

АКУСТООПТИЧЕСКИЕ И РАДИООПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 551.510.522+551.551.8

Потоки тепла в приземном слое атмосферы с разложением исходных компонентов на различные масштабы

В.А. Гладких¹, 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 24.12.2020 г.

Обсуждаются результаты расчетов потоков тепла (кинематических потоков температуры) в приземном слое атмосферы на основе экспериментальных данных о вариациях температуры воздуха и компонентов вектора ветра различного масштаба для территории с естественным ландшафтом (на двух высотах в приземном слое) и урбанизированной территории. Сделан вывод о необходимости учета потоков тепла «локального» масштаба наряду с учетом потоков «турбулентного» масштаба при прогнозировании состояния атмосферы с использованием моделей высокого пространственного разрешения.

Ключевые слова: атмосфера, поток тепла, приземный слой, серая зона, турбулентность; atmosphere, heat flux, surface layer, gray zone, turbulence.

Введение

В последние годы активно развиваются алгоритмы прогноза состояния атмосферы с использованием мезомасштабных моделей высокого пространственного разрешения на сетках с горизонтальными размерами от нескольких сотен метров до нескольких километров, в том числе на территории РФ (см., например, [1–4]). При этом, как правило, подразумевается, что текущие значения метеорологических параметров являются суммой крупномасштабной («детерминированной») и случайной («турбулентной») составляющих. При разработке моделей высокого разрешения может оказаться полезным введение в них еще и некоторого «промежуточного» масштаба (назовем его «локальным»). Это подразумевает, что какой-либо метеорологический параметр можно представить как сумму трех составляющих: «детерминированной» + «локальной» + «турбулентной». Подобный подход не является оригинальным. О его перспективности (и необходимости) упоминалось во многих известных публикациях (например, [5, 6]). Однако отмечались и сложности при выделении «локальных» составляющих и интерпретации их смешанных моментов, в частности потоков тепла и импульса.

В настоящее время прогностическое моделирование с включением «локальных» вариаций метеорологических параметров получило новое развитие.

В ряде публикаций последних лет [7–15] при проведении моделирования область «локальных» вариаций называют «серой зоной» (gray zone). В связи с актуальностью исследования «серой зоны» мы полагаем, что представленные далее экспериментальные данные, касающиеся вариаций метеорологических параметров «локального» масштаба, могут быть полезны при уточнении моделей высокого пространственного разрешения.

Поскольку одним из наиболее важных и сложных блоков в алгоритмах прогноза состояния атмосферы является учет процессов переноса тепла, основная цель нашей работы заключается в оценке и сопоставлении величин потоков тепла «локального» и «турбулентного» масштабов по трем осям прямоугольной системы координат. При этом рассматривались две возможные системы координат: «стационарная» и «сопровождающая». Безусловный интерес представляет сравнение потоков тепла над территориями с разной структурой подстилающей поверхности. В этой связи обсуждаются результаты, полученные над естественным ландшафтом и на урбанизированной территории.

Пункты и приборы для измерения исходных данных. Методика обработки

Далее излагаются результаты анализа экспериментальных данных, полученных ультразвуковыми метеостанциями (УЗМ) «Метео-2» [16]. УЗМ обеспечивали измерение компонентов вектора ветра

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

по осям «юг/север», «восток/запад» и в вертикальном направлении. Измерялись также температура и относительная влажность воздуха, атмосферное давление. Частота получения данных составляла 10 Гц. Две УЗМ размещались на высотах 5 и 10 м (на одной мачте) на территории Базового экспериментального комплекса (БЭК) Института оптики атмосферы (ИОА) СО РАН (пригород Томска, естественный ландшафт, большая открытая поляна с травяным покрытием). Еще одна УЗМ размещалась на крыше лабораторного корпуса ИОА СО РАН (г. Томск, Академгородок) на высоте 5 м от уровня крыши (17 м от подстилающей поверхности). Для обработки экспериментальных данных было подготовлено специализированное программное обеспечение, позволявшее проводить фильтрацию исходных выборок метеорологических параметров в заданном частотном диапазоне, а затем вычислять смешанные моменты.

Фильтрация исходных выборок (температуры воздуха и проекций вектора ветра на оси заданной системы координат) проводилась с использованием фильтра нижних частот, полосового фильтра (ПФ) и фильтра верхних частот. В итоге выделялись, соответственно, «детерминированная», «локальная» и «турбулентная» составляющие исходной выборки. Мы предположили, что «локальные» вариации того или иного параметра имеют место во временном интервале от 2 до 60 мин (ПФ в частотной области имеет границы 0,000278–0,00833 Гц). Нижняя граница такого «временного окна» (60 мин/0,000278 Гц) соответствует началу «детерминированной» области, а верхняя (2 мин/0,00833 Гц) — началу области «турбулентности». Для разных параметров более правильным было бы задавать и разные границы ПФ, основываясь на некоторых «физических факторах». Например, на оценках внешних масштабов турбулентности в приземном слое [17, 18] и/или на экспериментально выявляемых процессах мезометеорологического масштаба в пограничном слое атмосферы [19]. Но на данном этапе, когда мы стремились получить только общую картину вариаций смешанных моментов метеорологических величин в различных по масштабам областях, было принято решение применить указанные «размеры» ПФ ко всем параметрам.

Без иллюстраций отметим, что относительные погрешности, возникавшие в результате фильтрации, не превышали в среднем 1–2% (отклонение суммы отфильтрованных значений от значений в исходной выборке). Исключение составляли случаи, когда исходные значения были близки к нулю и относительные погрешности фильтрации достигали сотен и даже тысяч процентов. Однако в таких случаях и анализируемые потоки были близки к нулю, в результате чего погрешности фильтрации не вносили существенных ошибок в общие выводы.

Как уже отмечалось выше, обработка проводилась для «стационарной» и «сопровождающей» систем координат. Под «стационарной» (не изменяющейся во времени) понималась следующая ориентация осей прямоугольной системы координат. Компоненты

вектора ветра (с разложением по масштабам): вдоль оси «юг/север» $V_x = V_{x1} + V_{x2} + V_{x3}$, вдоль оси «восток/запад» $V_y = V_{y1} + V_{y2} + V_{y3}$, вдоль вертикальной оси $W = W_1 + W_2 + W_3$. Такая система непосредственно используется при работе УЗМ «Метео-2». Индексы в обозначениях: 1 — «детерминированная» составляющая, 2 — «локальная» составляющая, 3 — «турбулентная» составляющая. В «стационарной» системе координат знак «+» у величин V_{xi} соответствует движению с юга на север, у V_{yi} — движению с востока на запад, у W_i — движению вверх.

В «сопровождающей» системе координат на заданном интервале времени Δ в приземном слое определяется среднее направление горизонтального ветра и вдоль него вычисляется скорость «продольного» ветра (U). Перпендикулярная к нему составляющая (в горизонтальной плоскости) — «поперечный» ветер (V); в рассматриваемых далее результатах знак «+» у этого компонента — движение вправо от направления основного потока. Для вертикального ветра обозначение направлений движения такое же, как и в «стационарной» системе. В итоге получаются выборки «мгновенных» значений $U = U_1 + U_2 + U_3$, $V = V_1 + V_2 + V_3$ и $W = W_1 + W_2 + W_3$, которые затем подвергаются фильтрации и последующей обработке.

Естественно, что температура воздуха в обеих системах координат одна и та же и разлагается на три введенные выше составляющие: $T = T_1 + T_2 + T_3$.

Фильтрация проводилась по суточным измерениям. После фильтрации суточной записи формировались произведения различных комбинаций отфильтрованных выборок. Затем вычислялись средние значения этих произведений по интервалам времени Δ , т.е. получались смешанные моменты. Представленные далее результаты в основном вычислены при $\Delta = 10$ мин. Выбор такого интервала осреднения обусловлен стремлением оценить изменчивость потоков за достаточно короткие периоды времени. Используемые в тексте угловые скобки $\langle \rangle$ обозначают усреднение заключенных в них величин за заданный интервал времени. Отметим следующие свойства осредненных за указанный интервал времени компонентов (на примере температуры воздуха): $\langle T_1 \rangle \neq 0$, $\langle T_2 \rangle \neq 0$, $\langle T_3 \rangle = 0$. Если же усреднять не по интервалу 10 мин, а по более длительной выборке, например по нескольким часам, то $\langle T_1 \rangle \neq 0$, $\langle T_2 \rangle \rightarrow 0$, $\langle T_3 \rangle = 0$.

Поскольку нас интересовали в первую очередь «локальные» и «турбулентные» составляющие, дальнейший материал содержит результаты анализа смешанных моментов метеорологических величин только с индексами 2 и 3.

Потоки тепла (точнее, кинематические потоки температуры) в «сопровождающей» системе координат будут обозначаться как $Q_{Uij} = \langle T_i \cdot U_j \rangle$, $Q_{Vij} = \langle T_i \cdot V_j \rangle$, $Q_{Wij} = \langle T_i \cdot W_j \rangle$, а в «стационарной» — $q_{xij} = \langle T_i \cdot V_{xj} \rangle$, $q_{yij} = \langle T_i \cdot V_{yj} \rangle$, $q_{zij} = \langle T_i \cdot W_j \rangle$, где $i, j = 2, 3$. Причем $Q_{Wij} = \langle T_i \cdot W_j \rangle = q_{zij}$.

Естественный ландшафт (пункт «БЭК»)

Основная задача работы заключалась в сравнении потоков тепла «локального» и «турбулентного» масштабов по трем ортогональным осям декартовых систем координат. Детальное изучение этих потоков на большом количестве экспериментальных данных не предусматривалось. Для обработки был подобран такой период (22–31 августа 2019 г.), когда направ-

ление ветра принимало все возможные значения в диапазоне азимутальных углов от 0 до 360°. Условия проведения измерений иллюстрирует рис. 1 с графиками средних (за 10 мин) значений температуры воздуха, атмосферного давления, модуля горизонтальной скорости и направления ветра, а также компонентов $\langle V_x \rangle$ и $\langle V_y \rangle$ по измерениям в пункте «БЭК» на высоте 5 м.

