



Конвективные структуры вблизи нагретой поверхности¹

Малиновская Е.А., Чхетиани О.Г., Азизян Г.В.

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

Под влиянием конвекции усиливаются вертикальные пульсационные составляющие скорости с высотой [1], отмечается рост корреляций пульсации температуры и скорости воздушного потока [2], обеспечивается эмиссия субмикронного аэрозоля в условиях слабых ветров [3], что обуславливает установление универсальных профилей концентрации [4]. Структуры наблюдаются на высоте нескольких метров в поверхностном слое и имеют асимметрию поперечного сечения [2]. В момент прохождения структур в данных ряда пульсационных составляющих обнаруживаются несимметричные треугольные всплески, называемые «рампами» (ramps) [5, 6], что особенно отчетливо выражается на небольших высотах [7]. Самоподобные характеристики таких структур отражаются в устойчивых зависимостях для линейного наклона спектральной мощности и структурных функций [8, 9].

В большинстве случаев экспериментальных исследований конвекции в атмосферном пограничном слое измерения проводились на высотах, от 1

м и выше в условиях нежаркой погоды (весна — начало лета). Особый интерес представляют условия возникновения и развития конвективных структур в летнее время над нагретой до 30–50 °С поверхностью в аридных условиях на малых высотах до 2 м.

Для регистрации пульсаций температуры и скорости в ИФА им. А.М. Обухова РАН разработаны автономные измерительные комплексы, включающие в себя термометры переменного тока и термоанемометры постоянной температуры, с использованием позолоченной 10 мкм вольфрамовой нити (Рис. 1).

При комплексных полевых измерениях в Калмыкии в 2022 г. полевые измерения проводились на разных высотах в слое до 1 м над поверхностью. Конкретно, эксперимент с измерениями пульсационных составляющих с частотой записи 1000 Гц на высотах 20, 40 и 80 см проводился 28 и 29 июля 2022 г.. Температура у поверхности достигала около 12:00 37 °С 28 июля и 45 °С 29 июля.

Как отмечается в подобной задаче [10], что большие и малые масштабы непосредственно связаны, возникшие большие флуктуации на малых масштабах, доминируют над высокими моментами скалярной структурной функции. Если наложен статический крупномасштабный градиент, возникает нарушение мелкомасштабной изотропии. В

¹Исследования выполнены при поддержке Российского научного фонда (проект 20-17-00214).

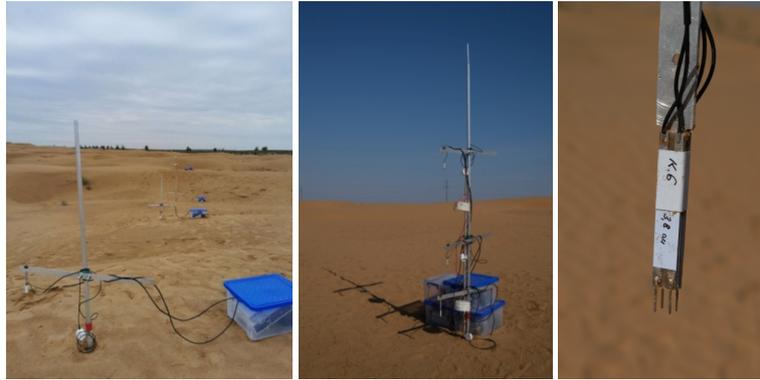


Рис. 1. Измерительный беспроводной комплекс и иллюстрация реализации эксперимента с датчиками на разной высоте, собственно датчик

связи с этим проведен визуальный анализ возникновения «рампов» при различных осреднениях.

При переходе от 10-сек. к 100-сек. осреднениям происходит укрупнение и исчезновение мелких «рампов» (Рис. 2). На разных масштабах (осреднение 1, 10, 200 сек.) возникают «рамповые» структуры, отражающие конвективные движения.

Сравнение функций плотности вероятности для пульсационных составляющих температуры и скорости при различных интервалах осреднения говорит о близком совпадении тепловых и динамических процессов на масштабах осреднения 1 и 10

с. В это же время для осреднения 100 с расхождения существенны.

