

УДК 551.510 551.551

МНОГОТОЧЕЧНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЕТРА В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ

© 2021 г. Е. А. Шишов^{а, *}, О. А. Соленая^а, О. Г. Чхетиани^а, Г. В. Азизян^а, В. М. Копров^а

^аИнститут физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер., 3, Москва, 119017 Россия

*e-mail: shishov.yegor@gmail.com

Поступила в редакцию 09.07.2020 г.

После доработки 15.02.2021 г.

Принята к публикации 17.02.2021 г.

Рассмотрены обобщенные за несколько лет результаты многоточечных измерений пульсаций направления ветра и температуры воздуха в приземном слое на базе Цимлянской научной станции ИФА им. А.М. Обухова РАН. Определены характерные размеры вихревых и термических структур, а также соотношение этих размеров при различных условиях. Подтверждена ранее найденная зависимость характерных размеров структур от условий термической стратификации. Представлены визуализации двумерных полей температуры и направления ветра.

Ключевые слова: турбулентность, когерентные структуры, приземный слой, вихри, термики, корреляционные функции

DOI: 10.31857/S0002351521030081

ВВЕДЕНИЕ

Еще в 50–70 гг. XX века было поставлено множество экспериментов по изучению турбулентности в приземном слое атмосферы [1–3]. Результаты этих измерений во многом сформировали современную теорию турбулентности.

В настоящее время данные натурных измерений активно используются для разработки новых более точных параметризаций подсеточных процессов в численных моделях циркуляции атмосферы [4, 5]. С развитием компьютерных систем регистрации стали популярны многоточечные измерения компонент скорости ветра и температуры воздуха. Эти методы позволяют получить данные о субмезомасштабных структурах атмосферного пограничного слоя, находящихся уже в т.н. “серой” зоне атмосферных моделей [6]. Количество используемых измерительных приборов в работах различных авторов может варьироваться от нескольких единиц [7, 8] до десяти и более единиц [9, 10]. Следует отметить, что использование слишком большого числа датчиков не только на порядок увеличивает стоимость проведения эксперимента, но и затрудняет глубокий статистический анализ полученных данных.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Измерения проводились в летние сезоны 2015, 2016, 2018 и 2019 гг. на базе Цимлянской научной станции ИФА им. А.М. Обухова РАН в Ростов-

ской области [1, 3]. Часть результатов измерений 2015 г. опубликована ранее в [11]. Измерительный полигон представляет собой ровный участок степи площадью около 1 км². Перепад высот составляет не более полуметра, а естественный травяной покров в различные годы имел высоту от 20–30 до 50 см. Измерительные приборы располагались не ближе чем в 100 м от южной границы полигона, обозначенной лесопосадкой. С основной наветренной (западной – к морю) стороны деревьев и постройки находились минимум в 500 м от крайней точки измерений, что также в значительной степени уменьшает влияние территории станции на выполняемые измерения.

Основная измерительная система включала в себя 12 флюгеров, каждый из которых был закреплен на двухметровой штанге. Лопастей используемых флюгеров имеют размеры 25 на 10 см. Постоянная времени такого датчика – порядка долей секунды. На рис. 1 изображен ряд установленных флюгеров. Примеры однотоочечных измерений пульсаций направления ветра флюгером описаны в работе [12], а многоточечных – в работах [13, 14].

В 2018 и 2019 гг. на некоторых штангах помимо флюгеров были установлены малоинерционные термометры, рабочим телом которых является вольфрамовая нить диаметром 20 мкм. Точно такие же термометры обычно используются для получения вертикальных профилей и регистрации конвективных структур [15, 16]. И термометры, и



Рис. 1. Стойки с флюгерами.

флюгеры имеют аналоговый выход и подключались к АЦП L-Card E-440 для синхронной регистрации. Частота опроса составляла 32 или 16 Гц, регистрация производилась сериями от 2 до 9 ч. Сопутствующие измерения производились двухуровневой метеомачтой с уровнями 2 и 10 м, на которых были размещены датчики температуры, скорости ветра, давления и влажности AANDERAA Data Instruments. Также в каждом эксперименте был задействован по крайней мере один трехкомпонентный акустический анемометр Gill WindMaster или Metek USA-1, установленный на высоте 10–12 м. Метеомачта использовалась для калибровки термометров и флюгеров и для определения масштаба Обухова [17–21] градиентным методом. Акустический анемометр позволял также определять масштаб Обухова пульсационным методом.

На рис. 2 приведены схемы расстановки приборов на полигоне. Основная часть датчиков выстраивалась в линию вдоль направления “север–юг”. Так как измерения проводились в период господства восточных ветров, характерных для Цимлянского полигона в это время года, линия датчиков большую часть времени была ориентирована поперек среднего направления потока воздуха. Такая расстановка позволяет регистрировать прохождение вихревых и термических структур (термик) через полигон. В некоторых измерениях часть стоек с флюгерами выстраивались вдоль направления среднего ветра.

КАРТЫ ТЕМПЕРАТУРЫ И НАПРАВЛЕНИЯ ВЕТРА

Чтобы визуализировать двумерные поля температуры и направления ветра, были построены

соответствующие карты – диаграммы Хофмёлера (Hovmöller) (рис. 3). Они аналогичны изображениям, представленным в работах [9, 10, 15, 16, 21, 22].

На вертикальной оси такой карты откладывается координата вдоль направления “север–юг”. Горизонтальная ось соответствует времени, которое через гипотезу о замороженной турбулентности может быть переведено в пространственную координату вдоль оси “запад–восток”. На приведенных изображениях горизонтальная ось размечена и в единицах времени, и в единицах длины. Координатная сетка для температуры и направления ветра совпадает.

Такое представление позволяет непосредственно наблюдать вихревые и термические структуры в потоке воздуха. Цветом обозначается температура или отклонение ветра от среднего значения. Для примера были взяты дневные и ночные данные за 3 августа 2019 г., полученные с пяти флюгеров и пяти термометров, установленных с интервалом 40 м поперек преобладающего направления ветра.

Чтобы исследуемые структуры не терялись на фоне синоптических колебаний, было произведено вычитание двадцатиминутного тренда из исходных рядов данных. Для отсека мелкомасштабных пульсаций было произведено сглаживание методом скользящего среднего с десятисекундным окном. Так как средняя скорость ветра во время измерений составила 3 м/с, временное осреднение, соответствующее горизонтальной оси, стало соразмерно пространственному разрешению, которое определяется расстановкой датчиков.

