, содержащими только турбулентные компоненты вектора ветра.

3. Результаты

3.1. Сравнение смешанных моментов

Сравним все слагаемые в правых частях соотношений (4)–(6), но не по «мгновенным» значениям комбинаций, а по их осредненным величинам за интервал времени $\delta t = 10$ мин, т.е. по смешанным моментам (далее в тексте осреднение обозначается чертой сверху, например, $\overline{u'w'}$). Смешанные моменты фактически определяют степень корреляции входящих в них величин. При этом для тех или иных компонентов вектора ветра они могут быть пренебрежимо малы даже в случае больших значений формирующих их величин (слабая корреляция компонентов). В качестве примера приведем рис. 2, где показаны смешанные моменты $\overline{U\bar{V}}$ и $\overline{u'v'}$ (рис. 2, а), а также $\overline{u'w'}$ и $\overline{v'w'}$ (рис. 2, б) для эпизода, представленного на рис. 1. В частности, корреляция между компонентами u' и v' существенно меньше, чем между \bar{U} и \bar{V} , хотя их «мгновенные» значения сопоставимы по величинам.

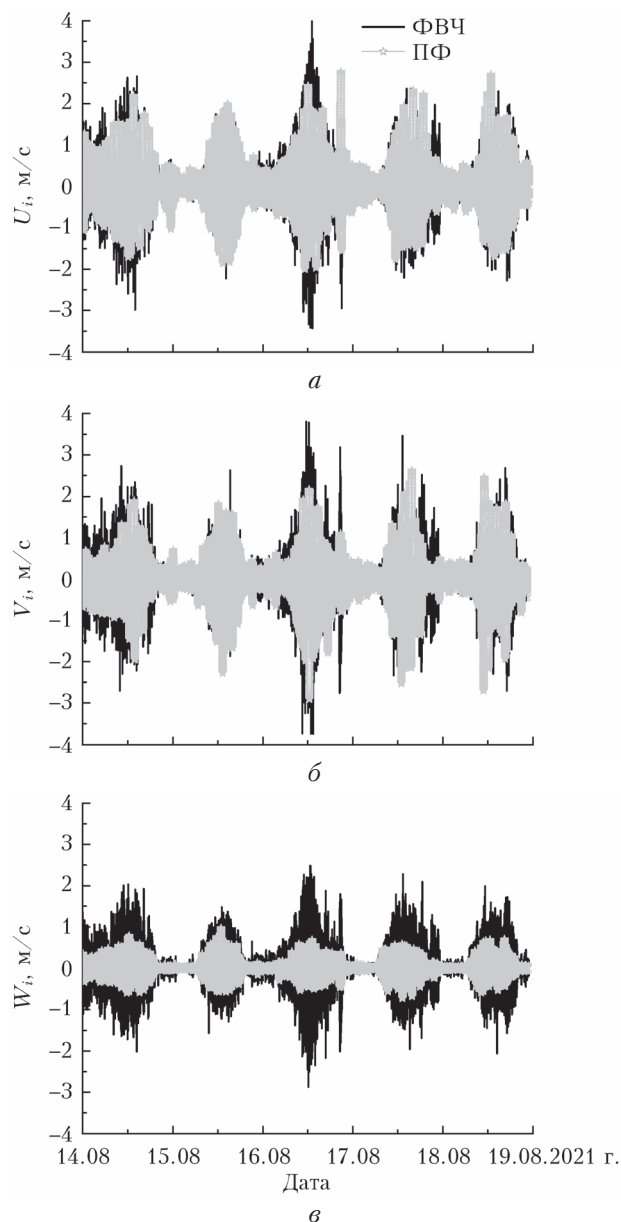


Рис. 1. Результаты применения ФВЧ и ПФ к продольному (u' и \bar{U}) (а), поперечному (v' и \bar{V}) (б) и вертикальному (w' и \bar{W}) (в) ветру

Отметим, что длительность интервала осреднения 10 мин для комбинаций вида $\overline{F_i \bar{F}_j}$, $\overline{\bar{F}_i F_j}$ не обеспечивает в полной мере их достоверную статистическую оценку (т.е. справедливость гипотезы эргодичности процессов, которая позволяет использовать осреднение по времени вместо осреднения по ансамблю реализаций). Краткий анализ влияния величины δt на оценки таких смешанных моментов приведен далее в тексте (п. 3.2). Но сейчас проведем сопоставление смешанных моментов за интервал времени $\delta t = 10$ мин. Такой интервал мы сочли предпочтительным, ориентируясь на возможное применение полученных результатов в задачах моделирования состояния пограничного слоя атмосферы с высоким пространственно-временным разрешением.

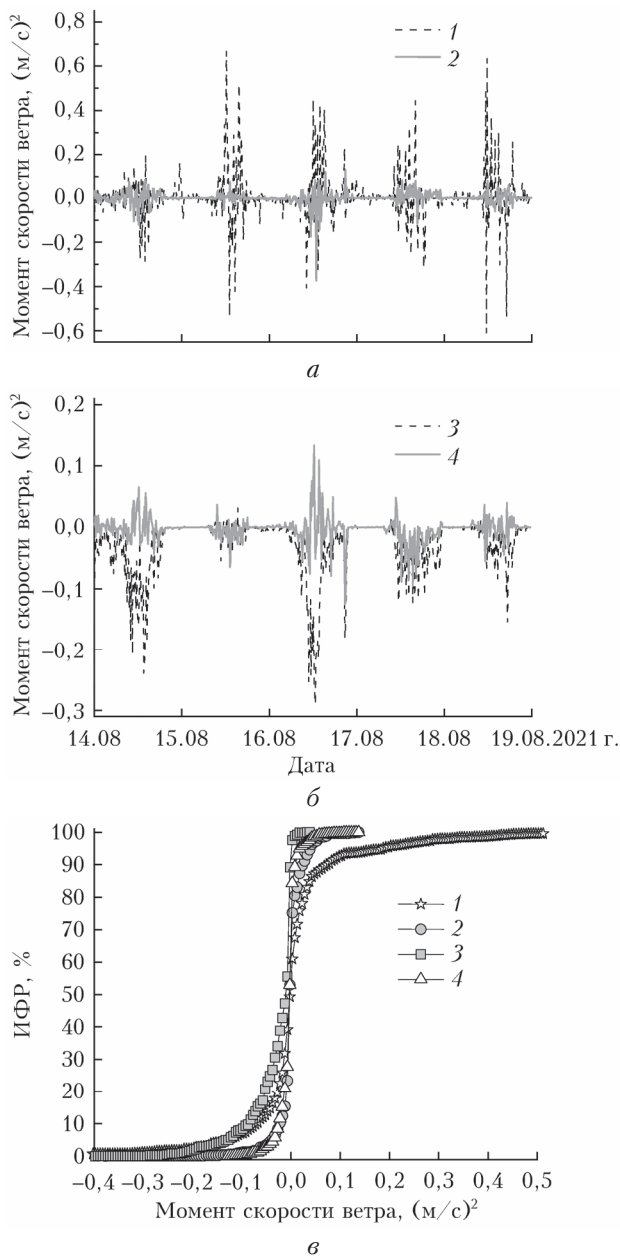


Рис. 2. Смешанные моменты компонентов вектора ветра (а, б) и их интегральные функции распределения (в): 1 – $\overline{U\overline{V}}$, 2 – $\overline{u'v'}$, 3 – $\overline{u'w'}$, 4 – $\overline{v'w'}$

Рассмотрим диапазоны изменения 39 смешанных моментов, входящих в правые части соотношений (4)–(6) (с учетом дубликатов строк). Наиболее эффективным подходом является, на наш взгляд, сопоставление интегральных функций распределения (ИФР) анализируемых величин. В качестве примера на рис. 2, в показаны ИФР смешанных моментов, приведенных на рис. 2, а, б. Для оценки диапазонов вариаций смешанных моментов воспользуемся квантилями ИФР: Q_1 (25% ИФР) и Q_3 (75% ИФР). При этом проведем расчеты ИФР с учетом удвоения ряда параметров, входящих в группы $\overline{K_{U_j}}$, $\overline{K_{V_j}}$, $\overline{K_{W_j}}$ (см. (4)–(6)).

