

В.С. Комаров, Н.Я. Ломакина

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

Часть 1. Фоновые характеристики и изменчивость

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 19.02.2007 г.

Обсуждаются результаты комплексного физико-статистического анализа вертикальной структуры полей температуры, влажности и ветра в пограничном слое атмосферы Западной Сибири, проведенного по данным многолетних наблюдений восьми аэрологических станций.

Изложены некоторые методические аспекты подготовки исходных данных, и рассмотрены особенности вертикального распределения фоновых (средних климатических) характеристик и дисперсий температуры, влажности и ветра до высоты 1600 м в зависимости от сезона и географического положения станции.

Введение

Решение многочисленных проблем, связанных с изучением и моделированием мезоклиматов, с разработкой и применением систем лазерного дистанционного зондирования параметров атмосферы, с оценкой условий распространения в воздушной среде электромагнитного (в том числе оптического) излучения и т.п., требует существенного расширения наших знаний о вертикальной статистической структуре полей температуры, влажности и ветра в пограничном слое атмосферы (ПСА) над различными регионами земного шара и особенно над таким малоосвещенным (в климатическом отношении) регионом, как Западная Сибирь.

Это обусловлено тем, что длительное время в метеорологической литературе (см., например, обзор [1]) основное внимание уделялось исследованию статистической структуры метеорологических полей в свободной атмосфере, проводимому по данным лишь одних стандартных изобарических уровней (без привлечения информации особых точек, т.е. точек на вертикальных профилях, где велика производная по вертикали одной из метеорологических величин [2]) и, следовательно, исключающему возможность изучения подобной структуры в пограничном слое атмосферы. Только в монографии [3], где использованы данные стандартных изобарических уровней и особых точек, наряду с анализом вертикальной статистической структуры метеорологических полей в свободной атмосфере над Северным полушарием исследуется та же структура в пограничном слое, в том числе и над территорией Западной Сибири.

Однако это исследование проводилось в [3] лишь на примере полей температуры и влажности и совершенно не касалось поля ветра. Кроме того, для исследования были использованы данные только трех станций: Салехарда, Свердловска и Новосибирска, взятые с разрешением по высоте около 250 м. Все это не позволяет осуществить адекватное описание вертикального распределения температуры и влажности в пограничном слое атмосферы над всей территорией Западной Сибири и особенно в нижнем 600-метровом слое, где данное распределение формируется в значительной степени под динамическим и термическим воздействием подстилающей поверхности.

Что касается других работ, посвященных исследованию вертикальной структуры метеорологических полей в пограничном слое атмосферы Западной Сибири, то приведенные в них сведения являются достаточно ориентировочными, поскольку они получены либо по данным многолетних радиозондовых наблюдений за температурой и ветром, однако для одной станции (Новосибирска) [4], либо по данным ограниченных экспериментальных (лидарных [5] или содарных [6]) измерений характеристик ветра, проведенных в районе г. Томска. При этом в работе [5] рассматриваются лишь профили высотного распределения средних значений и дисперсий параметров ветра, а в [6] только его межуровневые корреляционные связи, оцененные к тому же лишь для нижнего 300-метрового слоя атмосферы.

Все вышесказанное подчеркивает необходимость исследования особенностей вертикальной структуры температуры, влажности и ветра в пограничном слое атмосферы над территорией Западной Сибири. Этой проблеме и посвящена настоящая статья.

1. Характеристика исходного материала

Основным исходным материалом для исследования особенностей вертикальной статистической структуры полей температуры, влажности и ветра в пограничном слое атмосферы над территорией Западной Сибири послужили пятилетние (2001–2005 гг.) и двухразовые (00 и 12 ч по Гринвичу) радиозондовые наблюдения восьми аэрологических станций: Салехард (66° 32' с.ш., 66° 40' в.д.), Туруханск (65° 47' с.ш., 87° 56' в.д.), Ханты-Мансийск (61° 01' с.ш., 69° 02' в.д.), Александровское (60° 26' с.ш., 77° 52' в.д.), Верхнее Дуброво (56° 44' с.ш., 61° 40' в.д.), Омск (54° 56' с.ш., 73° 24' в.д.), Новосибирск (54° 58' с.ш., 82° 57' в.д.) и Емельяново (56° 11' с.ш., 92° 37' в.д.).