Приведенный на рис. 1 эпизод характерен для летнего периода. Мы полагаем, что полученные

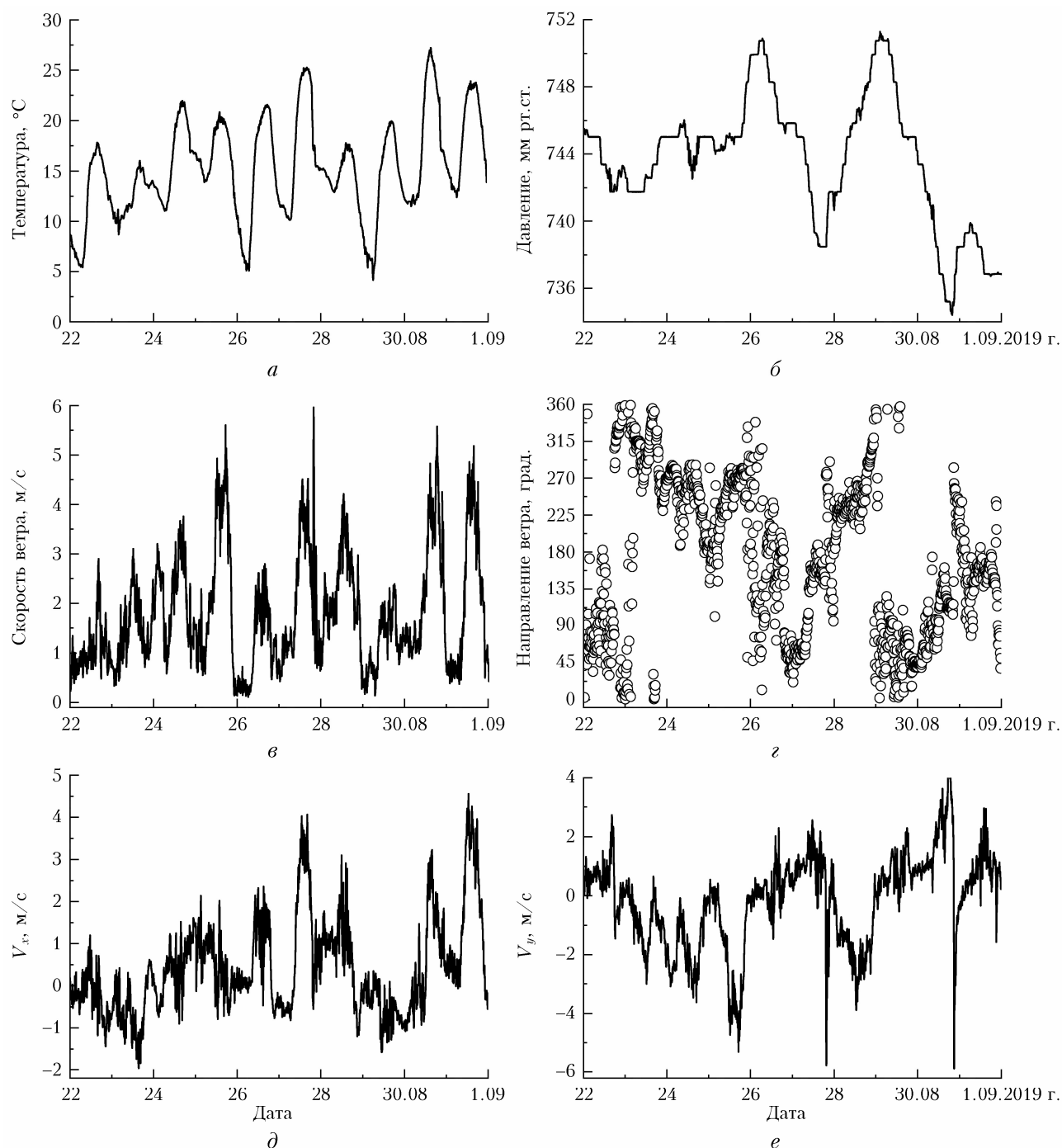


Рис. 1. Температура воздуха (а), атмосферное давление (б), скорость (в), направление ветра (г), составляющие ветра V_x (д) и V_y (е)

в этот период результаты можно распространить и на другие аналогичные синоптические условия.

«Сопровождающая» система координат

Рассмотрим сначала потоки тепла в «сопровождающей» системе координат. На рис. 2 показаны графики Q_{wij} , Q_{Uij} и Q_{Vij} . Потоки рассчитаны по измерениям в пункте «БЭК» на высоте 5 м.

Согласно рис. 2, *а* вертикальные потоки тепла, связанные с «локальными» масштабами вариаций температуры и вертикального ветра ($Q_{W22} = q_{z22}$), заметно меньше по сравнению с «турбулентными» потоками ($Q_{W33} = q_{z33}$). Однако очевидно, что их необходимо учитывать в прогностических моделях в дневное время суток. В то же время «перекрестные» смешанные моменты ($Q_{W23} = q_{z23}$, $Q_{W32} = q_{z32}$; на рис. 2, *а* они не нанесены) пренебрежимо малы.

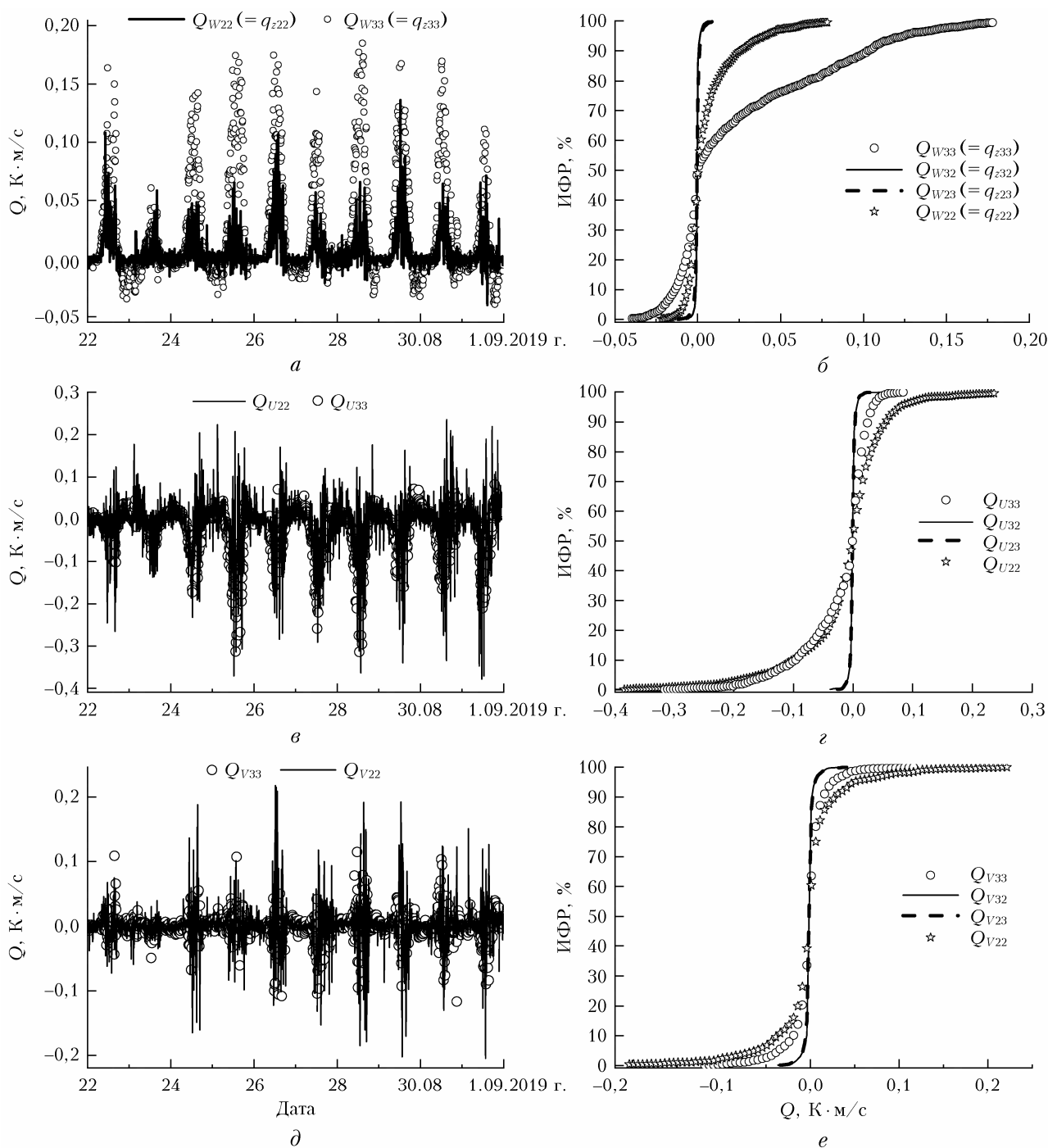


Рис. 2. Потоки тепла разных масштабов (*а, в, д*) и их интегральные функции распределения (*б, г, е*) по трем осям «сопровождающей» системы координат

Это демонстрируют, в частности, интегральные функции распределения (ИФР) $Q_{wij} = q_{zij}$, приведенные на рис. 2, б и построенные по выборкам за обсуждаемый 10-дневный период измерений. Сразу же отметим, что и для других комбинаций температуры и компонентов вектора ветра «перекрестные» смешанные моменты существенно меньше, чем «турбулентные» и «локальные».

Рассчитанные горизонтальные потоки тепла в «сопровождающей» системе координат в продольном направлении (Q_{Uij} при $i = j$) приведены на рис. 2, в. Графики ИФР этих потоков показаны на рис. 2, г. Согласно представленным результатам «локальные» потоки соизмеримы с «турбулентными». И их обязательно надо учитывать при прогнозе состояния атмосферы. Знаки потоков Q_{U22} и Q_{U33} в суточном ходе в целом совпадают; Q_{U22} более изменчив (по величине и знаку) по сравнению с «турбулентным» потоком Q_{U33} .

В «сопровождающей» системе координат поперечные потоки Q_{Vij} , показанные на рис. 2, д, меньше продольных потоков Q_{Uij} . При этом значительный вклад в поперечный поток вносят «локальные» масштабы. Этот вывод подтверждает рис. 2, е, где представлены графики ИФР различных комбинаций Q_{Vij} . Обратим внимание на то, что «корреляция» между знаками «турбулентных» и «локальных» потоков Q_{Vij} слабая. Этим Q_{Vij} отличаются от Q_{Uij} и Q_{wij} .

