

**В.С. Комаров, Н.Я. Ломакина**

## **Особенности вертикальной статистической структуры полей температуры, влажности и ветра в пограничном слое атмосферы Западной Сибири.**

### **Часть 2. Характеристики вертикальной корреляции**

*Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск*

Поступила в редакцию 19.02.2007 г.

На основе данных многолетних наблюдений восьми аэрологических станций рассмотрены особенности межуровневой корреляции температуры, влажности и ветра в пограничном слое атмосферы над территорией Западной Сибири, а также исследована проблема малопараметрического описания вертикальной структуры полей этих метеорологических величин с помощью главных собственных векторов их корреляционных матриц.

#### **Введение**

В работе [1] были исследованы особенности вертикального распределения средних значений и среднеквадратических отклонений температуры, влажности и ветра в пограничном слое атмосферы над территорией Западной Сибири. Однако известно, что статистическое описание вертикальной структуры любого метеорологического поля не будет полным, если, наряду с фоновыми характеристиками (т.е. средними) и параметрами изменчивости, не рассмотреть особенности его межуровневых корреляционных связей.

В настоящей статье, являющейся продолжением [1], рассмотрены дополнительно особенности межуровневых корреляционных связей температуры, влажности (массовой доли водяного пара) и ортогональных составляющих скорости ветра в пограничном слое атмосферы, которые характерны для такого малоосвещенного региона, как Западная Сибирь. Кроме того, исследуется вопрос, насколько типичны эти особенности для всей территории Западной Сибири и в какой степени они нарушаются в зависимости от сезона, высоты исходного уровня и физико-географических условий ее отдельных районов. Определенное место в данной статье занимает также рассмотрение такого важного вопроса (с точки зрения малопараметрического описания вертикальной структуры случайных метеорологических полей), как представление этих полей в виде суммы главных естественных ортогональных функций, обладающих при максимальной информативности большей (чем исходная корреляционная матрица) пространственной и временной устойчивостью.

#### **1. Особенности межуровневой корреляции температуры, влажности и ветра**

Остановимся коротко на рассмотрении основных закономерностей и особенностей, которые присущи

вертикальным (межуровневым) корреляционным связям температуры, влажности и ветра в пограничном слое атмосферы, и попытаемся установить, насколько они являются общими для всей территории Западной Сибири или, наоборот, обусловлены чисто локальными (местными) физико-географическими условиями. При этом, как и при анализе фоновых характеристик и их изменчивости [1], особенности межуровневых корреляционных связей будем рассматривать отдельно: сначала для температуры и влажности, а затем для зональной и меридиональной составляющей скорости ветра.

##### **1.1. Межуровневая корреляция температуры и влажности**

На рис. 1 представлены вертикальные корреляционные связи температуры и влажности в пограничном слое атмосферы (до высоты 1600 м), оцененные по данным пятилетних (2001–2005 гг.) наблюдений лишь двух типичных аэрологических станций: Салехарда и Омска, представляющих соответственно полярные районы и юг Западной Сибири.

Аналогично матрице коэффициентов межуровневой корреляции диагональная линия соответствует значениям коэффициента корреляции, равным единице; изоплеты представляют собой коэффициенты межуровневой корреляции. В силу симметрии автокорреляционных матриц на одном графике представлено распределение этих коэффициентов для температуры и влажности.

Анализ рис. 1 показывает, что корреляционные связи вариаций температуры и влажности у земли и на всех вышерасположенных уровнях пограничного слоя атмосферы являются положительными и ослабевают по мере увеличения расстояния между коррелируемыми уровнями. Такой характер поведения корреляционных связей температуры и влажности между