Поскольку нами использован пятилетний период осреднения, то возникает вопрос – насколько репрезентативен взятый период и можно ли применять полученные по нему статистические характеристики в качестве некоторых климатических норм. Для ответа на этот вопрос нами на примере ст. Новосибирск была осуществлена оценка значимости расхождения средних $\bar{\xi}_1$ и $\bar{\xi}_2$ и дисперсий σ_1^2 и σ_2^2 , рассчитанных по двум независимым выборкам N_1 и N_2 , путем использования, в соответствии с [7], критерия Стьюдента t_s (для сравнения средних) и критерия Фишера T_H (для сравнения дисперсий).

В таблице представлены результаты сопоставления средних значений и дисперсий температуры и ортогональных составляющих скорости ветра с помощью критериев t_s и T_H , рассчитанных для ст. Новосибирск по данным выборки N_1 (1961–1970 гг.) и выборки N_2 (2001–2005 гг.).

Подчеркнем, что средние и дисперсии, полученные по выборке N_1 , заимствованы из [8] (для температуры) и дополнены более поздними расчетами для ветра, а объем выборок N_1 и N_2 составил соответственно 230 и 138 наблюдений в январе и 260 и 152 в июле.

Анализ результатов сопоставления средних и дисперсий температуры, зонального и меридионального ветра, рассчитанных по двум выборкам N_1 и N_2 для уровня земли и изобарических поверхностей 925 и 850 гПа, расположенных в пограничном слое атмосферы, показал, что критерий t_s во всех случаях, т.е. независимо от метеорологической величины, месяца и уровня атмосферы, меньше его критического значения $t_s(P, k) = 1,96$, определенного при вероятности $P = 0,95$ и числе степеней свободы

$$k = N_1 + N_2 - 2 = 230 + 138 - 2 = 366 \text{ для января}$$

и

$$k = N_1 + N_2 - 2 = 260 + 152 - 2 = 410$$

для июля, а критерий T_H меньше $F_{1-P}(N_1, N_2)$, равного соответственно 1,31 и 1,28 при уровне значимости $s = 1 - P = 0,05$ и взятых значениях N_1 и N_2 .

Следовательно, как средние значения, так и дисперсии взятых метеорологических величин, рассчитанные по двум независимым выборкам для трех уровней, расположенных в ПСА, различаются между собой несущественно и случайно. Поэтому использованная нами выборка вполне репрезентативна, а полученные по ней статистические характеристики могут рассматриваться в качестве климатических норм.

Остановимся теперь коротко на некоторых особенностях формирования исходных статистических совокупностей, применяемых для расчета характеристик вертикальной структуры метеорологических полей, в качестве которых нами использованы: средние значения $\bar{\xi}(h_j)$, среднеквадратические отклонения $\sigma_{\xi}(h_i)$ и автокорреляционные (нормированные) функции $\mu_{\xi\xi}(h_i, h_j)$.

Для формирования этих совокупностей нами использованы следующие процедуры:

– во-первых, все аэрологические данные были предварительно проинтерполированы (с помощью метода линейной интерполяции) со стандартных изобарических поверхностей: 1000 (или уровень земли), 925, 850 и 700 гПа и уровней особых точек

Средние значения температуры t , °С, скорости зонального U , м/с, и меридионального V , м/с, ветра и их среднеквадратические отклонения σ , рассчитанные для станции Новосибирск за периоды 1961–1970 и 2001–2005 гг., и величины критериев значимости t_s и T_H

