



Циркуляционные конвективные структуры в атмосферном пограничном слое по данным акустического зондирования и результатам моделирования¹

Вазаева Н.В.^{*,**}, Чхетиани О.Г.^{*}, Зайцева Д.В.^{*}

^{*}Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

^{**}Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва

В последние десятилетия большой интерес проявлен к циркуляционным конвективным структурам – замкнутым термоконвекционным структурам, называемым также термиками, и незамкнутым системам, в атмосферном пограничном слое (АПС). Характерные проявления таких структур исследовались на примере экспериментальных данных, полученных в экспедициях ИФА им. А.М. Обухова РАН и по результатам расчета мезомасштабной негидростатической атмосферной модели WRF-ARW, адаптированной к конкретным синоптическим ситуациям – частным случаям.

Полевые эксперименты проводились в сильных и слабых ветровых и различных температурных условиях над Прикаспийской низменностью в восточной части Республики Калмыкия, Россия, в летнее время 2007, 2016, 2018, 2019, 2021, 2022 гг. Доплеровский акустический локаатор (содар) серии ЛАТАН-3 [1] с вертикальным разрешением 20 и 10 м, интервалом излучения импульсов 5 и 3 с, диапазоном высот 600 и 350 м и базовой несущей частотой 2 кГц и 4 кГц измерял вертикальные про-

фили интенсивности эхо-сигнала, пропорционального структурной характеристике температуры, а также профили компонент скорости ветра. По профилям определялась предельная вертикальная скорость, рассчитывались максимальная скорость в интервале существования циркуляционных конвективных структур и их горизонтальный масштаб.

Статистическое распределение выбранных характеристик в дневное время оказалось близким к распределению Рэлея [2], применяемого, в частности, для статистики интенсивных влажно-конвективных вихрей и высоты волн в океане (см., например, рис. 1 для максимальной вертикальной скорости ветра 2016 г.):

$$I?(U) = \frac{2U}{U_0^2} \exp\left(-\frac{U_m^2 - U^2}{U_0^2}\right),$$

¹Исследования выполнены при поддержке гранта Президента Российской Федерации для молодых учёных-кандидатов наук (проект № МК-5516.2022.1.5)

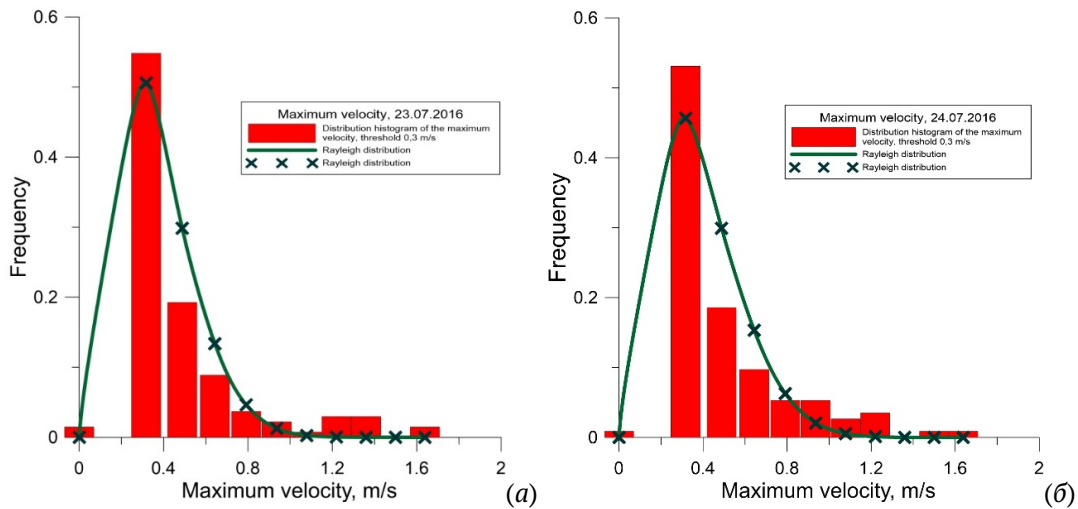


Рис. 1. Гистограмма распределения максимального значения вертикальной скорости (красные прямоугольники), распределение Рэля (зеленая линия), Калмыкия, 23 (а) и 24 (б) июля 2016 г.

где $U_0^2 = [\langle U^2 \rangle - U_m^2]$, $\langle U^2 \rangle$ — средняя квадратичная вертикальная скорость термиком, U_m — предельное значение вертикальной скорости термика.

Предполагается, что замкнутые термики движутся вперед за любой относительно небольшой временной шаг с некоторой усредненной скоростью (гипотеза Тейлора), при этом адекватно воспроизводятся пространственное распределение поля скорости и его временные вариации. Этот шаг по времени был принят эмпирически, от 5 до 10 мин. Рассмотрены случаи превышения вертикальных скоростей предельных значений, при которых гипотетически возникала конвективная структура (0.3 м/с, 0.6 м/с и 1.2 м/с). Известно, что в случае ансамбля термиком модель [3] дает одномерное распределение Максвелла.

При исследовании циркуляционных конвекци-

онных структур в АПС создано большое количество теоретических физико-математических моделей. Точные аналитические решения встречаются лишь в некоторых частных случаях, поэтому статистические методы сохраняют свою актуальность и значимость и продолжают развиваться [3–5]. Такие методы исследования данных натуральных измерений имеют особую ценность, в частности, при разработке вихреразрешающего моделирования атмосферных конвективных процессов. С помощью адаптированной модели WRF моделировалось несколько частных случаев над районом измерений в Калмыкии, хорошо визуализирующих как замкнутые термики — «пузыри», — так и незамкнутые структуры конвекции.