Поскольку нас интересовало в первую очередь сравнение диапазонов изменения смешанных моментов, содержащих компоненты \overline{F} , с диапазонами изменения турбулентных компонентов F'_j , проведем их сопоставление с использованием разности квантилей $\delta Q = Q_3 - Q_1$, которая определяет величину основного диапазона изменения исследуемого компонента (смешанного момента). Чем больше значение δQ в соответствующей группе ($\overline{K_{U_j}}$, $\overline{K_{V_j}}$, $\overline{K_{W_j}}$), тем больше его средний вклад в вариации поля ветра. В качестве примеров на рис. 3, а, б представлены значения δQ для февраля и августа 2021 г. для каждой из групп. При этом для облегчения анализа сгруппируем смешанные моменты по типам формирующих их компонентов: набор № 1 – $\overline{F'_i F'_j}$, № 2 – $\overline{F'_i \overline{F}_j}$, № 3 – $\overline{\overline{F}_i \overline{F}_j}$, № 4 – $\overline{\overline{F}_i F'_j}$, № 5 – $\overline{\overline{F}_i \overline{F}_j}$. Фактически нужно сравнить диапазоны изменения наборов № 2–5 с набором № 1 в каждой из групп $\overline{K_{U_j}}$, $\overline{K_{V_j}}$, $\overline{K_{W_j}}$. Отметим, что набор № 3 не содержит локального компонента \overline{F} , а соответствует взаимосвязи турбулентной составляющей (F'_i) с детерминированной (\overline{F}_j). Тем не менее мы также включили этот набор в анализ. На рис. 3 каждый набор обозначен соответствующим символом. Одним и тем же символом на этом рисунке могут обозначаться разные смешанные моменты, входящие в тот или иной набор, например $\overline{U'w'}$ и $u'\overline{W}$, входящие в набор № 2 группы K_{U_3} .

Примеры, приведенные на рис. 3, а, б, позволяют в общих чертах сопоставить между собой как диапазоны изменения смешанных моментов в той или иной группе, так и важность того или иного компонента внутри группы. Однако более эффективным, на наш взгляд, является сравнение не абсолютных величин δQ , а нормированных на значение «турбулентного» компонента в группе, т.е. значений, принадлежащих набору № 1: $\delta Q_n = \delta Q / \delta Q'$, где $\delta Q' = Q_3(\overline{F'_i F'_j}) - Q_1(\overline{F'_i F'_j})$. Пример нормировки выборок, показанных на рис. 3, а, б, приведен на рис. 3, в, г. Он позволяет наглядно оценить вклады различных смешанных моментов в величины (суммы компонентов) $\overline{K_{U_j}}$, $\overline{K_{V_j}}$, $\overline{K_{W_j}}$. Согласно рис. 3, в, г и в феврале, и в августе 2021 г. во всех группах доминировали компоненты из наборов № 1, 4, 5. Диапазоны изменения смешанных моментов из наборов № 2, 3 лишь в некоторых случаях приближались к значениям 10–20% от величины диапазона из набора № 1 (смешанные моменты турбулентных составляющих).

В таблице приведены нормированные значения δQ_n для всех вошедших в анализ месяцев 2021 г. В скобках даны медианы (за текущий месяц) значения смешанных моментов, указанных в первой колонке таблицы. Кроме того, в первой колонке приведены номера наборов, к которым относятся указанные компоненты, а в строках с $\overline{F'_i F'_j}$ (набор № 1)

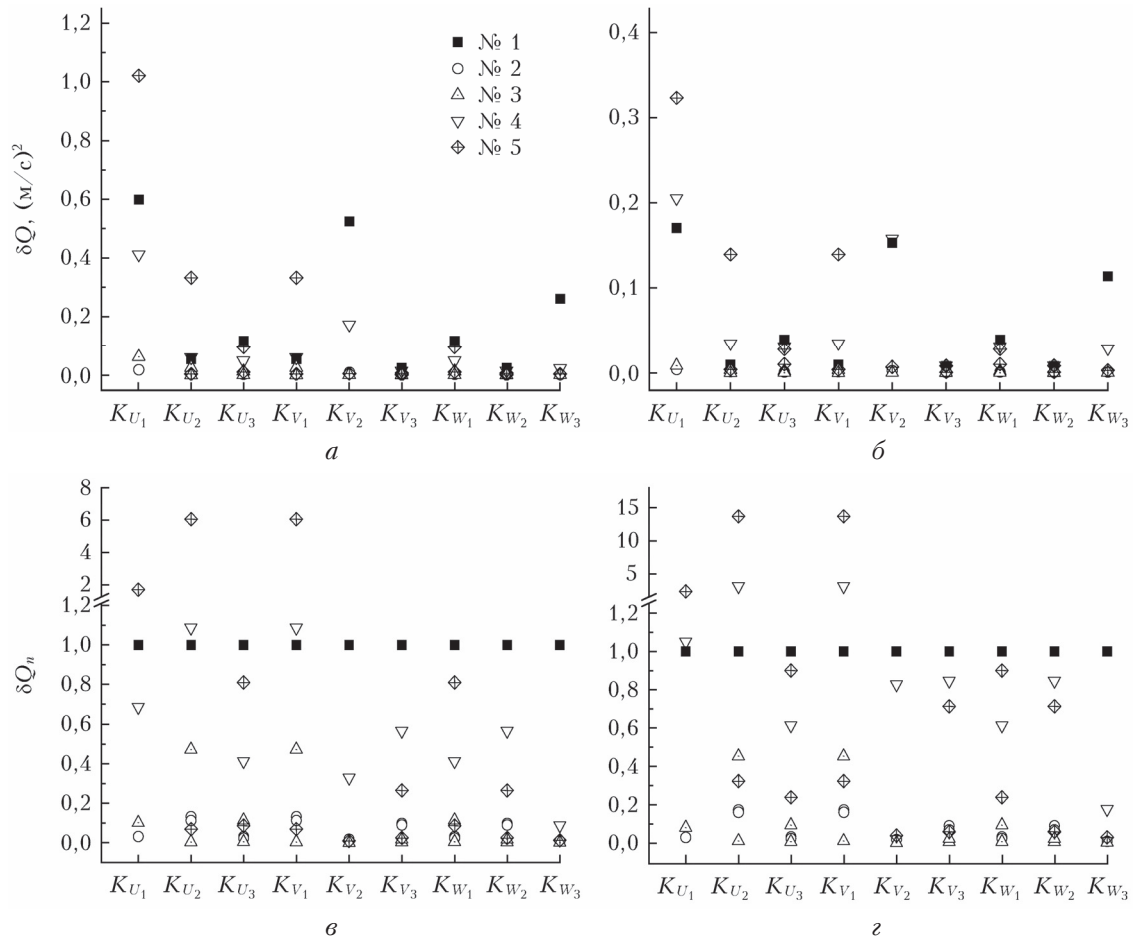


Рис. 3. Величины δQ для различных групп смешанных моментов в абсолютном (а, б) и нормированном (в, г) виде для февраля (а, в) и августа 2021 г. (б, г); пронумерованные символы соответствуют номерам введенных наборов (см. в тексте); оси ординат имеют разрывы с изменением шага шкалы значений (БЭК, 10 м)

Нормированные значения разности квартилей для всех вошедших в анализ месяцев 2021 г.