Уровень, гПа	Январь						Июль					
	1961–1970		2001–2005		t_s	T_H	1961–1970		2001–2005		t_s	T_H
	$\bar{\xi}_1$	σ_1	$\bar{\xi}_2$	σ_2			$\bar{\xi}_1$	σ_1	$\bar{\xi}_2$	σ_2		
	t , °С											
Земля	–17,1	8,5	–16,5	7,7	0,70	1,22	18,8	4,9	18,4	5,5	0,74	1,26
925	–13,0	6,3	–11,8	5,7	1,87	1,22	15,0	4,2	15,6	4,3	1,37	1,05
850	–13,9	5,5	–12,8	5,3	1,89	1,08	9,8	3,8	10,2	4,0	0,99	1,11
	U , м/с											
Земля	0,5	2,2	0,9	2,1	1,74	1,10	0,0	1,6	0,1	1,8	0,57	1,26
925	5,4	7,4	6,3	7,1	1,16	1,09	0,4	4,4	0,6	4,6	0,43	1,09
850	6,5	8,4	7,3	8,1	0,90	1,08	1,0	4,8	1,1	4,9	0,20	1,04
	V , м/с											
Земля	1,1	1,6	0,8	1,8	1,63	1,26	–0,1	1,5	–0,6	1,6	0,61	1,14
925	2,5	6,0	1,4	5,5	1,76	1,19	–0,2	4,5	–0,7	4,7	1,14	1,09
850	1,4	6,3	0,3	5,7	1,72	1,22	–0,1	4,8	–0,4	5,0	0,59	1,08

на заданные геометрические высоты: 0, 100, 200, 300, 400, 600, 800, 1000, 1200 и 1600 м;

– во-вторых, аэрологические измерения, полученные для различных станций, были подвержены синхронизации во времени, в результате чего общее число синхронных измерений составило для каждой станции 138 в январе и 152 в июле, что позволило получить вполне однородные по высоте и пространству и, в первом приближении, случайные и независимые выборки;

– в-третьих, при формировании исходных выборок в качестве периода осреднения выбран многолетний месяц, исключая нестационарность во взятых метеорологических рядах, свойственную при осреднении по году или сезону и искажающую получаемые статистики;

– в-четвертых, при формировании массива с данными влажности взяты значения доли водяного пара (q , %), которая не измеряется, поэтому она была вычислена по формуле [2]:

$$q = 622E_w(T_d)/p, \quad (1)$$

где $T_d = (273,16 + t_d)$ – точка росы, К (здесь t_d – та же точка росы, °С); $E_w(T_d)$ – фактическое парциальное давление водяного пара, гПа, оцениваемое по отношению к воде, и p – атмосферное давление в гПа, причем зависимость величины $E_w(T_d)$ от точки росы T_d может быть представлена в соответствии с Техническим регламентом ВМО [9] эмпирической формулой вида

$$\begin{aligned} \lg E_w(T_d) = & 10,79574 \left(1 - \frac{273,16}{T_d} \right) - 5,028 \lg \left(\frac{T_d}{273,16} \right) + \\ & + 1,50475 \cdot 10^{-4} \left[1 - 10^{-8,2969 \left(\frac{T_d}{273,16} - 1 \right)} \right] + \\ & + 0,42873 \cdot 10^{-3} \left[10^{4,76955 \left(1 - \frac{273,16}{T_d} \right)} - 1 \right] + 0,78614; \quad (2) \end{aligned}$$

– в-пятых, после формирования статистических совокупностей каждый член рассматриваемой совокупности подвергался климатическому контролю с помощью выражения [3]:

$$\left| \xi_i - \bar{\xi} \right| \geq 3\sigma_{\xi}. \quad (3)$$

Здесь ξ_i и $\bar{\xi}$ – контролируемое значение метеорологической величины и ее климатическая норма на некотором уровне атмосферы; σ – среднеквадратическое отклонение, полученное для того же уровня). В результате было отбраковано не более 1–3% измерений. Поскольку вертикальные профили $\xi_i(h)$, имеющие ошибочные значения на отдельных уровнях, полностью исключались из дальнейшего рассмотрения, то это обеспечило получение однородных по высоте статистических совокупностей, по которым и проводился расчет всех статистик.

