



УДК 551.511.639

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКИХ И ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ

Шишов Егор Алексеевич¹

Соленая Оксана Александровна¹

Копров Борис Михайлович¹

Копров Виктор Михайлович¹

Азизян Генрих Вачаганович¹

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

shishov.yegor@gmail.com

Аннотация

В работе представлены основные результаты, полученные в ходе полевого эксперимента на Цимлянском полигоне ИФА РАН летом 2019 года. Эксперимент заключался в исследовании вихревых и термических структур в приземном слое. Для этого использовалась многоточечная система регистрации температуры и направления ветра, развернутая вдоль горизонтальной линии с охватом 280 метров. Полученные данные позволили определить средний размер вихрей термиков. Были получены двумерные изображения этих структур.

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

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THERMIC AND VORTEX STRUCTURES IN A BOUNDARY LAYER

Egor A. Shishov¹

Oxana A. Solenaya¹

Boris M. Koprov

Victor M. Koprov

Genrikh V. Azizyan

¹A.M.Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
shishov.yegor@gmail.com

ABSTRACT

The paper presents the main results obtained during the field experiment at the Tsimlyansk test site of the IAP RAS in the summer of 2019. The experiment was concluded in the study of vortex and thermal structures in the surface layer. To do this, we used a multi-point system for recording temperature and wind direction, extending along a horizontal line with a coverage of 280 meters. The data obtained made it possible to determine the average size of thermal vortices. Two-dimensional images of these structures were obtained.

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

Введение

Несмотря на взрывной рост числа работ, посвященных численному моделированию, актуальность натурных измерений нисколько не уменьшается. И если глобальные и региональные климатические модели могут опираться на сеть метеостанций, разбросанных по всему миру, то моделирование мезо- и субмезомасштабных процессов осложняется дефицитом экспериментальных данных. С другой стороны, результаты такого моделирования зачастую остаются без сравнения с реально протекающими в атмосфере процессами. Повышение точности моделей циркуляции атмосферы во многом определяется увеличением их пространственного разрешения. Для адекватной параметризации этих моделей на малых масштабах необходимы данные натурных измерений. Эти же измерения затем могут использоваться для оценки результатов моделирования субмезомасштабных процессов.

Многоточечные измерения колебаний направления ветра проводились еще в 50-х и 60-х годах двадцатого века [1], [2]. В последние десятилетия, с развитием компьютерной техники, подобные измерения вышли на новый уровень и дали качественно новые результаты [3], [4], [5]. Все большее внимание уделяется экспериментальным исследованиям когерентных структур [6], [7]. Работа [8] посвящена изучению пыльных дьяволов. Особенно хочется выделить работы [9] и [10]. В этих работах авторы, используя большое количество акустических анемометров, смогли восстановить форму и вид некоторых воздушных вихрей, проходящих через полигон. Стоит отметить, что лишь в работах с небольшим количеством датчиков был проведен всесторонний статистический анализ полученных результатов. Напротив, использование большого числа сложных приборов значительно усложняет последующую обработку данных и вынуждает авторов рассматривать лишь самые яркие единичные события.

Постановка эксперимента

Данная работа является продолжением исследований, результаты которых описаны в [11], [12]. Измерения проводились на Цимлянском полигоне ИФА им. А.М. Обухова РАН в Ростовской области в период с 3 по 8 августа. Полигон представляет собой ровный участок невозделанной степи, покрытый невысокой высохшей травой. Его площадь составляет примерно один квадратный километр, а перепад высот не превышает полуметра.

Двенадцать флюгеров были закреплены на двухметровых штангах и выстроены вдоль линии «север-юг». Расстояние между соседними флюгерами было равно 20 метров (40 метров для нескольких крайних флюгеров). Общая протяженность линии флюгеров составила 280 метров (рис. 1а, б). На некоторых штангах помимо флюгеров были установлены малоинерционные термометры, рабочим телом которых служила 10 микронная вольфрамовая нить (рис. 1в). Аналоговые сигналы с флюгеров и термометров передавались на многоканальный АЦП L-Card E-440 и регистрировались с частотой 16 Гц. Запись производилась круглосуточно сериями от одного до восьми часов. Турбулентные потоки тепла и импульса определялись пульсационным методом при помощи акустического термометра-анемометра Gill WindMaster HS 3D (рис. 1г), установленного на мачте на высоте 12,5 м. Частота регистрации – 16 Гц, регистрация велась непрерывно. Для сопутствующих измерений температуры воздуха, скорости и направления ветра использовалась двухуровневая (2 и 10 м) метеомачта (рис. 1д). Измерения производились в автоматическом режиме один раз в минуту, результаты сохранялись на встроенном даталоггере.