Соответственно, для спектров пульсаций и структурных функций, построенных для одного интервала осреднения, выделяются соответствующие локальной изотропии степени « $5/3$ » и « $2/3$ » интервалы частот.

Характерные масштабы структур можно определить по положению области левой (низкочастотной) и правой границ температурного спектра для наклона $-5/3$ – «точки перегиба». Они варьируются от 0.2 до 5 м в течение дня для частот от 1 до

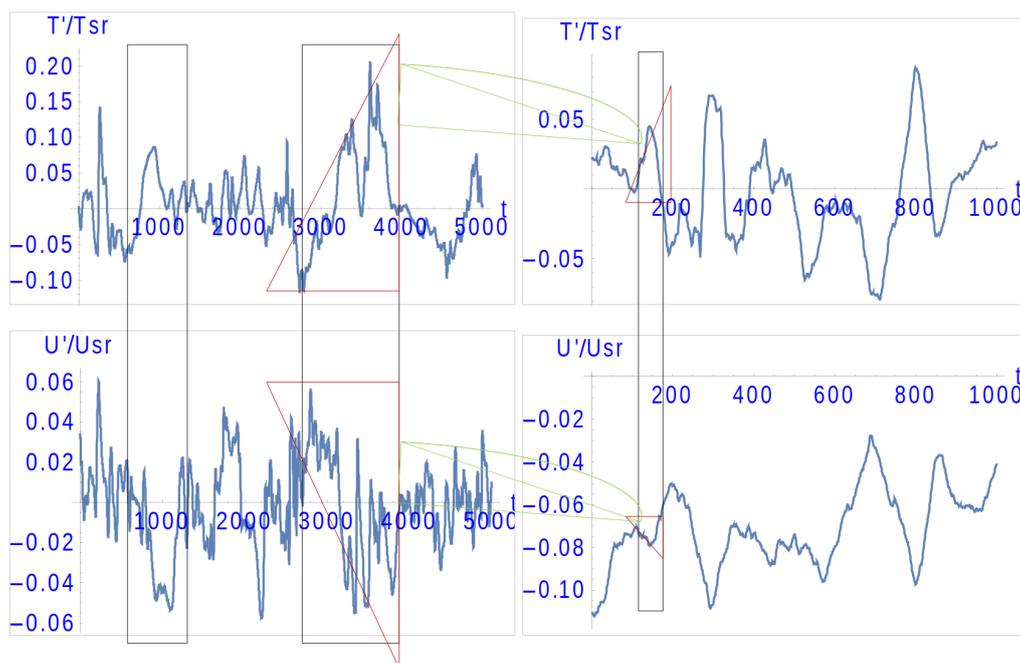


Рис. 2. Примеры возникновения самоподобия структур при изменении масштабов визуализации и осреднения с масштабом 1 мс и осреднением 1 с (слева) и масштабом 20 мс с осреднением 100 с (справа)