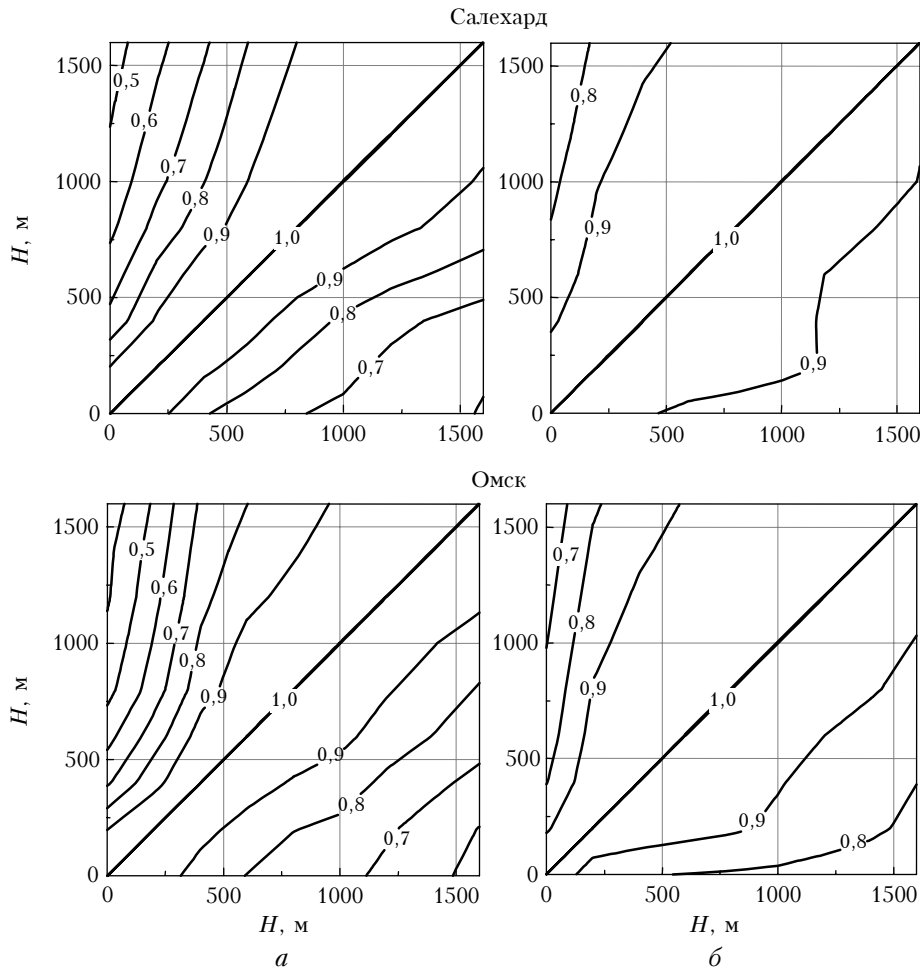


Рис. 1. Межуровневые корреляционные связи температуры (над диагональю) и влажности (под диагональю) для типичных станций Западной Сибири: а – январь, б – июль

исходным наземным уровнем и всеми вышерасположенными уровнями отмечается повсеместно и в оба рассматриваемых сезона.

Подобная закономерность характерна и для коэффициентов корреляции  $r_{tt}(h_i, h_j)$  и  $r_{qq}(h_i, h_j)$ , рассчитанных между любым исходным уровнем и всеми вышерасположенными уровнями пограничного слоя атмосферы.

Наряду с этой закономерностью для вертикальных корреляционных связей температуры и влажности в пограничном слое атмосферы характерны также и некоторые особенности. В частности, зимой значения коэффициентов корреляции между вариациями температуры и влажности у земли (или на высоте 100 м) и на всех вышерасположенных уровнях наиболее быстро уменьшаются по своей величине с высотой в нижнем 600-метровом слое, где межуровневые корреляционные связи этих метеорологических величин существенно нарушаются за счет появления мощных приземных инверсий, а выше они уменьшаются заметно медленнее. Так, например, в районе Салехарда коэффициент корреляции температуры  $r_{tt}(h_0, h_j)$  уменьшается в этом слое на 0,35 (от 1,00 на уровне земли до 0,65 на высоте 600 м), а в слое

600–1200 м, т.е. на таком же расстоянии между коррелируемыми уровнями, этот коэффициент корреляции изменился всего на 0,14 (от 0,65 до 0,50 соответственно).

