

УДК 551.510

О РОЛИ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ В РАДИАЦИОННОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ АТМОСФЕРЫ С ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

© 2020 г. **Б. М. Копров^a, В. М. Копров^{a, *}**

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

*E-mail: vkoprov@gmail.com

Поступила в редакцию 30.01.2019 г.

После доработки 11.03.2020 г.

Принята к публикации 01.04.2020 г.

Уже в 50-х годах XX века выяснилось, что предположения созданной А.С. Мониним и А.М. Обуховым полуэмпирической статистической теории приземного слоя, строго говоря, не выполняются. Экспериментально доказано, что организованные (когерентные) структуры в приземном слое существуют и именно они играют основную роль в адвективном (турбулентном) вертикальном переносе тепла, импульса и примесей, а ведущая роль радиационного механизма в формировании температурного профиля очевидна. Настоящая статья является попыткой качественно описать механизм взаимодействия организованных вихревых структур с радиационной теплопроводностью в процессе переноса тепла от подстилающей поверхности к атмосфере.

Ключевые слова: приземный слой, радиационный обмен, когерентные структуры, вихревые структуры, турбулентный перенос

DOI: 10.31857/S0002351520040057

ВВЕДЕНИЕ

Созданная А.С. Мониним и А.М. Обуховым полуэмпирическая статистическая теория приземного слоя [1] (для краткости будем называть ее далее $M * O$ -теорией) сыграла огромную роль в развитии исследований в этой области. Ее 50-летию был посвящен недавно вышедший обзор [2]. При создании этой теории А.С. Монин и А.М. Обухов посчитали возможным пренебречь радиационным притоком тепла. К другим основным предположениям $M * O$ -теории принадлежат стационарность и (по умолчанию) отсутствие организованных структур.

В то же время теоретические исследования земной атмосферы как тонкой газовой оболочки на вращающемся шаре, находящейся под воздействием солнечной радиации [3–5], начатые еще на рубеже XX столетия под влиянием работ астрофизиков по исследованию атмосфер Солнца и других звезд, показали, что вертикальный профиль температуры воздуха определяется главным образом радиационным обменом между поверхностью и атмосферой в инфракрасном диапазоне: земная поверхность, нагретая прямым солнечным излучением (проходящим через атмосферу почти без потерь), генерирует инфракрасное излучение, которое затем и поглощается атмосферой.

Под стационарностью обычно понимается неизменность во времени средних температуры и скорости ветра, а также вторых моментов вариаций. Основными параметрами $M * O$ -теории являются вертикальный турбулентный поток тепла $c_p \rho w' T'$ и вертикальный поток импульса $\rho w' u'$, которые считаются не зависящими от высоты, параметр плавучести g/T и высота z . Здесь c_p – теплоемкость при постоянном давлении, ρ – плотность воздуха, u' и w' – вариации горизонтальной и вертикальной скоростей ветра, T и T' – температура и ее вариации, g – ускорение свободного падения. Горизонтальная черта означает осреднение по времени. В описании приземного слоя используется система координат, в которой ось X направлена вдоль среднего ветра, а ось Z направлена вертикально.

Вращение Земли не учитывается, т.е. угловая скорость вращения Земли Ω считается равной нулю. Вследствие этого поле скорости в приземном слое обладает зеркальной симметрией и спиральность равна нулю:

$$He = u_i \omega_i = 0$$

(здесь, как обычно, по повторяющимся индексам производится суммирование).

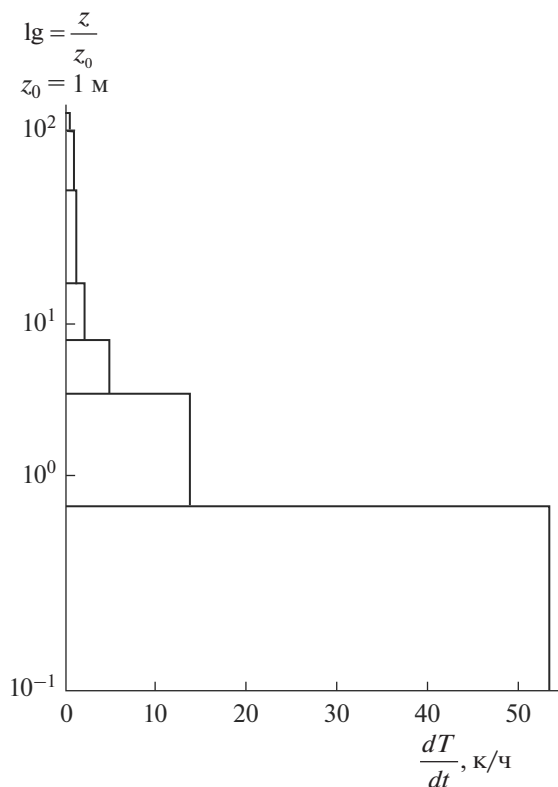


Рис. 1. Скорость инфракрасного радиационного нагрева приземного воздуха на разных высотах, рассчитанная по реальным данным в [10] (Цимлянск).

В этих предположениях существует единственный безразмерный параметр $\zeta = z/L$, где

$$L = \overline{(-u'w')^{3/2}} / \kappa(g/T)\overline{w'T'}$$

и κ – постоянная Кармана.

Теория Монина–Обухова является чисто статистической и не рассматривает организованных (когерентных) структур.