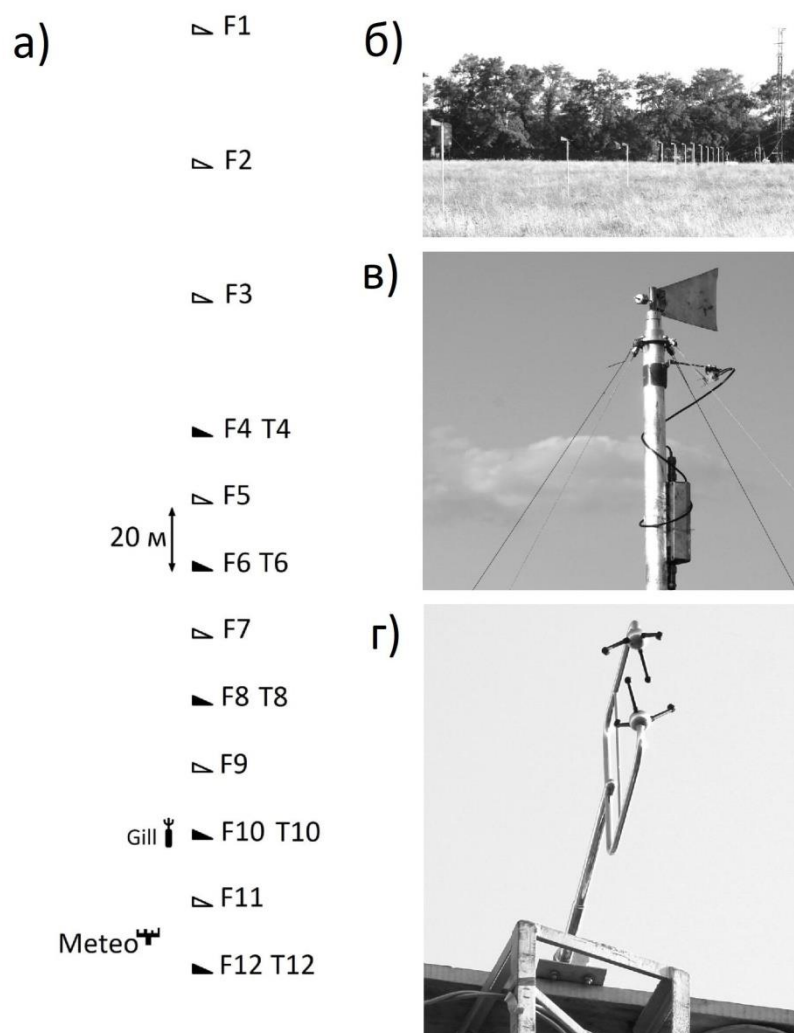


Рисунок 1. а, б) Схема и фотография полигона с установленными флюгерами, в) Флюгер, г) Анемометр

Корреляционные функции

Основная цель полевого эксперимента заключалась в изучении субмезомасштабных вихревых и термических структур – термиков [13], [14]. В данной работе рассматриваются воздушные вихри с вертикальной осью и конвективные структуры размером от нескольких метров до нескольких десятков метров. Нижняя граница определяется инерционностью используемых флюгеров, которые не могут откликаться на слишком быстрые изменения направления ветра. Верхняя граница диапазона задается как максимальным пространственным охватом датчиков, так и размерами полигона.

Чтобы отсечь крупномасштабную составляющую, из исходного ряда данных был вычтен трехминутный тренд. При средней скорости ветра 5 м/с структуры с характерным временным масштабом более трех минут будут иметь линейные размеры, превышающие длину полигона.

После подобной фильтрации практически для всех случаев корреляция между колебаниями температуры и изменением направления ветра не превышала 0,1. Это означает, что нет статистически значимой связи между термическими и вихревыми структурами в исследуемом масштабе. В то же время для исходных данных корреляция принимает значения от 0,1 до 0,7. На рис. 2 в совмещенной системе координат приведены графики изменения температуры и направления ветра. Изменения средней температуры явным образом повторяет изменение направления ветра. Скорее всего, это связано с

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.

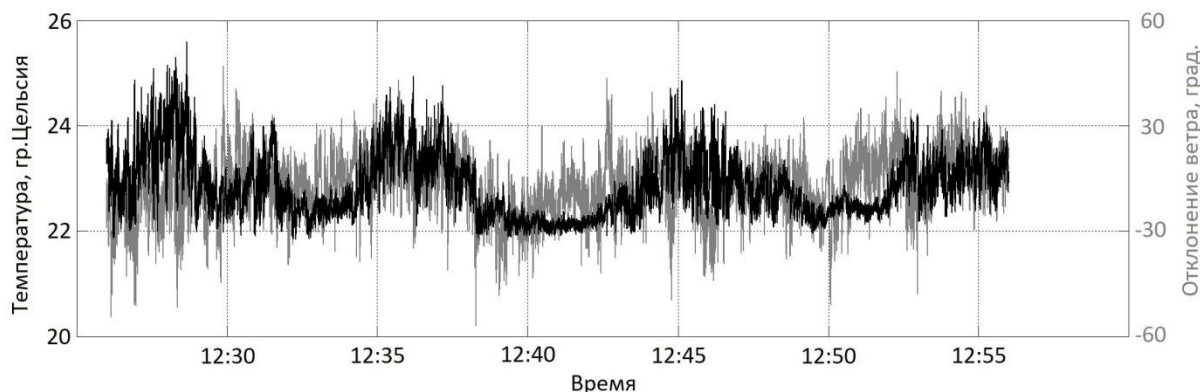


Рисунок 2. Изменение температуры и отклонения направления ветра для исходных данных. Более светлый – направление ветра

Для определения характерного размера воздушных вихрей использовался корреляционный анализ [14], [15], [16]. Для этого было выбрано 34 получасовых отрезка.

