

УДК 551.510

О КОРРЕЛЯЦИЯХ МЕЖДУ ПОЛЯМИ ТЕМПЕРАТУРЫ, МАЛЫХ ГАЗОВЫХ ПРИМЕСЕЙ И ВЕТРА В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ

© 2020 г. **Б. М. Копров^а, В. М. Копров^а***

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

*E-mail: vkoprov@gmail.com

Поступила в редакцию 29.04.2019 г.

После доработки 27.03.2020 г.

Принята к публикации 01.04.2020 г.

В целом ряде работ, в том числе в исследованиях, выполненных нами в Институте физики атмосферы, были обнаружены устойчивые корреляции между некоторыми скалярными полями приземного слоя (это поля температуры и концентраций малых газовых примесей — озона, водяного пара), а также корреляции между этими скалярами и скоростью ветра. В настоящей статье показывается, что наблюдаемые корреляции скаляров могут быть поняты на основе гипотезы подобия поверхностей равных концентраций примесей и изотермических поверхностей, и что карты температур объясняют, на качественном уровне, наблюдаемые корреляции температуры и скорости. Описаны разработанные в ИФА уникальные малоинерционные приборы для пульсационных измерений плотности озона и водяного пара. Рассмотрены эксперименты с синхронной регистрацией температуры, влажности и озона, показавшие высокую коррелированность вышеуказанных скалярных полей, и эксперименты с многоточечной по вертикали синхронной регистрацией температуры, позволившие построить карты сечений изотермических поверхностей вертикальной плоскостью, ориентированной вдоль направления ветра.

Ключевые слова: приземный слой, корреляция, изотермическая поверхность, газовая примесь, гипотеза подобия

DOI: 10.31857/S0002351520050089

ВВЕДЕНИЕ

Удельные концентрации основных атмосферных газов до высот примерно в 100 км почти не меняются, так как барометрическое равновесие (при котором плотности разных газов на заданной высоте существенно различны) не успевают установиться из-за высокой скорости перемешивания в масштабе всей атмосферы. Однако плотности водяного пара, озона, метана, т.е. так называемых газовых примесей, как показывает опыт, меняются с высотой много быстрее. Это происходит вследствие того, что упомянутые примеси, в отличие от основных газов, могут генерироваться на земной поверхности или поглощаться ею, причем эти процессы происходят вне зависимости от времени суток, т.е. от притока солнечной радиации к подстилающей поверхности. Например, водяной пар генерируется на поверхности, будь то почва, вода или снег, а озон стекает на почву, где расходуется на окисление органики.

Температурная стратификация и интенсивность временных вариаций температуры в приземном слое, напротив, управляются меняющимся притоком солнечной радиации. Было, однако, установлено, что плотности примесей также испытывают значительные вариации во времени и

пространстве, причем эти вариации сильно коррелированы с температурой и между собой, а также — в значительно меньшей степени — с вариациями компонент скорости.

Келлер и Фридман [1] предложили представлять поля метеорологических величин в виде суммы сглаженной и пульсационной, или “турбулентной” составляющей. Это привело к употреблению в повседневной практике понятий турбулентных потоков и ковариаций скаляров и соответствующих коэффициентов корреляции. В наших исследованиях выделение турбулентной составляющей производится путем вычитания из измеряемого временного ряда так называемого “скользящего среднего”.

Измерение вертикального потока газовой примеси, например, озона O_3 , вблизи земной поверхности опирается на определение потока как произведения компоненты скорости w на концентрацию

$$\overline{wO_3} = \overline{w'O_3'} + \overline{wO_3},$$

где штрихом обозначены вариации, а черта сверху означает осреднение.