В данной работе:

1) Приводятся экспериментальные данные об изменении с высотой турбулентного и радиационного потоков тепла в приземном слое при стационарности.

2) Демонстрируется существенная роль когерентных структур поля температуры в вертикальном турбулентном переносе тепла при неустойчивости и показано, что асимметрия и эксцесс временных разностей температуры определяются особенностями этих структур.

3) Показано, что средняя высота изотермической поверхности в приземном слое и амплитуда ее вариаций суть величины одного порядка, но при этом стратификация сохраняется, т.е. приземный слой атмосферы ведет себя как стратифицированная жидкость.

4) Дается качественное описание механизма теплообмена между поверхностью и атмосферой на основе предположения о существовании в приземном слое горизонтальных вихревых структур типа роллов.

ВЕРТИКАЛЬНАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ РАДИАЦИОННЫХ И КОНВЕКТИВНЫХ ПОТОКОВ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ – ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ

Обзор теоретических работ по этой проблеме и описание соответствующей системы уравнений содержится в работе Е.С. Кузнецова [6]. Однако до настоящего времени не существует теории, описывающей совместно радиационный и конвективный теплообмен подстилающей поверхности с атмосферой.

Инфракрасное радиационное нагревание воздуха в приземном слое в дневное время зависит от перепада температуры почва-воздух, градиента температуры и концентрации парниковых газов – водяного пара, углекислого газа, метана и озона. На рис. 1 показан результат расчета инфракрасного радиационного нагревания приземного воздуха в Цимлянске [7]. Длинноволновый радиационный поток, очевидно, максимален на подстилающей поверхности и быстро убывает с ростом высоты.

По дневным измерениям в Цимлянске в нижней части приземного слоя (ниже 5 м) турбулентный поток $c_p \rho \overline{w'T'}$, напротив, растет с высотой (турбулентное выхолаживание) [8–10], а начиная с высоты $Z_L \approx 5$ м его рост замедляется. Согласно [11], в слое 5–20 м турбулентные потоки тепла и импульса практически не меняются с высотой. Дневные измерения с самолета над Цимлянским полигоном [12] показали, что турбулентный поток не меняется до высоты $Z_T \approx 100$ м, а выше в силу нестационарности начинает убывать и на высоте около 600 м он меняет знак.

Средняя температура слоя не зависит от времени (стационарность), в частности, том случае, когда один поток с высотой убывает, а другой в равной степени – возрастает. Когда температура слоя растет со временем, то это означает, что радиационный нагрев не компенсируется турбулентным выхолаживанием. Таким образом, даже при неизменной во времени температуре слоя, турбулентный поток может зависеть от высоты, вопреки предположению $M * O$ -теории. Отметим также, что в упомянутых выше экспериментах [9, 10] получался парадоксальный результат: турбулентное выхолаживание больше радиационного нагрева при неизменной температуре слоя.

Поскольку радиационный нагрев становится незначительным на некоторой высоте $Z_L \approx 5$ м, а

турбулентный поток перестает зависеть от высоты (а это является исходным предположением $M * O$ -теории), из всего сказанного можно сделать вывод, что эта теория применима лишь в интервале высот $Z_L < Z < Z_T$, в данном случае это 5–100 м.

КОГЕРЕНТНЫЕ СТРУКТУРЫ ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И ИХ СВЯЗЬ С ВИХРЕВЫМИ СТРУКТУРАМИ

Переходя к обсуждению организованных структур, напомним некоторые статистические связи между вариациями компонент скорости и температуры, т.е. между их отклонениями от скользящего среднего.

Между температурой и продольной скоростью наблюдается высокая корреляция отрицательного знака ($r_{uT} \sim -0.7$), а ковариация $\overline{u'T'}$ по модулю существенно больше, чем $\overline{w'T'}$ [13] (вопреки предположению, высказанному в первом издании книги “Статистическая гидромеханика” [14]). Ковариация $\overline{u'w'}$ всегда имеет отрицательный знак, независимо от знака параметра стратификации (разумеется, в том слое, где средняя скорость \bar{U} возрастает с высотой). Основной вклад в интегральное значение вертикального потока импульса и тепла, а также горизонтального потока тепла вносят неоднородности компонент вектора скорости и температуры с масштабами порядка высоты.

В приземном слое днем в летнее время наблюдаются асимметричные выбросы положительного знака, получившие название рэмп-структур [15] (*ramp-structures*). В этих выбросах возрастание происходит медленно, а возвращение к исходному уровню очень быстро. Интерес к рэмп-структурам изначально был связан с тем, что они вносят основной вклад в турбулентные потоки тепла [16].

Кроме того, как показано в [17], асимметрия временной изменчивости производной температуры, определяется формой структур.

На рис. 2 в верхней его части показаны трехминутные синхронные реализации температуры на семи высотах от 1 до 36 м, а в нижней дана карта, представляющая собой временную развертку высоты изотермических поверхностей для того же отрезка времени. Карта дана до высоты 11 м и со сглаживающим окном в 1 с. На рис. 3 показана карта для отрезка в 15 с, приходящегося на начало упомянутого трехминутного отрезка, в том же интервале высот, без сглаживания. Частота регистрации составляла 32 Hz. Легко заметить, что прохождению рэмп-структуры соответствует “холм” на изотермической поверхности, но однородная слоистость сглаженного 1-секундным фильтром температурного поля при этом не нарушается. Ско-

рость изменения высоты изотерм характеризует вертикальную скорость воздуха. Такой “холм” связан с согласованными вариациями вертикальной и продольной компонент скорости, которые происходят при прохождении вихря с циркуляцией вокруг горизонтальной оси, перпендикулярной направлению средней скорости. Это с очевидностью следует из выражения для поперечной компоненты ротора скорости

$$\omega_y = \partial u / \partial z - \partial w / \partial x.$$

Таким образом, рэмп-структуре соответствует интервал времени, в течение которого через точку наблюдения проходит вихрь с горизонтальной осью.