Летом, в отличие от зимы, когда нет мощных приземных инверсий, ослабление межуровневых корреляционных связей температуры и влажности с увеличением расстояния между коррелируемыми уровнями происходит с меньшей интенсивностью и более равномерно (так, например, если зимой в районе того же Салехарда коэффициент корреляции температуры  $r_{tt}(h_0, 1600 \text{ м})$  равен 0,46, то летом он заметно больше и составляет порядка 0,70). Правда, на юге Западной Сибири, где летом выявлен 100-метровый слой приземной инверсии [1], ослабление межуровневых корреляционных связей между вариациями температуры и влажности у земли и на вышерасположенных уровнях происходит неравномерно: достаточно интенсивно в нижнем 400-метровом слое и замедленно выше этого слоя. Так, например, вблизи Омска коэффициент корреляции температуры  $r_{tt}(0, 400 \text{ м}) = 0,795$ , а  $r_{tt}(0, 800 \text{ м}) = 0,725$ , т.е. в слое 0–400 м он уменьшился на 0,205, а между уровнями 400 и 800 м – всего на 0,070.

## 1.2. Межуровневая корреляция ветра

На рис. 2 показано распределение коэффициентов межуровневой корреляции скоростей зонального и меридионального ветра на различных высотах пограничного слоя атмосферы, полученное для тех же (что и в случае с температурой и влажностью) аэрологических станций, а именно Салехарда и Омска.

Оказалось, что для зональной и меридиональной составляющих скорости ветра характерна та же общая закономерность, которая была выявлена для межуровневой корреляции температуры и влажности воздуха (см. рис. 1). Она заключается в том, что межуровневая корреляция ортогональных составляющих скорости ветра также положительна во всем пограничном слое атмосферы, причем повсеместно и независимо от сезона, и ослабевает с увеличением расстояния между коррелируемыми уровнями. При этом зимой наибольшее ослабление межуровневой корреляции зонального и меридионального ветра, оцененной между уровнем земли и всеми вышерасположенными высотами, наблюдается, как и в случае корреляции температуры и влажности, в нижнем,

но не 600, а 300–400-метровом слое, т.е. для ветра характерно более быстрое уменьшение значений  $r_{UU}(h_0, h_i)$  и  $r_{VV}(h_0, h_j)$  с высотой.

Кроме того, для ветра (как и для температуры и влажности) характерны различия в изменении межуровневой корреляции с высотой. В частности, зимой (в сравнении с летом) отмечается более быстрое убывание межуровневых корреляционных связей зональной и меридиональной составляющих скорости ветра с увеличением расстояния между коррелируемыми уровнями. Это обусловлено тем, что зимой межуровневая корреляция ветра существенно нарушается за счет появления, причем повсеместно, мощных приземных инверсий, которые в летний период не наблюдаются.

Все отмеченные выше закономерности (положительная корреляционная связь, ее ослабление с увеличением расстояния между коррелируемыми уровнями, а также рост связи от зимы к лету) характерны и для межуровневой корреляции, оцененной между другими исходными (фиксированными) уровнями и всеми вышерасположенными уровнями пограничного слоя атмосферы.

