

СУБМЕЗОМАСШТАБНЫЕ КОГЕРЕНТНЫЕ ВИХРЕВЫЕ СТРУКТУРЫ В АТМОСФЕРНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ В КОНТЕКСТЕ АНАЛИЗА ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЯВЛЕНИЙ НАД ТЕРРИТОРИЕЙ РОССИИ

^{1,2}Н.В. Вазаева, ¹О.Г. Чхетиани, ¹В.Ф. Крамар, ¹Д.В. Зайцева

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
vazaevanv@ifaran.ru

²Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

SUBMESOSCALE COHERENT VORTEX STRUCTURES IN THE ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER IN THE CONTEXT OF ANALYSIS OF EXTREME PHENOMENA OVER RUSSIA

^{1,2}N.V. Vazaeva, ¹O.G. Chkhetiani, ¹V.F. Kramar, ¹D.V. Zaytseva

¹A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia
vazaevanv@ifaran.ru

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Аннотация. Проводится исследование механизмов обменных процессов в области влияния когерентных структур. Среди них условия и механизмы генерации и поддержания когерентных субмезомасштабных структур, несмотря на давнюю регистрацию в численных моделях и достаточно уверенную и детальную экспериментальную регистрацию, до сих пор остаются не до конца ясными. В связи с важностью таких структур для разработки новых схем параметризаций при описании обменных процессов объектом исследования являлись эмиссии аэрозоля, формирование шквалов, ураганов, пыльных бурь и других экстремальных явлений, а также характеристики стриков.

Ключевые слова: субмезомасштабные когерентные структуры, турбулентность, спектры, спиральность, данные наблюдений.

Abstract. We studied mechanisms of exchange processes in the context of influence of coherent structures. Among them, the conditions and mechanisms of generation and keeping of coherent submesoscale structures remain not fully investigated until now, though they have been considered in numerical models for a long time and in experiments in details. Since such structures are important for the development of new parameterization schemes when describing exchange processes, this paper deals with aerosol emissions, the formation of squalls, hurricanes, dust storms and other extreme phenomena, as well as characteristics of streaks.

Keywords: submesoscale coherent structures, turbulence, spectra, helicity, observational data.

ВВЕДЕНИЕ

Субмезомасштабные — от десятков секунд до минут и от десятков до сотен метров — вихревые структуры постоянно существуют в атмосферном пограничном слое (АПС), где всегда имеется значительный вертикальный сдвиг скорости ветра. В сечении, параллельном поверхности, эти структуры, называемые стриками, выглядят как чередование вытянутых в направлении средней скорости ветра полос низкой и высокой скоростей движения.

Образование стриков связывается с развитием немодальных возмущений в стратифицированном экмановском слое, испытывающих интенсивный алгебраический рост за конечные промежутки времени.

Стрики способны приводить к интенсификации эмиссии пыли с подстилающей поверхности и, таким образом, являются важной составляющей при описании экстремальных явлений. Такие структуры необходимо учитывать в схемах параметризаций АПС, поэтому данные об их масштабах и динамических характеристиках представляют большой интерес. Их уверенная и детальная дистанционная регистрация в приземном слое, где ранее акустическое зондирование ограничивалось техническими возможностями содаров, в настоящем исследовании стала возможной благодаря минисодару высокого разрешения (ВРМС). На наличие стриков указывают также данные о флуктуациях скорости и температуры в АПС, которые демонстрируют спектральные зави-

симости с наклоном, близким к k^{-1} [Kader, Yaglom, 1991]. Несмотря на их давнее присутствие в численных моделях, надежная и детальная экспериментальная регистрация таких структур в АПС была отмечена относительно недавно [Drobinski et al., 2004]. По мнению наблюдателей, именно с этими структурами связаны наблюдаемые энергетические спектры с показателем степени -1 . Физические механизмы укрепления и поддержания таких структур обычно связаны со сдвиговыми неустойчивостями [Drobinski, Foster, 2003] или с их конвективной аналогией [Никитин, Чернышенко, 1997], где роль температурного поля играют турбулентные напряжения Рейнольдса. В стриках происходит до 25 % турбулентной диссипации энергии. В некоторых работах эти структуры также называются крупномасштабной турбулентностью. Наличие спиральности в АПС может быть одним из источников усиления завихренности в таких структурах.

В данной работе проанализированы основные характеристики субмезомасштабных структур, включая частотные спектры на основе наблюдений, с учетом теоретических результатов [Чхетиани и др., 2019].