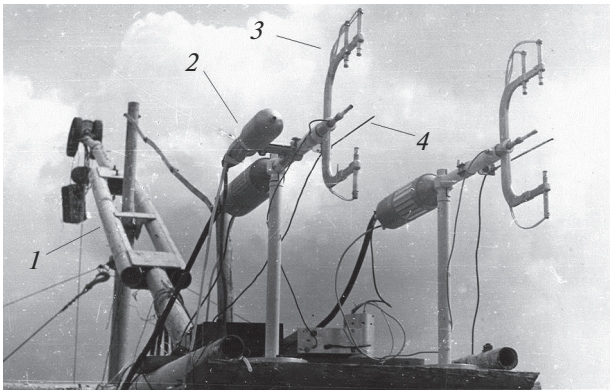


Рис. 1. Датчики на мачте-пантографе в Цимлянкой экспедиции 1993 года. 1 – пантограф, 2 – озонметр, 3 – двухкомпонентный акустический анемометр, 4 – микротермометр сопротивления.

Пульсационные измерения по понятным причинам производятся не на самой поверхности, а на высоте нескольких метров. Вопрос о влиянии температурной стратификации на вертикальный перенос газовых примесей рассматривался в работах [2], [3].

Разобраться в причинах высокой коррелированности вариаций скаляров и понять механизмы реализации вертикального переноса тепла и примесей помогли многоточечные по высоте измерения температуры.

РАЗРАБОТАННЫЕ В ИФА ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ ПУЛЬСАЦИЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ОЗОНА И ВОДЯНОГО ПАРА

1) Озонметр.

Для измерения пульсаций концентрации озона до частоты 0.5 Гц применялся разработанный Д.Ю. Соколовым прибор [4], в котором использовался эффект хемолуминисценции родаминов под действием озона. По тефлоновой трубке длиной 10 см воздух подавался на чувствительный элемент. Свечение его поверхностного слоя с помощью фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) превращалось в фототок, пропорциональный концентрации озона. Выносимый в точку измерения датчик озона состоял из чувствительного элемента и ФЭУ, заключенных в обтекаемый кожух. Основной блок содержал усилитель, источник питания и насос. На рис. 1 показан установленный на измерительной площадке мачты-пантографа комплект приборов, в состав которого входили датчик озона, двухкомпонентный акустический анемометр и микротермометр сопротивления. Пульсационный озонметр был откалиброван по прибору *Dasibi 1009AH*.

2) Гигрометр.

Концентрация водяного пара измерялась разработанным Л.Г. Елагиной [5] ИК-гигрометром,

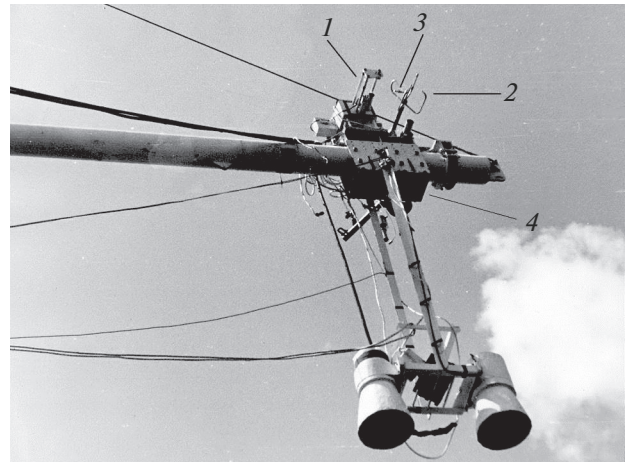


Рис. 2. Измерительный комплекс на высоте 10 м на бушприте НИС “Академик Курчатов” в экспедиции ТРОПЭКС-72. Вид снизу со шлюпки. 1 – инфракрасный гигрометр Л.Г. Елагиной, 2 – двухкомпонентный акустический анемометр, 3 – микротермометр сопротивления, 4 – подвижная платформа.

в котором использовался эффект поглощения ИК радиации в полосе 2.6 мкм. Гигрометр был построен по двухлучевой схеме с обтюрацией. Прибор позволял регистрировать как средние значения, так и пульсации до частоты 12 Гц. На рис. 2 показано, как выглядели бум для приборов на носу НИС “Академик Курчатов” и подвижная платформа с датчиками гигрометра, анемометра и термометра в экспедиции ТРОПЭКС-72 (вид снизу со шлюпки). Пульсации измеренных величин записывались на 12-канальный магнитофон. В дальнейшем в ходе камеральной обработки по этим пульсациям находились турбулентные потоки тепла и влаги и соответствующие спектры и коспектры [6]. Вся обработка велась с помощью аналоговых перемножителей и анализаторов.