Параметр (набор)	δQ_n (медиана)				
	Январь	Февраль	Май	Август	Октябрь
1	2	3	4	5	6
$\bar{K}_{U_1} = 2\bar{U}\bar{U} + 2\bar{U}\bar{u}' + 2\bar{U}\bar{u}' + \bar{U}^2 + \bar{u}'^2$					
$2\bar{U}\bar{U}$ (№ 5)	1,2 (-0,021)	1,7 (-0,028)	1,6 (-0,0092)	2,3 (-0,0068)	1,1 (-0,0094)
$2\bar{U}\bar{u}'$ (№ 3)	0,067 (3,3E-04)	0,10 (0,0011)	0,072 (-2,5E-04)	0,081 (-1,5E-04)	0,064 (3,4E-04)
$2\bar{U}\bar{u}'$ (№ 2)	0,019 (3,7E-05)	0,031 (1,0E-04)	0,026 (1,5E-04)	0,030 (3,6E-05)	0,022 (7,5E-05)
\bar{U}^2 (№ 4)	0,57 (0,14)	0,69 (0,23)	0,87 (0,30)	1,1 (0,13)	0,68 (0,22)
\bar{u}'^2 (№ 1)	1/0,56 (0,22)	1/0,60 (0,34)	1/0,74 (0,36)	1/0,24 (0,12)	1/0,73 (0,27)
$\bar{K}_{U_2} = \bar{U}\bar{V} + \bar{U}\bar{v}' + \bar{U}\bar{V} + \bar{U}\bar{V} + \bar{U}\bar{v}' + \bar{u}'\bar{V} + \bar{u}'\bar{V} + \bar{u}'\bar{v}'$					
$\bar{U}\bar{V}$ (№ 5)	6,4 (7,6E-04)	6,1 (0,0022)	8,6 (-0,0046)	14 (6,4E-04)	8,4 (-1,8E-04)
$\bar{U}\bar{v}'$ (№ 3)	0,40 (-1,7E-05)	0,47 (-4,4E-05)	0,44 (-3,9E-05)	0,45 (-1,7E-05)	0,54 (6,5E-06)
$\bar{U}\bar{V}$ (№ 5)	0,074 (3,3E-05)	0,068 (3,4E-05)	0,15 (4,5E-05)	0,32 (3,7E-05)	0,11 (4,5E-05)
$\bar{U}\bar{V}$ (№ 4)	1,1 (5,8E-04)	1,1 (2,3E-04)	1,9 (-0,0026)	3,1 (6,3E-04)	1,7 (-5,8E-04)
$\bar{U}\bar{v}'$ (№ 2)	0,11 (1,4E-06)	0,13 (6,9E-06)	0,15 (-1,0E-07)	0,17 (6,4E-06)	0,19 (-9,6E-06)
$\bar{u}'\bar{V}$ (№ 3)	0,0036 (-9,6E-07)	0,0040 (-2,8E-07)	0,0068 (9,4E-07)	0,011 (-1,0E-07)	0,0064 (-7,5E-07)
$\bar{u}'\bar{V}$ (№ 2)	0,097 (-3,7E-06)	0,11 (1,7E-05)	0,15 (-8,0E-06)	0,16 (8,2E-06)	0,17 (8,7E-06)
$\bar{u}'\bar{v}'$ (№ 1)	1/0,034 (3,0E-04)	1/0,055 (-3,9E-04)	1/0,051 (-8,9E-05)	1/0,017 (5,3E-04)	1/0,032 (3,2E-04)

1	2	3	4	5	6
$\overline{K}_{U_3} = \overline{U\overline{W}} + \overline{U\overline{w'}} + \overline{U\overline{W}} + \overline{U\overline{w'}} + \overline{U\overline{W}} + \overline{U\overline{w'}} + \overline{u'\overline{W}} + \overline{u'\overline{w'}}$					
$\overline{U\overline{W}}$ (№ 5)	0,49 (3,8E-05)	0,81 (8,6E-04)	0,59 (-0,0011)	0,90 (2,0E-05)	0,50 (-1,5E-04)
$\overline{U\overline{w'}}$ (№ 3)	0,068 (1,5E-08)	0,11 (-1,2E-05)	0,074 (2,5E-05)	0,095 (5,4E-06)	0,070 (3,5E-05)
$\overline{U\overline{W}}$ (№ 5)	0,10 (3,0E-04)	0,086 (2,1E-04)	0,11 (1,2E-04)	0,24 (1,3E-04)	0,065 (-8,6E-05)
$\overline{U\overline{w'}}$ (№ 4)	0,35 (-0,012)	0,41 (-0,018)	0,42 (-0,025)	0,61 (-0,0091)	0,41 (-0,022)
$\overline{U\overline{W}}$ (№ 2)	0,017 (-2,5E-06)	0,031 (-5,9E-06)	0,026 (-2,7E-05)	0,033 (-8,6E-06)	0,021 (-2,4E-06)
$\overline{u'\overline{W}}$ (№ 3)	0,0046 (-1,2E-05)	0,0045 (-1,2E-05)	0,0048 (1,4E-06)	0,0078 (3,1E-06)	0,0030 (3,3E-06)
$\overline{u'\overline{W}}$ (№ 2)	0,014 (-4,0E-06)	0,024 (-2,0E-06)	0,020 (-1,6E-05)	0,024 (-3,1E-06)	0,016 (-3,0E-06)
$\overline{u'\overline{w'}}$ (№ 1)	1/0,11 (-0,041)	1/0,12 (-0,059)	1/0,16 (-0,064)	1/0,054 (-0,020)	1/0,16 (-0,052)
$\overline{K}_{V_2} = 2\overline{V\overline{V}} + 2\overline{V\overline{v'}} + 2\overline{V\overline{v'}} + \overline{V^2} + \overline{v'^2}$					
$2\overline{V\overline{V}}$ (№ 5)	0,0065 (1,4E-04)	0,0090 (2,5E-04)	0,019 (3,2E-04)	0,040 (3,4E-04)	0,0071 (2,4E-04)
$2\overline{V\overline{v'}}$ (№ 3)	3,9E-04 (3,0E-07)	6,5E-04 (1,7E-06)	9,1E-04 (1,1E-06)	0,0013 (8,5E-07)	4,7E-04 (-9,7E-07)
$2\overline{V\overline{v'}}$ (№ 2)	0,0092 (4,5E-05)	0,018 (3,9E-05)	0,018 (1,1E-04)	0,019 (9,7E-06)	0,012 (6,5E-05)
$\overline{V^2}$ (№ 4)	0,23 (0,053)	0,33 (0,089)	0,72 (0,17)	0,83 (0,082)	0,31 (0,091)
$\overline{v'^2}$ (№ 1)	1/0,49 (0,18)	1/0,52 (0,30)	1/0,66 (0,31)	1/0,23 (0,11)	1/0,68 (0,26)
$\overline{K}_{V_3} = \overline{V\overline{W}} + \overline{V\overline{w'}} + \overline{V\overline{W}} + \overline{V\overline{w'}} + \overline{v'\overline{W}} + \overline{v'\overline{W}} + \overline{v'\overline{w'}}$					
$\overline{V\overline{W}}$ (№ 5)	0,026 (2,7E-06)	0,025 (3,8E-06)	0,038 (-1,1E-05)	0,059 (4,9E-06)	0,027 (-3,5E-06)
$\overline{V\overline{w'}}$ (№ 3)	0,0032 (1,6E-07)	0,0037 (-2,7E-07)	0,0052 (1,1E-06)	0,0064 (-3,5E-07)	0,0039 (-4,0E-07)
$\overline{V\overline{W}}$ (№ 5)	0,46 (1,8E-05)	0,26 (-3,8E-05)	0,43 (5,2E-05)	0,71 (4,2E-05)	0,29 (6,8E-05)
$\overline{V\overline{w'}}$ (№ 4)	0,56 (-1,8E-04)	0,57 (-7,6E-04)	0,75 (-5,1E-04)	0,85 (5,1E-04)	0,59 (-5,3E-04)
$\overline{V\overline{w'}}$ (№ 2)	0,076 (3,6E-06)	0,098 (-7,9E-06)	0,10 (1,4E-05)	0,091 (2,2E-06)	0,099 (2,6E-06)
$\overline{v'\overline{W}}$ (№ 3)	0,025 (6,6E-07)	0,017 (1,5E-06)	0,020 (2,5E-06)	0,022 (1,6E-07)	0,015 (2,0E-06)
$\overline{v'\overline{W}}$ (№ 2)	0,069 (1,3E-06)	0,090 (-4,9E-06)	0,076 (-3,4E-06)	0,069 (-8,7E-07)	0,087 (7,9E-07)
$\overline{v'\overline{w'}}$ (№ 1)	1/0,016 (-3,8E-04)	1/0,025 (-0,0028)	1/0,033 (-0,0014)	1/0,015 (6,3E-05)	1/0,024 (-0,0020)
$\overline{K}_{W_3} = 2\overline{W\overline{W}} + 2\overline{W\overline{w'}} + 2\overline{W\overline{w'}} + \overline{W^2} + \overline{w'^2}$					
$2\overline{W\overline{W}}$ (№ 5)	0,012 (2,0E-05)	0,012 (9,3E-06)	0,016 (1,0E-04)	0,030 (3,5E-05)	0,0098 (7,0E-05)
$2\overline{W\overline{w'}}$ (№ 3)	0,0016 (4,2E-07)	0,0017 (5,1E-06)	0,0021 (1,6E-07)	0,0031 (3,0E-07)	0,0013 (2,7E-06)
$2\overline{W\overline{w'}}$ (№ 2)	0,0045 (4,3E-06)	0,0083 (8,9E-06)	0,0082 (1,6E-05)	0,0094 (3,9E-06)	0,0063 (6,3E-06)
$\overline{W^2}$ (№ 4)	0,16 (0,020)	0,088 (0,015)	0,11 (0,021)	0,18 (0,012)	0,098 (0,018)
$\overline{w'^2}$ (№ 1)	1/0,26 (0,11)	1/0,26 (0,16)	1/0,33 (0,18)	1/0,14 (0,075)	1/0,34 (0,15)