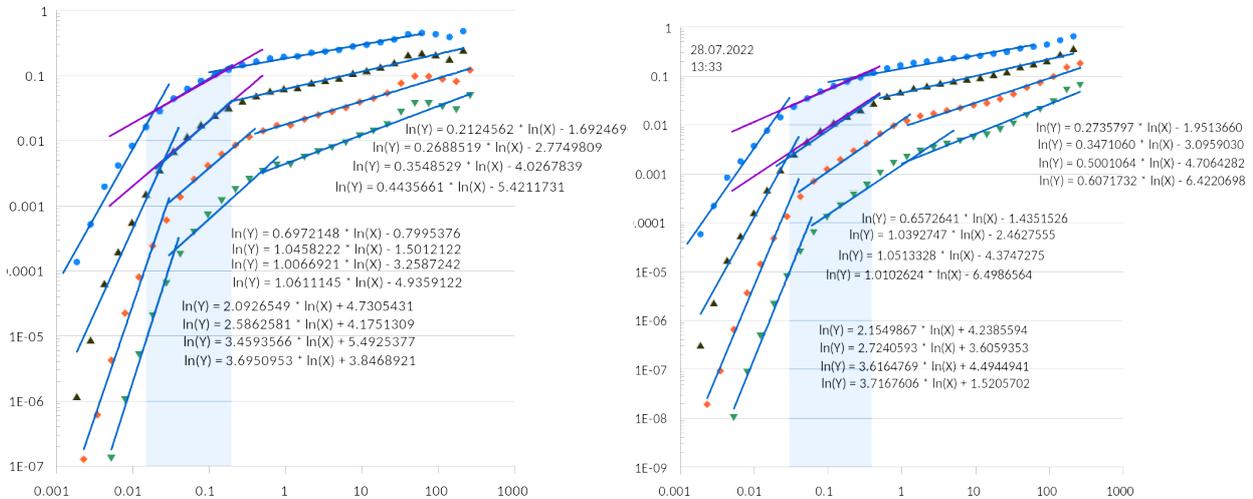


Рис. 3. Вид структурных функций от 2-го до 5-го порядка для 29.07 и 29.08 в 13:00 (цифрами 2–5 отмечены порядки структурных функций)

20 Гц (0.05–1 с) для левой и 0.01–0.1 м для 50–150 Гц (0.007–0.02 с) для правой. Участок с меньшими частотами со степенью -1 , вероятно, отражает наличие тепловых «струй» (аналогично, как в [10]) и других структур, в которых варьируются высокие и низкие значения температуры и скорости.

Наклоны спектров температуры и скорости в солнечный день отличны, обе точки перегиба смещены в сторону высоких значений частот.

Структурные функции построены для разностей значений температурных и скоростных пульсаций во временных рядах, подобно тому, как это делалось в [6, 9]. Для значений сдвига по времени от 0.02 до 0.2 с соблюдается локальная изотропия со степенью близкой к $-2/3$.

Отмечаемые также асимметрии для распределений разностных характеристик особо выражены в 11:00 и в 15:00 (противоположные эффекты), что, вероятно, связано с качественным различием в формировании восходящих нисходящих токов в это время.

Авторы хотят выразить признательность Л.О.Максименкову, Е.А.Шишову, А.А. Хапаеву за помощь в организации и проведении натурных измерений. Особую признательность хотим высказать Г.С. Голицыну и Е.Б. Гледзеру за постоянный интерес к работе и ценные замечания.

Список литературы

- [1] Frisch A. S., Businger J. A. A study of convective elements in the atmospheric surface layer // *Boundary-Layer Meteorology*. 1973, V. 3(3), p. 301–328.
- [2] Kopriv B. M. et al. Statistics of air temperature spatial variability in the atmospheric surface layer // *Boundary-layer meteorology*. 1998, V. 88(3), pp. 399–423.
- [3] Chkhetiani, O. G., Gledzer, E. B., Artamonova, M. S., & Iordanskii, M. A. Dust Resuspension under Weak Wind Conditions: Direct Observations and Model // *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, V. 12(11), P. 5147–5162.
- [4] Малиновская Е. А., Чхетиани О. Г., Голицын Г. С., Лебедев В. А. О вертикальном распределении пылевого аэрозоля в условиях слабых и умеренных ветров // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле, 2023, Т. 509 (2), с. 109–117.
- [5] Taylor R. J. Thermal structures in the lowest layers of the atmosphere // *Australian Journal of Physics*. 1958, V. 11(2), p. 168–176.
- [6] Antonia R. A., Chambers A. J. Note on the temperature ramp structure in the marine surface layer // *Boundary-Layer Meteorology*. 1978, V. 15(3), p. 347–355.
- [7] Chen W. et al. Coherent eddies and temperature structure functions for three contrasting surfaces. Part I: Ramp model with finite microfront time // *Boundary-Layer Meteorology*. 1997, V. 84, p. 99–124.
- [8] Zong-Peng S. et al. Self-Similar Characteristic for the Ramp Structures of Wind Speed // *Atmospheric and Oceanic Science Letters*. 2014, V. 7(4), p. 320–323.
- [9] Перепелкина А.В. Некоторые результаты исследования турбулентных пульсаций температуры и вертикальной составляющей скорости ветра // *Известия АН СССР. Серия геофизическая*. 1957, Т. 6, с. 765–778.
- [10] Shraiman B. I., Siggia E. D. Scalar turbulence // *Nature*. 2000, V. 405, p. 639–646.