Коэффициент корреляции вариаций направления ветра φ_i и φ_j , соответствующих флюгерам i и j , определяется как $R_\varphi(i, j) = \frac{\varphi_i \varphi_j}{\sigma_i \sigma_j}$, где σ_i и σ_j – среднеквадратические отклонения, а черта сверху означает временное осреднение по всему выбранному отрезку. Аналогичным образом определяется коэффициент корреляции $R_t(i, j)$ пульсаций температуры в различных точках. На рис. 3 представлены зависимости коэффициента корреляции R_φ и R_t от расстояния между соответствующими датчиками – так называемые пространственные корреляционные функции $R_\varphi(\Delta x)$ и $R_t(\Delta x)$. Дневная запись была произведена 3 августа в период с 13:36 по 14:06. В это время дул умеренный западный ветер со средней скоростью 4 м/с. Средняя температура воздуха составляла 24°C, а термическую стратификацию можно характеризовать как неустойчивую – масштаб Обухова был равен -12 м. Масштаб Обухова [17] определялся пульсационным методом по данным с ультразвукового анемометра. Ночная запись была сделана в тот же день с 23:30 по 00:00. Дул слабый восточный ветер 1,5 м/с, средняя температура воздуха составила 20°C, а масштаб Обухова был равен 24 м, что соответствует устойчивой стратификации.

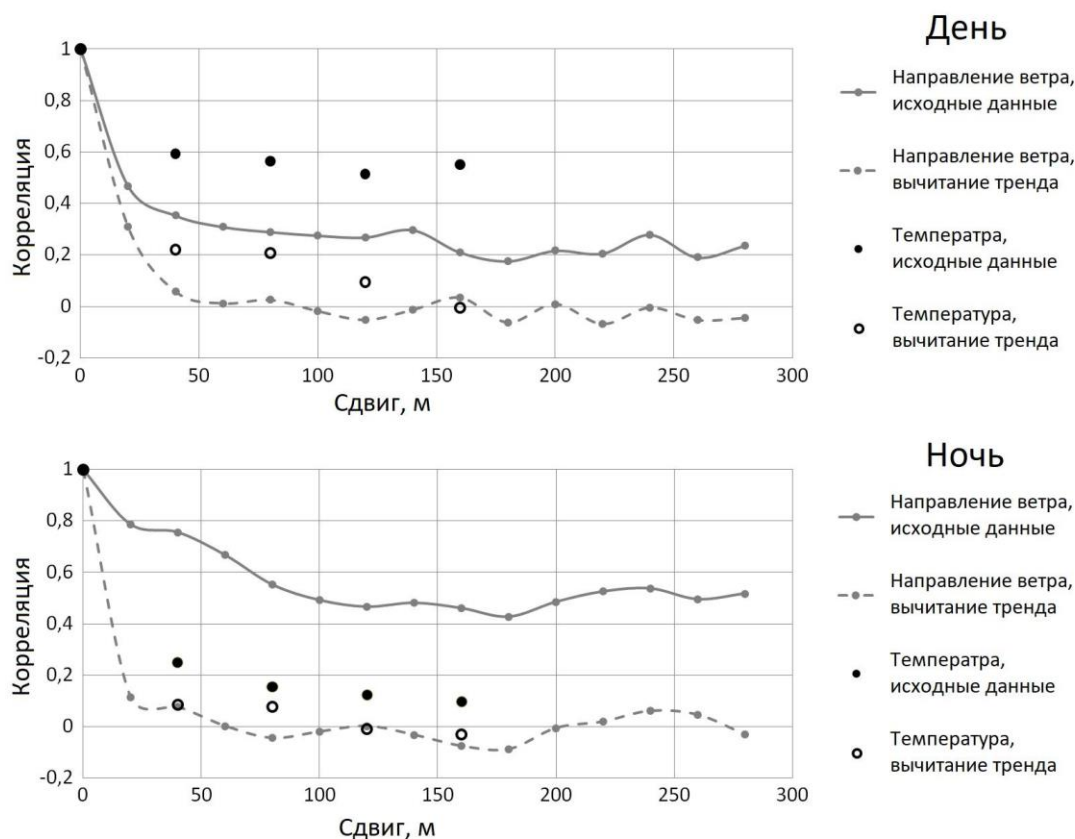


Рисунок 3. Корреляционные функции

Все полученные корреляционные функции на начальном этапе убывают с увеличением расстояния Δx между датчиками. Проходя через полигон, крупные вихри (или массы воздуха повышенной/пониженной температуры) одновременно захватывают датчики, расположенные даже на значительном расстоянии, повышая коэффициент корреляции для соответствующих значений Δx . Напротив, вихри и термические структуры меньших масштабов вносят вклад в коэффициенты R_φ и R_t только для малых значений Δx . Таким образом, чем больше характерный размер термических или вихревых областей в потоке воздуха, тем медленнее убывает корреляционная функция.

Корреляционные функции для исходных данных не обращаются в ноль даже при максимальном для данного эксперимента расстоянии между флюгерами или между термометрами. Напротив, для больших расстояний Δx функции $R_\varphi(\Delta x)$ и $R_t(\Delta x)$ выходят на некоторые постоянные значения.

После применения процедуры вычитания трехминутного тренда мезомасштабные процессы перестают вносить заметный вклад в коэффициенты корреляции, и корреляционные функции колебаний направления ветра обращаются в ноль на дистанциях 40-160 м.