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВРМС И ПОЛУЧЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Для экспериментальной регистрации стриков используется доплеровский трехкомпонентный мини-

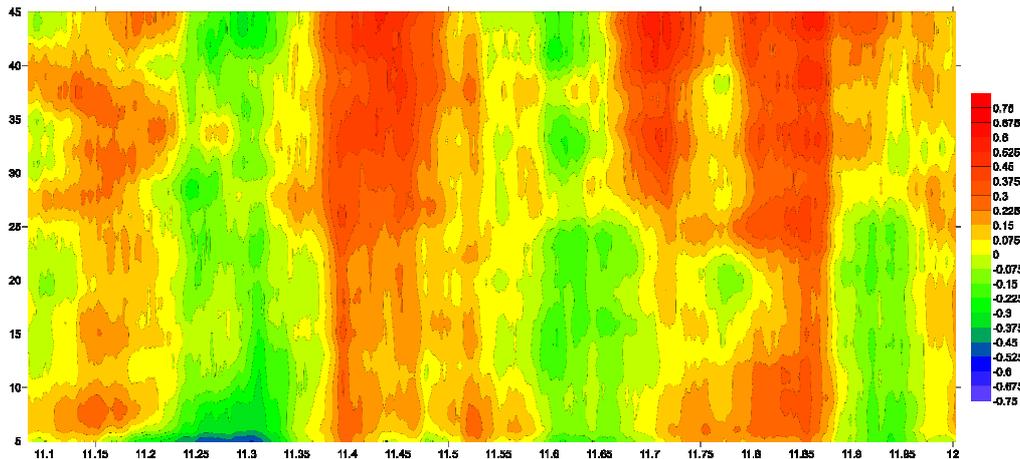


Рис. 1. Вертикальное поле скорости для часовой записи, выполненной минисодаром приземного слоя 23 июля 2018 г., 11.00–12.00 UT с 5-минутным осреднением

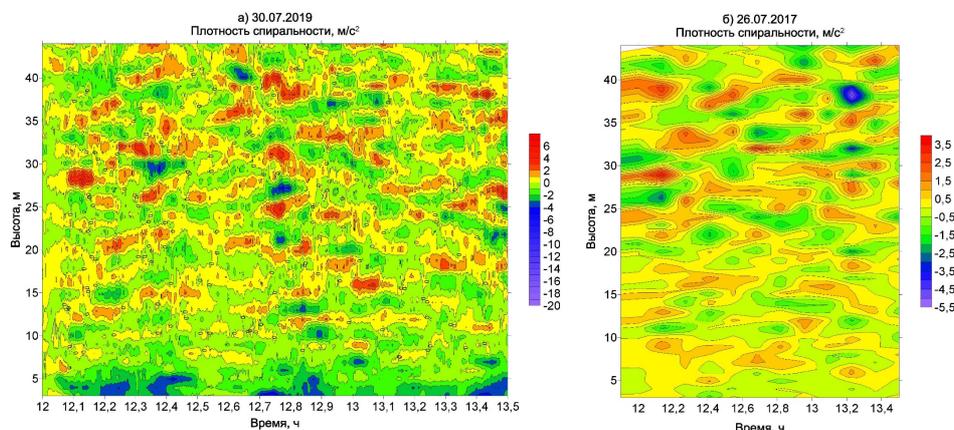


Рис. 2. Плотность спиральности стриков (m/s^2). Содарные измерения, Цимлянск: а — 30 июля 2019 г., б — 26 июля 2017 г. Параметр осреднения 5 мин. Плотность спиральности в стриках по результатам проведенных измерений составляет $0.5\text{--}4 \text{ m/s}^2$

содар высокого разрешения (ВРМС) с высокой достоверностью и хорошей точностью данных. Есть сведения об определении точности измерения скорости ветра. ВРМС использовался в летний период 2017–2019, 2021 гг. на Цимлянской научной станции; данные достоверны на высотах 2–45 м с разрешением 1 м по высоте и 1 с по времени. ВРМС фиксирует стрики с основным крупным временным масштабом 5–10 мин. и соответствующим пространственным масштабом 300–500 м, определяемым через среднюю скорость ветра, переносящего структуры.

Результаты измерения представляются в виде эхограмм. Верхняя панель — интенсивность эхосигнала в произвольных единицах, справа показана цветовая шкала в децибелах. Средняя панель — диаграмма вертикальной составляющей скорости, нижняя панель — профили модуля горизонтальной скорости ветра и ее направления, осредненные за 30 мин. В данных измерений ВРМС после осреднения четко идентифицируются субмезомасштабные когерентные структуры. Вертикальное поле скорости, плотность спиральности показаны на рис. 1, 2. Хорошо фиксируется основной крупный временной масштаб (5–7 мин для 2017 г., 6–8 мин для 2018 г.,

7–10 мин для 2019 г.), наблюдаемый во всех трех компонентах поля скорости.

ЧАСТОТНЫЕ СПЕКТРЫ КОМПОНЕНТ СКОРОСТИ И ТУРБУЛЕНТНАЯ СПИРАЛЬНОСТЬ

На рис. 3 показаны частотные спектры вертикальной компоненты скорости, измеренные с помощью акустического анемометра Gill Wind Master Pro HS Part 1951-РК-020 (а) и с помощью содара высокого разрешения (б), хорошо коррелируют между собой в области совпадения масштабов.