На картах видны крупные чередующиеся области, поперечные размеры которых превышают охват датчиков, а продольные достигают 1–1.5 км, то есть больше размера полигона. Изменения на-

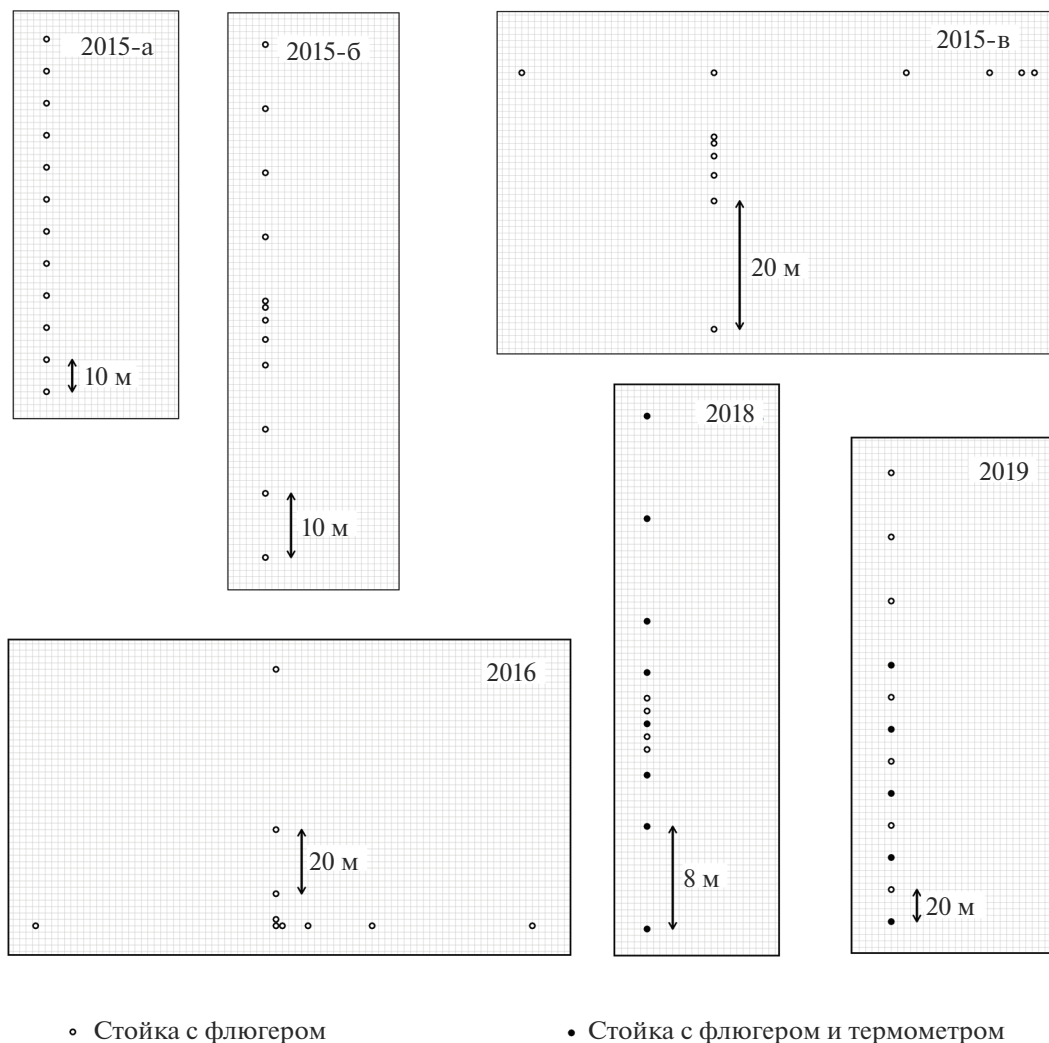


Рис. 2. Схемы расстановки измерительных приборов в экспедициях разных годов.

правления ветра и температуры на этом пространственно-временном масштабе происходят синхронно.

На рис. 4 один из таких участков изображен более крупно. Отчетливо различим вихрь в виде подковы. Он имеет размеры примерно 150 на 200 м, и его форма частично повторяется температурным профилем. Если же считать единым вихрем не только область отклонения флюгеров в одну сторону, но и их возврат, то протяженность такого вихря будет порядка 400 м. Амплитуда поворота лопастей флюгеров достигает нескольких десятков градусов (процедура сглаживания несколько снижает дисперсию колебаний), перепад температуры составил почти один градус Цельсия. В работе [23] горизонтальные очертания термических и вихревых структур также имеют схожую форму. Тем не менее это не является типичным случаем. Гораздо чаще ветровые и температурные кар-

ты вообще не имеют ничего общего (насколько об этом можно судить при визуальном анализе большого числа карт).

В отличие от дневных, ночные условия характеризуются более низкой амплитудой пульсаций (рис. 5). Так как средняя скорость во время ночного измерения составила 1.5 м/с, было выбрано двадцатисекундное окно сглаживания. Рисунок карты не так сильно изрезан мелкомасштабными колебаниями направления ветра или температуры. Поле температур стало более однородно, поэтому даже небольшое отклонение на карте выглядит очень контрастно.

На рис. 6 можно наблюдать объект, судя по всему являющийся вихрем с вертикальной осью. Пройдя через ряд флюгеров с востока на запад, он отклонил их лопасти сначала против, а затем по часовой стрелке. Исходя из этого, можно предположить, что сам вихрь вращался против часовой