Дальше рассматриваем корреляционные функции только после вычитания тренда, если не указано иное. Определим радиус корреляции как величину, численно равную площади под графиком функции $r = \int_0^{x_{max}} R(\Delta x) d(\Delta x)$, где x_{max} – расстояние, на котором корреляционная функция обращается в ноль. Так как и флюгеры, и термометры располагались на стойках, выставленных в линию поперек среднего ветра, полученные радиусы корреляции направления ветра r_φ и температуры r_t можно принять за характерный поперечный размер вихрей и термик. Так, для приведенных записей

$r_\varphi = 23$ м, $r_t = 31$ м днем и $r_\varphi = 13$ м, $r_t = 22$ м ночью. В обоих случаях термические структуры оказываются крупнее вихревых. Еще лучше это видно на рис. 4, где сравниваются r_φ и r_t для всех 34 обработанных временных отрезков.

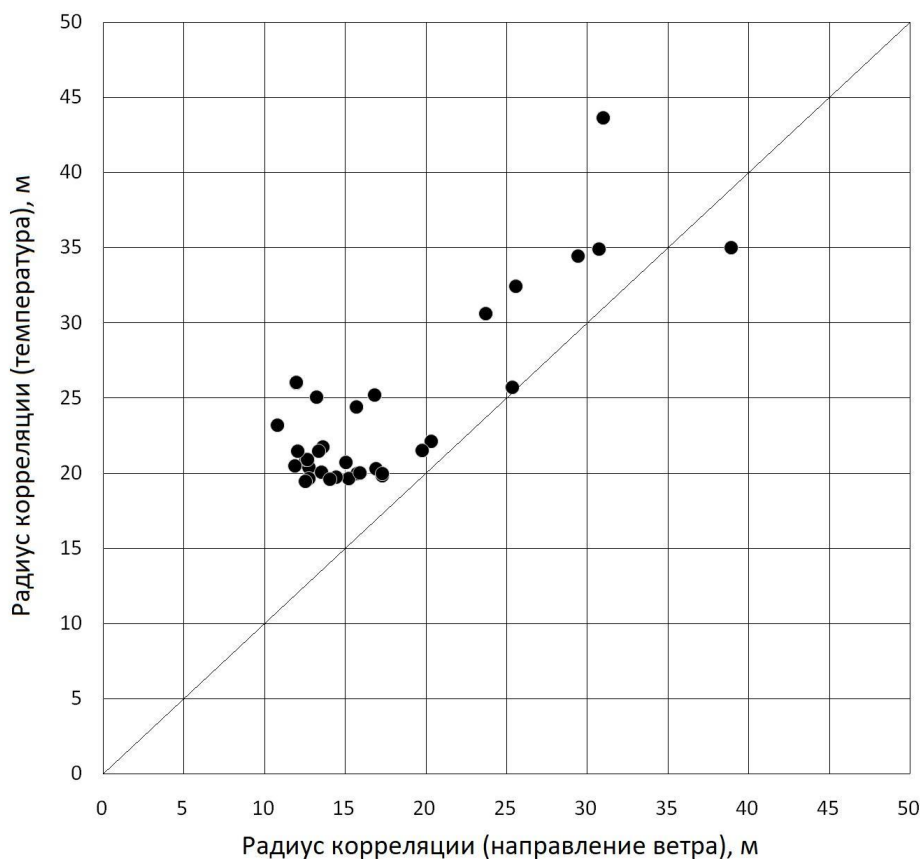


Рисунок 4. Сравнение радиуса корреляции направления ветра r_φ и температуры r_t .

Следует отметить, что получаемые масштабы r_φ и r_t весьма условны, так как они сильно зависят от длины тренда, который принимается за среднее значение рассматриваемой величины. Из рис. 3 видно, как отсечение крупномасштабной составляющей может изменить вид корреляционной функции: по-разному для температуры и отклонения направления ветра или же для дневных или ночных реализаций.

Тем не менее, радиусы корреляции, посчитанные по одной методике, в рамках одной работы могут сравниваться между собой.

На рис. 5 представлена зависимость радиусов корреляции от масштаба Обухова. И для вихревых, и для температурных структур характерно увеличение размеров при переходе от устойчивой стратификации к неустойчивой. Причем для отклонений направления ветра этот эффект проявляется сильнее.