На рис. 3 показана мачта-пантограф с установкой для измерения турбулентных потоков тепла и водяного пара над снегом в зимней экспедиции в Колтушах в 1976 году [7]. В этой экспедиции мы не использовали предварительной магнитной записи измерявшихся сигналов, а непосредственно в ходе эксперимента производили перемножение пульсаций w', u', T', e' (где e – это влажность) аналоговыми перемножителями и вычисляли турбулентные потоки импульсы, тепла и влаги. Пульсации получались из исходных сигналов с помощью дифференцирующей цепочки с постоянной времени 100 с.

ПРИМЕРЫ ВЫСОКОЙ КОРРЕЛЯЦИИ МЕЖДУ СКАЛЯРАМИ

На рис. 4 показан фрагмент синхронной совместной регистрации вариаций температуры T' и

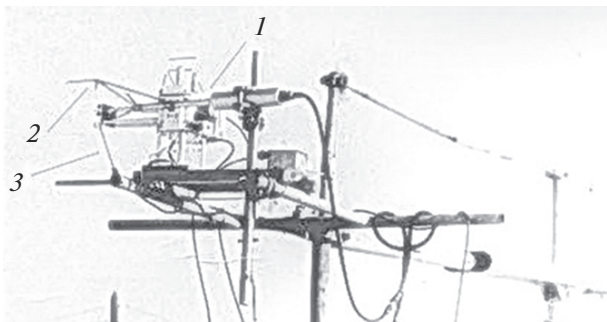


Рис. 3. Размещение датчиков на мачте-пантографе на высоте 3 м в зимнем эксперименте в феврале 1976 года в Колтушах. 1 – инфракрасный гигрометр, 2 – трехкомпонентный акустический анемометр, 3 – термометр сопротивления.

влажности e' над океаном в тропиках [8]. Положительная корреляция между ними означает, что вертикальные потоки $w'T'$ и $w'e'$ направлены вверх. Ее абсолютное значение, как правило, превышает 0.9.

Над сушей летом поток влаги и днем и ночью (за исключением тех случаев, когда выпадает роса) направлен вверх, а поток тепла днем направлен вверх, а ночью вниз.

Зимой над снегом, как показано на рис. 5, поток влаги в силу испарения влаги с заснеженной поверхности направлен вверх, а поток тепла при господствующей в зимних условиях устойчивой температурной стратификации направлен вниз [7]. Тот же рисунок дает основание заключить, что абсолютное значение коэффициента корреляции между вариациями температуры и влажности также очень высоко.

На рис. 6 приведен фрагмент синхронной записи концентрации озона и температуры в Цимлянске в дневное время при умеренно-неустойчивой стратификации ($\zeta = -0.05$).

Для температуры характерны асимметричные выбросы продолжительностью порядка 10 с, известные как рэмп-структуры [8]. Синхронные с ними выбросы наблюдаются и в вариациях концентрации озона. Они имеют более сглаженный вид, поскольку инерция описанного датчика озона была порядка 0.5 с, тогда как у термометра она близка к 0.01 с. Коэффициент корреляции между вариациями температуры и концентрации озона, согласно рис. 7, зависит от стратификации: днем он близок к -0.7 , а ночью к $+0.4$.

На рис. 8 показан пример временной изменчивости турбулентных потоков тепла и озона с 9 до 19 ч местного поясного времени. Поток озона в течение всего этого времени был направлен вниз, хотя и обнаружил уменьшение в вечернее время, тогда как поток тепла утром был направлен вверх, а вблизи 16 ч изменил направление. Это означает,

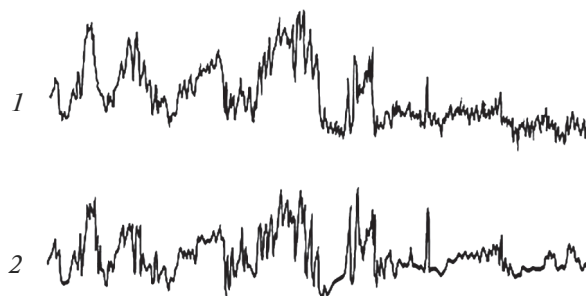


Рис. 4. Фрагмент дневной синхронной записи температуры (1) и влажности (2) на высоте 10 м в пассатной зоне Атлантики в точке $7^{\circ}19' N, 20^{\circ}52' W$.