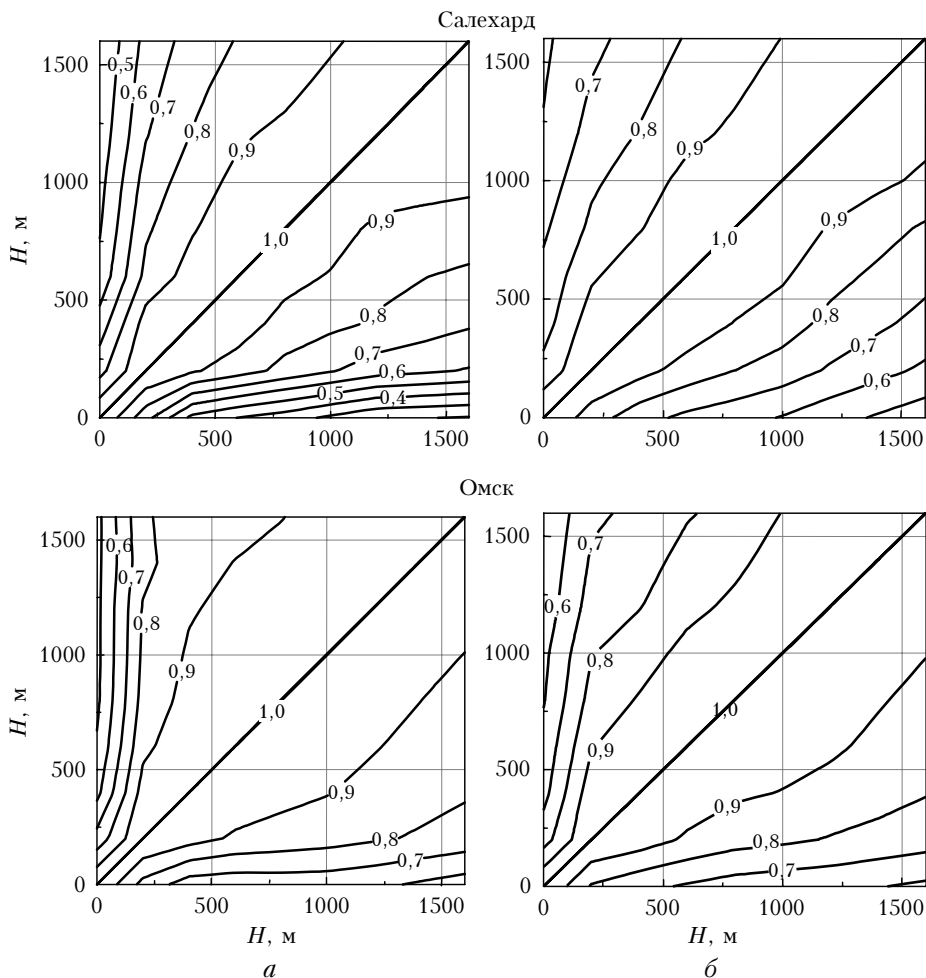


Рис. 2. Графики межуровневой корреляции зональной (над диагональю) и меридиональной (под диагональю) составляющих скорости ветра для типичных станций Западной Сибири: *a* – январь, *б* – июль

## 2. Результаты малопараметрического представления вертикальной структуры случайных полей температуры, влажности и ветра в пограничном слое атмосферы с помощью естественных ортогональных функций

В современных статистических исследованиях пространственной (в том числе вертикальной) структуры случайных полей метеорологических величин широко применяется оптимальное их представление в виде суммы естественных ортогональных функций (собственных векторов корреляционных матриц поля, заданного в выбранной фиксированной системе точек или высот) [2–4]. Это обусловлено тем, что такое представление, в отличие от других способов (например, разложения по ортогональным полиномам Чебышева, тригонометрическим функциям или полиномам Лежандра), отличается возможностью обойтись без задания заранее функции разложения, поскольку она определяется статистически из фактических особенностей исследуемого случайного поля. Кроме того, разложение любого случайного поля по естественным ортогональным функциям обладает большей скоростью сходимости, что позволяет выделить из исходной информации об этом поле наиболее существенные и устойчивые особенности и исключить мелкие детали и шумы. Наконец, главные собственные векторы, полученные в результате подобного разложения, обладают (по сравнению с исходной корреляционной матрицей) большей пространственной и временной устойчивостью.

Все перечисленные преимущества позволяют использовать естественные ортогональные функции для решения такой важной для практики задачи, как малопараметрическое описание вертикальной структуры случайных метеорологических полей в пограничном слое атмосферы, которое для Западной Сибири до сих пор не проводилось. Данному вопросу и посвящен настоящий раздел.