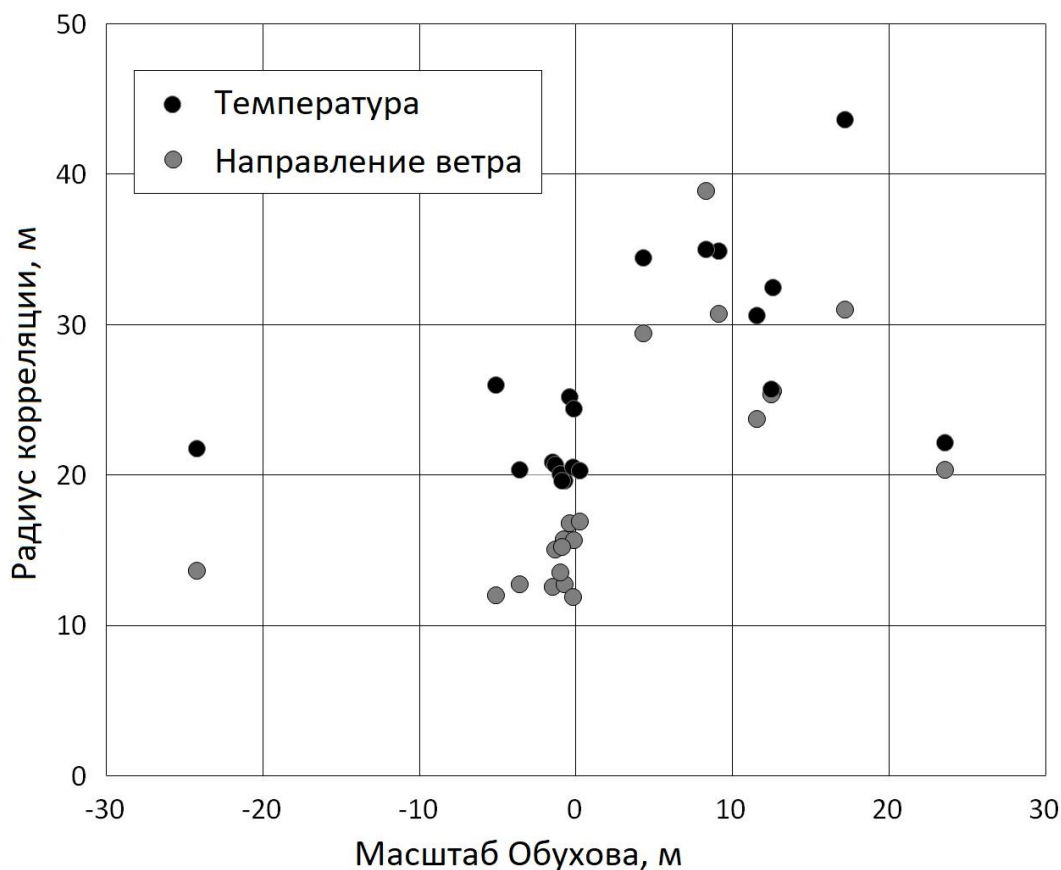


Рисунок 5. Зависимость радиуса корреляции от масштаба Обухова

Спектры

Для определения частотных характеристик отклонений направления ветра и температуры были построены спектры для ночных и дневных измерений (рис. 6).

При построении спектров использовались те же данные, что и для уже описанных корреляционных функций, представленных на рис. 3. Данные использовались исходные, без вычитания тренда. Продолжительность выбранных отрезков записи составляет 1 час. На всех графиках присутствует участок со степенной зависимостью спектральной плотности от частоты. В системе координат с билогарифмическим масштабом эти участки имеют вид прямых линий. Ночью интенсивность турбулентных колебаний и температуры, и направления ветра снижается. Причем спад в низкочастотной области более выражен, хотя можно было ожидать и обратного, поскольку предполагалось, что мелкомасштабная турбулентность должна уменьшиться после заката.

Спектры колебаний направления ветра имеют завал в области высоких частот. Это объясняется инерционностью лопастей флюгеров, которые не могут откликаться на слишком быстрые изменения направления ветра. Частотные характеристики флюгеров явным образом зависят от скорости ветра: чем больше скорость, тем лучше флюгер обрабатывает высокочастотные пульсации. Данная зависимость описана в работе [2]. Это хорошо видно при сравнении спектров для дневных и ночных измерений.

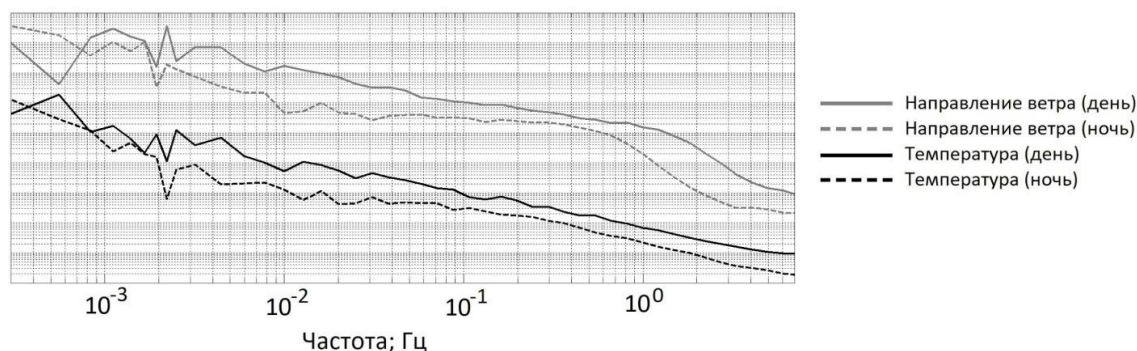


Рисунок 6. Спектры температуры и направления ветра

Визуализация полей температуры и направления ветра

Для визуализации полей температуры и направления ветра по полученным экспериментальным данным были построены соответствующие карты. Цветом на них отмечена температура воздуха или отклонение направления ветра от среднего значения. Вертикальная ось соответствует пространственной координате «север-юг». Вдоль горизонтальной оси отложено время. Применяя гипотезу Тейлора о замороженной турбулентности, данный временной масштаб можно перевести в пространственный, соответствующий направлению «запад-восток».

На рис. 7 изображены карты направления ветра и температуры для дневной реализации. Исходные данные были сглажены методом скользящего среднего с окном сглаживания 5 секунд.

Цилиндрический вихрь с вертикальной осью вращения, проходя через поперечно расположенный ряд флюгеров, должен отклонять их сначала в одну сторону, затем в другую. Нечто подобное можно наблюдать на приведенной карте. Примерно в 14:25 флюгеры поворачиваются против часовой стрелки, а спустя минуту отклоняются в противоположном направлении. Так как ветер в это время дул с запада на восток, можно сделать вывод, что вихрь был закручен против часовой стрелки. Поперечные размеры данного вихря около 100 метров, а протяженность вдоль направления среднего ветра – порядка 350 метров. То есть он достаточно вытянут в продольном направлении, что соответствует результатам, полученным в [12].