2. Некоторые особенности вертикальной структуры средних полей температуры, влажности и ветра в пограничном слое атмосферы

Известно, что основные черты вертикальной структуры какого-либо метеорологического поля наиболее четко выявляются при анализе его фоновых (средних) характеристик, отображающих главные закономерности, свойственные этому полю. Некоторым результатам такого анализа, проведенного для региона Западной Сибири, посвящен данный раздел.

Сразу же подчеркнем, что результаты статистического анализа фоновых характеристик будем излагать отдельно для комплекса «температура – влажность» (между ними, согласно [3], существует тесная корреляционная связь) и параметров вектора ветра, представленных его зональной и меридиональной составляющими. Применение последних обусловлено тем, что анализ скорости и направления ветра, измеряемых радиозондом, невозможен, поскольку среднее значение направления ветра вообще может не существовать [1]. Далее, для простоты, будем применять также термин «скорость зонального или меридионального ветра». При этом положительные значения скорости зонального ветра соответствуют западному переносу, а отрицательные – восточному. В то же время положительные значения скорости меридионального ветра соответствуют южному переносу, а отрицательные – северному.

Из анализа рис. 1, где показано вертикальное распределение средней температуры и влажности для станций Западной Сибири, следует, что зимой для него характерно наличие мощных приземных инверсий, наблюдаемых до высот 800 и 600 м соответственно. Кроме того, зимой во всем ПСА прослеживается заметное понижение средней температуры и влажности в направлении с юго-запада на северо-восток: наибольшие температура и влажность наблюдаются на ст. Верхнее Дуброво, а наименьшие – в Туруханске.

Летом температура и влажность понижаются с высотой, однако для температуры южнее 61° с.ш. выявлен 100-метровый слой приземной инверсии или изотермии. Что касается пространственного распределения величин \bar{t} и \bar{q} , то во всем ПСА они понижаются с юга на север.

Инверсионное распределение температуры и влажности с высотой в зимний период обусловлено сильным радиационным выхолаживанием и, как следствие, высушиванием приземного воздуха над холодной подстилающей поверхностью в условиях антициклонального характера атмосферной циркуляции [3]. Небольшое повышение температуры в нижнем 100-метровом слое, отмечаемое летом, связано с возникновением в этом сезоне ночных радиационных инверсий.