Отметим также, что подобные одиночные “холмы” на изотермах наблюдались при измерениях в условиях сильной устойчивости на шельфовом склоне Антарктиды [18]. На наш взгляд, в этом случае физической причиной возникновения “холмов” явилось вихреобразное скатывание одиночных лавин холодного воздуха вдоль шельфового склона Антарктиды. Изменение направления и амплитуды скорости при их прохождении подтверждается данными наблюдений.

ПРИМЕРЫ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР В ПРИРОДНЫХ ТЕЧЕНИЯХ

Классическим примером организованной структуры, движущейся сквозь неподвижный воздух, являются вихревые кольца, образующиеся при выбросе порции дыма через отверстие в наполненном дымом замкнутом объеме. Учившиеся на физфаке МГУ могли видеть их “вживую” в ходе лекционных демонстраций. Кольцо движется сквозь неподвижный воздух без видимого изменения своей формы и скорости в течение длительного времени. При неудачном выбросе образуется бесформенное облачко дыма, которое быстро теряет скорость и смешивается с окружающим воздухом. Физической причиной такой поразительной проникающей способности этого организованного движения является, на наш взгляд, то, что окружная скорость воздуха на внешней поверхности кольца u , обусловленная вращением вокруг оси тора, в данном случае равна скорости движения кольца как целого U и противоположна ей по направлению, что эквивалентно движению кольца без трения в неподвижном воздухе.

Вихревое кольцо может возникать и под влиянием движения в жидкости круглой пластины в направлении нормали к ней [19]. Его можно наблюдать после гребка вертикально поставленным веслом. На поверхности воды образуются два вихря, визуализирующие находящуюся в воде половину вихревого кольца, которое движется со скоростью, сообщенной движением весла.