Поле температур также содержит выделяющиеся структуры. К примеру, в 14:24 можно наблюдать прохождение термика через ряд датчиков. Вертикальное строение подобных конвективных ячеек подробно описано в работе [7]. Что касается горизонтальных размеров: данный конкретный термик имеет диаметр около 80 метров и не вытянут вдоль ветра, как в случае с описанным выше вихрем.

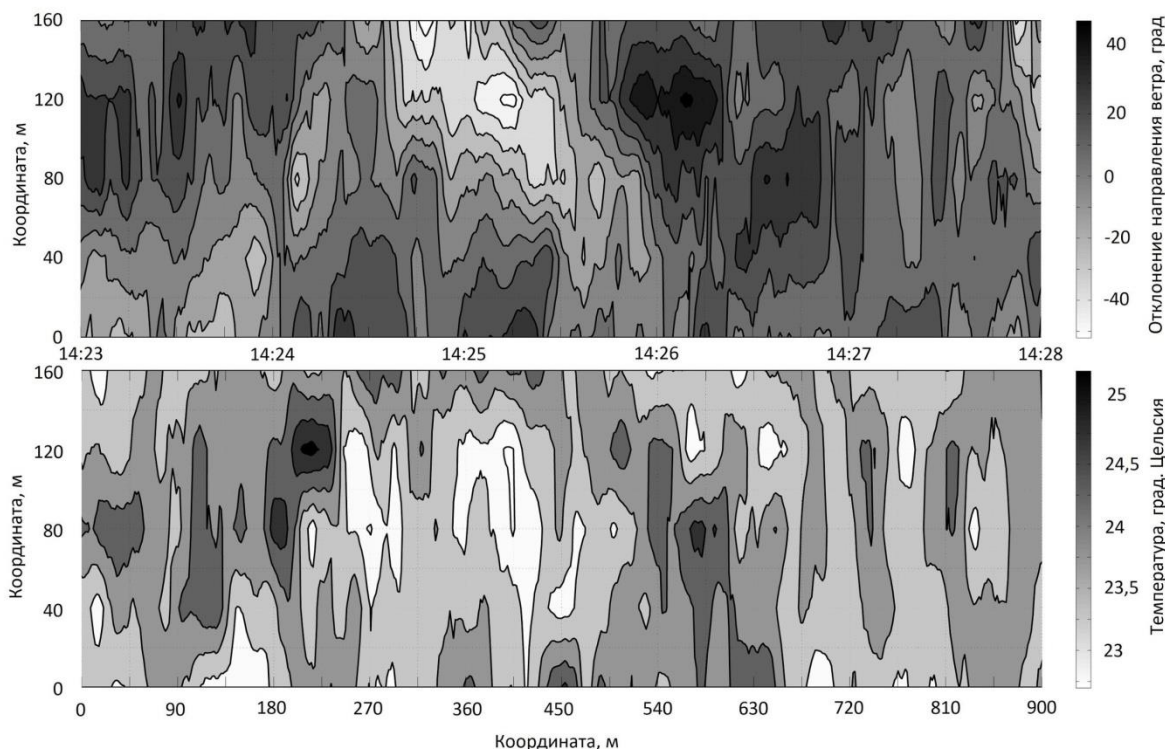


Рисунок 7. Карта направления ветра и температуры для дневной реализации. Временная и пространственная шкала общая для обоих графиков. Пересчет сделан с учетом средней скорости ветра

На рис. 8 представлены аналогичные карты для ночной реализации. Так как скорость ветра была вдвое меньше, чем днем, ширина окна сглаживания была увеличена до 10 секунд. Тем не менее, можно наблюдать большое количество относительно мелких пульсаций как температуры, так и направления ветра. При этом амплитуда колебаний гораздо меньше чем днем. На карте направления ветра в промежуток времени с 23:51 по 21:53 можно наблюдать практически такой же по размерам вихрь, что и днем. На этот раз ветер дул с востока на запад, поэтому данное чередование направлений поворотов флюгеров также соответствует вращению вихря против часовой стрелки. Сопоставимые размеры дневного и ночного вихря возможно свидетельствуют о том, что полученные ранее радиусы корреляции несут информацию не столько о размерах вихрей, сколько о частоте их появления. Этот факт также может объяснить различие в соотношении размеров вихревых и термических структур, рассчитанных через корреляционные функции с тем, что следует из построенных карт.

Ночью, в условиях устойчивой термической стратификации, контраст температурных неоднородностей снижается. К примеру, редкий теплый очаг, прошедший через датчики в 23:50, не более чем на пол градуса горячее окружающего воздуха. Днем термик схожих размеров имел перепад температур до полутора градусов (без учета совсем мелких пульсаций, которые были сглажены при осреднении).

Построенные карты позволяют непосредственно наблюдать термические и вихревые структуры в потоке воздуха. Что примечательно, контуры этих структур явным образом не связаны друг с другом на исследуемых масштабах. Между тем, в работе [10] описаны вихри, форма которых четко повторяется температурными неоднородностями.