Особо отметим, что все рассмотренные потоки тепла в «сопровождающей» системе координат имеют явно выраженный суточный ход (как по величинам, так и по знакам).

«Стационарная» система координат

Обратимся теперь к горизонтальным потокам тепла, рассчитанным для «стационарной» системы координат: $q_{xij} = \langle T_i \cdot V_{xj} \rangle$, $q_{yij} = \langle T_i \cdot V_{yj} \rangle$, где $i, j = 2, 3$. Сразу же отметим, что «перекрестные» потоки q_{x23} , q_{x32} , q_{y23} и q_{y32} существенно меньше потоков q_{xii} , q_{yii} и по ним детальный анализ проводить не будет.

Хотя «стационарные» системы координат и используются в алгоритмах прогноза состояния атмосферы, все же экспериментальных данных по потокам тепла вдоль горизонтальных осей таких систем крайне мало. Поэтому рассмотрим более подробно некоторые особенности потоков «турбулентного» и «локального» масштабов, которые могут оказаться важными при использовании в моделях с высоким пространственным разрешением.

В «стационарной» системе координат как «локальные», так и «турбулентные» горизонтальные потоки тепла по обеим осям сопоставимы по величинам (по абсолютным значениям) с «продольными» потоками Q_{Uij} в «сопровождающей» системе координат. В этом можно убедиться, если сравнить рис. 3, а, в, где представлены потоки q_{xii} , q_{yii} , с рис. 2, в.

Результаты, приведенные на рис. 3, позволяют сделать важный вывод о том, что в «стационарной» системе координат вклады «локальных» масштабов вариаций горизонтальных составляющих вектора ветра и температуры воздуха в суммарный поток тепла в целом превышают вклады «турбулентных» масштабов. Величина горизонтальных потоков (как «локальных», так и «турбулентных») зависит от времени суток. Их абсолютные значения в дневное время больше, чем ночью. Однако направление потока вдоль той или иной горизонтальной оси «стационарной» системы координат в разные дни, согласно рис. 3, может менять знак. Рассмотрим эту особенность более подробно.

На рис. 4, а сопоставлены «локальные» потоки q_{x22} и q_{y22} , а на рис. 4, б — «турбулентные» потоки q_{x33} и q_{y33} . Согласно рис. 4, а какой-либо явной взаимосвязи между знаками «локальных» потоков q_{x22} и q_{y22} не наблюдается. Иначе обстоит дело с «турбулентными» потоками q_{x33} и q_{y33} (рис. 4, б). В отдельные дни (например, 24 и 28 августа) можно говорить о достаточно высокой степени «отрицательной» корреляции потоков «турбулентных» масштабов по разным осям «стационарной» системы координат, а в другие дни (например, 27 и 30 августа) — о «положительной» корреляции.

Естественно, возникает вопрос, при каких условиях реализуется та или иная взаимосвязь «турбулентных» потоков q_{x33} и q_{y33} . Можно ожидать, что определенное влияние на знаки этих потоков оказывают скорость и направление среднего ветра. Как указано выше, был специально выбран период измерений, когда направление ветра менялось от 0 до 360° и достаточно часто попадало в тот или иной диапазон углов. Это видно на рис. 1, г и специально иллюстрирует рис. 5, а, где приведена гистограмма распределения направления ветра (азимут, откуда дует ветер), показывающая, сколько времени (в часах) средний ветер имел то или иное направление. Кроме того, на рис. 5, б приведена гистограмма распределения средней скорости (модуля) ветра за период измерений. Мы полагаем, что по направлению ветра статистическая обеспеченность последующих выводов достаточна для всего диапазона от 0 до 360°. А при анализе зависимости от скорости ветра следует ограничиться скоростью до 5 м/с включительно. Задача заключалась в выявлении и рассмотрении особенностей потоков тепла по горизонтальным осям «стационарной» системы координат, а не в полномасштабном изучении статистики этих потоков. Поэтому относительно короткое пребывание параметров ветра (скорости и направления) в том или ином диапазоне значений не препятствует решению поставленной задачи.

Проиллюстрируем взаимосвязь потоков q_{xii} и q_{yii} ($i = 2, 3$) со скоростью V_h и направлением ϕ среднего ветра с помощью 2D-графиков на рис. 6. При построении этих графиков использованы результаты всех измерений с 22 по 31 августа 2019 г. на высоте 5 м в пункте наблюдения «БЭК» (за исключением случаев, когда $V_h > 5$ м/с). Напомним, что

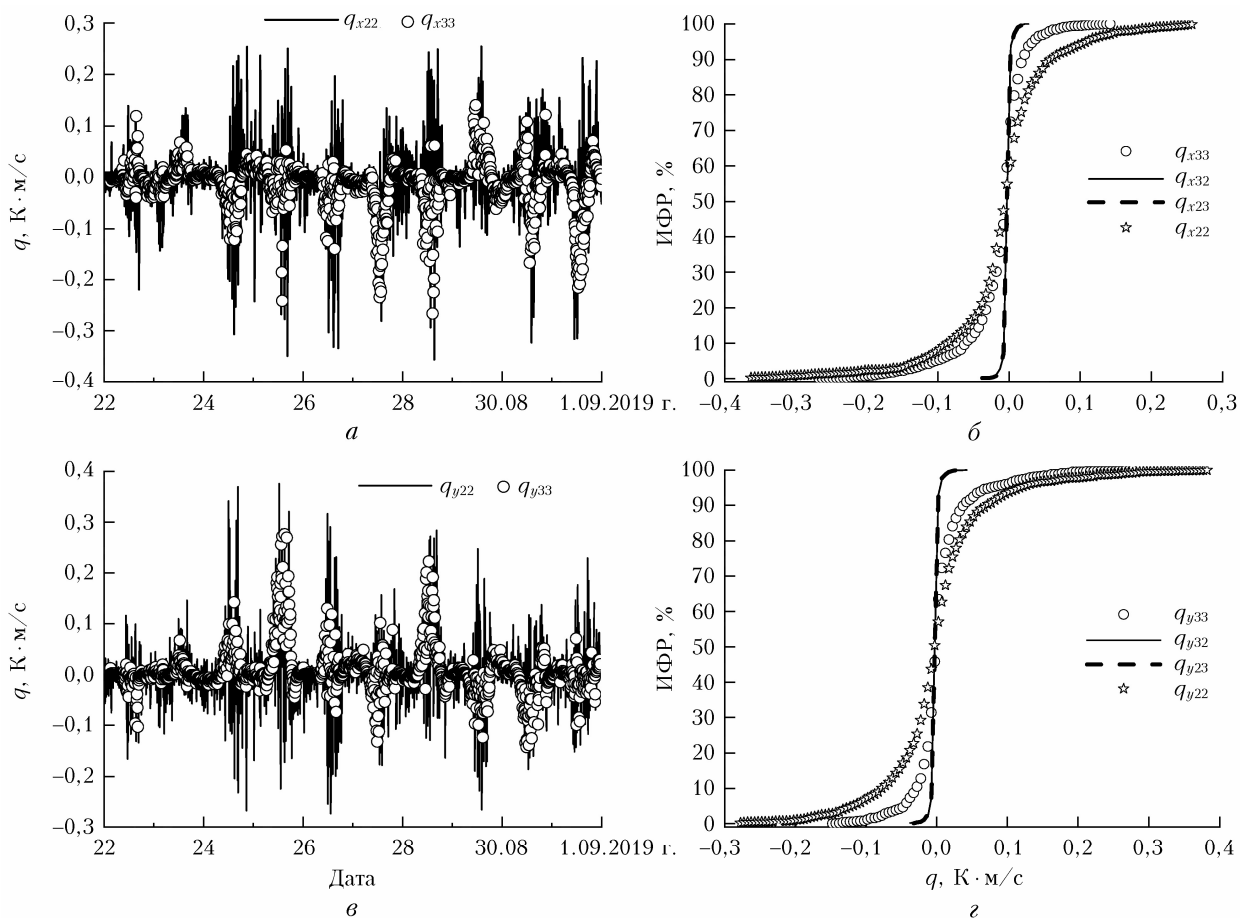


Рис. 3. Горизонтальные потоки тепла разных масштабов (а, в) и их интегральные функции распределения (б, з) в «стационарной» системе координат

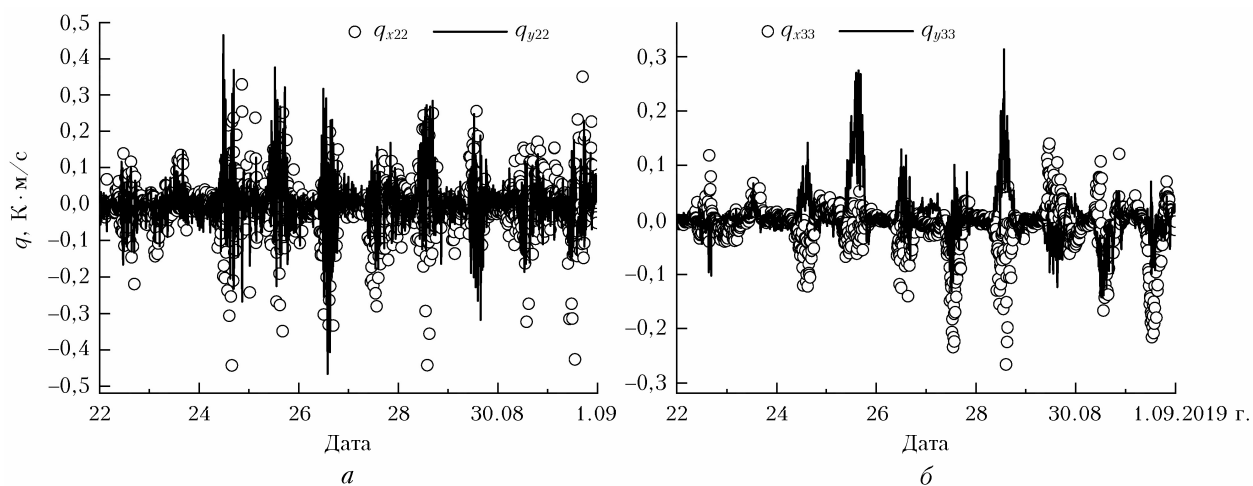


Рис. 4. Сравнение потоков тепла «локального» (а) и «турбулентного» (б) масштабов по разным осям «стационарной» системы координат

потоки q_{xii} соответствуют движению вдоль направления «юг/север», а потоки q_{yii} — вдоль направления «восток/запад».