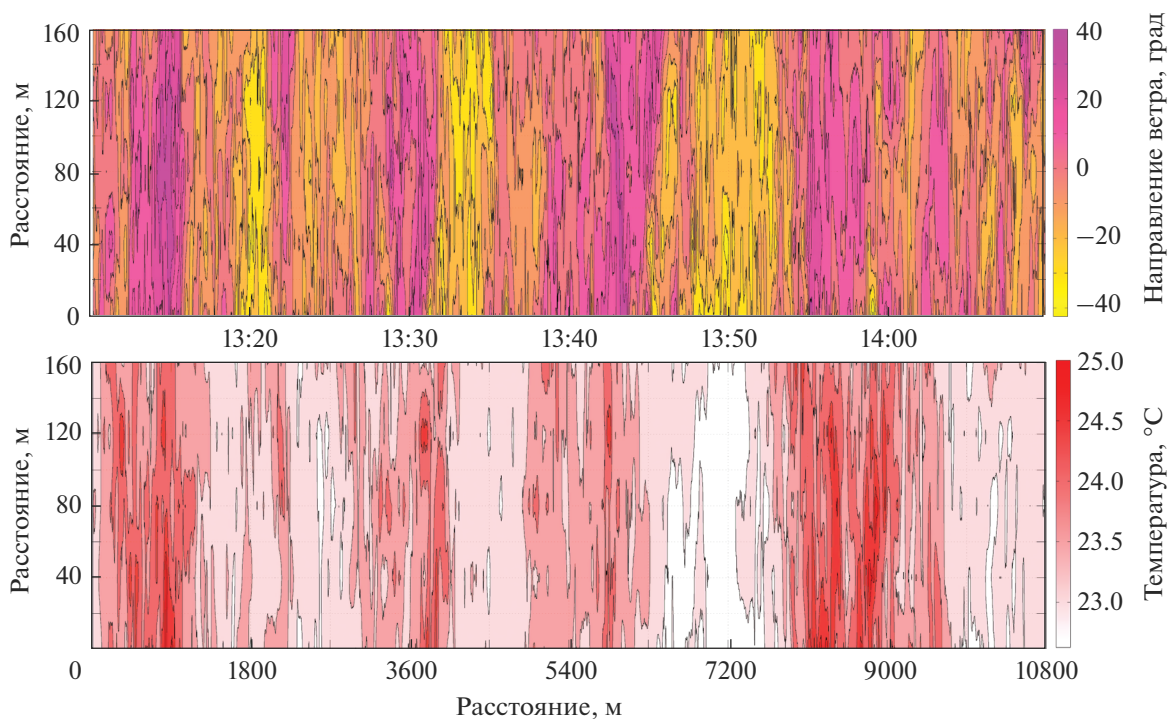


Рис. 3. Карты направления ветра и температуры; дневная запись, 1 ч.

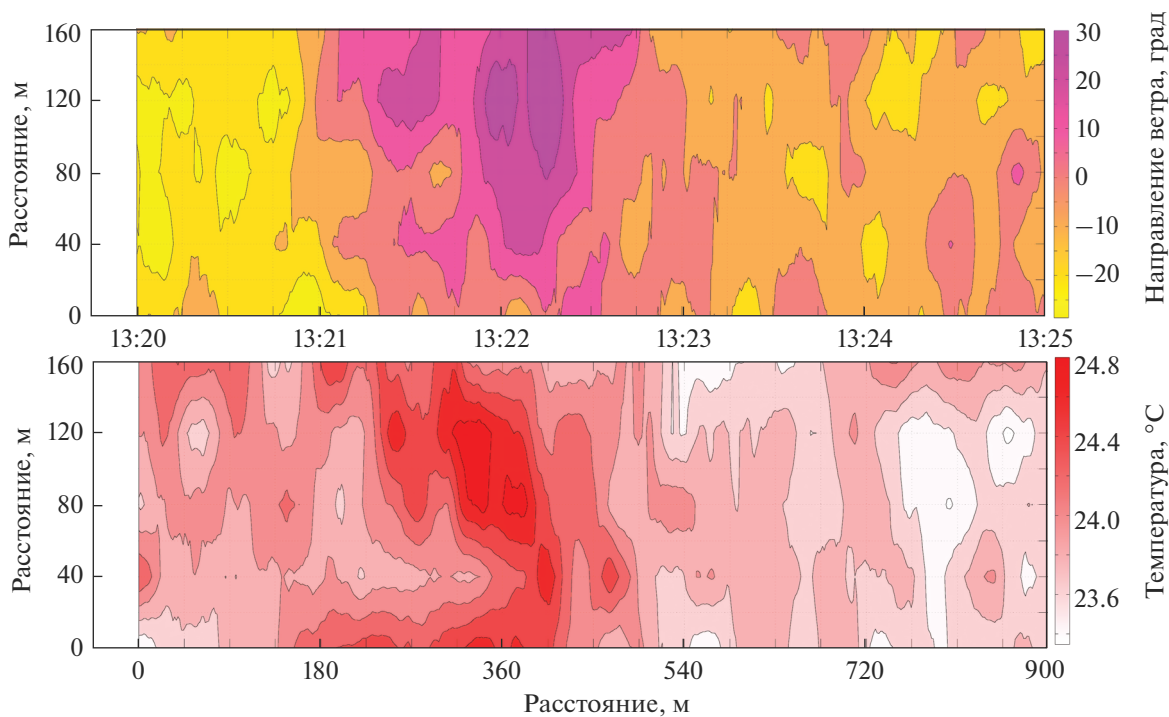


Рис. 4. Карты направления ветра и температуры; дневная запись, 5 мин.

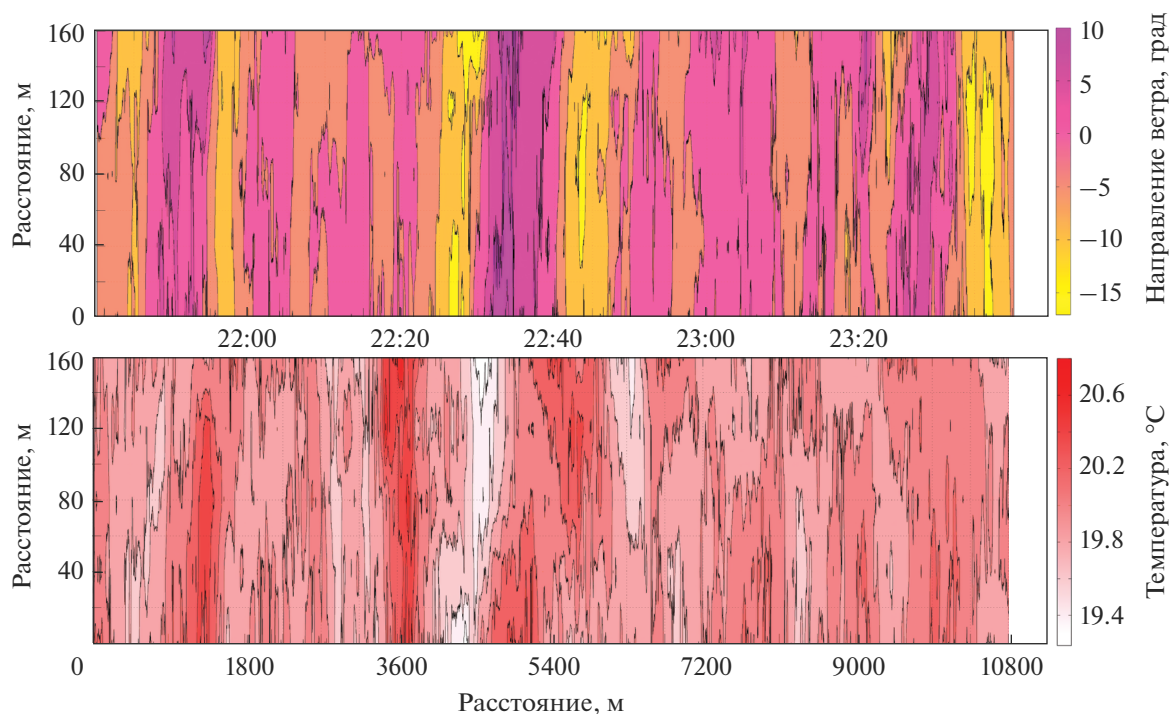


Рис. 5. Карты направления ветра и температуры; ночная запись, 2 ч.