В случае горячей подстилающей поверхности замкнутые структуры характерны для слабых вет-

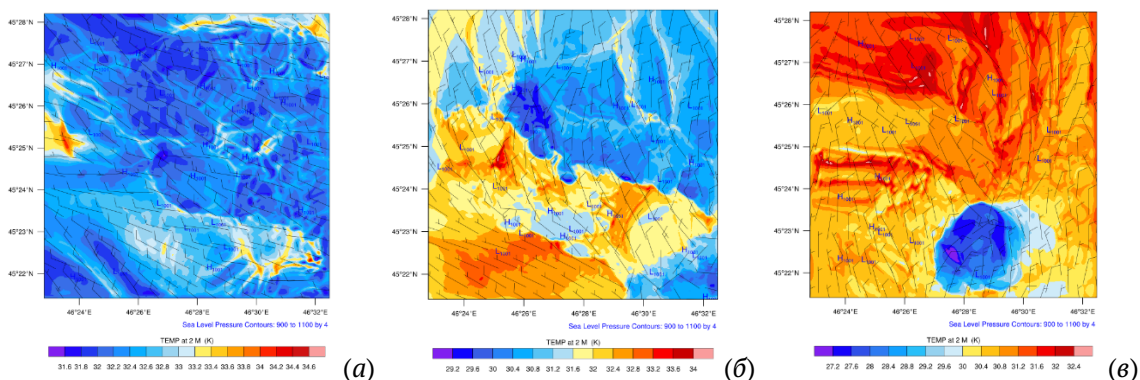


Рис. 2. Температура и ветер на высоте 2 м, атмосферное давление на уровне моря — для 12 (а), 12:30 (б), 13 (в) UTC; над районом измерений, вид сверху. Точка измерений в Калмыкии располагается в центре области, координаты 45.42° с.ш. 46.47° в.д. Модифицированная модель WRF, 23 июля 2021 г. Шаг сетки 60 м

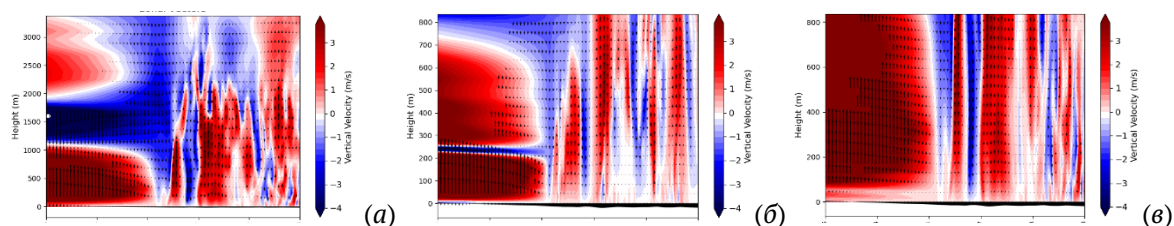


Рис. 3. Распределение вертикальной скорости по высоте в нижнем слое АПС – для 12 (а), 12:30 (б), 13 (в) UTC; над районом измерений, вид сбоку, сечение по долготе точки измерений. Координаты точки измерений в Калмыкии 45.42° с.ш. 46.47° в.д. Модифицированная модель WRF, 23 июля 2021 г. Шаг сетки 60 м

ровых условий. Во всех выбранных случаях конвекция была хорошо развита. При сильном ветре замкнутые структуры термиков исчезали и наблюдалась проникающая конвекция. Этот вывод хорошо визуализируется на рисунке вертикальной скорости вблизи района измерений (см. рис. 2, 3).

Эмпирические параметры распределения Рэ-ля для конвективных структур могут быть реализованы в параметризациях атмосферных моделей, позволяя увеличить точность прогнозирования условий зарождения и пути распространения таких структур и, собственно, понимания процессов в так называемой «серой зоне» численного моделирования.

Приносим благодарность М.А. Калистратовой, Р.Д. Кузнецову, В.Ф. Крамару, В.С. Люлюкину и Д.Д. Кузнецову за вклад в подготовку и проведение экспериментов по акустическому зондированию;

и М.В. Курганскому за полезные советы и интерес к работе.

Список литературы

- [1] *Kouznetsov R.D.* The multiple-frequency sodar with high temporal resolution // *Meteorol. Z.* 2009. V. 18(2). P. 169–173.
- [2] *Курганский М.В.* Статистическое распределение интенсивных влажно-конвективных спиральных вихрей в атмосфере // *ДАН*, 2000. V. 37(2). P. 240–242.
- [3] *Вульфсон А.Н., Бородин О.О.* Система конвективных термиков как обобщенный ансамбль броуновских частиц // *Успехи физических наук*. 2016. Т. 186(2). С. 113–124.
- [4] *Petenko I.V., Bezverkhniy V.A.* Temporal Scales of Convective Coherent Structures Derived from Sodar Data, *Meteorol // Atmos. Phys.* 1999. V. 71. P. 105–116.
- [5] *Petenko I.V. and Shurygin E.A.* A two-regime model for the probability density function of the temperature structure parameter in the convective boundary layer // *Bound-Layer Meteor.* 1999. V. 93. P. 381–394.