Для анализа полученных результатов используем собственные числа и собственные векторы, рассчитанные по данным автокорреляционных матриц  $\|R_{tt}\|$ ,  $\|R_{qq}\|$ ,  $\|R_{UU}\|$  и  $\|R_{VV}\|$  для всех рассматриваемых станций Западной Сибири с помощью системы уравнений вида

$$\sum_{j=1}^k R_{ij} F_{aj} = \lambda_{\alpha} F_{ai} \quad (i = k = 10), \quad (1)$$

где  $R_{ij}$  — элементы корреляционной матрицы  $\|R_{ij}\|_{\xi}$ , рассчитанной для заданной метеорологической величины  $\xi$  (в нашем случае это температура, влажность и ортогональные составляющие скорости ветра);  $F_{ai}$  — компоненты собственных векторов той же корреляционной матрицы (здесь  $\alpha = 1, 2, \dots, n$  — номер члена разложения, а  $i = 1, 2, \dots, k$  — номер компоненты

собственного вектора);  $\lambda_{\alpha}$  — собственные числа матрицы  $\|R_{ij}\|_{\xi}$ , являющиеся дисперсиями коэффициентов разложения  $C_{\alpha}$  некоторой случайной функции  $\Phi(z)$  по собственным векторам той же корреляционной матрицы (здесь  $\Phi(z)$  —  $k$ -мерный случайный вектор (вертикальный профиль), заданный на конечном числе уровней  $z_j$ ).

Для выбора главных собственных векторов корреляционной матрицы  $\|R_{ij}\|_{\xi}$ , обеспечивающих оптимальное и достаточно точное описание вертикальной структуры случайного метеорологического поля, а также для оценки допускаемой при этом погрешности был использован критерий

$$d_m = \sum_{\alpha=1}^m \lambda_{\alpha} / Sp \|R_{ij}\|_{\xi} \quad (2)$$

(здесь  $Sp \|R_{ij}\|_{\xi} = \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha}$  — след корреляционной матрицы  $\|R_{ij}\|_{\xi}$ ), характеризующий долю, вносимую первыми (главными) векторами в суммарную дисперсию.

Подробное описание методики получения естественных ортогональных функций (собственных векторов корреляционных матриц) дается в [2, 4].

Рассмотрим особенности поведения естественных ортогональных функций вертикальных профилей температуры, влажности и ветра, обратив главное внимание на их статистическую устойчивость и информативность. На рис. 3 изображены два первых собственных вектора корреляционных матриц температуры, влажности, зональной и меридиональной составляющих скорости ветра для станций Салехард, Ханты-Мансийск, Омск и Новосибирск, а в таблице для тех же станций приведены собственные числа  $\lambda_{\alpha}$  указанных матриц и величины критерия  $d_m$ , характеризующего долю первых  $m$  естественных ортогональных функций в суммарной дисперсии  $\sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha}$ .

Анализ рис. 3 показывает, что первые и вторые собственные векторы корреляционных матриц  $\|R_{tt}\|$ ,  $\|R_{qq}\|$ ,  $\|R_{UU}\|$  и  $\|R_{VV}\|$  имеют общие характерные черты, которые не зависят от метеорологической величины, сезона и географического положения станции. Так, например, первые собственные векторы  $F_1$ , полученные для указанных матриц, сохраняют, причем во всем пограничном слое атмосферы, положительный знак своих компонент. С физической точки зрения такой высотный ход векторов  $F_1$  вполне закономерен, поскольку он отражает положительные межуровневые корреляционные связи, характерные для случайных вариаций температуры, влажности, зональной и меридиональной составляющих скорости ветра во всем пограничном слое атмосферы (см. рис. 1 и 2). Надо отметить также, что и для зимы, и для лета собственные векторы  $F_1$  для всех рассматриваемых станций Западной Сибири образуют семейство кривых, хорошо согласующихся между собой и имеющих незначительный разброс (не более 0,10), причем в основном у компоненты  $F_{11}$ .