Согласно рис. 6 скорость и направление среднего ветра заметно влияют на значения только потоков «турбулентных» масштабов. Это проявляется в сосредоточении «больших» значений $|q_{x33}|$ и $|q_{y33}|$ при определенных комбинациях V_x и φ (рис. 6, а, б).

Под «большими» здесь понимаются значения $|q_{x33}, q_{y33}| > 0,05$ ($\text{K} \cdot \text{m}/\text{c}$). В частности, для горизонтального «турбулентного» потока тепла q_{x33} («юг/север», рис. 6, а) при направлении ветра из сектора $110-260^\circ$ хорошо выражена область со скоростями ветра более $2,5$ м/с, в которой этот поток имеет отрицательные значения. Явно выраженная область с положительными значениями потока соответствует

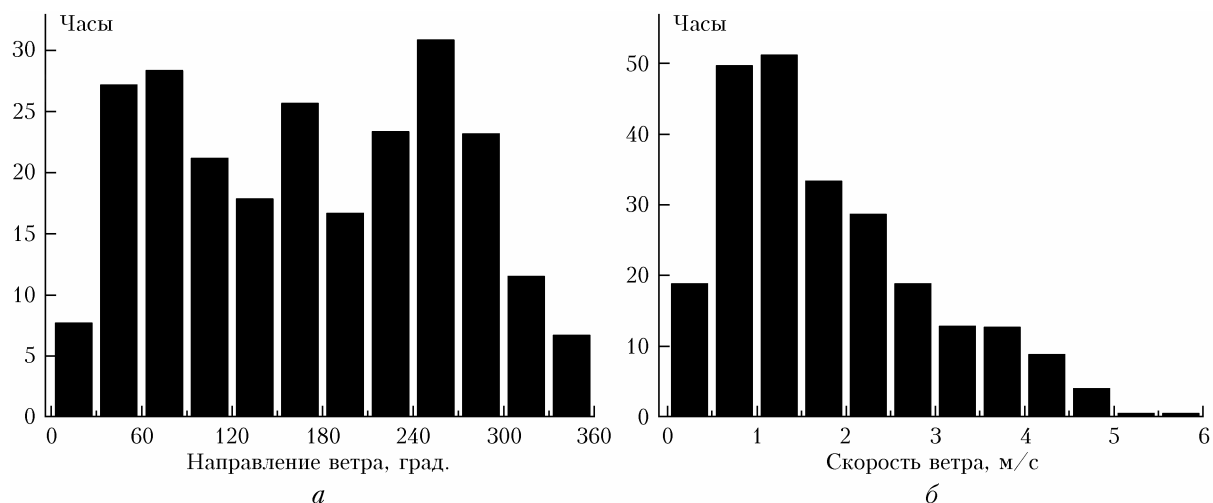


Рис. 5. Гистограммы распределения направления (а) и скорости (б) ветра в пункте «БЭК» на высоте 5 м

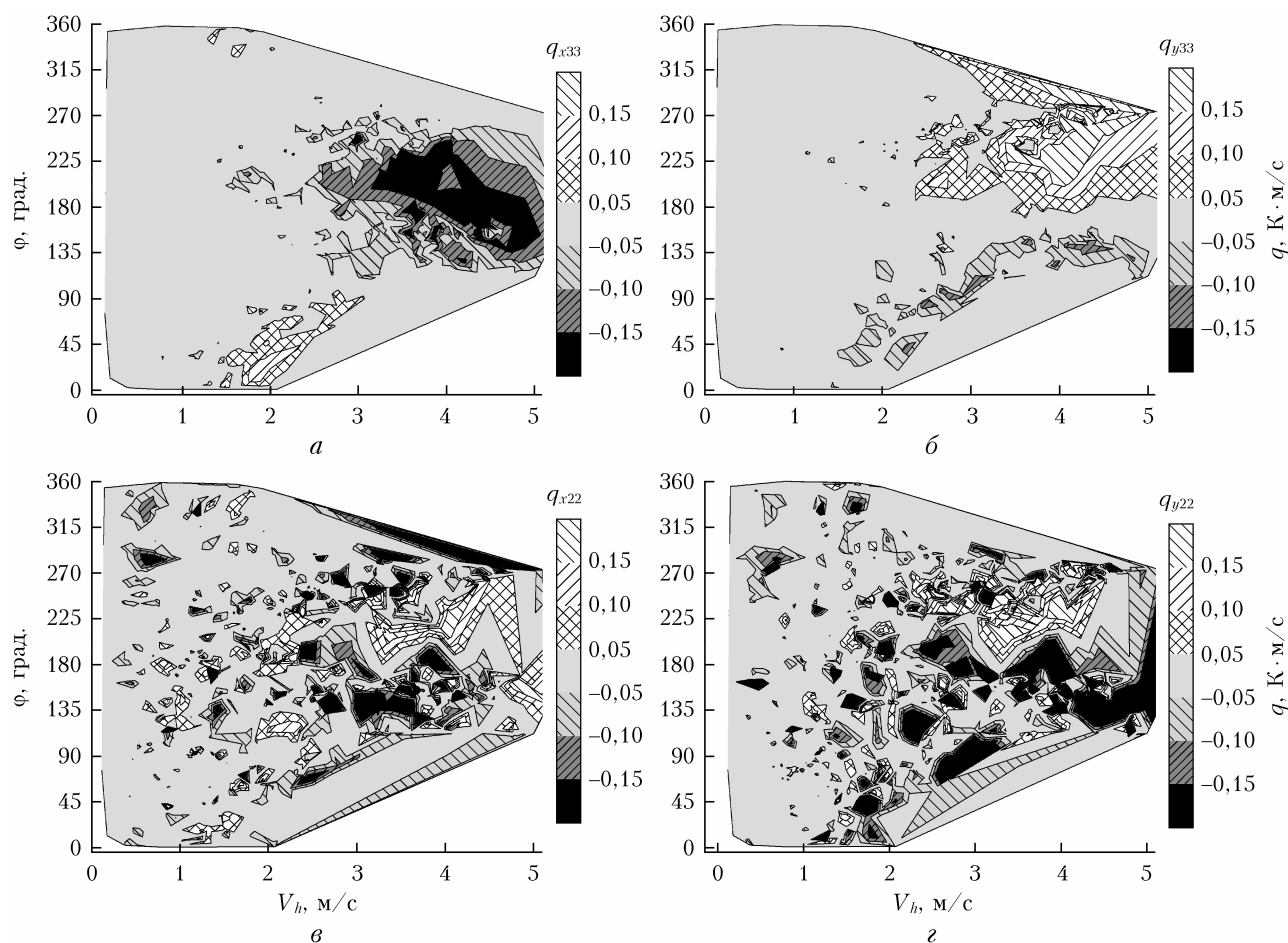


Рис. 6. Зависимость горизонтальных потоков тепла «турбулентного» (а, б) и «локального» (в, г) масштабов от скорости и направления ветра в пункте «БЭК» (5 м) при расчетах в «стационарной» системе координат

диапазону скоростей 1,5–3 м/с при северо-северо-восточном направлении ветра. В свою очередь, поток тепла «турбулентного» масштаба q_{y33} («восток/запад»; рис. 6, б) имеет выраженные области «больших» значений примерно в тех же диапазонах скоростей и направлений ветра, что и q_{x33} , только с обратными знаками.

Горизонтальные потоки тепла «локальных» масштабов (q_{x22} и q_{y22}) не имеют такой выраженной взаимосвязи с конкретными скоростями и направлениями ветра, как потоки «турбулентных» масштабов (см. рис. 6, в, г). Тем не менее увеличение скорости ветра приводит к увеличению (по абсолютным значениям) этих потоков.

Подводя итоги анализа потоков тепла «локального» и «турбулентного» масштабов вдоль горизонтальных осей «стационарной» системы координат в пункте «БЭК» на высоте 5 м (22–31 августа 2019 г.), сформулируем некоторые выводы. Во-первых, перенос тепла «локальными» вариациями температуры и компонентов вектора ветра не менее важен, чем «турбулентными». Во-вторых, заметной корреляции между «локальными» и «турбулентными» вариациями температуры и компонентов вектора ветра нет ($q_{xij} \rightarrow 0$, $q_{yij} \rightarrow 0$ при $i \neq j$, см. рис. 3, б, г). В-третьих, большие (по абсолютному значению) потоки «турбулентных» масштабов реализуются только при определенных значениях скорости и направления среднего ветра, в то время как у потоков «локальных» масштабов такая зависимость выражена нечетко. В-четвертых, потоки тепла «турбулентного» масштаба по разным горизонтальным осям «стационарной» системы координат имеют некоторую взаимосвязь между собой (параметризация которой пока не входила в круг решавшихся задач). И еще отметим вполне ожидаемый факт, что днем процессы горизонтального переноса тепла более активны, чем ночью.

Сравнение потоков на разных высотах

Весь предыдущий анализ был проведен для высоты 5 м в пункте «БЭК». Рассмотрим теперь результаты, полученные в этом же пункте на высоте 10 м (для того же периода 22–31 августа 2019 г.). Сразу отметим, что общие выводы, сделанные для высоты 5 м, справедливы и для высоты 10 м. Различия имеются только в некоторых деталях. «Перекрестные» смешанные моменты (корреляции вариаций «локальных» и «турбулентных» масштабов) рассматривать не будем ввиду их малого вклада в суммарные потоки тепла по всем координатным осям.

Анализ результатов показал, что вертикальные потоки тепла «турбулентных» масштабов на обеих высотах примерно равны. В то же время вертикальный поток «локального» масштаба на высоте 10 м несколько больше (по абсолютным значениям), чем на высоте 5 м. Оставим этот вывод без иллюстраций. Очевидно, что вертикальные потоки в «сопровождающей» и в «стационарной» системах координат совпадают.