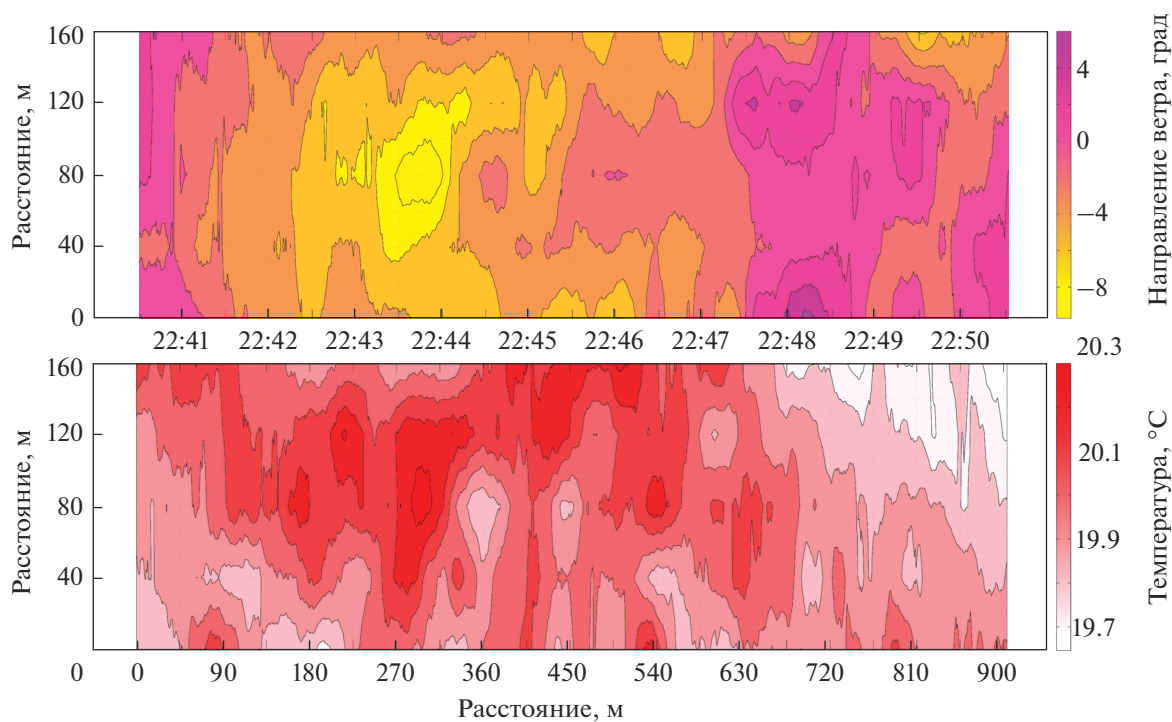


Рис. 6. Карты направления ветра и температуры; ночная запись, 10 мин.

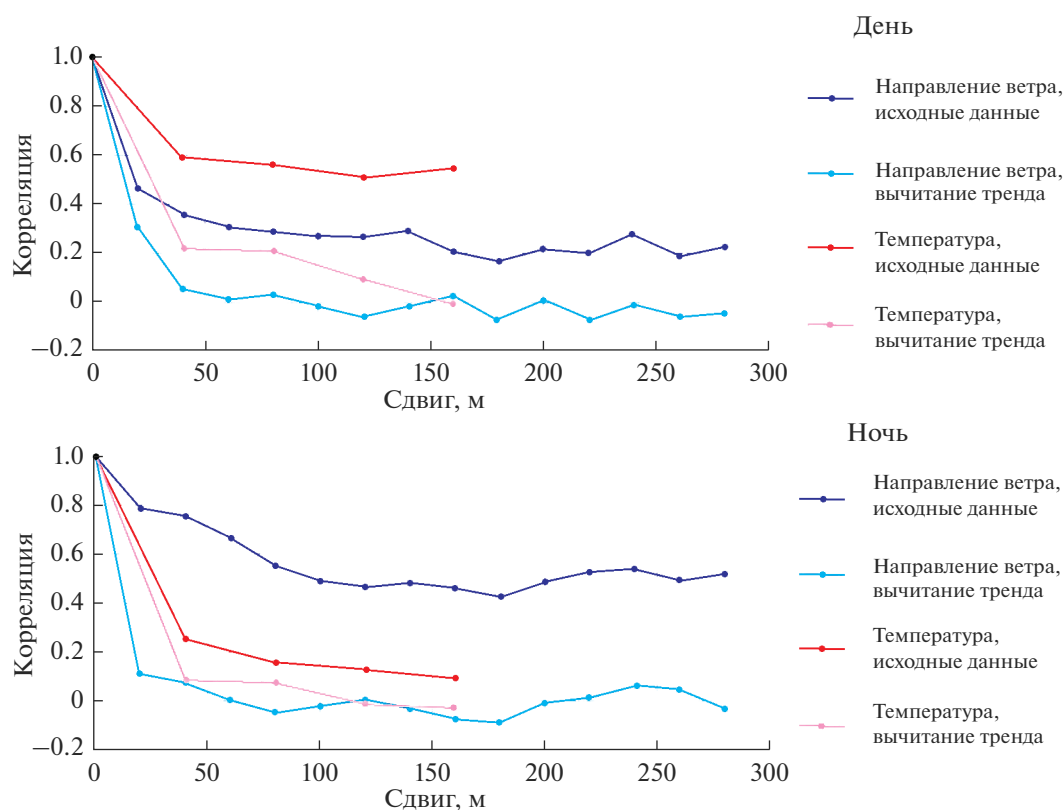


Рис. 7. Пространственные корреляционные функции.

стрелки. Более подробно о поворотах лопасти флюгера при прохождении вихря написано в работе [24]. Судя по карте температур, область прохождения вихря на полградуса теплее окружающего воздуха, однако тяжело однозначно судить о пространственном совпадении вихревой и термической структуры. Несмотря на устойчивую вертикальную стратификацию, в приземном слое воздуха фиксируется множество горизонтальных температурных неоднородностей.

КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ФУНКЦИИ

Измеряемая температура воздуха может быть представлена как сумма постоянной составляющей и пульсационной $T = T_{cp} + T'$. В работах, посвященных атмосферной турбулентности, обычно рассматривается лишь второе слагаемое, а первое (тренд) отбрасывается [25]. Чтобы отсеять постоянную составляющую, из исходного ряда данных вычитается скользящее среднее. После этого остается лишь пульсационная часть. Временной масштаб подобной фильтрации подбирается исходя из условий поставленного эксперимента. В измерениях, проводимых на Цимлянском полигоне, прямоугольное окно фильтрации обычно подбирается от нескольких минут до нескольких десятков минут [11, 14, 26]. В данной ра-

боте отсекаются колебания с постоянной времени больше трех минут.