что подстилающая поверхность днем является источником тепла, а ночью его стоком. Ночью же, при устойчивой стратификации, когда подстилающая поверхность холоднее прилегающего воздуха, она является стоком как тепла, так и озона [4].

ВЫЯСНЕНИЕ ПРИЧИН НАБЛЮДАЕМОЙ КОРРЕЛЯЦИИ

Многоточечные по высоте измерения температуры малоинерционными датчиками позволили выяснить, как выглядят временные изменения

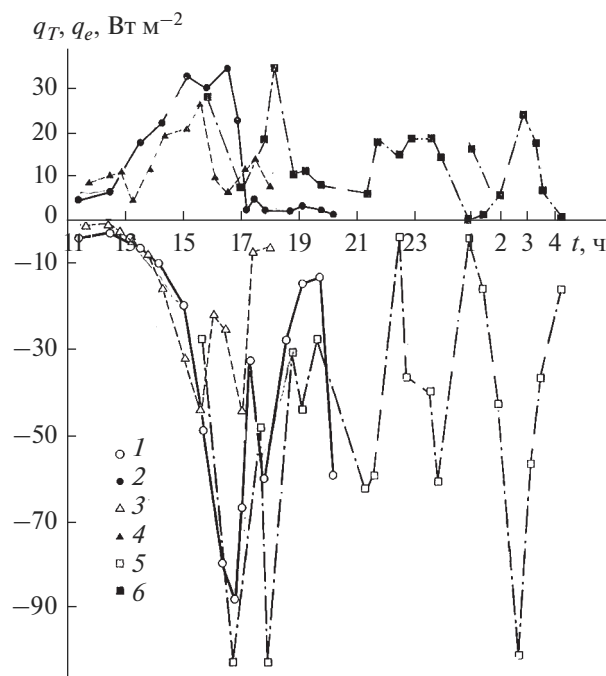


Рис. 5. Временной ход потоков тепла (q_T) и влаги (q_e) на высоте 3 м над снегом в феврале 1976 года в Колтушах. 1, 3, 5 – турбулентный поток тепла, 2, 4, 6 – турбулентный поток влаги.

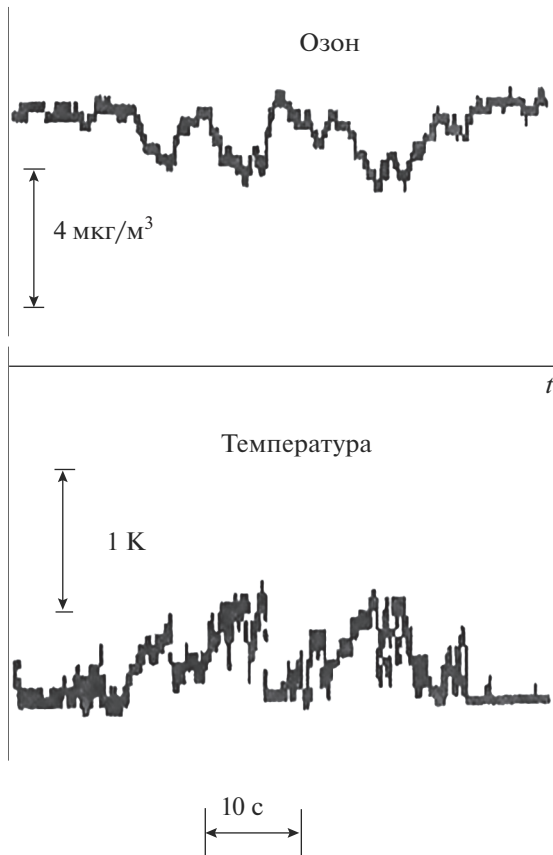


Рис. 6. Фрагмент синхронной записи концентрации озона и температуры днем над степью в Цимлянске.