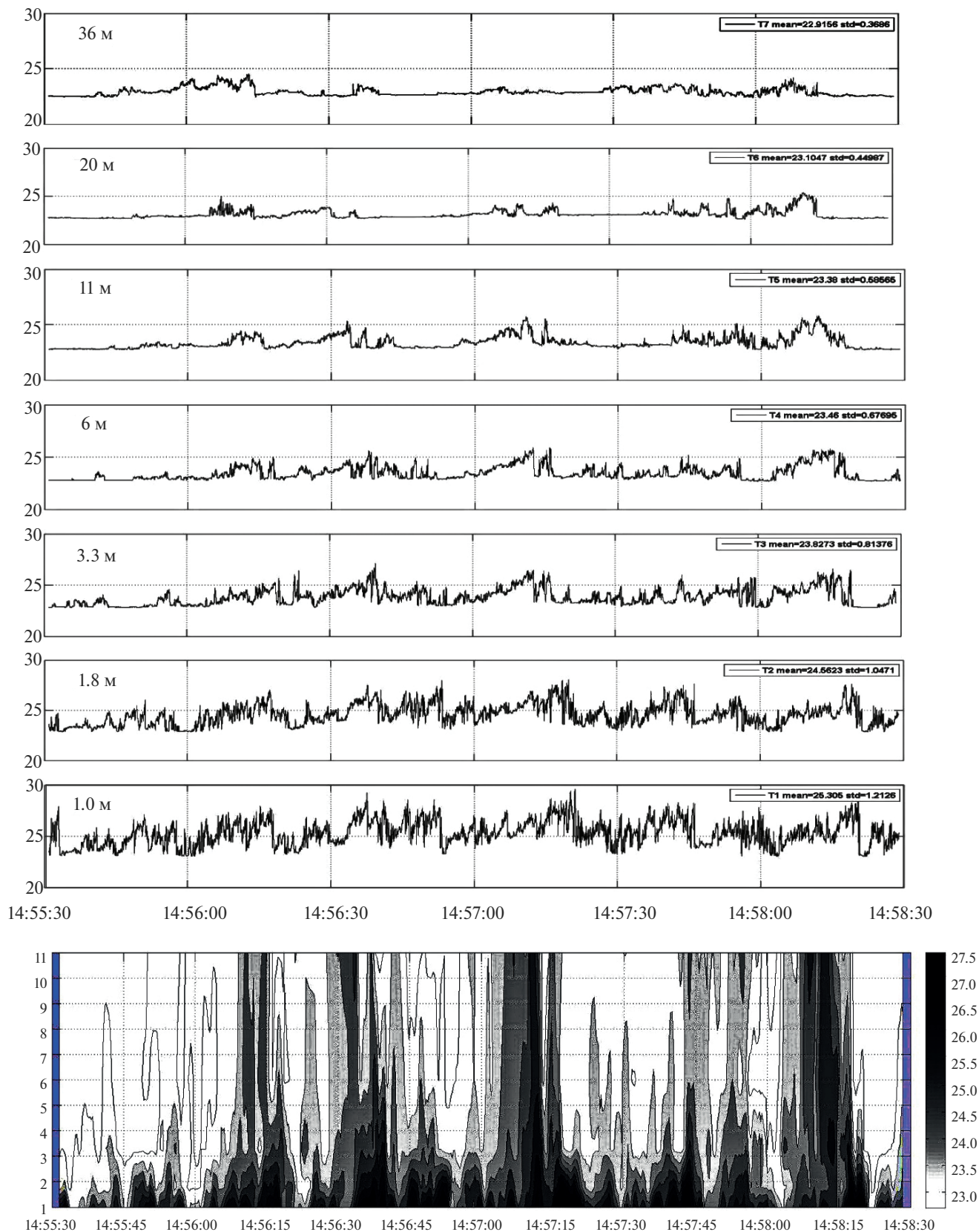


Рис. 2. Верхняя часть – синхронные вариации температуры на 7 уровнях в слое 1–36 м на интервале времени в 3 мин. Нижняя часть – развертка высот изотермических поверхностей на том же временном интервале, со сглаживающим окном в 1 с. Цимлянск 01.09.1998. Частота регистрации 32 Hz.

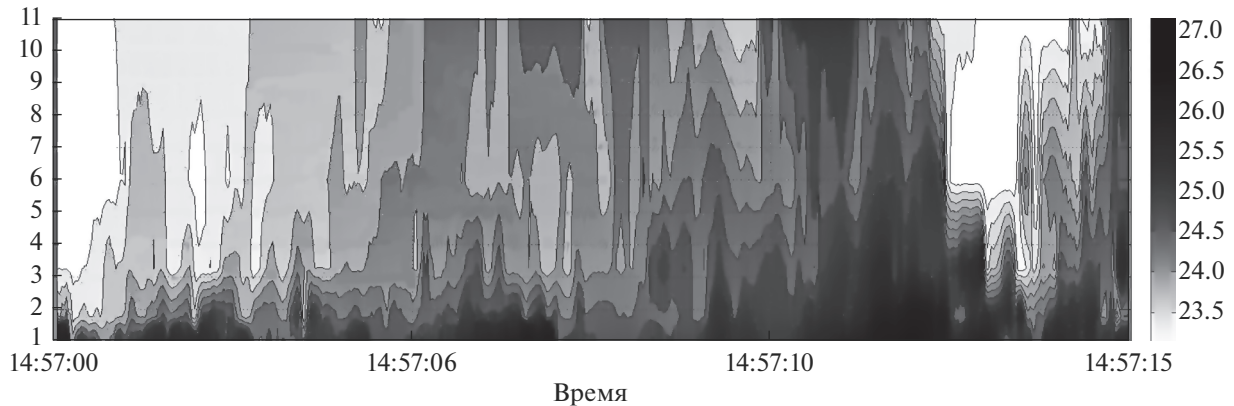


Рис. 3. Карта изотермических поверхностей, построенная по данным за 15 с, без сглаживания. Цимлянск 01.09.1998. Частота регистрации 32 Hz.

По-видимому, таково же происхождение долго сохраняющегося следа на поверхности воды после прохождения судна. Этот след есть не что иное, как визуализация сообщенного кораблем вращательного движения, обеспечивающего перемещения воды вдоль траектории движения корабля с минимальными потерями кинетической энергии на трение.

Эти примеры показывают, что какая-либо частица вязкой жидкости может двигаться сквозь неподвижную среду с минимальными потерями кинетической энергии за счет трения, если составляющая ее жидкость участвует в специальном образом организованном вращательном движении. Здесь прослеживается аналогия с преимуществом перемещения бревна методом качения по сравнению с волочением. Другим часто наблюдаемым в приземном слое вихревым образованием является спиральный вихрь типа пыльного дьявола.

СОВМЕСТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ И РОТОРА В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ

Матрица турбулентных ковариаций компонент скорости и ротора (поток вихря) теоретически рассматривалась в [20]. Первая попытка экспериментальной проверки выводов этой работы предпринята нами в [21] с использованием фазового метода [22] для измерения скорости и ротора. Используя разработанный позднее двухкомпонентный фазовый роторометр (циркулиметр), нам удалось измерить совместно несколько элементов ковариационной матрицы $\overline{u_i \omega_k}$, в том числе и слагаемые спиральности [23].

Первые совместные измерения спиральности и потенциального вихря были выполнены на высоте 5 м в Цимлянске в 2012 году [24] с помощью установки из четырех акустических анемометров-термометров, размещенных в вершинах прямоугольного тетраэдра с базовым размером 5 м.

В 2014 году аналогичные по методике измерения в Цимлянске были выполнены с тетраэдром размером 0.7 м (рис. 4) на высотах 3.5, 5, 13.5 и 25 м [25].

В пустынях при слабом ветре и сильном перегреве подстилающей поверхности регулярно наблюдаются конвективные спиральные вихри типа так называемых пыльных дьяволов [26], которые пронизывают весь пограничный слой. Векторы \vec{v} и $\vec{\omega}$ в таком вихре коллинеарны. В степной зоне, где расположен Цимлянский полигон, среднее значение угла между векторами \vec{u} и $\vec{\omega}$ близко к 90° [25], т.е. среднее значение спиральности мало, а спиральные вихревые образования типа пыльных дьяволов возникают крайне редко. В то же время среднее значение коэффициента корреляции между ортогональными пульсационными компонентами векторов \vec{u} и $\vec{\omega}$ достигает величин порядка 0.5. На рис. 5 представлена матрица корреляций-ковариаций для временных вариаций следующих шести величин:

$$\omega'_x, \omega'_y, \omega'_z, u'_x, u'_y, u'_z.$$

Вариации, отмеченные штрихами, определены как отклонения от скользящего двадцатиминутного среднего. Можно констатировать, что в этих условиях все диагональные элементы ковариационных матриц в несколько раз меньше недиагональных. Аналогичное утверждение справедливо и для коспектров. Рисунок 6 представляет коспектры, умноженные на частоту f , в зависимости от логарифма частоты (по техническим причинам на графике и в подписи к нему для скорости используется обозначение V , а для ротора – R). Логарифмическое представление введено, как это обычно делается в подобных случаях, в связи с тем, что спектр вариаций компонент скорости и ротора простирается от сотых долей до десятков Hz , и поэтому графическое изображение в линейном масштабе по оси абсцисс невозможно. В то же время для любой интегрируемой функции спра-

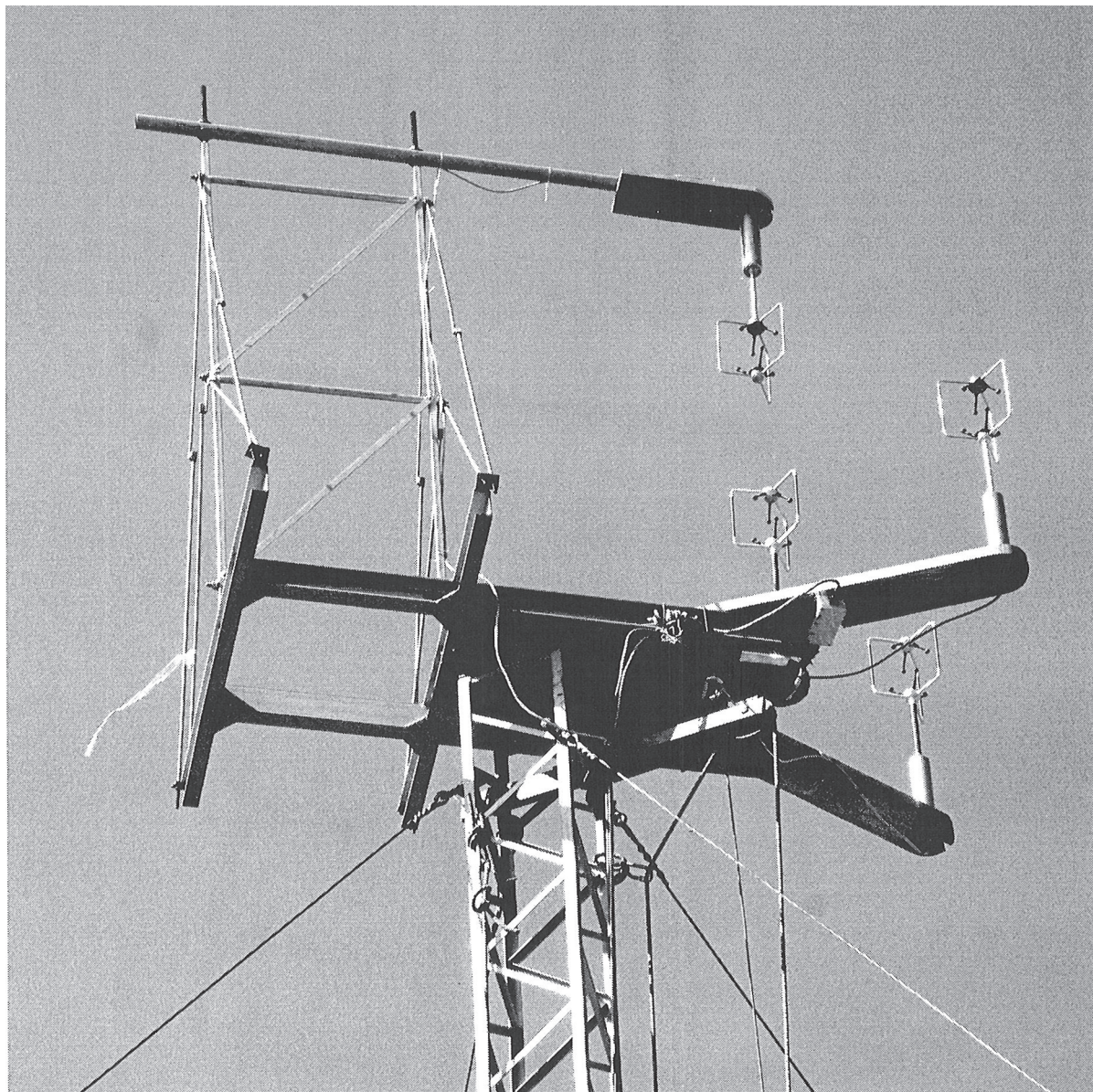


Рис. 4. Установка “Тетраэдр” для покомпонентного измерения скорости, ротора скорости и градиента температуры. Установка размещалась на вершине мачты переменной высоты. Цимлянск, 2014.

ведливо тождество $\int_0^{+\infty} F(x)dx = \int_0^{+\infty} xF(x)d \ln x$. На рис. 7а и 7б показаны в аналогичном представлении автоспектры компонент скорости и ротора.

На рис. 6 хорошо видно, что все коспектры, умноженные на частоту обладают максимумом в районе $f = 0.1$ Hz. Этой частоте (по замороженности) соответствует горизонтальный масштаб повторения структур порядка 50 м.