Угол поворота флюгера является функцией горизонтальных компонент скорости ветра. В работах [12, 27] показано, что зависимость угла направления ветра от поперечной компоненты скорости ветра с некоторыми оговорками можно считать линейной. Изменчивость направления ветра также может быть разделена на две составляющие $\varphi = \varphi_{cp} + \varphi'$. Это позволяет аналогичным образом вычитать из временных рядов данных трехминутный тренд.

Коэффициент корреляции вариаций направления ветра φ_i и φ_j , соответствующих флюгерам i и j , определяется как $R_\varphi(i, j) = \frac{\overline{\varphi_i \varphi_j}}{\sigma_i \sigma_j}$, где σ_i и σ_j — среднеквадратические отклонения, а черта сверху означает временное осреднение по всему выбранному отрезку временной выборки.

Воздушный вихрь, проходящий через поперечно расставленный ряд флюгеров, почти синхронно отклоняет лопасти всех датчиков, попавших в зону его влияния. Чем крупнее вихрь, тем дальше могут располагаться флюгеры, сигналы с которых будут коррелировать. Аналогичным образом определяется коэффициент корреляции

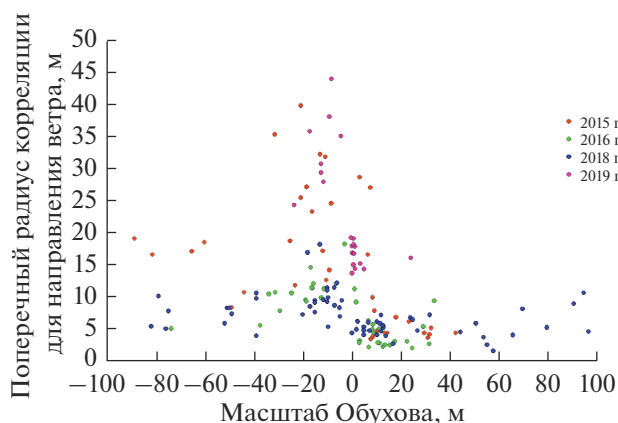


Рис. 8. Зависимость поперечного радиуса корреляции для направления ветра от масштаба Обухова.

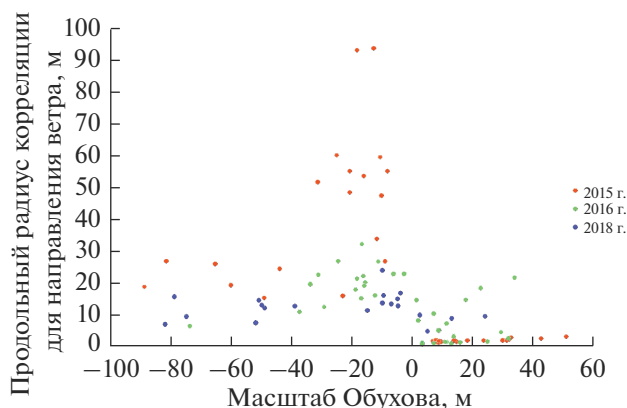


Рис. 9. Зависимость продольного радиуса корреляции для направления ветра от масштаба Обухова.

$R_i(i, j)$ пульсаций температуры в различных точках. Применение корреляционного анализа при экспериментальном изучении атмосферной турбулентности подробно описано в работах [28, 29].

На рис. 7 представлены зависимости коэффициента корреляции R_φ и R_t от расстояния между соответствующими датчиками — так называемые пространственные корреляционные функции $R_\varphi(\Delta x)$ и $R_t(\Delta x)$. Верхний график построен по тридцатиминутному отрезку записи, сделанному днем 3 августа 2019 с 14:06 по 14:36 при средней температуре воздуха 24°C и скорости ветра 4 м/с. Масштаб Обухова был равен -12 м. Можно сравнить вид корреляционных функций для исходных данных и после применения процедуры вычитания тренда.

На нижнем графике изображены такие же зависимости для ночной записи, сделанной 3 августа в промежуток времени с 23:30 по 00:00. Температура была равна 20°C , скорость ветра 1.5 м/с,

масштаб Обухова 24 м. Видно, что для приведенных примеров дневные корреляционные функции медленнее убывают с расстоянием, чем ночные (при условии отсечения крупномасштабной составляющей). То есть средний размер вихрей в первом случае больше (или они появляются чаще), чем во втором.

Чтобы количественно оценить размер возможных вихрей с вертикальной осью вращения или термиком, проходящих через ряд датчиков, определим поперечный радиус корреляции как величину, численно равную площади под соответствующей корреляционной функцией $r = \int_0^{x_{\max}} R(\Delta x) d(\Delta x)$, где

x_{\max} — расстояние, на котором корреляционная функция обращается в ноль. Полученные радиусы корреляции направления ветра r_φ и температуры r_t можно принять за характерный поперечный размер вихревых и термических структур. Эти величины носят статистический характер: отдельные вихри и термики могут иметь размеры, отличные от полученных значений. Кроме того, радиус корреляции сильно зависит от вычитаемого тренда, так как эта процедура отсекает крупные вихри. Наконец, радиус корреляции не может быть корректно посчитан, если средний размер вихрей меньше расстояния между ближайшими датчиками или больше расстояния между самыми удаленными.

Несмотря на все эти оговорки, используемый метод позволяет получать вполне конкретные результаты. Важно лишь, чтобы размер “линейки” из датчиков соответствовал текущей синоптической обстановке.

Для определения продольного размера вихрей и термиком можно использовать данные с датчиков, установленных вдоль направления среднего ветра. Такая расстановка осуществлялась в 2015 и 2016 гг. Еще один способ получить продольный радиус корреляции — построить временную автокорреляционную функцию $R_\varphi(\tau, \Delta\tau) = \frac{\overline{\varphi(\tau)\varphi(\tau + \Delta\tau)}}{\sigma(\tau)\sigma(\tau + \Delta\tau)}$

или $R_t(\tau, \Delta\tau) = \frac{\overline{t(\tau)t(\tau + \Delta\tau)}}{\sigma(\tau)\sigma(\tau + \Delta\tau)}$. В соответствии с гипотезой Тейлора о замороженной турбулентности временной сдвиг $\Delta\tau$ может быть заменен соответствующим пространственным сдвигом. Сравнение продольных радиусов корреляции, полученных двумя методами, произведено в работе [9].

На рис. 8 и 9 приведены зависимости поперечного и продольного радиусов корреляции от масштаба Обухова, характеризующего термическую стратификацию приземного слоя.