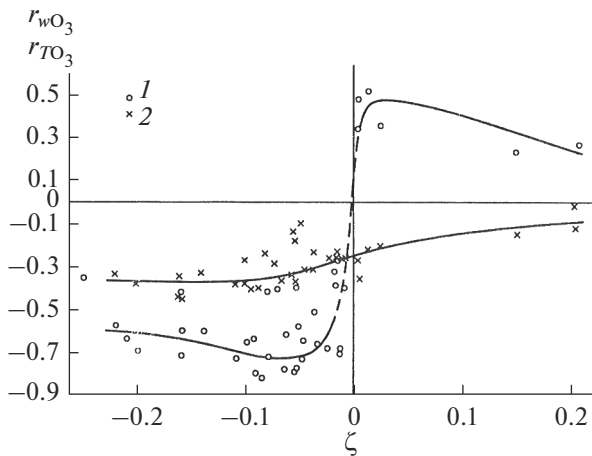


Рис. 7. Зависимость от параметра ζ интегральных коэффициентов корреляции. (1) — $r_{TO_3} = T' O_3' / \sigma_T \sigma_{O_3}$, (2) — $r_{wO_3} = w' O_3' / \sigma_w \sigma_{O_3} \zeta = z k \left(\frac{g}{T} \right) \overline{w' T'} / v_*^3$, где z — высота, k — постоянная Кармана, g — ускорение свободного падения, T — абсолютная температура, $v_* = \sqrt{-u' w'}$, σ_w , σ_T , σ_{O_3} — среднеквадратичные значения $w' T'$ и O_3' .

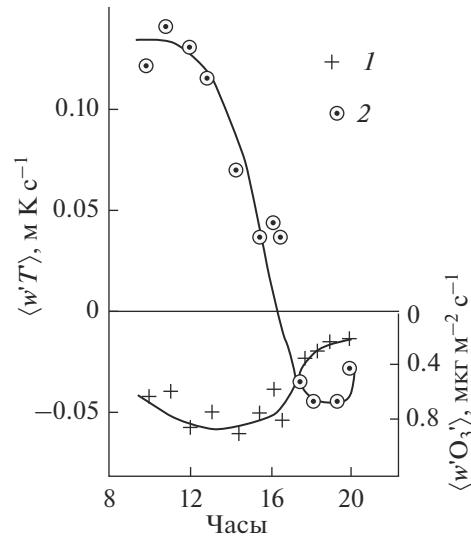


Рис. 8. Суточный ход турбулентных потоков озона (1) и тепла (2) на высоте 5 м в августе 1993 года в Цимлянске.

изотермических поверхностей. На рис. 9 представлен 60-секундный фрагмент синхронной записи температур $T(z_i, t)$ на семи уровнях при неустойчивой стратификации, а на рис. 10 показана соответствующая этому фрагменту временная развертка высот изотермических поверхностей. Основная и наиболее заметная особенность представленной картины, регулярно воспроизводящаяся в подобных условиях, — это четкая расслоенность поля температуры, сохраняющаяся почти всегда, несмотря на большую амплитуду вариаций высот изотерм. (Отметим, что исходные данные были предварительно сглажены скользящим симметричным прямоугольным окном шириной 0.3 с).

Сопоставление рис. 9 и 10 делает очевидным, что резкое падение температуры возникает в тех случаях, когда датчик встречается со слоем, где происходит соприкосновение теплого восходящего воздуха с опускающимся холодным. При этом угол между переходным слоем и горизонтом становится максимальным, а локальный градиент температуры принимает максимальное значение. Другой особенностью наблюдаемой картины является ее асимметрия: слева от момента 15:45 изолинии разрежены, а вблизи 15:45 наблюдается сгущение, что согласуется с характером изменения температуры со временем типа рэмп-структур.