Как показано в [25], спиральность и при устойчивой, и при неустойчивой стратификации имеет, как правило, положительный знак, подобно спиральности циклонов и антициклонов, а также торнадо северного полушария. Поэтому можно предположить, что знак среднего значе-

ния турбулентной спиральности также определяется вращением Земли, и не меняется при смене знака параметра устойчивости $\zeta = z/L$.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РАДИАЦИОННОГО И КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ

Среднее значение поперечной компоненты ротора скорости

$$\bar{\Omega}_y = \partial \bar{u} / \partial z - \partial \bar{w} / \partial x$$

в приземном слое имеет положительный знак, поскольку скорость ветра растет с высотой. Это да-

CovCor_1408_15_x12 1430 1630

*	R_x	R_y	R_z	V_x	V_y	V_z
R_x	4.55	-0.41	1.94	-0.14	0.92	0.63
R_y	-0.11	2.87	1.03	-0.57	0.29	-0.27
R_z	0.36	0.24	6.49	-1.29	1.33	0.18
V_x	-0.051	-0.26	-0.39	1.71	-0.078	-0.27
V_y	0.34	0.14	0.41	-0.047	1.64	0.054
V_z	0.46	-0.25	0.11	-0.32	0.066	0.41

Рис. 5. Дневная матрица корреляций-ковариаций между компонентами ротора R_x, R_y, R_z и скорости V_x, V_y, V_z . На диагонали дисперсии, ниже диагонали – корреляции, выше – ковариации. Цимлянск, 20 августа 2014 г., 14:30–16:30, частота регистрации 20 Hz, высота 25 м.

ет основание предполагать, что существуют вихри, имеющие диаметр порядка высоты z , которые катятся вниз по потоку. По-видимому, именно эти вихри являются теми структурными элементами, которые формируют средний профиль скорости и вносят основной вклад в среднее значение ковариации $\overline{u'w'}$. М.Д. Миллионщиков высказывал такое мнение на одном из турбулентных обуховских семинаров в ИФА еще в 60-х годах прошлого века и позднее в своей статье по турбулентности [27].

В ряде работ было показано, что в температурном поле при неустойчивости наблюдаются события, состоящие в погружении холодных и быстро движущихся масс воздуха в прогретые и медленные нижние слои. Эта вторгающаяся масса испытывает торможение на границе соприкосновения с более медленным вытесняемым теплым воздухом, в силу чего в ней возникает циркуляционная ячейка, схема которой согласуется с наличием рэмп-структур температурного поля (рис. 3). С другой стороны, с приближением порции холодного воздуха к горячей подстилающей поверхности уже с высоты порядка 1–2 м начинается ее интенсивный прогрев за счет поглощения инфракрасного излучения от подстилающей поверхности (рис. 1), а затем, в рамках предложенной схемы, происходит ее подъем и охлаждение. Таким образом, эта ячейка циркуляции, питающаяся кинетической энергией среднего потока, осуществляет перенос вверх тепла, полученного вблизи поверхности за счет поглощения ее инфракрасного излучения. Это обеспечивает вертикальному радиационному теплопереносу превалирующую роль по сравнению с адвективным (турбулентным) в непосредственной близости от поверхности.

Поскольку интенсивность радиации в полосах поглощения быстро убывает с высотой, начиная с высот в несколько метров основную роль в верти-

кальном переносе тепла начинает играть адвекция, и турбулентный поток перестает зависеть от высоты.

В силу сказанного, предположение $M * O$ -теории о постоянстве с высотой турбулентного потока тепла в приземном слое следует заменить постоянством суммы турбулентного и радиационного потоков (как это в порядке примечания и предлагали авторы теории).

Перенос примесей, например, испаряющегося с поверхности водяного пара, происходит за счет молекулярной и мелкомасштабной турбулентной диффузии между слоями в стратифицированном приземном слое и может иметь направление как совпадающее с направлением потока тепла, так и противоположное ему [28]. Аналогично обстоит дело с озоном: его турбулентный поток и дном и но-

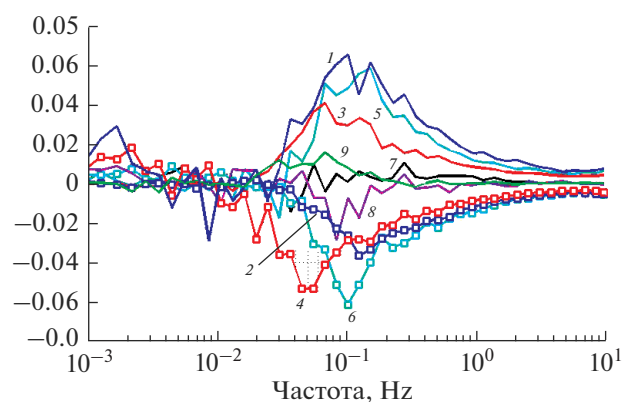


Рис. 6. Коспектры компонент ротора и скорости (с умножением на частоту). 1 – R_zV_y , 2 – R_yV_z , 3 – R_xV_z , 4 – R_zV_x , 5 – R_xV_y , 6 – R_yV_x , 7 – R_xV_x , 8 – R_yV_y , 9 – R_zV_z . Цимлянск, 18 августа 2014 г., 15:06–18:06, частота регистрации 20 Hz, высота 25 м.