При сравнении потоков тепла в горизонтальной плоскости установлено, что в «сопровождающей» системе координат потоки «турбулентных» масштабов в продольном и поперечном направлениях на высотах 5 и 10 м примерно одинаковы (этот вывод оставим без иллюстраций). Область вариаций потоков «локального» масштаба в поперечном направлении (Q_{V22}) на высотах 5 и 10 м также примерно одинакова. А вот область вариаций потоков «локального» масштаба в продольном направлении (Q_{U22}) на высоте 10 м заметно больше, чем на высоте 5 м. Выводы о зависимости горизонтальных потоков «локального» масштаба от высоты при использовании «сопровождающей» системы координат проиллюстрируем на рис. 7, где показаны интегральные функции распределения этих величин.

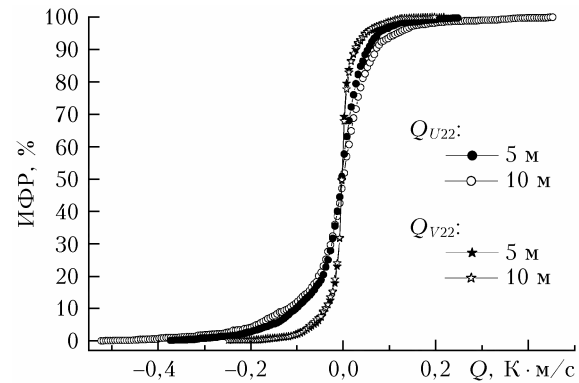


Рис. 7. Интегральные функции распределения горизонтальных потоков тепла «локального» масштаба в пункте «БЭК» на разных высотах при расчетах в «сопровождающей» системе координат

Теперь коротко рассмотрим горизонтальные потоки тепла в «стационарной» системе координат. Потоки «турбулентных» масштабов на обеих высотах (5 и 10 м) примерно совпадают (как по знакам, так и по абсолютным значениям). Вариации потоков «локального» масштаба на высоте 10 м несколько больше, чем на высоте 5 м. Эти выводы относятся к обоим горизонтальным осям «стационарной» системы координат. Иллюстрацией служит рис. 8, где приведены соответствующие ИФР горизонтальных потоков «турбулентного» и «локального» масштабов.

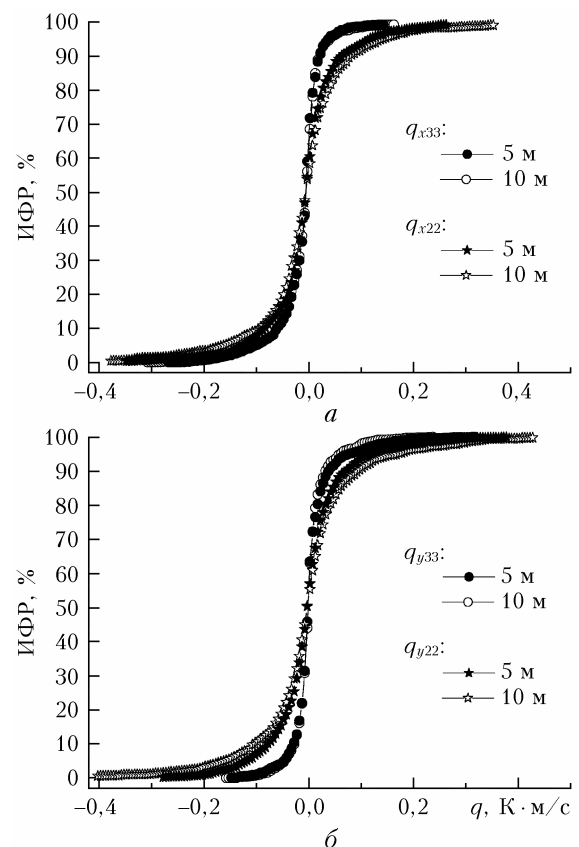


Рис. 8. Интегральные функции распределения горизонтальных потоков тепла «турбулентного» и «локального» масштабов по разным осям «стационарной» системы координат в пункте «БЭК» на разных высотах (5 и 10 м)

Подводя итоги сопоставления потоков тепла «турбулентного» и «локального» масштабов на разных высотах, можно сделать следующие выводы. «Турбулентный» теплообмен по всем координатным осям как в «сопровождающей», так и в «стационарной» системах координат примерно одинаков на обеих высотах. Потоки тепла «локального» масштаба по всем координатным осям на высоте 10 м превышают (по абсолютным значениям) аналогичные потоки на высоте 5 м.

Урбанизированная территория («Академгородок»)

Представленный выше материал относится к условиям естественного ландшафта (большая открытая поляна с травяным покрытием, окруженная лесопосадками высотой до 10–15 м). Интерес представляет и анализ результатов для урбанизированной территории. Рассмотрим далее потоки тепла «турбулентного» и «локального» масштабов, полученные для пункта наблюдения «Академгородок» за тот же период (22–31 августа 2019 г.), что и для пункта «БЭК». Измерения проводились на высоте 5 м над уровнем крыши лабораторного корпуса ИОА СО РАН (17 м от уровня подстилающей поверхности).

Пункт «БЭК» находится примерно в 3 км к востоку от пункта «Академгородок».

Поскольку основная цель работы заключается только в оценке необходимости учета потоков тепла «локального» масштаба, а также в сопоставлении потоков, рассчитываемых для разных систем координат («сопровождающей» или «стационарной»), детальное сравнение потоков по пунктам «БЭК» и «Академгородок» проводить не будем. Ограничимся лишь обсуждением результатов, касающихся основной цели работы.

Сразу же отметим, что «перекрестные» смешанные моменты, т.е. потоки с индексами $i \neq j$ ($i, j = 2, 3$), в пункте «Академгородок» так же пренебрежимо малы, как и в пункте «БЭК». В целом диапазоны изменения всех рассматриваемых потоков тепла в пункте «Академгородок» шире, чем в пункте «БЭК» (за исключением некоторых случаев с потоками «локальных» масштабов). Покажем это на нескольких примерах.

На рис. 9 приведено сопоставление потоков «турбулентного» и «локального» масштабов в сравниваемых пунктах (для пункта «БЭК» — на уровне 10 м). Причем для потоков в горизонтальной плоскости на рис. 9 использованы оценки в «сопровождающей» системе координат.

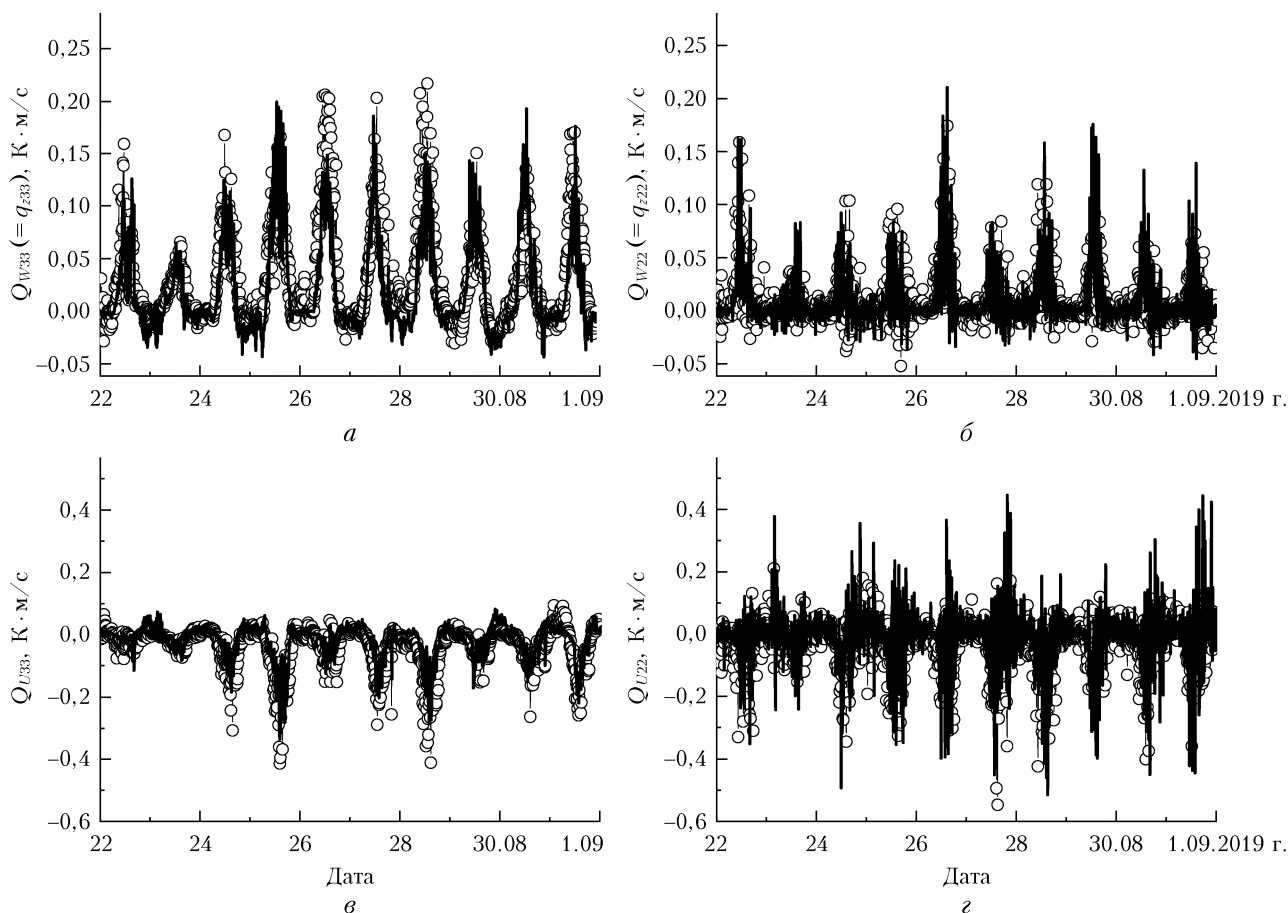
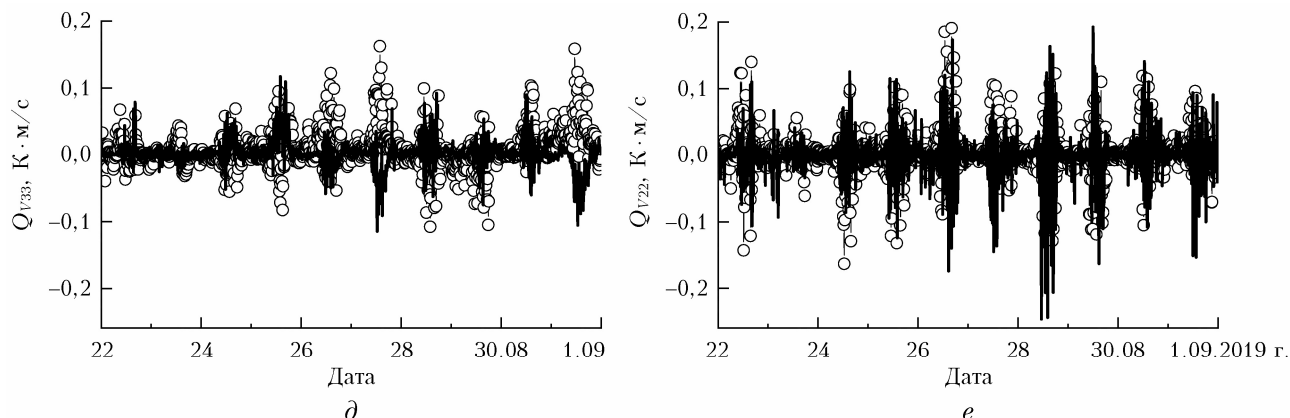