Градиент температуры меняет знак от дня к ночи. Градиент плотности озона положителен, а плотности водяного пара — отрицателен, но на это накладывается также зависимость плотности примесей, определяемая влиянием температуры. Эти эффекты рассмотрены в [2, 3]. В результате, как показано на рис. 4 и 6, в момент, где наблюдается выброс температуры, имеет место выброс

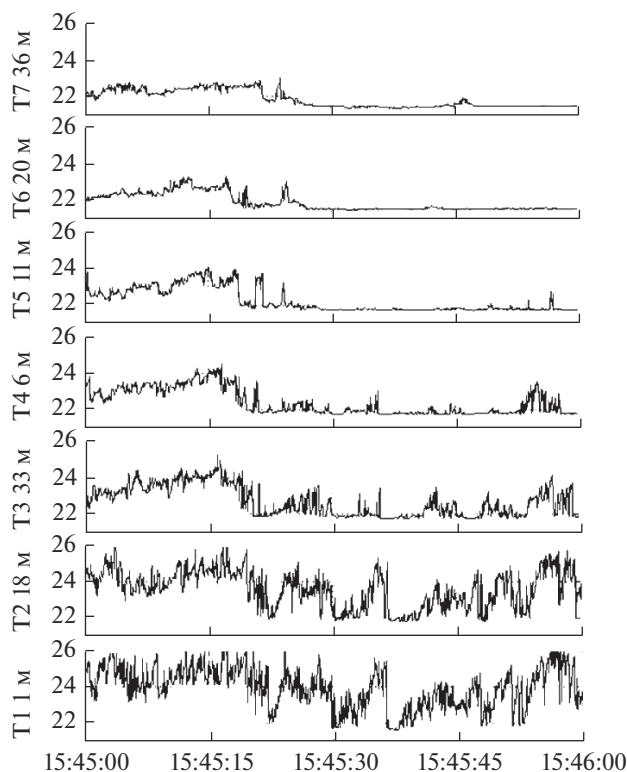


Рис. 9. 60-секундный фрагмент синхронной записи температуры на 7 уровнях: 1; 1.8; 3.3; 6; 11; 18; 36 м 31 августа 1998 года в Цимлянске.

плотности озона или водяного пара того или иного знака.

На основе представленных выше данных о корреляции между температурой и озоном, а так-

же между температурой и водяным паром (как положительной, так и отрицательной), можно предположить, что для изотермических поверхностей и поверхностей равных значений влажности и озона приблизительно выполняются условия коллинеарности

$$\text{grad } T \times \text{grad } O_3 = 0,$$

$$\text{grad } T \times \text{grad } e = 0.$$

Если поверхности равных значений скаляров не являются горизонтальными, то в силу этих условий и в предположении “замороженности” перемещение таких поверхностей приводит к сильно коррелированным временным изменениям рассмотренных скалярных величин в фиксированной точке наблюдения.

Подводя итоги исследования корреляции скаляров, можно констатировать, что при взаимодействии с подстилающей поверхностью формируются поля озона и водяного пара, удовлетворяющие условию коллинеарности с полем температуры. Изотермы, как показано выше, испытывают существенные вариации высоты. В приближении замороженности временные вариации каждого из этих полей в фиксированной точке можно рассматривать как результат горизонтального переноса. Это и обеспечивает высокую корреляцию временных вариаций этих скаляров в неподвижной точке измерения.

Распределение средней температуры с высотой (стратификация) определяется полем радиации и наличием парниковых газов, а вариации мгновенных профилей связаны с когерентными структурами поля скорости.