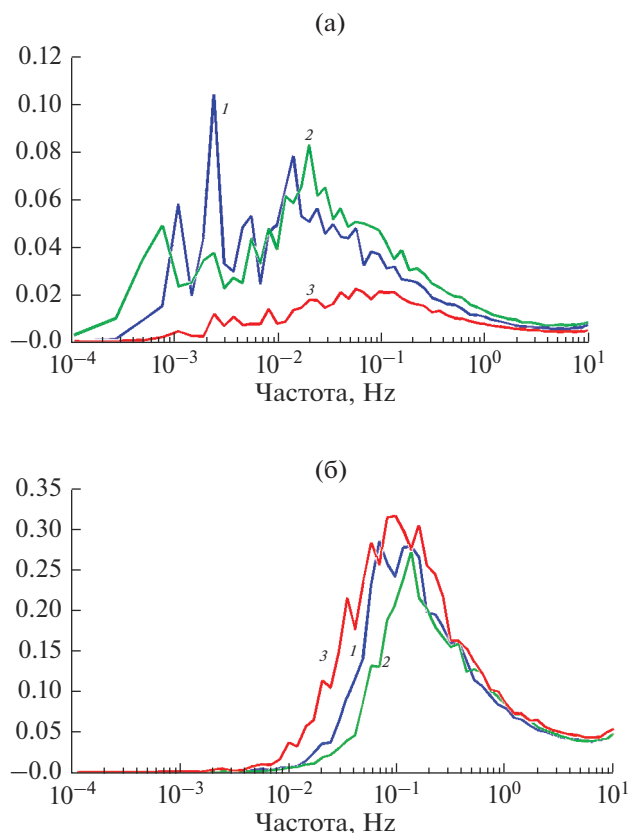


Рис. 7. (а) Автоспектры компонент скорости (с умножением на частоту). 1 – V_x , 2 – V_y , 3 – V_z . Цимлянск, 18 августа 2014 г., 15:06–18:06, частота регистрации 20 Hz, высота 25 м. (б) Автоспектры компонент ротора (с умножением на частоту). 1 – R_x , 2 – R_y , 3 – R_z . Цимлянск, 18 августа 2014 г., 15:06–18:06, частота регистрации 20 Hz, высота 25 м.

чью направлен вниз, тогда как турбулентный поток тепла меняет направление от дня к ночи [29].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе многоточечных малоинерционных измерений температуры в Цимлянске, проводившихся в связи с интересом к рэмп-структурам, была освоена методика представления поля температуры в форме карт высот изотермических поверхностей. Такое представление показало, что поле температуры, а, следовательно, и поле плотности (в приближении несжимаемости), несмотря на наблюдающуюся большую амплитуду вариаций высот изотерм, сохраняет стратификацию, как это свойственно стратифицированной жидкости [30]. На изотермической поверхности наблюдаются отдельные “холмы”, изолированные друг от друга и случайно размещенные на горизонтальной оси. Они соответствуют рэмп-структурам на временных реализациях температуры. Стало ясно, что такие “холмы” соответствуют прохождению вихрей

с горизонтальной осью, катящихся по поверхности. Это позволило сделать следующее предположение: *основным физическим агентом, осуществляющим перенос тепла от подстилающей поверхности к атмосфере, является вихрь с горизонтальной осью, катящийся по поверхности, причем приобретение вихрем тепла происходит в основном за счет поглощения длинноволновой радиации, поскольку контактный теплообмен поверхности с роллом гораздо менее эффективен.* Приобретенная порция тепла затем переносится вихрем в более холодные верхние слои, где оно затрачивается на их нагревание.

В дневное время (при неустойчивости) этот механизм добавляет вращательному движению, получающему энергию от среднего потока, дополнительную порцию кинетической энергии, а при устойчивости, напротив, часть кинетической энергии вращения затрачивается на работу против сил Архимеда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Монин А.С., Обухов А.М. Основные закономерности турбулентного перемешивания в приземном слое атмосферы // Труды Геофизического института. 1954. № 24(151).
2. Foken Thomas. 50 years of the Monin-Obukhov similarity theory // Boundary-Layer Meteorology. 2006. V. 119. № 3. P. 431–447.
3. Schwarzschild K. Über das Gleichungen der Sonnenatmosphäre // Nachrichten von der Konigl. Gesellschaft der Wiss zu Gottingen, math./-phys. Kl. 1906. H. 1. C. 41.
4. Emden R. Über Strahlungsgleichgewicht und atmosphärische Strahlung // Sitz. der math./-phys. Kl. der. K.V. Akad. der Wiss.zu Munchen. 1913. C. 55.
5. Фридман А.А. О распределении температуры с высотой при наличии лучистого теплообмена Земли и Солнца // Изв. Главн. физ. обсерват. 1920. № 2. С. 42.
6. Кузнецов Е.С. Лучистый теплообмен в движущейся жидкой среде // Изв. АН СССР. Серия географ. и геофиз. 1941. Т. 5. № 1. С. 3–28.
7. Горчакова И.А., Тарасова Т.А., Устинов Е.А., Фейгельсон Е.М. О радиационном нагревании приземного слоя воздуха // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1988. Т. 24. № 5. С. 527–531.
8. Мордухович М.И., Цванг Л.Р. Прямые измерения турбулентных потоков на двух высотах в приземном слое воздуха // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1966. Т. 2. № 8. С. 786–803.
9. Копров Б.М., Соколов Д.Ю. Об экспериментальном исследовании изменчивости потоков тепла в приземном слое воздуха // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1975. Т. 11. № 7. С. 743–747.
10. Зубковский С.Л., Кухарец В.П., Цванг Л.Р. Вертикальные профили характеристик турбулентности в приземном и пограничном слоях атмосферы при неустойчивой стратификации // Изв. АН СССР. ФАО. 1979. Т. 15. № 1. С. 44–51.