Рис. 9. Сравнение потоков тепла «турбулентного» (а, в, з) и «локального» (б, г, е) масштабов по трем осям «сопровождающей» системы координат в пунктах «Академгородок» (кружки) и «БЭК» (10 м) (сплошная кривая). Окончание рисунка на с. 138



Окончание рис. 9. Начало на с. 137

Обратим внимание на одну особенность в поведении потоков тепла «турбулентного» масштаба в направлении, поперечном к продольному ветру (графики Q_{V33} на рис. 9, *д*). В отдельные дни (в частности, 27 и 31 августа) знаки этих потоков в сравниваемых пунктах различны. При этом в потоках «локального» масштаба подобное различие в знаках практически отсутствует (графики Q_{V22} на рис. 9, *е*). Изучение причин такого поведения по-

токов представляет определенный интерес, но в настоящей работе эта особенность не анализируется.

Для полноты картины приведем на рис. 10 графики потоков тепла «турбулентного» и «локального» масштабов в рассматриваемых пунктах наблюдения для «стационарной» системы координат (в горизонтальной плоскости). Отметим, что вариации потоков «турбулентного» масштаба (q_{x33} и q_{y33} ; рис. 10, *а, в*) в пункте «Академгородок» несколько больше, чем

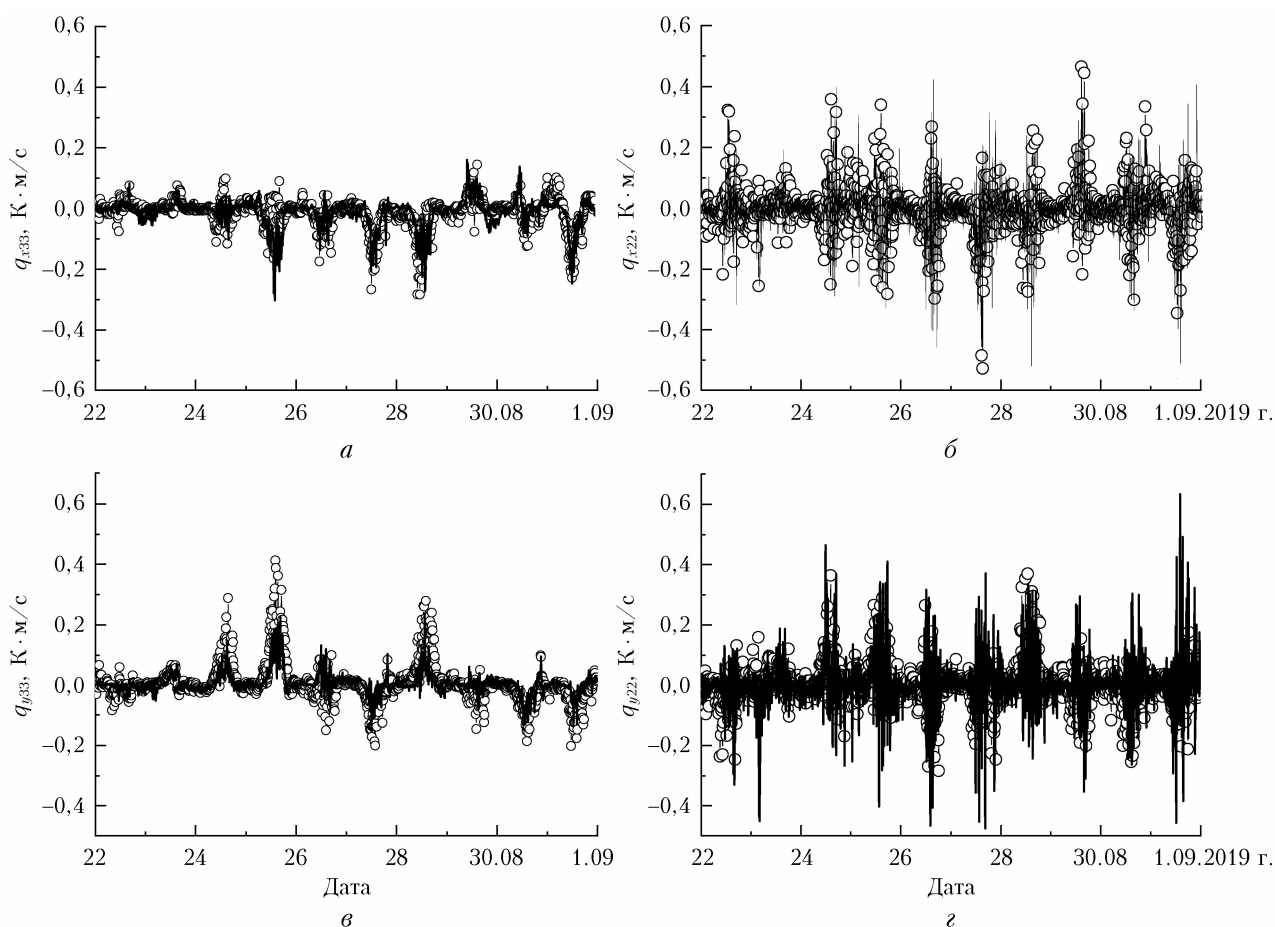


Рис. 10. Сравнение горизонтальных потоков тепла «турбулентного» (*а, в*) и «локального» (*б, г*) масштабов по осям «стационарной» системы координат в пунктах «Академгородок» (кружки) и «БЭК» (10 м) (сплошная кривая)

в пункте «БЭК» (для уровня 10 м), а область вариаций потоков «локального» масштаба (q_{x22} и q_{y22} ; рис. 10, б, з) в обоих пунктах примерно одинакова.

Без каких-либо иллюстраций укажем, что в «стационарной» системе координат зависимость горизонтальных потоков тепла «турбулентного» и «локального» масштабов от скорости и направления среднего ветра в пункте «Академгородок» подобна той, которую демонстрирует рис. 6 для пункта «БЭК» (с некоторыми отличиями в деталях). Это говорит о том, что отмеченные особенности указанной зависимости характерны в целом для всего региона (по крайней мере, для обоих пунктов наблюдения) в период измерений.

Влияние характеристик полосового фильтра и длительности интервала осреднения на оценки потоков тепла

Перед подведением общих итогов рассмотрим еще два вопроса. Первый вопрос касается влияния границ (ширины) ПФ, который использовался для вы-

деления «локальных» вариаций метеорологических параметров, точнее, задания положения границы, разделяющей области «локальных» и «турбулентных» вариаций. Во всех приведенных выше материалах полагалось, что турбулентность соответствует области спектра, превышающей частоту 0,00833 Гц (во временной области это соответствует двум минутам). Чтобы оценить влияние «высокочастотной» границы на величины потоков «локального» и «турбулентного» масштабов, были проведены дополнительные расчеты при значении этой границы 0,00417 Гц (во временной области — 4 мин). При этом ПФ соответствовал диапазону «4 мин — 1 ч» (вместо «2 мин — 1 ч», использованного при основных расчетах). Было установлено, что изменение «высокочастотной» границы не очень сильно повлияло на результаты. Определенные различия проявляются только в дневное время. В качестве примера на рис. 11, а, б приведены графики вертикальных потоков тепла «турбулентного» и «локального» масштабов, полученных по результатам измерений в пункте «Академгородок». Кардинальных изменений как в форме ИФР, так и в диапазоне вариаций этих потоков нет.