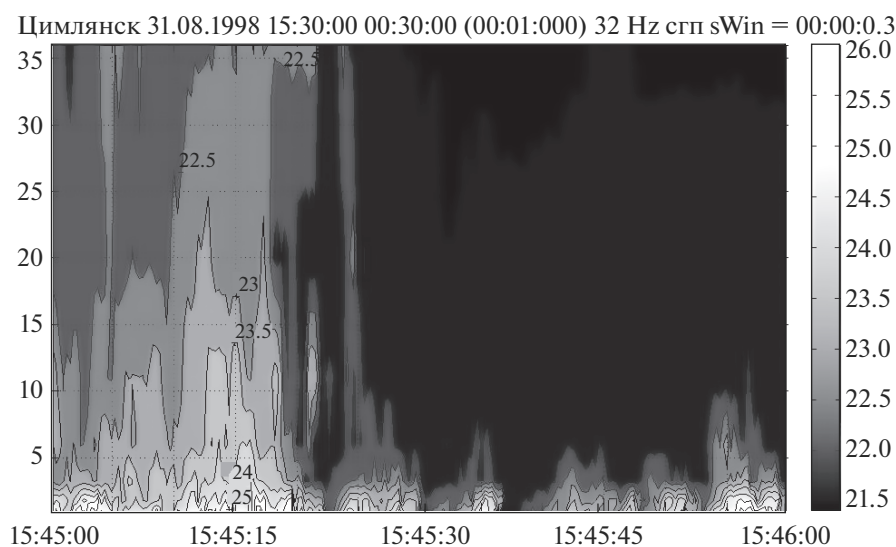


Рис. 10. Развертка высот изотермических поверхностей, построенная по 7-точечной регистрации температуры, показанной на рис. 10.

Как известно, имеет место четкая корреляция между полями температуры и скорости. В частности, при неустойчивости коэффициент корреляции между продольной скоростью и температурой $r_{uT} = \overline{u'T'}/\sigma_u\sigma_T$ отрицателен, а между вертикальной скоростью и температурой $r_{wT} = \overline{w'T'}/\sigma_w\sigma_a$ положителен. Кроме того, известно, что коэффициент корреляции между продольной и вертикальной скоростями $r_{uw} = \overline{u'w'}/\sigma_u\sigma_w$ отрицателен. Рассмотрение карт температуры позволяет понять, на качественном уровне, почему возникают корреляции между температурой и скоростью. На карте, показанной на рис. 10, холодный воздух ($T' < 0$) справа от структуры, имеющий направленную вниз вертикальную скорость ($w' < 0$) и превышающую среднее значение продольную скорость ($u' > 0$), давит на поднимающийся снизу ($w' > 0$) и более медленно движущийся ($u' < 0$) купол теплого воздуха ($T' > 0$) и, не смешиваясь с ним, деформирует изотермические поверхности (которые в приближении Буссинеска коллинеарны поверхностям равной плотности). Здесь же наиболее очевидно проявляется действие архимедовых сил.

Продолжая рассмотрение рис. 10, отметим, что после момента 15:45:20 холодный воздух с температурой 21.5°C находился максимально близко к подстилающей поверхности. Здесь наблюдается последовательность структур, вызванных, по-видимому, вихрями с циркуляцией скорости Ω_2 , как бы катящимися по поверхности [9]. Именно здесь имеют место максимальные градиенты температуры и происходит интенсивное радиационное нагревание приземного воздуха и вихревой вынос нагретого воздуха вверх.

В цимлянских экспедициях 2012 и 2014 годов для измерения скорости, ротора и градиента температуры по всем трем осям нами использовались установки, состоявшие из четырех акустических анемометров-термометров, размещенных в вершинах прямоугольного тетраэдра ([10, 11] (установка "Тетраэдр"). По результатам измерений были вычислены средние значения косинусов углов между векторами скорости \vec{v} и градиента температуры $\text{grad } T$, а также между векторами скорости и ротора на различных высотах: 3.5; 5; 13; 25 м. Оказалось, что эти углы близки к 90°, т.е. малы спиральность $v_i\omega_i$ и ковариация $v_i(\partial T/\partial x_i)$ и, следовательно, мал их вклад в обменные процессы в приземном слое. Есть предположение, что относительная роль спиральности в переносе завихренности и примесей возрастает с ростом высоты. В то же время, в работе [11] показано, что корреляция между компонентами скорости и ротора, относящимися к разным осям, например, между