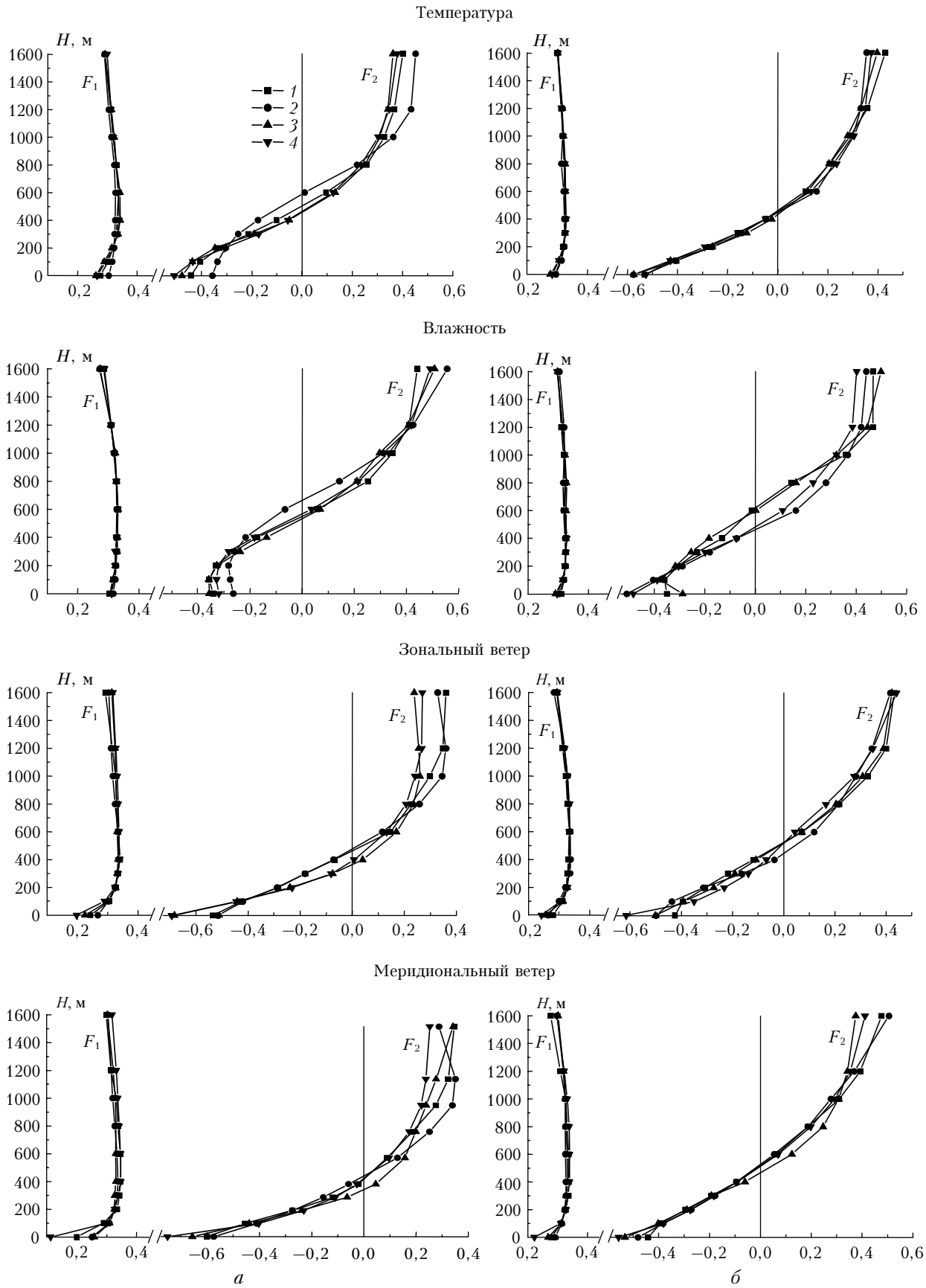


Рис. 3. Собственные векторы корреляционных матриц температуры, влажности, зонального и меридионального ветра для станций Салехард (1), Ханты-Мансийск (2), Омск (3) и Новосибирск (4): *a* – январь, *б* – июль

Собственные числа корреляционных матриц температуры  $\lambda_\alpha$  ( $^{\circ}\text{C}$ )<sup>2</sup>, влажности  $\lambda_\alpha$  (%)<sup>2</sup>, зональной и меридиональной составляющих скорости ветра  $\lambda_\alpha$  (м/с)<sup>2</sup> и доли (%) учитываемой дисперсии  $d_m$ , рассчитанные для некоторых станций Западной Сибири