через «/» приведены абсолютные значения интервалов $\delta Q'$ для этих величин (это позволяет при необходимости вычислить значения δQ других смешанных моментов данной группы). В таблице отсутствуют строки с компонентами (смешанными моментами) для групп \overline{K}_{V_1} , \overline{K}_{W_1} , \overline{K}_{W_2} , поскольку они аналогичны компонентам из других групп (\overline{K}_{U_2} , \overline{K}_{U_3} , \overline{K}_{V_3} соответственно).

Согласно таблице, сделанный ранее вывод о доминировании диапазонов изменения смешанных моментов, принадлежащих наборам № 1 ($\overline{F_i\overline{F_j}}$), № 4 ($\overline{F_i\overline{F_j}}$), № 5 ($\overline{F_i\overline{F_j}}$), справедлив для всех сезонов года (всех месяцев, включенных в анализ). Диапазоны изменения остальных смешанных моментов существенно меньше. Фактически это означает, что при введении в анализ уравнений движения (1) мезо-гамма-масштабов вариаций компонентов вектора ветра их влияние на конечный результат (достоверность моделирования поля ветра с высоким пространственно-временным разрешением) может быть весьма существенным. Это основной вывод по результатам проделанной работы. Рассмотрим далее несколько частных вопросов.

3.2. Влияние длительности интервала осреднения

Все представленные выше результаты были получены при оценках смешанных моментов за интервал времени $\delta t = 10$ мин. При этом возникает вопрос о статистической достоверности оценок смешанных моментов, содержащих детерминированные (F) и локальные компоненты ветра (\overline{F}) из-за небольшой длительности интервала осреднения. В первую очередь это важно для наборов № 4 ($\overline{F_i\overline{F_j}}$) и № 5 ($\overline{F_i\overline{F_j}}$), поскольку они при $\delta t = 10$ мин, согласно таблице, могут быть сравнимы по диапазону вариаций со смешанными моментами турбулентных составляющих или даже превышать их. Для ответа на поставленный вопрос были проведены дополнительные расчеты смешанных моментов по интервалам $\delta t = 30$ и 60 мин. Установлено, что увеличение интервала δt наибольшее влияние оказывает на смешанные моменты вида $\overline{F_i\overline{F_j}}$, существенно уменьшая диапазоны их изменения и вклад в суммы соответствующих групп. Можно сделать вывод, что увеличение δt приведет

к выполнению неравенства $\delta Q_n = \delta Q(\overline{F_i \overline{F_j}}) / \delta Q' \ll \ll 1$ и к возможности пренебрежения смешанными моментами данного вида.

Влияние увеличения δt на смешанные моменты $\overline{F_i \overline{F_j}}$ заключается в их «сглаживании» в суточном ходе и некотором уменьшении диапазона вариаций, но без кардинального изменения по величине. Примеры результатов расчета при разных δt для эпизода, который представлен на рис. 1 и 2, приведены на рис. 4. По-видимому, выбор конкретных значений δt при обработке (или моделировании) должен определяться характером решаемой задачи.

3.3. Зависимость смешанных моментов от скорости ветра

Определенный интерес представляет взаимосвязь смешанных моментов, содержащих флуктуации компонентов вектора ветра локального масштаба, с метеорологическими характеристиками, такими как средняя скорость ветра и градиент температуры. Рассмотрим сначала взаимосвязь смешанных моментов со средней (за 10 мин) скоростью ветра. Ограничимся результатами, полученными в феврале и августе 2021 г., характеризующими зимнее и летнее время. Напомним, что все измерения проводились

в приземном слое на высоте 10 м над территорией с естественным ландшафтом. Уделим основное внимание сопоставлению смешанных моментов вида $\overline{F_i' F_j'}$ (набор № 1) и $\overline{F_i \overline{F_j}}$ (набор № 4), поскольку они, согласно таблице, превышают по абсолютным значениям другие виды смешанных моментов. Анализ комбинаций $\overline{F_i \overline{F_j}}$ проводить не будем из-за их слабой статистической обеспеченности при осреднении за 10 мин. Сопоставим, прежде всего, смешанные моменты $\overline{F_i' F_i'}$ и $\overline{F_i \overline{F_i}}$, т.е. дисперсии компонентов ветра турбулентного и локального масштабов (термин «дисперсия» для смешанного момента $\overline{F_i \overline{F_i}}$ носит условный характер). В качестве примера на рис. 5 приведены зависимости дисперсий от скорости продольного ветра в феврале и августе 2021 г. В частности, в августе «облака» экспериментальных точек несколько шире, чем в феврале. Обратим также внимание на то, что при скорости ветра более 2 м/с дисперсия вертикального ветра локального масштаба становится существенно меньше дисперсии турбулентного масштаба. Дисперсии горизонтальных компонентов обоих масштабов примерно одинаково зависят от скорости ветра. Очевидно, что увеличение интервала осреднения δt приведет к сужению «облаков» экспериментальных данных и в первую очередь – для дисперсий вида $\overline{F_i \overline{F_i}}$.