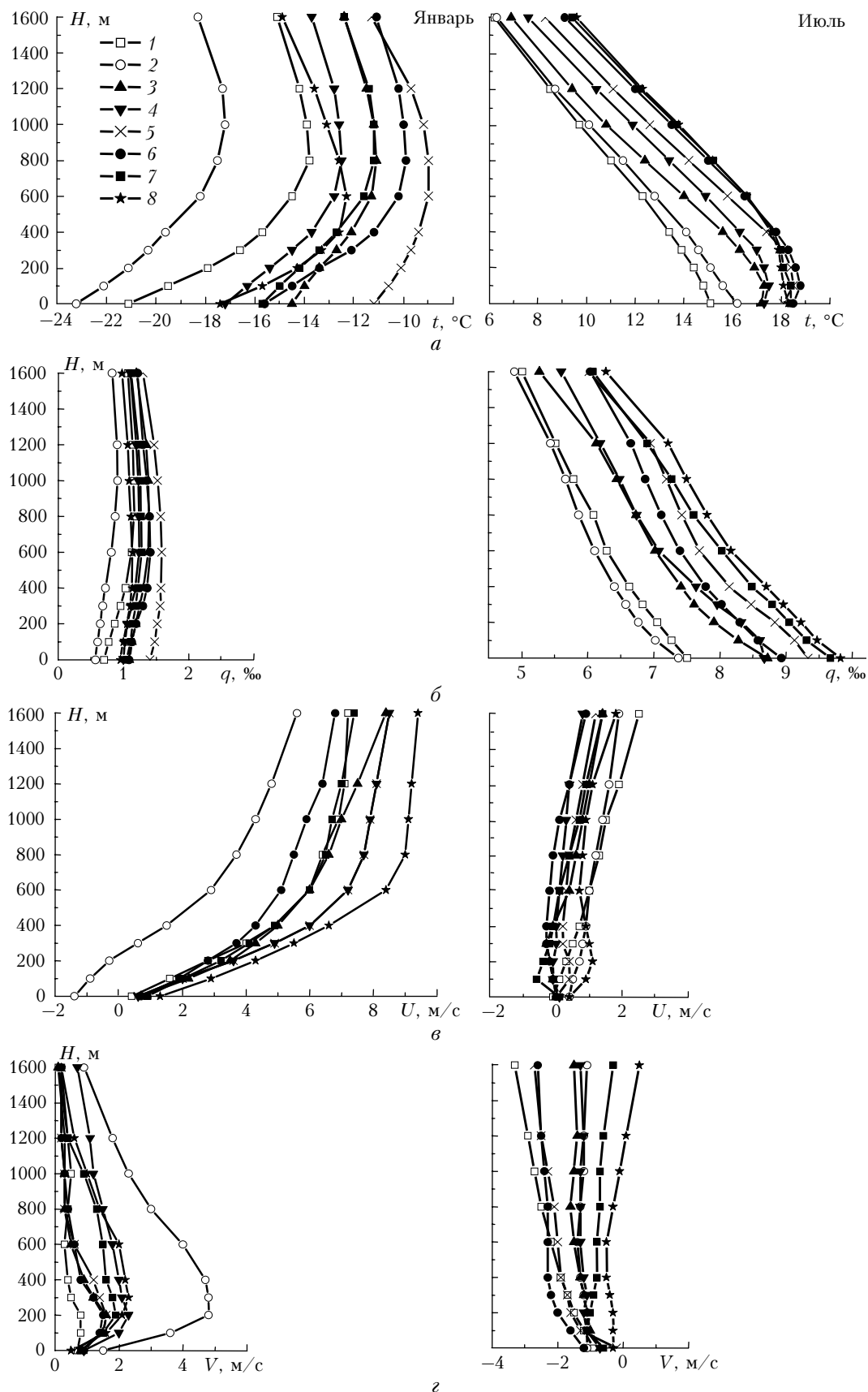


Рис. 1. Вертикальное распределение температуры (а), влажности воздуха (б), зонального (в) и меридионального (г) ветра в пограничном слое атмосферы над Западной Сибирью (1 – Салехард, 2 – Туруханск, 3 – Ханты-Мансийск, 4 – Александровское, 5 – Верхнее Дуброво, 6 – Омск, 7 – Новосибирск, 8 – Емельяново)

Рассмотрим теперь особенности вертикального распределения среднего зонального и меридионального ветра. Из рис. 1 видно, что зимой в ПСА над всей территорией Западной Сибири потоки имеют в среднем западную составляющую за исключением приземного 200-метрового слоя на северо-западе (ст. Туруханск). При этом повсеместно скорость западного ветра возрастает с высотой, особенно интенсивно в нижнем 600-метровом слое (от ~ 1 м/с вблизи земной поверхности до 5–8 м/с на уровне 600 м). Однако интенсивность такого роста в значительной степени зависит от широты и долготы места, наибольшее усиление западного ветра с высотой наблюдается в районе ст. Емельяново, где его скорость возрастает при обтекании Алтайских и Саянских гор. В северо-восточных районах Западной Сибири (ст. Туруханск) выше уровня 200 м наблюдаются наименьшие скорости западного ветра.

Анализ особенностей вертикального распределения среднего меридионального ветра, представленного на рис. 1, показывает, что зимой в пограничном слое атмосферы над Западной Сибирью преобладает в среднем южная составляющая. Важным отличием высотного распределения скорости меридионального ветра (по сравнению с зональным ветром) является то, что рост скорости южного ветра с высотой имеет место лишь в нижнем 200–300-метровом слое. При этом наименьшие скорости ветра наблюдаются в северо-западной части рассматриваемого региона (ст. Салехард), а наибольшие — в северо-восточной (ст. Туруханск). Выше этого слоя скорости южных ветров уменьшаются с высотой.