$\alpha$	Салехард		Ханты-Мансийск		Омск		Новосибирск	
	$\lambda_\alpha$	$d_m$	$\lambda_\alpha$	$d_m$	$\lambda_\alpha$	$d_m$	$\lambda_\alpha$	$d_m$
Январь								
<i>Температура</i>								
1	8,10	81	7,94	79	7,76	78	7,70	77
2	1,41	95	1,39	93	1,71	95	1,92	96
<i>Влажность</i>								
1	8,31	83	8,52	85	8,48	85	8,62	86
2	1,11	94	0,98	95	1,01	95	0,86	95
<i>Зональная составляющая скорости ветра</i>								
1	8,08	81	8,38	84	8,24	82	8,22	82
2	1,26	93	1,15	95	1,15	94	1,26	95
<i>Меридиональная составляющая скорости ветра</i>								
1	7,67	77	8,34	83	8,58	86	8,03	80
2	1,62	93	1,11	94	0,75	93	1,20	92
Июль								
<i>Температура</i>								
1	9,23	92	9,21	92	9,00	90	8,90	89
2	0,60	98	0,61	98	0,74	97	0,91	98
<i>Влажность</i>								
1	9,19	92	9,12	91	8,97	90	8,83	83
2	0,40	96	0,48	96	0,48	94	0,57	94
<i>Зональная составляющая скорости ветра</i>								
1	8,47	85	8,20	82	8,36	84	8,40	84
2	0,92	94	1,09	93	0,96	93	1,03	94
<i>Меридиональная составляющая скорости ветра</i>								
1	8,21	82	8,42	84	8,61	86	8,11	82
2	1,16	94	0,88	93	0,77	94	1,24	94

Вторые собственные векторы  $F_2$ , сохраняя, как и векторы  $F_1$ , пространственно-временную устойчивость, имеют более сложный характер распределения своих компонент по высоте, а именно: они меняют свой знак, причем независимо от метеорологической величины, вблизи уровня 400–600 м. При этом переход вектора  $F_2$  через нуль происходит от отрицательных к положительным значениям.

Что касается собственных чисел  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , на сумму которых приходится от 92 до 98% общей дисперсии, то они в зависимости от метеорологической станции, сезона и географического положения станции варьируют в основном незначительно (для первого собственного вектора) и существенно (для второго собственного вектора).

В заключение следует сказать, что высокая пространственно-временная устойчивость первых двух собственных векторов и быстрая сходимостъ разложения по естественным ортогональным функциям позволяют существенно сократить (в 5 раз) объем статистической информации, необходимой для опи-

сания вертикальной структуры случайных полей температуры, влажности и ветра в пограничном слое атмосферы над регионом Западной Сибири, а также дают широкие возможности для их применения в задачах объективной классификации и статистического моделирования этих метеорологических полей.

1. Комаров В.С., Ломкина Н.Я. Особенности вертикальной статистической структуры полей температуры, влажности и ветра в пограничном слое атмосферы Западной Сибири. Часть 1. Фоновые характеристики и изменчивости // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20. № 10. С. 885–891.
2. Зуев В.Е., Комаров В.С. Статистические модели температуры и газовых компонент атмосферы. Л.: Гидрометеондат, 1986. 264 с.
3. Zuev V.E., Komarov V.S. Statistical Models of the Temperature and Gaseous Components of the Atmosphere. Dordrecht; Boston; Lancaster; Tokyo: D. Reidel Publishing Company, 1987. 306 p.
4. Мещерская А.В., Руховец Л.В., Юдин М.И., Яковлева Н.И. Естественные составляющие метеорологических полей. Л.: Гидрометеондат, 1970. 199 с.

*V.S. Komarov, N.Ya. Lomakina. Peculiarities of vertical statistical structure of the temperature, humidity, and wind fields within boundary layer of the Western Siberia atmosphere. P. 2. Characteristics of vertical correlation.*

Based on the data of many-year observations at eight aerologic stations, peculiarities of inter-level correlation of the temperature, humidity, and wind in the boundary atmospheric layer above Western Siberia territory is described, as well as the problem of small-parametric description of vertical structure of these meteorological parameters is studied using basic eigen vectors of their correlation matrices.