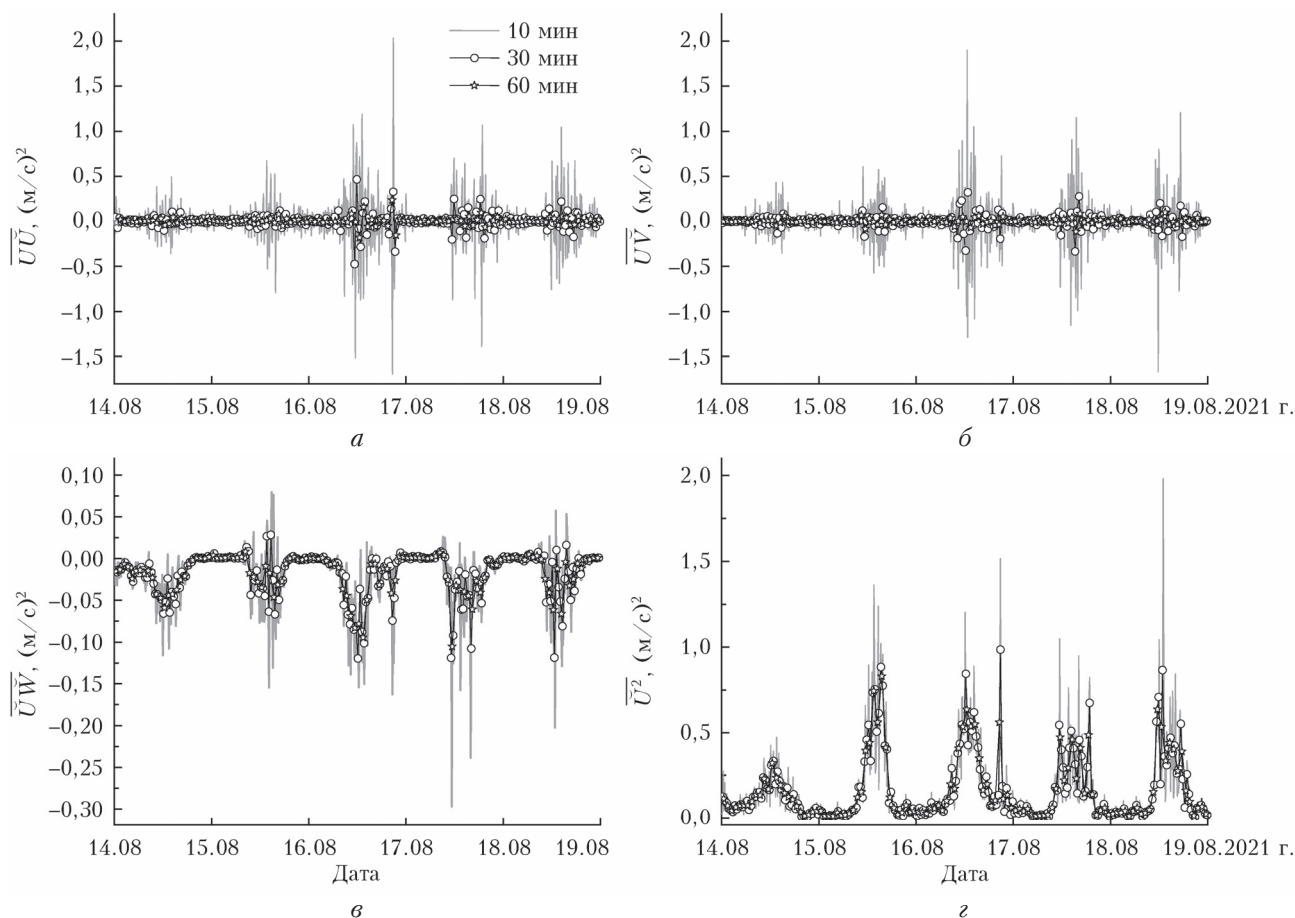


Рис. 4. Примеры смешанных моментов при разных длительностях интервала осреднения (БЭК, высота 10 м)

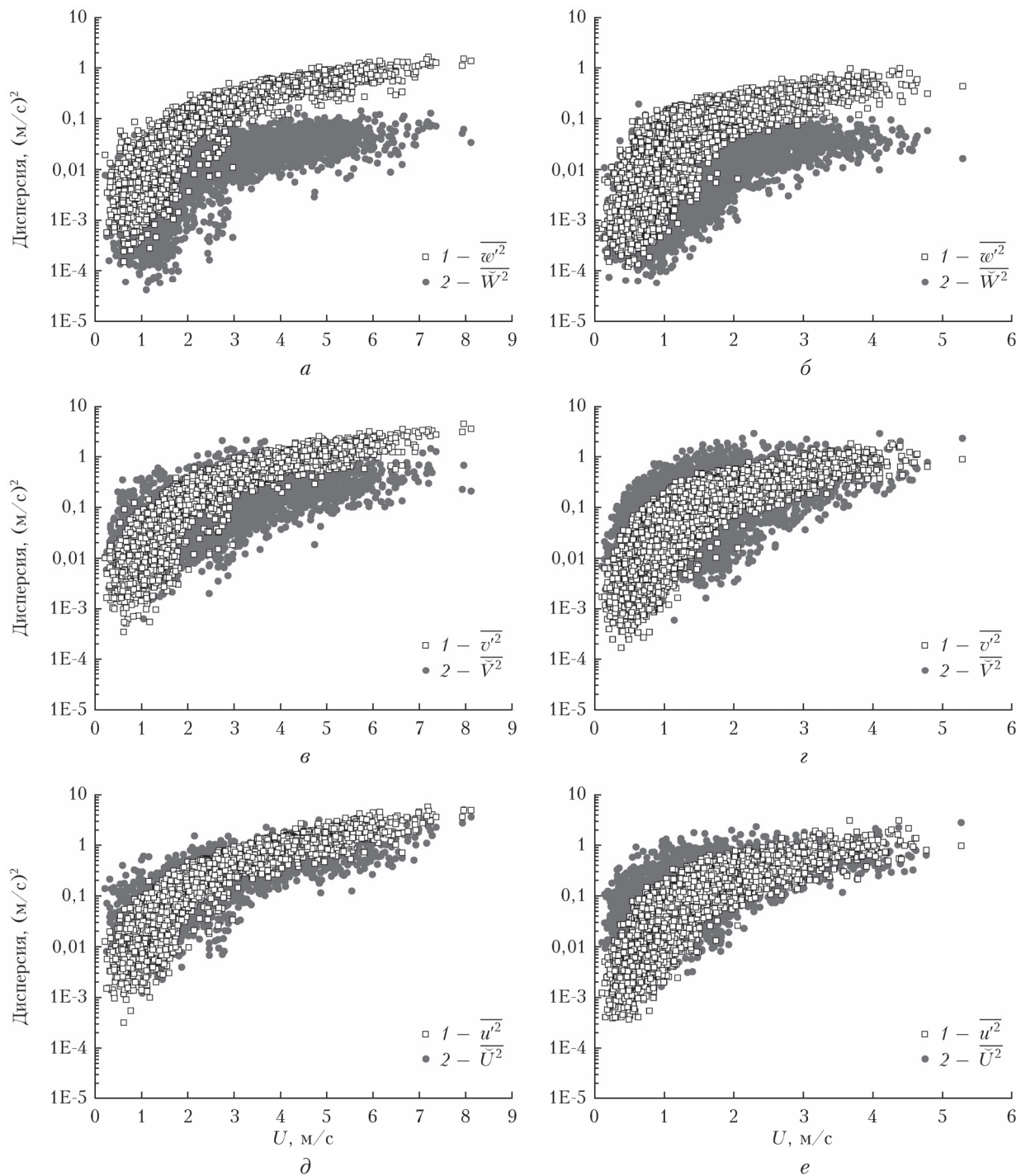


Рис. 5. Зависимость дисперсий компонентов вектора ветра турбулентного (1 – открытые символы) и локального (2 – сплошные символы) масштабов от скорости ветра в феврале (левая колонка) и августе (правая колонка) 2021 г.; ось ординат представлена в логарифмическом масштабе