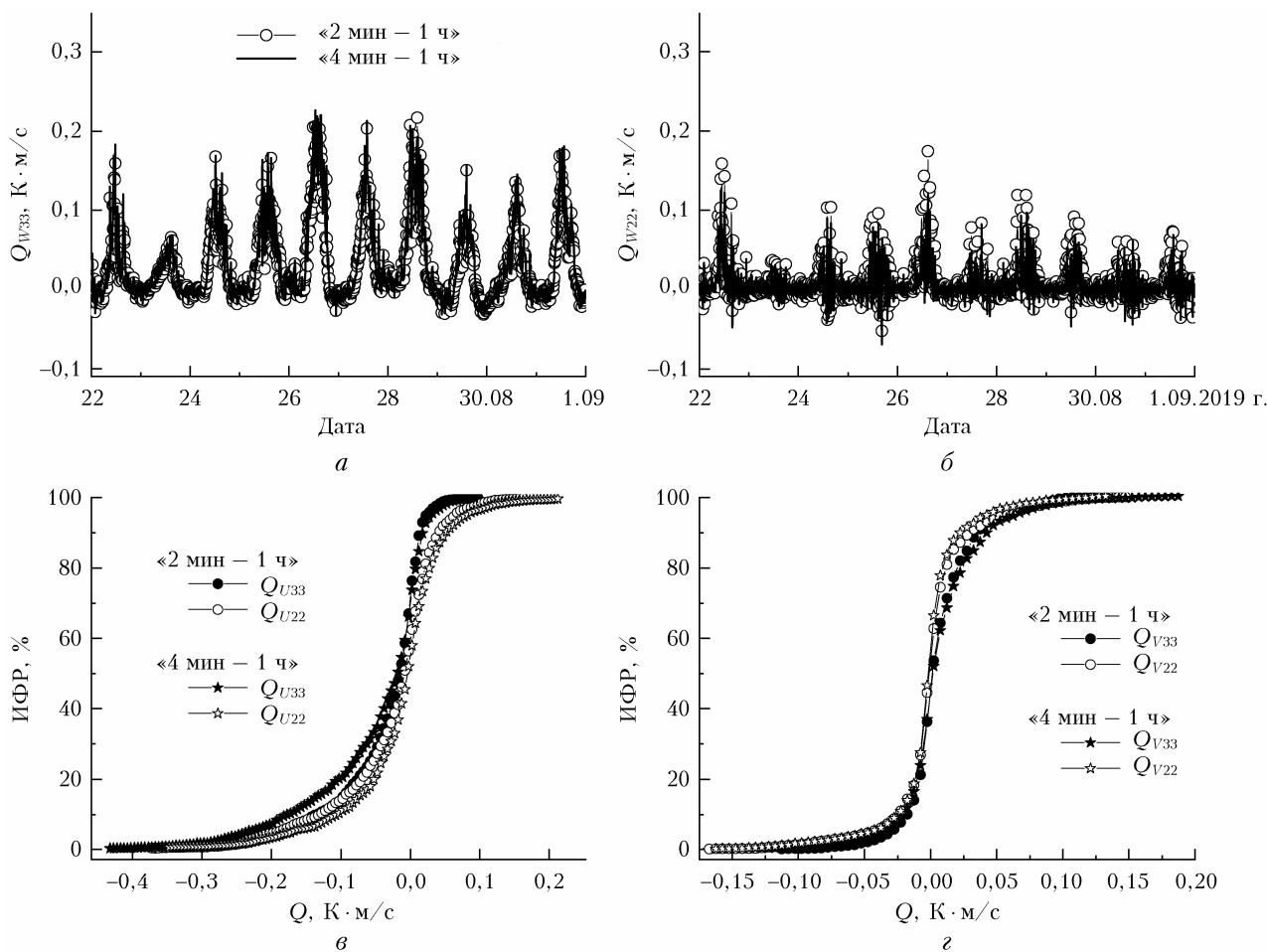


Рис. 11. Вертикальные потоки тепла «турбулентного» (а) и «локального» (б) масштабов, а также интегральные функции распределения потоков тепла в «сопровождающей» системе координат в продольном (в) и поперечном (з) направлении при разных величинах полосового фильтра

Изменения, коснувшиеся горизонтальных потоков (рассматривалась «сопровождающая» система координат), можно оценить с помощью ИФР, показанных на рис. 11, *в*, *г*. Наиболее «чувствительной» к смещению положения «высокочастотной» границы ПФ является величина «продольных» потоков (Q_{Uii}).

Обратимся теперь ко второму вопросу, связанному с влиянием интервала времени Δ , по которому оценивались потоки тепла. Основные расчеты проведены для варианта $\Delta = 10$ мин. Этот интервал является стандартным при метеонаблюдениях. Естественно, что увеличение Δ приведет к более сглаженному поведению потоков. При этом возникает вопрос, как изменятся величины потоков «локального» масштаба и не приведет ли увеличение интервала Δ к «обнулению» такого вида потоков. Для ответа были проведены дополнительные расчеты при $\Delta = 60$ мин по измерениям в пункте «Академгородок» (обрабатывался прежний период 22–31 августа 2019 г.). В результате установлено, что, несмотря на существенное сглаживание всех потоков, потоки «локального» масштаба по-прежнему остаются значимыми и их учет в алгоритмах прогноза состояния атмосферы необходим. Проиллюстрируем этот

вывод на рис. 12, где сравниваются все виды потоков тепла (кинематического потока температуры) в «сопровождающей» системе координат для 10- и 60-минутных интервалов осреднения.

Обратим внимание на определенную взаимосвязь «вертикальных» (Q_{Wii}) и «продольных» (Q_{Uii}) потоков. Они имеют явную «отрицательную» корреляцию в суточном ходе. Этот эффект мы рассматривали ранее на большом количестве экспериментальных данных для случая потоков «турбулентного» масштаба [20]. Согласно рис. 12 такая же закономерность имеет место и для потоков «локального» масштаба. Покажем эту связь с помощью рис. 13, где представлены зависимости $Q_{U33}(Q_{W33})$ и $Q_{U22}(Q_{W22})$ при $\Delta = 10$ и 60 мин.

Результаты на рис. 13 демонстрируют, что взаимосвязь потоков «локального» масштаба $Q_{U22}(Q_{W22})$ более «чувствительна» к вариациям величин, поскольку даже небольшое изменение одного из «локальных» потоков приводит к более заметному изменению другого «локального» потока по сравнению со случаем $Q_{U33}(Q_{W33})$. Возможно, отмеченная взаимосвязь «вертикальных» и «горизонтальных» потоков тепла окажется полезной при параметризации процессов подсеточного масштаба в приземном слое атмосферы.

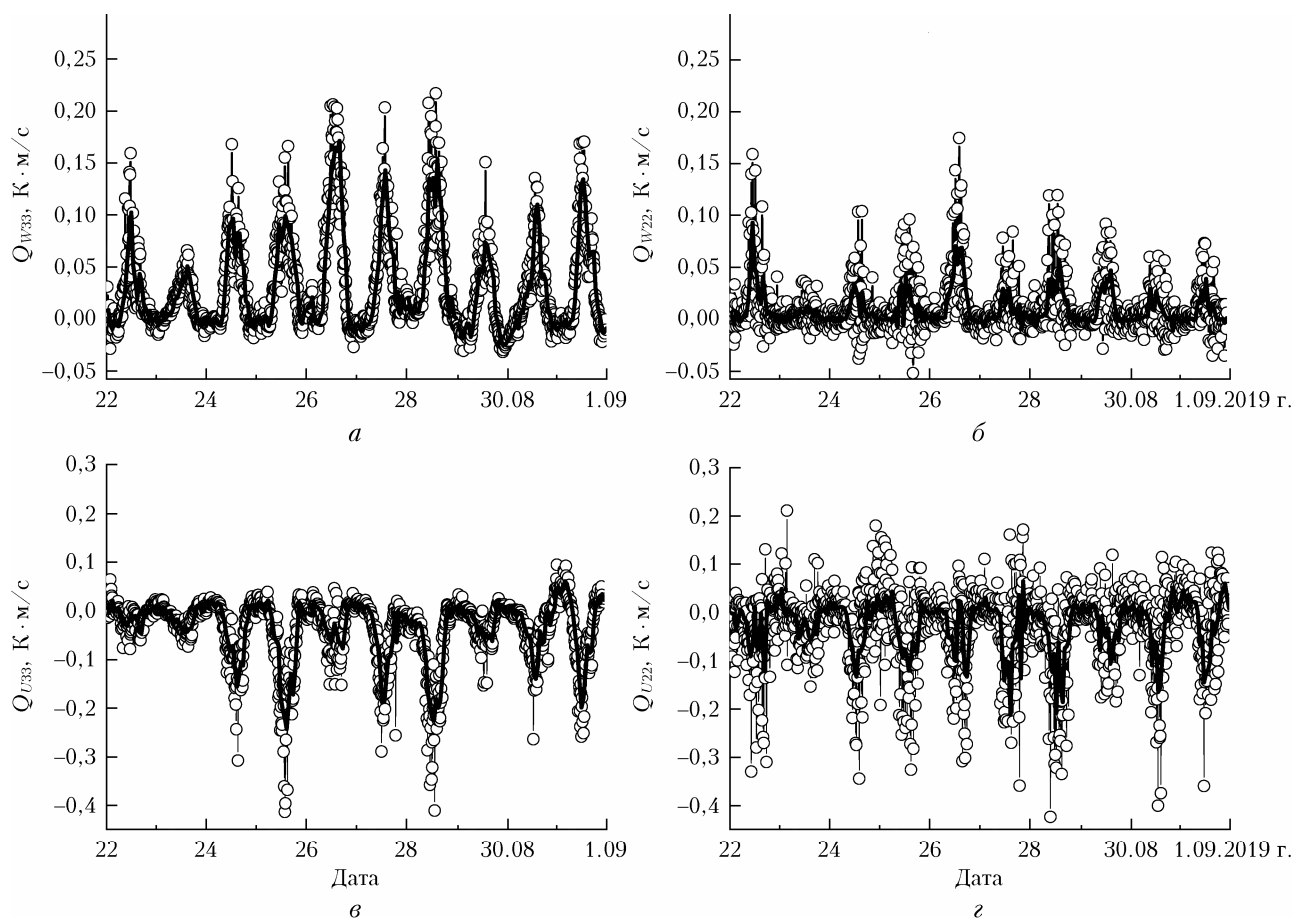
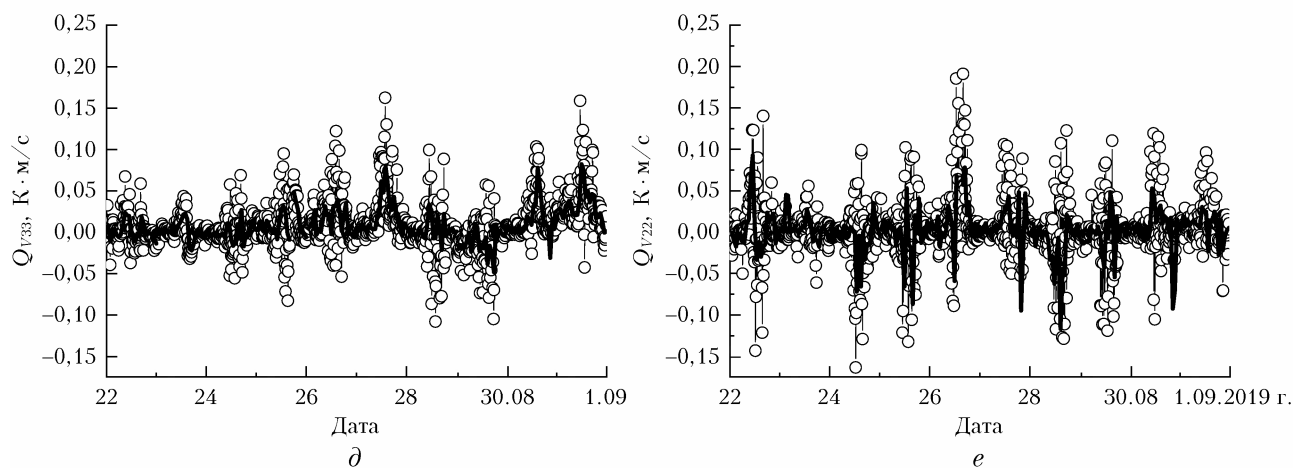