ω_2 и v_3 , напротив, довольно велика. Это указывает на их существенную роль в переносе завихренности, особенно в непосредственной близости от подстилающей поверхности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Существенный прогресс, достигнутый в области прецизионных измерений температуры, скорости ветра и концентраций малых газовых примесей, сделал возможным выполнение целого ряда новых, часто достаточно масштабных, полевых экспериментов в приземном слое атмосферы. Некоторые из них описаны в данной статье. Это были, с одной стороны, совместные измерения нескольких величин (например, влажности и температуры, скорости ветра и температуры) в одной и той же точке пространства ("одноточечные" измерения), а с другой – многоточечные синхронные измерения температуры на одной вертикали. И в том, и в другом случае результатом эксперимента были большие массивы данных, которые давали представление о временном ходе измеряемых величин. Измерения выявили четкое расслоение температурного поля по высоте и показали в то же время, что существуют устойчивые корреляционные связи между измеряемыми величинами. Ключом к пониманию физического механизма корреляций между примесями и температурой и корреляций между примесями послужила гипотеза о подобии поверхностей равных концентраций примесей и изотермических поверхностей. Рассмотрение карт изотерм позволяет на качественном уровне понять происхождение корреляций между скоростью и температурой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Keller L.V., Friedman A.A. Differentialgleichung für die turbulente Bewegung einer kompressiblen Flüssigkeit // Proc. 1st Intern. Congr. Appl. Mech. 1924. Delft. P. 395–405.
2. Копров Б.М. О влиянии тепловой конвекции на вертикальный перенос водяного пара // Изв. АН СССР. ФАО. 1986. Т. 22. № 1. С. 17–21.
3. Webb E.K. On the correction of flux measurements for effects of heat and water vapour transfer // Boundary-Layer Meteorology. 1982. V. 23. № 2. P. 251–254.
4. Еланский Н.Ф., Копров Б.М., Соколов Д.Ю., Тиме Н.С. Турбулентный поток озона над степью // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1995. Т. 31. № 1. С. 109–114.
5. Горшков В.И., Елагина Л.Г. Новая модель инфракрасного гигрометра для измерения турбулентных пульсаций влажности над морем // В кн. ТРОПЭКС-72. Л. Гидрометеиздат. 1974. С. 663–666.
6. Волков Ю.А., Елагина Л.Г., Копров Б.М. Спектральные характеристики турбулентного обмена между океаном и атмосферой в тропической зоне Атлан-

- тики // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1974. Т. 10. № 6. 619–627.
7. *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.
 8. *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. С. 99–108.
 9. *Копров Б.М., Копров В.М.* О роли вихревых структур приземного слоя в радиационном взаимодействии атмосферы с подстилающей поверхностью // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 4. С. 473–481.
 10. *Копров Б.М., Копров В.М., Курганский М.В., Чхетиани О.Г.* Спиральность и потенциальный вихрь в приземной турбулентности // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 6. С. 565–575.
 11. *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 // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54. № 5. С. 525–537.

About Correlations Between Fields of Temperature, Small Gas Impurities and Wind in the Surface Layer of the Atmosphere

B. M. Koprov¹ and V. M. Koprov^{1, *}

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

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

In a number of studies, including our studies performed at the Institute of Atmospheric Physics, stable correlations were found between scalar fields of the surface layer (these are fields of temperature and concentrations of small gas impurities – ozone, water vapor), as well as correlations between these scalars and wind speed. This article shows that the observed correlations of scalars can be understood on the basis of the hypothesis of similarity of surfaces with equal concentrations of impurities and isothermal surfaces, and that temperature maps explain, at a qualitative level, the observed correlations of temperature and speed. The unique low-inertia devices developed for pulsed measurements of the density of ozone and water vapor are described. Experiments with synchronous registration of temperature, humidity and ozone, which showed a high correlation of the above scalar fields, and experiments with vertically multi-point synchronous registration of temperature, which made it possible to construct maps of sections of isothermal surfaces with a vertical plane along the wind direction, are considered

Keywords: atmospheric surface layer, correlation, isothermal surface, gas impurities, similarity hypothesis