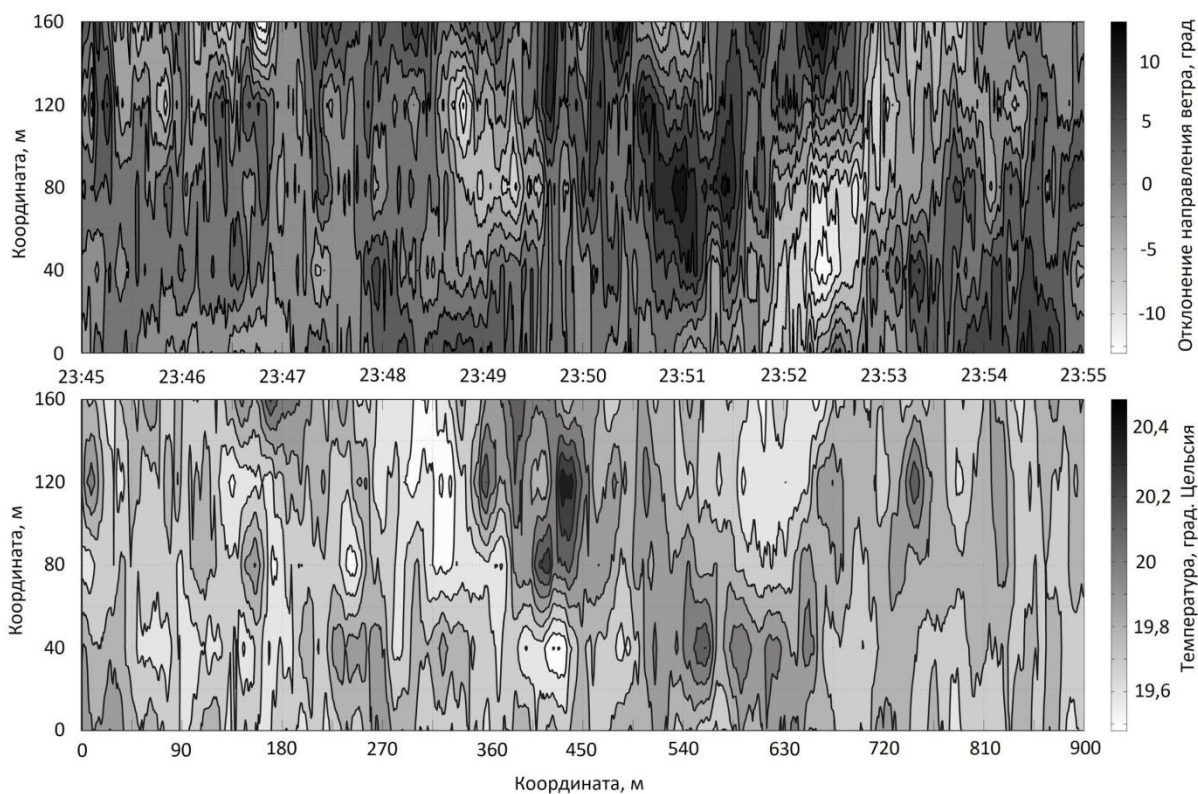


Рисунок 8. Карта направления ветра и температуры для ночной реализации

Основные результаты

1. Полученные статистическим методом радиусы корреляции для температур превышают радиусы корреляции для направления ветра. Однако отдельные вихревые структуры могут быть крупнее термиком.

2. Типичные значения полученных радиусов корреляции колебаний температуры и направления ветра - несколько десятков метров. Они сильно уменьшаются при переходе от дня к ночи.

3. При переходе от неустойчивой стратификации к устойчивой интенсивность турбулентных пульсаций снижается на всем диапазоне частот, однако для низких частот этот процесс выражен наиболее ярко.

4. Долгопериодные, порядка нескольких минут, колебания температуры совпадают с изменением среднего направления ветра. На меньшем масштабе корреляция между температурой и направлением ветра отсутствует.

5. Во время проведенных измерений непосредственно наблюдались воздушные вихри с вертикальной осью вращения. Они имеют размер порядка ста метров и сильно вытянуты вдоль направления среднего ветра.

Работа выполнена при поддержке РФФИ. Грант 18-35-00591.

Список литературы

1. С.И. Кречмер. К вопросу об изменчивости направления ветра. Труды ГЕОФИАН, № 33 (160), 1956.
2. Н.З. Ариель. 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.
3. L. Mahrt. Surface Wind Direction Variability *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2011. V 50, pp. 144-152.
4. E. Doorn, B. Dhruva, K. R. Sreenivasan, V. Cassella. Statistics of wind direction and its increments. *Physics of Fluids*. 2000. V. 12, №6, pp.1529-1534.
5. M. Metzger, B. J. McKeon and H. Holmes. The near-neutral atmospheric surface layer: turbulence and non-stationarity. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 2007, V. 365, pp. 859-876.
6. M. Calaf, M. Hultmark, H.J. Oldroyd, V. Simeonov. Coherent structures and k-1 spectral behavior. 2013, *Physics of Fluids* 25, 125107.
7. B.M. Koprov, V.M. Koprov, T.I. Makarova and G.S. Golitsyn. Coherent structures in the atmospheric surface layer under stable and unstable conditions. *Boundary-Layer Meteorology*, 2004, V. 111, pp. 19-32.
8. M.V. Kurgansky, A. Montecinus, V. Villagran, S.M. Metzger. Micro-meteorological conditions for dust-devil occurrence in the Atacama Desert. *Boundary-Layer Meteorology*, 2011, V. 138, pp. 285-298.
9. M.A. Carper, F. Porté-Agel. The role of coherent structures in subfilter-scale dissipation of turbulence measured in the atmospheric surface layer // *J. of Turbulence*. 2004. V. 5. Issue 1. P. 040.
10. S.P. Oncley, O. Hartogensis, C. Tong. Whirlwinds and Hairpins in the Atmospheric Surface Layer // *Journal of the Atmospheric Sciences*. 2016. V. 73. P. 4927-4943.