Смешанные моменты, образованные ортогональными компонентами ветра, также зависят от его средней скорости. Понятно, что увеличение скорости приводит к увеличению смешанных моментов (по абсолютному значению). Но для разных масштабов это происходит по-разному. Примеры приведены на рис. 6. Обратим внимание на то, что в феврале смешанный момент $\overline{u'w'}$ (рис. 6, а), оп-

ределяющий величину динамической скорости (скорости трения), увеличивался значительно (по абсолютному значению) с ростом скорости ветра по сравнению с августом. Можно сделать общий вывод, что, во-первых, рассмотренные смешанные моменты ортогональных компонентов вектора ветра турбулентных и локальных масштабов увеличиваются (по абсолютным значениям) с увеличением

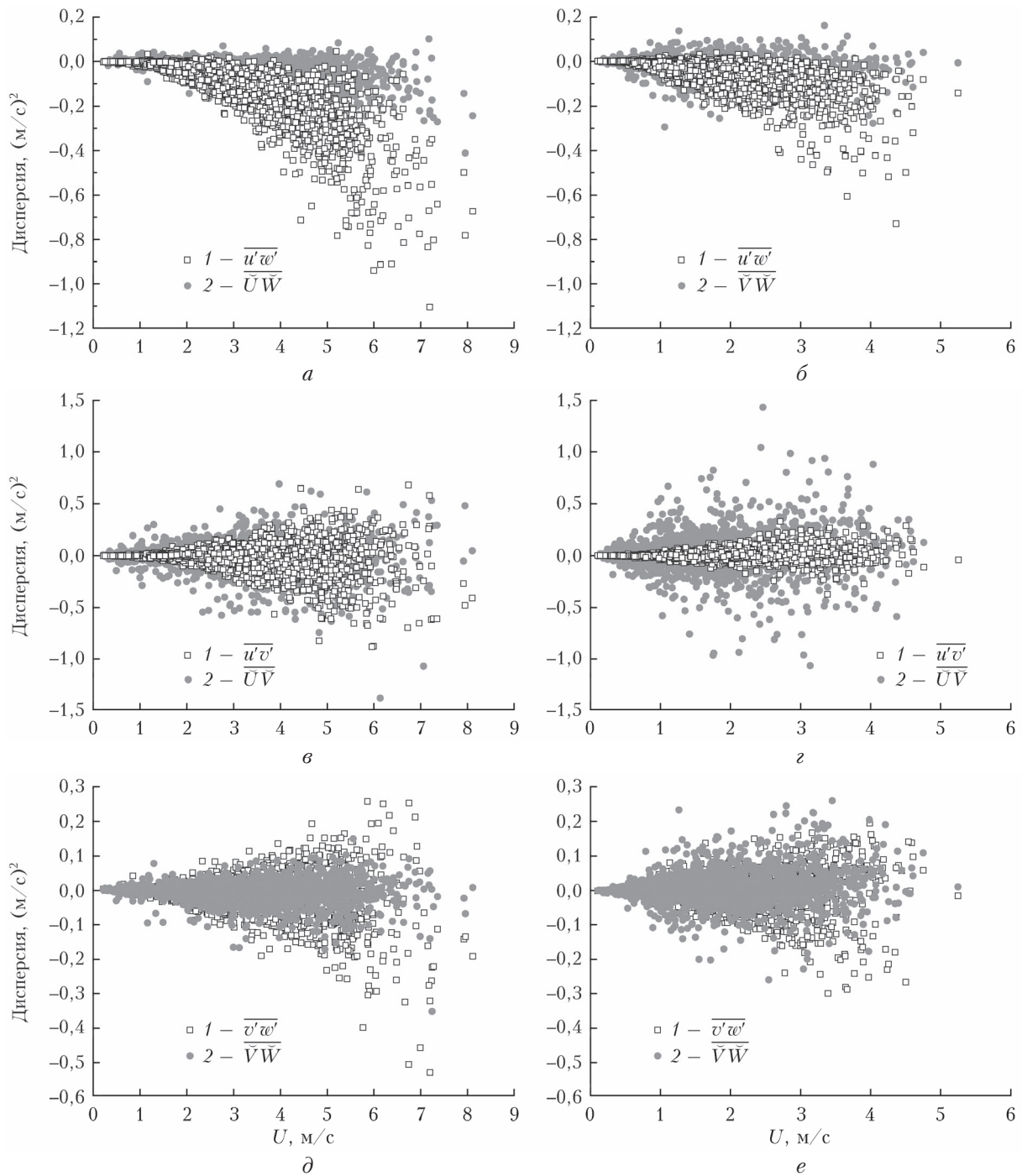


Рис. 6. Зависимость «перекрестных» смешанных моментов турбулентного (1 – открытые символы) и локального (2 – сплошные символы) масштабов от скорости ветра в феврале (левая колонка) и августе (правая колонка) 2021 г.

средней скорости ветра, во-вторых, это увеличение сопоставимо по величинам для обоих масштабов. Хотя могут быть и особые случаи, как это демонстрирует рис. 6, г.

Мы не будем в деталях анализировать взаимосвязь смешанных моментов со средней скоростью ветра, поскольку это является отдельной задачей, корректное решение которой необходимо в процессе параметризации данных взаимосвязей при моделировании поля ветра на основе системы уравнений (1).

3.4. Зависимость смешанных моментов от типа стратификации приземного слоя

Рассмотрим теперь взаимосвязь смешанных моментов вида $\overline{F_i'F_j'}$ и $\overline{F_i}\overline{F_j}$ с градиентом температуры γ_{50} в приземном слое. Под этим градиентом будем понимать разность температур $T(H)$ между уровнями $H = 50$ м и 0 м, поделенную на 50 м, т.е.

$\gamma_{50} = [T(50) - T(0)]/50$. Эти температуры измерялись метеорологическим температурным профилимером МТР-5 [19, 20], расположенным рядом с УЗМ «Метео-2» (на расстоянии примерно 20 м). Шаг измерения температуры по высоте составлял 50 м, а по времени – 5 мин (для сравнения использовались осредненные за 10 мин температуры). Если $\gamma_{50} > 0$, то в приземном слое присутствовала инверсия температуры.

Как и следовало ожидать, наибольшие значения смешанных моментов (по абсолютной величине) реализуются при неустойчивой или близкой к нейтральной ($\gamma_{50} \leq 0$) стратификации. Переход к устойчивой

стратификации ($\gamma_{50} > 0$) существенно уменьшает диапазоны вариаций смешанных моментов как турбулентного, так и локального масштабов. Типичные примеры зависимости дисперсий $\overline{F'_i F'_i}$ и $\overline{F_i F_i}$ от градиента γ_{50} для февраля и августа приведены на рис. 7.

Согласно графикам на рис. 7 зависимость дисперсии компонентов вектора ветра от градиента температуры в приземном слое несколько различается в феврале и августе. В частности, в августе дисперсии компонентов локального масштаба при одних и тех же *положительных* градиентах температуры могут быть больше, чем в феврале.