Все радиусы корреляции были получены с применением процедуры вычитания трехминутного тренда. Записи 2015, 2016 и 2018 гг. были раз-

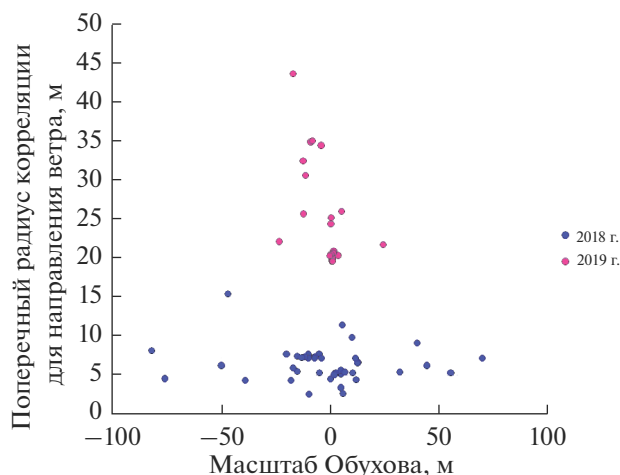


Рис. 10. Зависимость поперечного радиуса корреляции для температуры от масштаба Обухова.

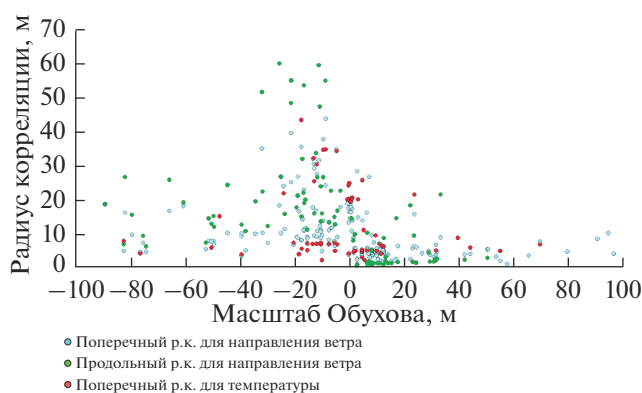


Рис. 11. Зависимость различных радиусов корреляции от масштаба Обухова.

биты на полуторачасовые временные отрезки. Результаты измерений 2019 г. представлены получасовыми отрезками.

Радиусы корреляции, полученные в разные годы, сильно отличаются. Это объясняется различной расстановкой датчиков — каждая конфигурация позволяет регистрировать вихри в конечном диапазоне масштабов. Тем не менее, есть общие соотношения, воспроизводимые в каждом эксперименте. И продольный, и поперечный радиусы корреляции минимальны ночью, при устойчивой стратификации. Размеры вихревых структур достигают максимальных размеров при отрицательных значениях масштаба Обухова порядка 10–30 м. При дальнейшем увеличении абсолютных значений масштаба Обухова размеры вихрей вновь уменьшаются, хоть и остаются выше ночных значений.

На рис. 10 приведена зависимость поперечного радиуса корреляции для температуры от масштаба Обухова. Так как термометры применялись лишь в 2018 и 2019 гг., данных по температуре не так много. Кроме того, результаты этих двух

экспериментов сильно различаются из-за расположения датчиков: максимальное расстояние между термометрами в 2018 г. равно минимальному расстоянию между термометрами в 2019 г. На рис. 11 все данные по различным радиусам корреляции объединены без разбивки по годам.

На рис. 12 представлена зависимость продольного радиуса корреляции направления ветра от поперечного. Результаты различных годов хорошо согласуются между собой. В среднем, продольный радиус в 1.4 раза превышает поперечный. То есть воздушные вихри вытянуты вдоль среднего направления ветра. Рассмотрим, как может изменяться данное соотношение. На рис. 13 представлена зависимость отношения продольного радиуса корреляции к поперечному от масштаба Обухова. Несмотря на большую вариативность значений, можно заключить, что в среднем при неустойчивой стратификации вихри более вытянуты: продольные размеры превышают поперечные в полтора и более раза. При устойчивой стратифика-

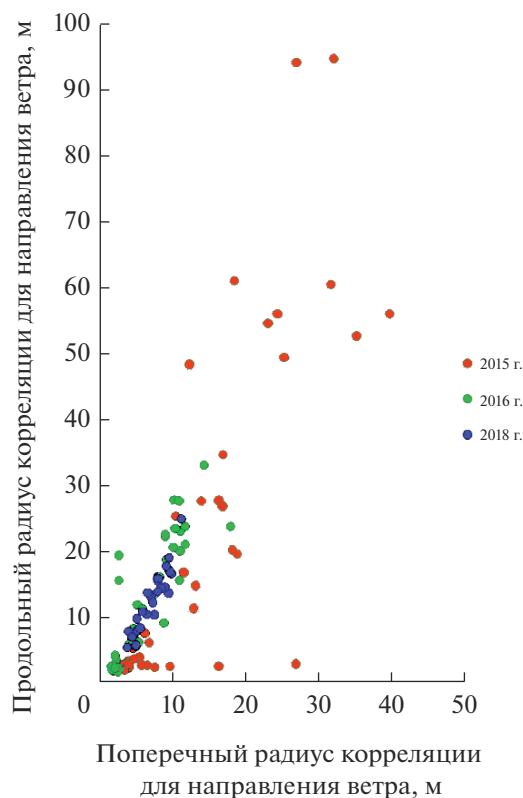


Рис. 12. Соотношение продольных и поперечных радиусов корреляции для направления ветра.

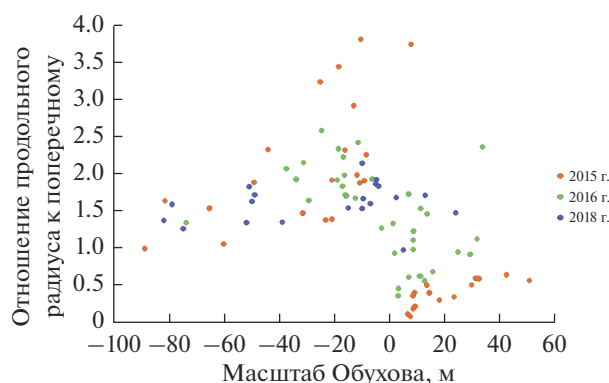


Рис. 13. Зависимость отношения продольного и поперечного радиусов корреляции от масштаба Обухова.

ции, напротив, вихри могут быть вытянуты как вдоль, так и поперек среднего ветра.

Аналогичным образом можно сравнить поперечные размеры термических и вихревых структур. На рис. 14 представлена зависимость поперечного радиуса корреляции для температуры от поперечного радиуса для направления ветра. Расстановка приборов в 2018 г. позволяла регистрировать только вихри и термики небольших размеров, а расстановка 2019 г. — лишь достаточно крупные структуры. Поэтому точки на графике образуют две изолированные группы с близкими,

хоть и не равными соотношениями между размерами. Рассмотрим, как соотносятся размеры вихрей и термиков при различных условиях. На рис. 15 представлена зависимость отношения поперечных радиусов корреляции от масштаба Обухова. При устойчивой стратификации термические структуры в среднем крупнее вихревых, при неустойчивой стратификации — наоборот.