11. *Haugen D.A., Kaimal J.C., Bradley E.F.* An experimental study of Reynolds stress and heat flux in the atmospheric surface layer // *Quart. J. R. Met. Soc.* 1971. 97. P. 168–170.
12. *Копров Б.М., Цванг Л.Р.* Прямые измерения турбулентного потока тепла с борта самолета // *Изв. АН СССР. ФАО.* 1965. Т. 1. № 11. С. 643–648.
13. *Кадер Б.А.* Трехслойная структура неустойчиво стратифицированного приземного слоя атмосферы // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.* 1988. Т. 24. № 12. С. 1235–1250.
14. *Монин А.С., Яглом А.М.* Статистическая гидромеханика. Часть 1. Москва. Наука. 1965. С. 639.
15. *Antonia R.A., Chambers A.J., Friehe C.A., Van Atta C.W.* Temperature ramps in the atmospheric surface layer // *J. Atmos. Sci.* 1979. V. 36. № 1. P. 99–108.
16. *Копров Б.М., Копров В.М., Макарова Т.И.* Конвективные структуры приземного слоя воздуха // *Изв. АН. Физика атмосферы и океана.* 2000. Т. 36. № 1. С. 44–54.
17. *Копров Б.М.* Влияние структуры термиков на процесс и асимметрию распределений вероятностей для временной производной температуры // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.* 1988. Т. 24. № 6. С. 579–587.
18. *Rees J.M., Koprov B., Koprov V., Zimmerman W.B.* On solitary wave mediated heat exchange in the Antarctic boundary layer // *Atmospheric Science Letters.* 2003. V. 4. № 1–4. С. 1–14.
19. *Сэффмэн Ф.Дж.* Динамика вихрей. Москва. Научный мир. 2000. С. 376.
20. *Новиков Е.А.* Поток вихря // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.* 1972. Т. 8. № 7. С. 759–762.
21. *Копров Б.М., Калугин В.В., Тиме Н.С.* Турбулентный поток вихря // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.* 1994. Т. 30. № 1. С. 13–17.
22. *Бовищевров В.М., Гурвич А.С., Кочетков А.М., Ломадзе С.О.* Измерение частотного спектра мелкомасштабной циркуляции скорости в турбулентном потоке // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.* 1971. Т. 7. № 4. С. 371–376.
23. *Копров Б.М., Копров В.М., Пономарев В.М., Чхетиани О.Г.* Измерение турбулентной спиральности и ее спектра в пограничном слое атмосферы // *ДАН.* 2005. Т. 403. № 5. С. 627–630.
24. *Копров Б.М., Копров В.М., Курганский М.В., Чхетиани О.Г.* Спиральность и потенциальный вихрь в приземной турбулентности // *Физика атмосферы и океана.* 2015. Т. 51. № 6. С. 565–575.
25. *Копров Б.М., Копров В.М., Соленая О.А., Чхетиани О.Г., Шишов Е.А.* Методика и результаты измерений турбулентной спиральности в стратифицированном приземном слое // *Физика атмосферы и океана.* 2018. Т. 54. № 5. С. 525–537
26. *Kurgansky V.V., Montecinos A., Villagran V., Metzger S.M.* Micrometeorological conditions for Dust-Devil Occurrence in the Atacama Desert // *Boundary-Layer Meteorol.* 2011. V. 138. P. 285–298.
27. *Миллионщиков М.Д.* Некоторые проблемы турбулентности и турбулентного теплообмена. В кн. “Турбулентные течения” Тр Всесоюзного семинара. М. “Наука”, 1974. С. 3–18. (под. ред. Струминского В.В.).
28. *Елагина Л.Г., Копров Б.М., Тимановский Д.Ф.* Некоторые характеристики приземного слоя воздуха над снегом // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.* 1978. Т. 14. № 9. С. 926–931.
29. *Еланский Н.Ф., Копров Б.М., Соколов Д.Ю., Тиме Н.С.* Турбулентный поток озона над степью // *Физика атмосферы и океана.* 1995. Т. 31. № 1. С. 109–114.
30. *Должанский Ф.В.* Основы геофизической гидродинамики. М.: Физматгиз, 2011. С. 264.

On the Role of Vortex Structures of the Surface Layer in the Radiation Interaction of the Atmosphere with an Underlying Surface

B. M. Koprov¹ and V. M. Koprov¹, *

¹*Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Pyzhevsky per., 3, Moscow, 119017 Russia*

**e-mail: vkoprov@gmail.com*

Already in the 50s of the 20th century it turned out that the assumptions of the semi-empirical statistical theory of the surface layer created by A.S. Monin and A.M. Obukhov, strictly speaking, were not fulfilled. It is experimentally proved that organized (coherent) structures in the surface layer exist and they play the main role in the advective (turbulent) vertical transfer of heat, momentum and impurities. And the leading role of the radiation mechanism in the formation of the temperature profile is obvious. This article is an attempt to qualitatively describe the mechanism of interaction of organized vortex structures with radiation thermal conductivity during heat transfer from the underlying surface to the atmosphere.

Keywords: surface layer, radiation exchange, coherent structures, vortex structures, turbulent transfer