Рис. 12. Потоки тепла «турбулентного» (*а*, *в*, *д*) и «локального» (*б*, *г*, *е*) масштабов по осям «сопровождающей» системы координат при $\Delta = 10$ (кружки) и 60 мин (сплошная кривая). Окончание рисунка на с. 141



Окончание рис. 12. Начало на с. 140

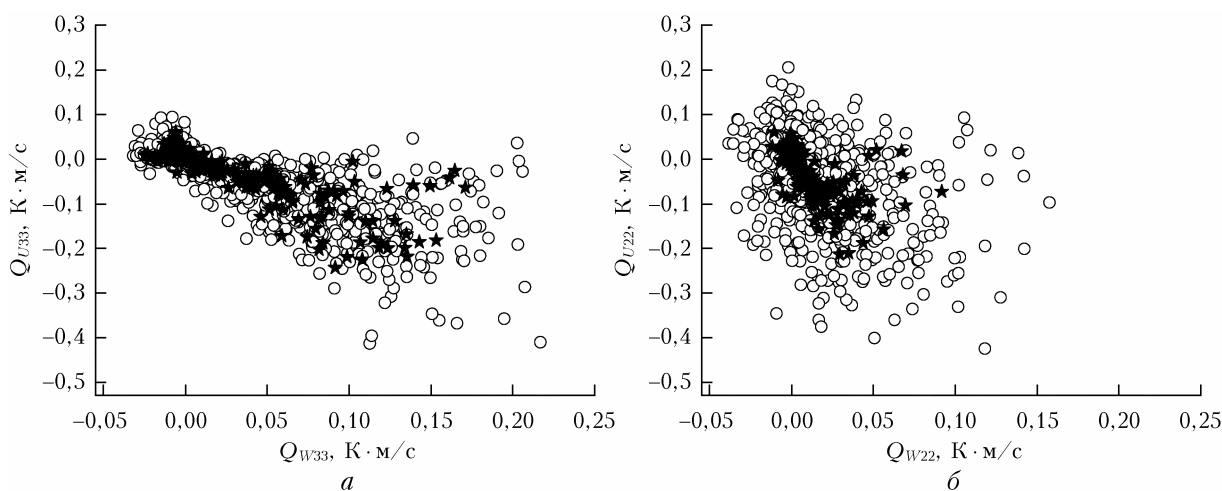


Рис. 13. Взаимосвязь потоков тепла в вертикальном и продольном направлении для «турбулентных» (а) и «локальных» (б) масштабов при $\Delta = 10$ (кружки) и 60 мин (звездочки)

Заключение

Основная цель работы заключалась в оценке и сопоставлении потоков тепла «локального» и «турбулентного» масштабов по трем осям прямоугольной (декартовой) системы координат. В результате проведенных исследований установлено, что в приземном слое атмосферы потоки тепла «локального» масштаба (смешанные моменты флуктуаций температуры воздуха и компонентов вектора ветра в полосе $0,000278\text{--}0,00833$ Гц/ $2\text{--}60$ мин соответствующих спектров) по величине сопоставимы, а в некоторых случаях и превышают потоки тепла «турбулентного» масштаба (флуктуации, соответствующие области спектра более $0,00833$ Гц).

Рассмотрены особенности горизонтальных потоков тепла при их расчетах в двух различных прямоугольных системах координат — «сопровождающей» и «стационарной», а также в двух различных пунктах наблюдения — над территорией с естественным ландшафтом и над урбанизированной территорией. Оценки подтверждают очевидный факт превышения потоков над урбанизированной территорией по срав-

нению с условиями естественного ландшафта. При этом выявлено, что потоки «турбулентных» масштабов в «стационарной» системе координат имеют определенную зависимость от скорости и направления среднего ветра, в то время как у потоков «локальных» масштабов такая зависимость выражена нечетко. Кроме того, потоки тепла «турбулентного» масштаба по разным горизонтальным осям «стационарной» системы координат имеют определенную взаимосвязь.

Проведено сопоставление потоков тепла на двух уровнях (5 и 10 м) над естественным ландшафтом. Установлено, что потоки тепла «турбулентного» масштаба на обеих высотах примерно одинаковы, а потоки «локального» масштаба несколько больше на высоте 10 м, чем на высоте 5 м.

Кратко рассмотрены результаты, полученные при разных значениях «граничной» частоты области турбулентных флуктуаций. Расчеты показали, что расширение спектральной области, к которой относятся «турбулентные» вариации температуры и компонентов вектора ветра, хоть и увеличивает вклад «турбулентных» и несколько уменьшает вклад

«локальных» масштабов в суммарный поток тепла, но общий вывод о необходимости учета потоков «локальных» масштабов не изменяет.

Особо отметим, что работа была направлена на оценку величин потоков тепла «локального» масштаба в некоторых «простых» условиях (хотя и с существенными изменениями скоростей и направлений среднего ветра). Подробное изучение особенностей формирования таких потоков в различных синоптических условиях (включая зимнее время), а также анализ возможностей их параметризации на этом этапе работы не планировались.

Понятно, что все сделанные в статье выводы о потоках тепла «локального» и «турбулентного» масштабов в приземном слое атмосферы относятся к конкретным пунктам наблюдения. Возможно, в других пунктах будут свои особенности. Но мы полагаем, что общие выводы о важности вкладов «локальных» масштабов в суммарный поток тепла останутся прежними.

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

1. Старченко А.В., Кузевская И.В., Кижнер Л.И., Баращикова 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.
2. Калинин Н.А., Ветров А.Л., Связов Е.М., Попова Е.В. Изучение интенсивной конвекции в Пермском крае с помощью модели WRF // Метеорол. и гидрол. 2013. № 9. С. 21–30.
3. Романский С.О., Вебицкая Е.М. Краткосрочный численный прогноз погоды высокого пространственного разрешения по Владивостоку на базе модели WRF-ARW // Вестн. ДВО РАН. 2014. № 5. С. 48–57.
4. Шихов А.Н., Быков А.В. Оценка качества прогноза мезомасштабных конвективных систем на Западном Урале с помощью модели WRF и спутниковых данных MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 1. С. 137–148.
5. Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей / под ред. Ф.Т.М. Ныстада, Х. Ван Допа. Л.: Гидрометеониздат, 1985. 352 с.
6. Бызова Н.Л., Иванов В.Н., Гаргер Е.К. Турбулентность в пограничном слое атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1989. 264 с.
7. Zhou B., Xue M., Zhu K. A grid-refinement-based approach for modeling the convective boundary layer in the gray zone: A pilot study // J. Atmos. Sci. 2017. V. 74, N 11. P. 3497–3513.
8. Zhou B., Xue M., Zhu K. A grid-refinement-based approach for modeling the convective boundary layer in the gray zone: Algorithm implementation and testing // J. Atmos. Sci. 2018. V. 75, N 4. P. 1143–1161.
9. Shin H.H., Hong S.-Y. Representation of the subgrid-scale turbulent transport in convective boundary layers at gray-zone resolutions // Mon. Weather Rev. 2015. V. 143, N 1. P. 250–271.
10. Efsthathiou G.A., Plant R.S., Bopape M.-J.M. Simulation of an evolving convective boundary layer using a scale-dependent dynamic Smagorinsky model at near-gray-zone resolutions // J. Appl. Meteorol. Climatol. 2018. V. 57, N 9. P. 2197–2214.
11. Ito J., Niino H., Mikio Nakanishi M., Moeng C.-H. An extension of the Mellor–Yamada model to the Terra Incognita zone for dry convective mixed layers in the free convection regime // Bound.-Lay. Meteorol. 2015. V. 157, N 1. P. 23–43.
12. Honnert R., Couvreux F., Masson V., Lancz D. Sampling the structure of convective turbulence and implications for grey-zone parametrizations // Bound.-Lay. Meteorol. 2016. V. 160, N 1. P. 133–156.
13. Lancz D., Szintai B., Honnert R. Modification of a parametrization of shallow convection in the gray zone using mesoscale model // Bound.-Lay. Meteorol. 2018. V. 169, N 3. P. 483–503.
14. Honnert R. Grey-zone turbulence in the neutral atmospheric boundary layer // Bound.-Lay. Meteorol. 2019. V. 170, N 2. P. 191–204.
15. 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.
16. Гладких В.А., Макиенко А.Э. Цифровая ультразвуковая метеостанция // Приборы. 2009. № 7. С. 21–25.
17. Гладких В.А., Невзорова И.В., Одинцов С.Л. Методические аспекты определения внешних масштабов турбулентности // Успехи современного естествознания. 2018. № 5. С. 64–70.
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; Odintsov S.L., Gladkikh V.A., Nevzorova I.V. Statistics of outer turbulence scales in the surface air layer // Atmos. Ocean. Opt. 2019. V. 32, N 4. P. 450–458.
19. 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.
20. Камардин А.П., Гладких В.А., Дервоведов А.С., Невзорова И.В., Одинцов С.Л., Федоров В.А. К вопросу о взаимосвязи вертикальных и горизонтальных турбулентных потоков тепла в пограничном слое атмосферы // Тр. XXV Междунар. симпоз. «Оптика атмосф. и океана. Физика атмосферы». 30 июня – 5 июля 2019 г., Новосибирск. Томск: Изд-во ИОА СО РАН. С. D263–D266.

V.A. Gladkikh, I.V. Nevzorova, S.L. Odintsov. Heat fluxes in the surface air layer with decomposition of initial components onto different scales.

The paper discusses the results of calculation of heat fluxes (kinematic temperature fluxes) in the surface air layer from experimental data on variations in the air temperature and wind vector components on different scales. The fluxes along three coordinate axes of the “stationary” and “accompanying” Cartesian coordinate systems are compared. Estimates of the heat fluxes for the territory with natural landscape (at two altitudes in the surface layer) and the urban territory are considered. The analysis of experimental data has led us to the conclusion that the heat fluxes on the local scale should be taken into account along with the heat fluxes on the turbulent scale when predicting the state of the atmosphere using models of high spatial resolution.