Для горизонтальных компонент скорости корреляция отсутствует в силу конструктивных особенностей содара, в котором антенны направлены под углом к горизонтальной плоскости. В области малых частот спектр имеет наклон, близкий к -1 , при увеличении частоты наклон близок к $-5/3$. Наклон -1 связан с развитием стриков в АПС.

Для анализа еще одной удобной характеристики стриков — турбулентной спиральности — данные эксперимента 2012 г. сравнивались со значениями, измеренными содарами. Измерение турбулентной спиральности и ротора скорости (завихрен-

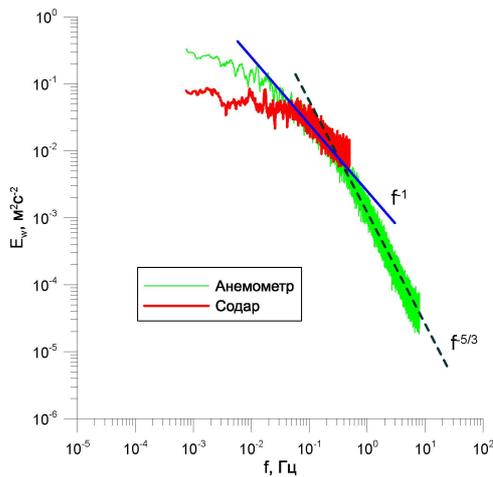


Рис. 3. Частотный спектр вертикальной компоненты скорости. Цимлянск, 30 июля 2019 г.

ности), а также получение данных спектров было выполнено ранее в ИПФ РАН акустическим фазовым методом в предположении измерения циркуляции скорости по замкнутому контуру. По результатам измерений турбулентной спиральности с усреднением 15 мин и данным акустического зондирования с усреднением 10 мин видна хорошая корреляция в вечерние часы (коэффициент корреляции с 20:00 до 21:00 UT равен 0.784) при отсутствии конвекции. Турбулентная спиральность измерялась в приземном слое до 10 м, спиральность поля скорости по данным акустического зондирования усреднена в слое до 70 м. В утренние часы обе измеренные спиральности хорошо коррелируют, но амплитудные значения не совпадают, вероятнее всего, за счет развивающихся конвективных движений (термиков). Значение турбулентной спиральности по данным измерений с учетом 15-минутного осреднения составляет $\sim 0.01\text{--}0.1 \text{ м/с}^2$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рост количества экстремальных событий в атмосфере вызывает увеличение спроса на системы мониторинга и прогнозирования переноса загрязнений. Исследование механизмов обменных процессов в различных метеорологических условиях необходимо для совершенствования моделирования экстремальных событий, для формирования которых обменные процессы в АПС играют определяющую роль. Когерентные структуры вносят большой вклад в эти процессы: среди них условия и механизмы генерации и поддержания когерентных субмезомасштабных структур, несмотря на давнюю регистрацию в численных моделях и достаточно уверенную и детальную экспериментальную регистрацию, до сих пор остаются не до конца ясными. Тем не менее, стрики важны для разработки новых схем параметризаций при описании обменных процессов, эмиссии аэрозоля, а также формирования шквалов, ураганов, пыльных бурь, поэтому их характеристики являются объектом исследования.

По результатам данной работы получены следующие выводы:

1. ВРМС фиксирует стрики с основным крупным временным масштабом 5–10 мин и соответствующим пространственным масштабом 300–500 м, определяемым через среднюю скорость ветра, переносящего структуры.

2. Плотность спиральности в стриках по результатам проведенных измерений составляет $0.5\text{--}4 \text{ м/с}^2$.

3. В области малых частот спектр имеет наклон, близкий к -1 , при увеличении частоты наклон близок к $-5/3$, наклон -1 связан с развитием стриков в АПС.

4. Значение турбулентной спиральности по данным измерений с учетом 15-минутного осреднения составляет $\sim 0.01\text{--}0.1 \text{ м/с}^2$.

Исследования выполнены при поддержке гранта Президента Российской Федерации для молодых ученых-кандидатов наук (проект № МК-5516.2022.1.5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Никитин Н.В., Чернышенко С.М. О природе организованных структур в пристенных турбулентных течениях. *Механика жидкости и газа*. 1997. № 1. С. 24–30.

Чхетиани О.Г., Вазаева Н.В. Об алгебраических возмущениях в атмосферном пограничном слое. *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2019. Т. 55, № 5. С. 62–75.

Drobinski P., Foster R. C. On the origin of near-surface streaks in the neutrally-stratified planetary boundary layer. *Boundary-Layer Meteorology*. 2003. Vol. 108. P. 247–256.

Drobinski P., Carlotti P., Newsom R.K., Banta R.M., Foster R.C., Redelsperger J.L. The structure of the near-neutral atmospheric surface layer. *J. Atmosph. Sciences*. 2004. Vol. 61. P. 699–714.

Kader B.A., Yaglom A.M. Spectra and correlation functions of surface layer atmospheric turbulence in unstable thermal stratification. *Turbulence and Coherent Structures*. Springer. Dordrecht. 1991. P. 387–412.