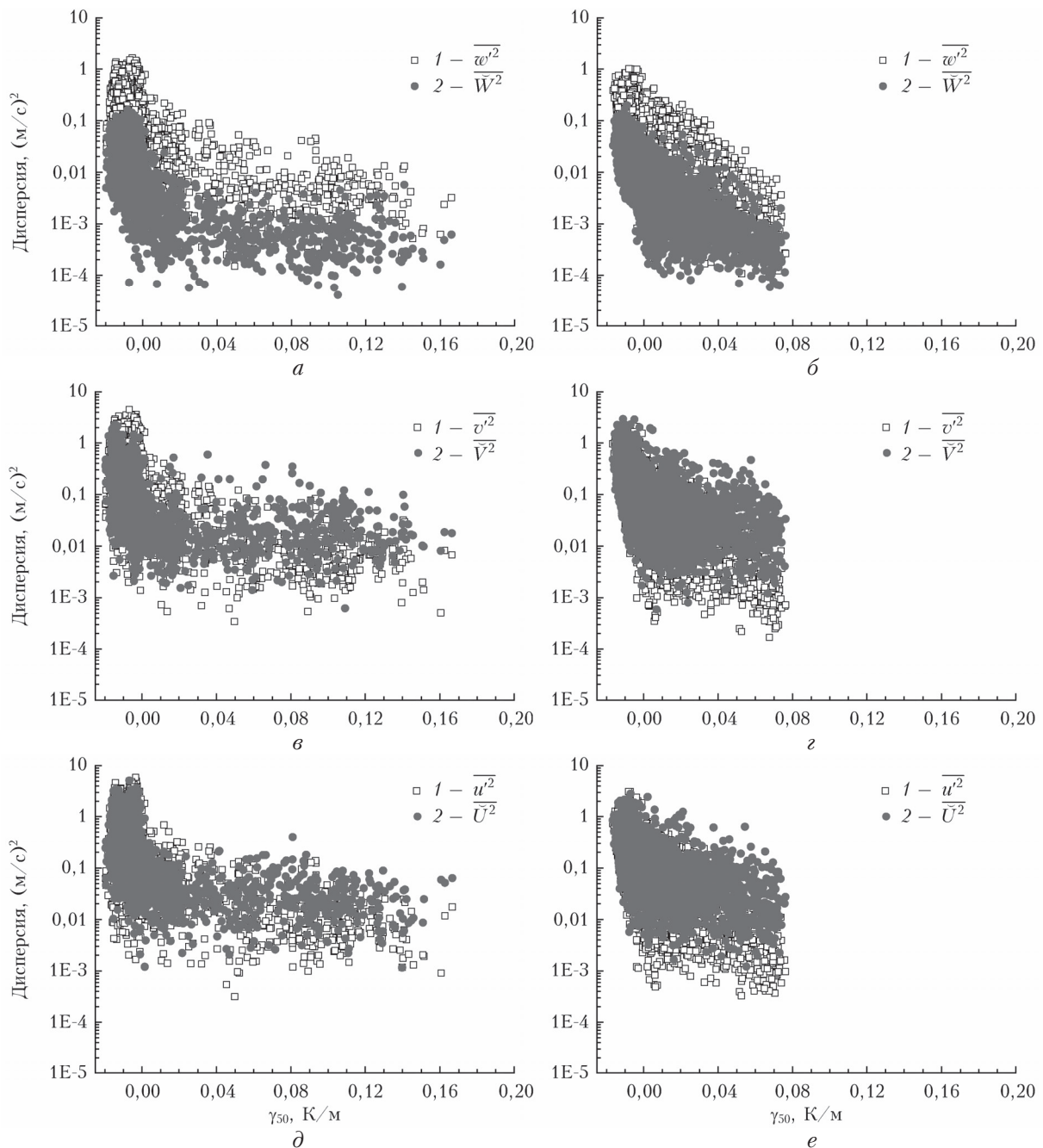


Рис. 7. Зависимость смешанных моментов турбулентного (1 – открытые символы) и локального (2 – сплошные символы) масштабов от градиента температуры в феврале (левая колонка) и августе (правая колонка) 2021 г.

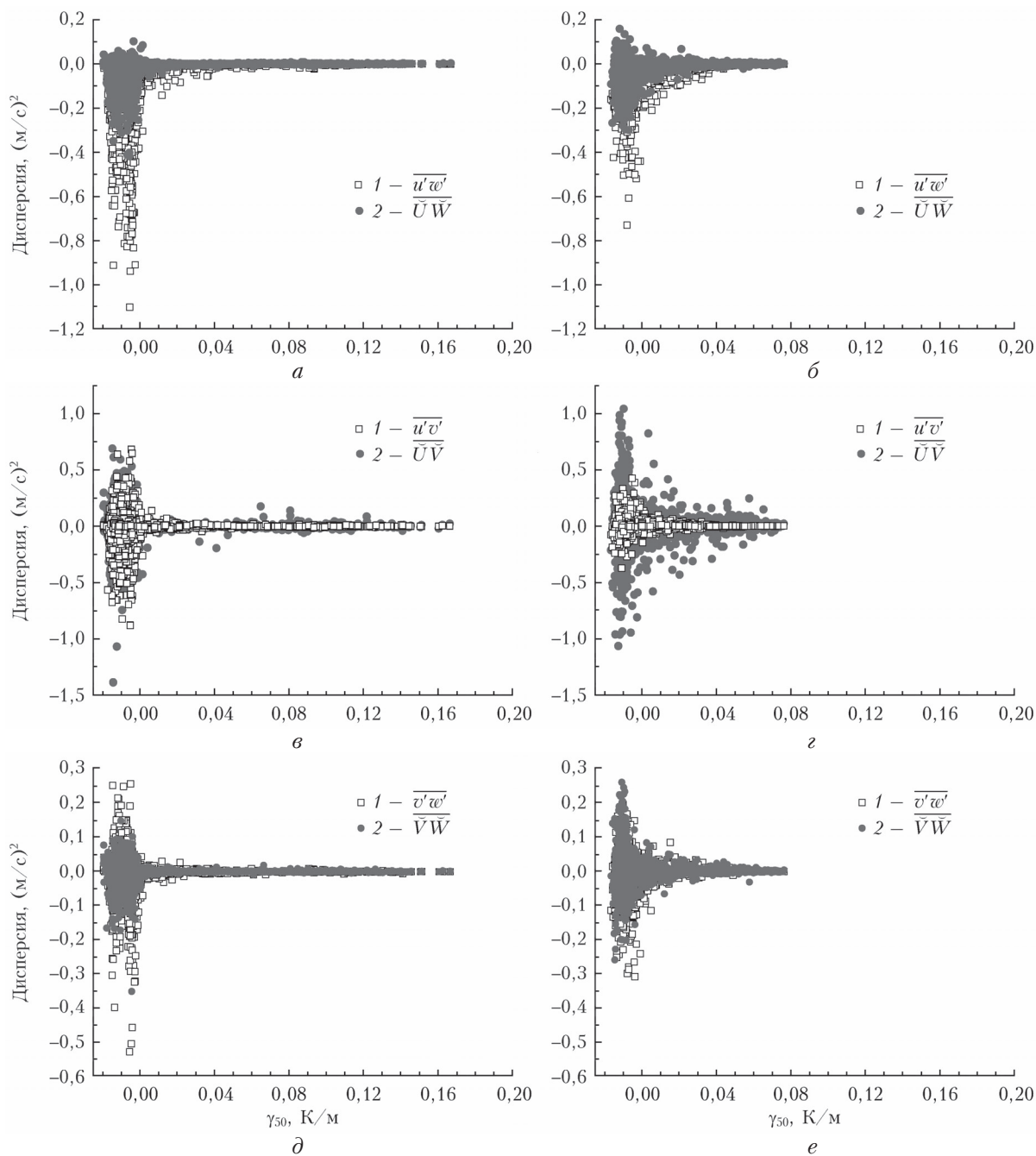


Рис. 8. Зависимость «перекрестных» смешанных моментов турбулентного (1 – открытые символы) и локального (2 – сплошные символы) масштабов от градиента температуры в феврале (левая колонка) и августе (правая колонка) 2021 г.