Средние размеры вихрей и термиков, судя по всему, одинаково зависят от условий стратификации. Вместе с тем, прямой связи между этими структурами нет. При построении корреляцион-

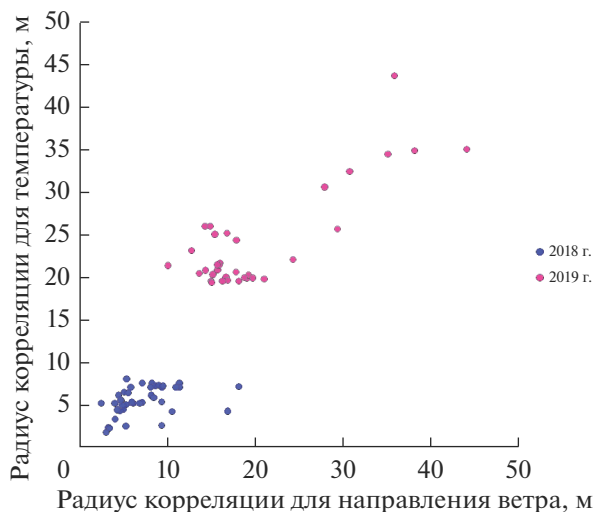


Рис. 14. Соотношение продольных радиусов корреляции для температуры и для направления ветра.

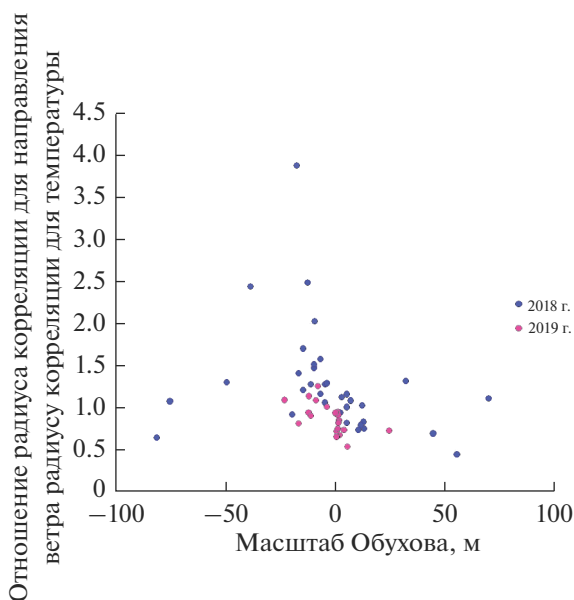


Рис. 15. Зависимость отношения радиусов корреляции для направления ветра и для температуры от масштаба Обухова.

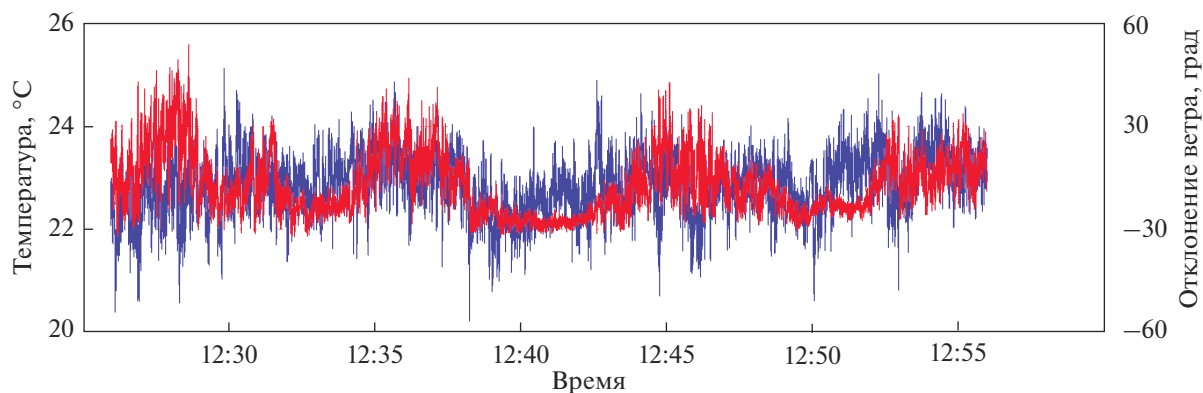


Рис. 16. Временная изменчивость температуры и направления ветра в одной точке.

ных функций для тех же временных отрезков рассчитывалась корреляция между пульсациями температуры и направления ветра. Для этого использовались данные с флюгера и термометра, установленных на одной штанге. В подавляющем большинстве случаев корреляция не превышала 0.1, хотя в отдельных случаях могла достигать 0.5. Факторы, влияющие на значение корреляции, выявить так и не удалось. Даже для одного временного отрезка корреляция на различных парах термометр–флюгер может отличаться до 20%.

Корреляция между температурой и направлением ветра может достигать значений 0.8 и даже выше, если не применять процедуру вычитания тренда. В этом случае крупномасштабная составляющая не отсекается, именно она и вносит основной вклад в значение корреляции. На рис. 16 видно, что изменение температуры явным образом следует за изменением направления ветра. Можно предположить, что это объясняется неоднородным нагревом подстилающей поверхности вокруг полигона. К примеру, юго-западный ветер может приносить воздушные массы из городского острова тепла, а западный ветер – прохладный воздух со стороны Цимлянского водохранилища.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Типичные значения полученных радиусов корреляции колебаний температуры и направления ветра: от 2–10 до 30–60 м, в зависимости от условий. Они сильно уменьшаются при переходе от дня к ночи.

2. При значениях масштаба Обухова порядка –10...–30 м вихри и термики достигают своих наибольших размеров (порядка 60 м).

3. При неустойчивой стратификации продольные размеры вихрей в 1.5–2 раза превышают поперечные. При устойчивой стратификации продольные размеры меньше поперечных.

4. При неустойчивой стратификации средний размер термиков на 10–30% больше размера вихрей.

5. Долгопериодные, порядка нескольких минут, колебания температуры совпадают с изменением среднего направления ветра. На меньшем масштабе корреляция между температурой и направлением ветра почти отсутствует. Несмотря на это, вихревые и термические структуры могут быть связаны.

6. Получаемые значения радиусов корреляции сильно зависят от методики измерений и последующей обработки, но все основные соотношения при этом сохраняются.

Авторы выражают признательность А.Ю. Артамонову, Д.В. Зайцевой, Д.Д. Кузнецову, В.С. Люлюкину, И.А. Репиной за внимание, помощь и

консультации в организации и проведении экспериментов, а также коллективу Цимлянской научной станции за содействие и обеспечение необходимых условий для успешных измерений. Хочется особо вспомнить Б.М. Копрова, по инициативе которого было возобновлено на новом уровне это направление экспериментальных исследований структуры атмосферного пограничного слоя.