11. 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. No 1. С. 23–28.
12. Е.А. Шишов, О.А. Соленая, Б.М. Копров, В.М. Копров. Исследование вариаций направления ветра вблизи поверхности земли // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54. No 6. С. 611–620.
13. Antonia R.A., Chambers A.J., Friehe C.A., Van-Atta C.W., Temperature ramps in the atmospheric surface-layer // J. Atmos. Science. 1979. V. 36. No 1. P. 99–108
14. Копров Б.М., Соколов Д.Ю. Пространственные корреляционные функции компонент скорости ветра и температуры в приземном слое атмосферы // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1973. Т. 9. No 2. С. 178–182.
15. 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. No 9. С. 909–916.
16. Kader B.A., Yaglom A.M., Zubkovsky S.L. Spatial correlation functions of surface-layer atmospheric turbulence in neutral stratification. Bound.-Layer Meteorol. 1989. V. 47. No 1. P. 233–249.
17. Монин А.С. и Обухов А.М. Безразмерные характеристики турбулентности в приземном слое атмосферы // ДАН. 1953. Т. 93. No 2. С. 223–226.

References

1. S. I. Kretschmer. On the question of the wind direction variability. Proceedings of the GEOFIANS, No. 33 (160), 1956 [in Russian].
2. N. Z. Ariel. Some results of observations of temperature fluctuations and the wind direction. Proceedings of the main geophysical Observatory named A. I. voeykov 1961 no. 107 Physics of the surface layer of the atmosphere, pp. 60-65 [in Russian].
3. L. Mahrt. Surface wind direction variability. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2011. V 50, pp. 144-152.
4. E. Doorn, B. Dhruva, K. R. Sreenivasan, V. Cassella. Statistics of wind direction and its increments. Physics of Fluids. 2000. V. 12, №6, pp.1529-1534.
5. M. Metzger, B. J. McKeon and H. Holmes. The near-neutral atmospheric surface layer: turbulence and non-stationarity. Phil. Trans. R. Soc. A, 2007, V. 365, pp. 859-876.
6. M. Calaf, M. Hultmark, H.J. Oldroyd, V. Simeonov. Coherent structures and k-1 spectral behavior. 2013, Physics of Fluids 25, 125107.
7. B.M. Koprov, V.M. Koprov, T.I. Makarova and G.S. Golitsyn. Coherent structures in the atmospheric surface layer under stable and unstable conditions. Boundary-Layer Meteorology, 2004, V. 111, pp. 19-32.
8. M.V. Kurgansky, A. Montecinus, V. Villagran, S.M. Metzger. Micro-meteorological conditions for dust-devil occurrence in the Atacama Desert. Boundary-Layer Meteorology, 2011, V. 138, pp. 285-298.
9. M.A. Carper, F. Porté-Agel. The role of coherent structures in subfilter-scale dissipation of turbulence measured in the atmospheric surface layer // J. of Turbulence. 2004. V. 5. Issue 1. P. 040.
10. S.P. Oncley, O. Hartogensis, C. Tong. Whirlwinds and Hairpins in the Atmospheric Surface Layer // Journal of the Atmospheric Sciences. 2016. V. 73. P. 4927-4943.
11. Shishov E. A., Koprov B. M., Koprov V. M. Statistical characteristics of space-time variability of the wind direction in the boundary-layer // Izv. RAS. Atmospheric and ocean physics. 2017. Vol. 53. No 1. Pp. 23-28 [in Russian].
12. E. A. Shishov, O. A. Solenaya, B. M. Koprov, V. M. Koprov. Investigation of wind direction variations near the earth's surface // Izvestiya RAS. Atmospheric and ocean physics. 2018. Vol. 54. No 6. Pp. 611-620 [in Russian].
13. Antonia R.A., Chambers A.J. Friehe C.A., Van-Atta C.W., Temperature ramps in the atmospheric boundary-layer // J. Atmos. Science. 1979. V. 36. No 1. P. 99-108
14. Koprov B. M., Sokolov D. Yu. Spatial correlation functions of wind speed and temperature components in the boundary-layer of the atmosphere. Izv. USSR ACADEMY OF SCIENCES. Atmospheric and ocean physics. 1973. Vol. 9. No 2. Pp. 178-182 [in Russian].
15. Zubkovsky S. L., Fedorov M. M. Experimental determination of spatial correlation functions of the wind speed field in the boundary-layer of air. Izv. USSR ACADEMY OF SCIENCES. Atmospheric and ocean physics. 1986. Vol. 22. No 9. Pp. 909-916 [in Russian].
16. Kader B.A., Yaglom A.M., Zubkovsky S.L. Spatial correlation functions of surface-layer atmospheric turbulence in neutral stratification. Bound.-Layer Meteorol. 1989. V. 47. No 1. P. 233-249.
17. Monin A. S. and Obukhov A. M., Dimensionless characteristics of turbulence in the atmospheric surface layer // DOKL. RAS 1953. Vol. 93. No 2. Pp. 223-226 [in Russian].