Однако наиболее заметно влияние градиентов температуры на «перекрестные» смешанные моменты $\overline{F_i'F_j'}$ и $\overline{F_i\tilde{F}_j}$ ($i \neq j$). Основной вывод: при инверсии температуры величины этих смешанных моментов стремятся к нулю как в феврале, так и в августе. Этот вывод иллюстрирует рис. 8.

Заключение

Обобщая полученные результаты, можно сделать вывод, что учет «локальной» (мезо-гамма-масштабной) составляющей компонентов вектора ветра

при решении системы уравнений движения (1) может оказаться полезным для совершенствования алгоритмов моделирования (прогноза) состояния пограничного слоя атмосферы с высоким пространственно-временным разрешением. Влияние смешанных моментов с компонентами локального масштаба на вариации поля ветра сопоставимо с влиянием турбулентных составляющих, а в некоторых случаях и превышает его.

Краткий анализ зависимости смешанных моментов, формируемых компонентами локальных и турбулентных масштабов, от метеорологических параметров (скорости ветра и градиента температуры

воздуха в приземном слое) показал, что эти зависимости примерно одинаковы для обоих типов смешанных моментов. Хотя в ряде случаев имеются и некоторые различия. Мы не ставили задачу детального анализа этих ситуаций, а также не включили в анализ суточный ход смешанных моментов, который достаточно выражен в августе, что демонстрируют, например, графики на рис. 2, 4, но слабо выражен в феврале (оставим этот вывод без иллюстраций). Определенный интерес представляет и вопрос о возможной «компенсации» влияния тех или иных смешанных моментов при формировании величин \bar{K}_{ij} (соотношения (4)–(6)). Анализ показал, что при суммировании смешанных моментов при формировании \bar{K}_{ij} не происходит существенно понижения степени влияния локальных масштабов. Этот вывод также оставим без иллюстраций, хотя он может быть получен из более подробного анализа таблицы.

Понятно, что все результаты и сделанные на их основе выводы относятся к конкретному пункту наблюдения. Однако мы полагаем, что основной вывод о важности учета смешанных моментов, содержащих компоненты вектора ветра мезо-гамма-масштаба, будет справедлив и для других пунктов наблюдения с подобным типом подстилающей поверхности. Кроме того, можно ожидать, что выводы, полученные для приземного слоя, актуальны и для всего пограничного слоя атмосферы.

Отметим еще один важный момент: для решения системы уравнений движения (1) требуется не только рассматривать величины смешанных моментов, входящих в группы K_{ij} , но и вычислять их производные по времени и по пространственным координатам согласно выражениям (2) и (3). В этой связи возможны случаи, когда величина какого-либо смешанного момента большая (по абсолютному значению), но производная от него может быть существенно меньше производной от смешанного момента с небольшой величиной. В этой связи в дальнейшем нами запланирован анализ производных, входящих в соотношения (2) и (3).

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. Boyko V., Vercauteren N. Multiscale shear forcing of turbulence in the nocturnal boundary layer: A statistical Analysis // Bound.-Lay. Meteorol. 2021. V. 179, iss. 1. P. 43–72. DOI: 10.1007/s10546-020-00583-0.
2. 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. DOI: 10.3390/atmos12081063.
3. Simon J.S., Chow F.K. Alternative anisotropic formulations for Eddy-Viscosity models in the Weather Research and Forecasting Model // Bound.-Lay. Meteorol. 2021. V. 181, N 1. P. 11–37. DOI: 10.1007/s10546-021-00642-0.
4. Doubrava P., Mucoz-Esparza D. Simulating real atmospheric boundary layers at gray-zone resolutions: How do currently available turbulence parameterizations perform? // Atmosphere. 2020. V. 11, N 4. DOI: 10.3390/atmos11040345.
5. Clement R.J., Moncrieff J.B. A functional approach to vertical turbulent transport of scalars in the atmospheric surface layer // Bound.-Lay. Meteorol. 2019. V. 173, N 3. P. 373–408. DOI: 10.1007/s10546-019-00474-z.
6. Jeworrek J., West G., Stull R. Evaluation of cumulus and microphysics parameterizations in WRF across the convective gray zone // Weather Forecast. 2019. V. 34, N 4. P. 1097–1115. DOI: 10.1175/WAF-D-18-0178.1.
7. Honnert R. Grey-zone turbulence in the neutral atmospheric boundary layer // Bound.-Lay. Meteorol. 2019. V. 170, N 2. P. 191–204. DOI: 10.1007/s10546-018-0394-y.
8. Kealy J.C., Efsthathiou G.A., Beare R.J. The onset of resolved boundary-layer turbulence at grey-zone resolutions // Bound.-Lay. Meteorol. 2019. V. 171, N 1. P. 31–52. DOI: 10.1007/s10546-018-0420-0.
9. Lancz D., Szintai B., Honnert R. Modification of a parametrization of shallow convection in the grey zone using a mesoscale model // Bound.-Lay. Meteorol. 2018. V. 169, iss. 3. P. 483–503. DOI: 10.1007/s10546-018-0375-1.
10. 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.-Lay. Meteorol. 2017. V. 163, N 1. P. 69–89. DOI: 10.1007/s10546-016-0217-y.
11. Honnert R., Couvreur F., Masson V., Lancz D. Sampling the structure of convective turbulence and implications for grey-zone parameterizations // Bound.-Lay. Meteorol. 2016. V. 160, N 1. P. 133–156. DOI: 10.1007/s10546-016-0130-4.
12. Гладких В.А., Невзорова И.В., Одинцов С.Л. Потоки тепла в приземном слое атмосферы с разложением исходных компонентов на различные масштабы // Оптика атмосф. 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. DOI: 10.1134/S1024856021060130.
13. Атмосферная турбулентность и моделирование пространства примесей // под ред. Ф.Т.М. Ныстадта, Х. Ван Допа. Л.: Гидрометеониздат, 1985. 352 с.
14. 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.
15. Гладких В.А., Макиенко А.Э. Цифровая ультразвуковая метеостанция // Приборы. 2009. № 7. С. 21–25.
16. Состав наиболее ценного оборудования // ИОА СО РАН. Томск, 2022. URL: <https://www.iao.ru/ru/structure/juc/equipment> (дата обращения: 30.03.2022).
17. Одинцов С.Л., Федоров В.А. Исследование вариаций скорости ветра мезометеорологического масштаба по содарным наблюдениям // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20, № 11. С. 986–993.
18. Гладких В.А., Невзорова И.В., Одинцов С.Л. Статистика внешних масштабов турбулентности в приземном слое атмосферы // Оптика атмосф. 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. DOI: 10.1134/S1024856019040055.

19. *Кадыгров Е.Н., Кузнецова И.Н.* Методические рекомендации по использованию данных дистанционных измерений профилей температуры в пограничном слое

микроволновыми профилемерами: теория и практика. Долгопрудный: Физматкнига, 2015. 171 с.

20. *Кадыгров Е.Н.* Микроволновая радиометрия атмосферного пограничного слоя – метод, аппаратура, результаты измерений // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 7. С. 697–704.

V.A. Gladkikh, A.A. Mamysheva, I.V. Nevzorova, S.L. Odintsov. **Estimation and comparison of mixed moments of turbulent- and mesometeorological-scale wind vector components in the surface air layer.**

The mixed moments of wind vector components on the turbulent and meso-gamma scales calculated from experimental data obtained in the surface air layer at an altitude of 10 m are compared. The statistics of mixed moments for several months in different seasons of 2021 is presented. The dependence of mixed moments on the wind velocity and temperature stratification in the surface air layer is briefly analyzed. The values of mixed moments formed by the wind field components on the meso-gamma scale are comparable with those formed by the mixed moments of turbulent components of the wind vector.