Работа выполнена при поддержке РФФИ. Гранты 18-35-00591, 17-05-01116.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цванг Л.Р. Исследования атмосферной турбулентности на Цимлянской научной станции Института физики атмосферы АН СССР // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1985. Т. 21. № 4. С. 339–348.
2. Foken T. 50 years of the Monin–Obukhov similarity theory // Boundary-Layer Meteorology. 2006. V. 119(3). P. 431–447.
3. Копров Б.М. Из истории исследований пограничного слоя в Институте физики атмосферы АН СССР // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54. № 3. С. 330–343.
4. Дымников В.П., Лыкосов В.Н., Володин Е.М. Моделирование климата и его изменений: современные проблемы // Вестник РАН. 2012. Т. 82. №. 3. С. 227–227.
5. Yuval J., O’Gorman P.A. Stable machine-learning parameterization of subgrid processes for climate modeling at a range of resolutions // Nat. Commun. 2020. Т. 11. № 1. С. 1–10.
6. Вазаева Н.В., Чхетиани О.Г., Курганский М.В., Каллистратова М.А. Спиральность и турбулентность в атмосферном пограничном слое // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 1. С. 34–52.
7. Lofy E.R., Abbas A.A., Zaki S.A., Harun S. Characteristics of Turbulent Coherent Structures in Atmospheric Flow Under Different Shear–Buoyancy Conditions // Boundary-Layer Meteorology. 2019. V. 173. P. 115–141.
8. Mahrt L. Surface Wind Direction Variability // J. Applied Meteorology and Climatology. 2011. V. 5. P. 144–152.
9. Carper M.A., Porté-Agel F. The role of coherent structures in subfilter-scale dissipation of turbulence measured in the atmospheric surface layer // J. Turbulence. 2004. V. 5. Issue 1. P. 040.
10. Han G., Wang G., Zheng X. Applicability of Taylor’s Hypothesis for Estimating the Mean Streamwise Length Scale of Large-Scale Structures in the Near-Neutral Atmospheric Surface Layer // Boundary-Layer Meteorology. 2019. V. 172. P. 215–237.
11. Шишов Е.А., Соленая О.А., Копров Б.М., Копров В.М. Исследование вариаций направления ветра вблизи поверхности земли // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54. № 6. С. 611–620.
12. Ариель Н.З. Некоторые результаты наблюдений за пульсациями температуры и направления ветра // Труды главной геофизической обсерватории

- им. А.И. Воейкова 1961 № 107. Физика приземного слоя атмосферы (Махталинская экспедиция ГГО и СА НИГМИ). С. 60–65.
13. *Кречмер С.И.* К вопросу об изменчивости направления ветра // Труды ГЕОФИАН. 1956. № 33(160). С. 48–59.
 14. *Шишов Е.А., Копров Б.М., Копров В.М.* Статистические характеристики пространственно-временной изменчивости направления ветра в приземном слое // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 1. С. 23–28.
 15. *Копров Б.М., Копров В.М., Макарова Т.И.* Конвективные структуры в приземном слое атмосферы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2000. Т. 36. № 1. С. 37–47.
 16. *Koprov V.M., Koprov V.M., Makarova T.I., Golitsyn G.S.* Coherent structures in the atmospheric surface layer under stable and unstable conditions // *Boundary-Layer Meteorology*. 2004. V. 51(6). P. 19–32.
 17. *Монин А.С., Обухов А.М.* Безразмерные характеристики турбулентности в приземном слое атмосферы // ДАН. 1953. Т. 93. № 2. С. 223–226.
 18. *Мордухович М.И., Цванг Л.Р.* Прямые измерения турбулентных потоков на двух высотах в приземном слое атмосферы // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1966. Т. 2. № 8. С. 786–803.
 19. *Репина И.А.* Методы определения турбулентных потоков над морской поверхностью. М.: ИКИ РАН. 2007. 36 с
 20. *Wyngaard J.C.* Turbulence in the atmosphere. New York: Cambridge University Press, 2010. 393 p.
 21. *Hutchins N., Chauhan K., Marusic I., Monty J., Klewiczki J.* Towards Reconciling the Layer-Scale Structure of Turbulent Boundary Layers in the Atmosphere and Laboratory // *Boundary-Layer Meteorology*. 2012. V. 145. P. 273–306.
 22. *Hommema S.E., Adrian R.J.* Packet structure of surface eddies in the atmospheric boundary layer // *Boundary-Layer Meteorology*. 2003. V. 106. P. 147–170.
 23. *Oncley S. P., Hartogensis O., Tong C.* Whirlwinds and Hairpins in the Atmospheric Surface Layer // *J. Atmos. Sci.* 2016. V.73 P. 4927–4943
 24. *Doorn E., Dhruva B., Sreenivasan K. R., Cassella V.* Statistics of wind direction and its increments // *Physics of Fluids*. 2000. V. 12. № 6. P. 1529–1534.
 25. *Обухов А.М.* Турбулентность и динамика атмосферы // 1988. Гидрометеиздат. 408 с.
 26. *Копров Б.М., Копров В.М., Курганский М.В., Чхетиани О.Г.* Спиральность и потенциальный вихрь в приземной турбулентности // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 6. С. 637–647.
 27. *Панчев С.* Случайные функции и турбулентность. Л.: Гидрометеиздат, 1967. 447 с.
 28. *Зубковский С.Л., Федоров М.М.* Экспериментальное определение пространственных корреляционных функций поля скорости ветра в приземном слое воздуха // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1986. Т. 22. № 9. С. 909–916.
 29. *Копров Б.М., Соколов Д.Ю.* Пространственные корреляционные функции компонент скорости ветра скорости ветра и температуры в приземном слое атмосферы // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1973. Т. 9. № 2. С. 178–182.

Multi-Point Measurements of Temperature and Wind in the Surface Layer

E. A. Shishov^{1, *}, O. A. Solenaya¹, O. G. Chkhetiani¹, G. V. Azizyan¹, and V. M. Koprov¹

¹*Obukhov Institute of Atmospheric Physics Russian Academy of Science, Pyzhevsky per., 3, Moscow, 119017 Russia*

**e-mail: shishov.yegor@gmail.com*

The generalized over several years results of multi-point measurements of wind direction pulsations and air temperature in the surface layer on the basis of the Tsymljansk Scientific Station of the Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS. The characteristic sizes of vortex and thermal structures, as well as the ratio of these sizes under various conditions, have been determined. The previously found dependence of the characteristic sizes of structures on the conditions of thermal stratification is confirmed. Visualizations of two-dimensional fields of temperature and wind direction are presented.

Keywords: turbulence, coherent structures, surface layer, vortices, thermals, correlation functions