Летом, в отличие от зимы, в нижнем 400-метровом слое ПСА в центральных (ст. Ханты-Мансийск, Александровское) и южных (ст. Омск, Новосибирск) районах Западной Сибири зональные потоки в среднем имеют восточную составляющую, однако при скоростях, близких к нулю. Очень слабые западные ветры наблюдаются в западных (ст. Верхнее Дуброво, Салехард) и восточных областях (ст. Емельяново, Туруханск), а также выше 400 м над всей территорией Западной Сибири. Что касается летнего распределения меридионального ветра, то для него характерны северная составляющая, за исключением ст. Емельяново выше 1200 м, и небольшие скорости.

3. Особенности вариаций вертикальных профилей температуры, влажности и ветра в пограничном слое атмосферы

Наряду с вертикальной структурой средних полей несомненный интерес представляет исследование особенностей изменчивости полей температуры, влажности и ветра. Остановимся коротко на анализе изменчивости этих полей в ПСА над Западной Сибирью. С этой целью воспользуемся рис. 2, на котором приведено распределение средних квадратических отклонений температуры, влажности и ортогональных составляющих скорости ветра, характеризующих возможные вариации данных метеорологических величин вокруг их среднего значения.

Из рис. 2 следует, что зимой изменчивость температуры и влажности над всей территорией Западной Сибири достаточно высока, особенно вблизи земной поверхности, и убывает с высотой, причем наиболее сильно у температуры. Для влажности воздуха наименьшая изменчивость характерна для северных районов (ст. Туруханск и Салехард), где наблюдается и наименьшая влажность воздуха.

Наличие максимума изменчивости температуры и влажности в приземном слое атмосферы обусловлено совместным воздействием радиационного и циркуляционного факторов. Действительно, согласно [3] зимой над континентами Северного полушария отмечается интенсивный межширотный и зональный обмен воздушных масс, который в условиях сильного радиационного выхолаживания приземного слоя над внутренними районами материков (к ним относятся и Западная Сибирь), обуславливающего здесь образование мощных приземных инверсий, вызывает значительную изменчивость температуры и влажности вблизи земной поверхности.

От зимы к лету изменчивость температуры и влажности существенно уменьшается, причем во всем пограничном слое атмосферы. При этом распределения средних квадратических отклонений температуры и влажности с высотой в ПСА над Западной Сибирью имеют различный характер. Так, для температуры характерно, как и зимой, понижение ее изменчивости с высотой во всем пограничном слое атмосферы, однако менее интенсивное. При этом максимум изменчивости температуры наблюдается на северо-западе (ст. Салехард).

Иной характер распределения с высотой имеет изменчивость влажности. В целом она убывает с высотой, причем с большей интенсивностью, чем зимой. Однако на юге (ст. Верхнее Дуброво, Омск, Новосибирск, Емельяново) и на северо-востоке (ст. Туруханск) Западной Сибири отмечается некоторый рост изменчивости влажности в нижнем 100–400-метровом слое.

Свои особенности характерны также и для изменчивости полей зонального и меридионального ветра. Анализ рис. 2 показывает, что независимо от сезона и географического положения станции изменчивость скорости зонального и меридионального ветра достаточно мала в приземном слое (σ_U и σ_V порядка 1–3 м/с) и с высотой существенно возрастает, особенно в нижнем 400–600-метровом слое.

Таким образом, проведенный анализ показал, что вертикальная структура полей средней температуры, влажности и скорости ветра, а также их изменчивость в пограничном слое атмосферы над Западной Сибирью имеют как общие черты, так и определенные особенности, связанные с сезоном и географическим положением станции.

В заключение следует сказать, что результаты анализа межуровневой корреляции температуры, влажности и скорости ветра в пограничном слое атмосферы над Западной Сибирью будут рассмотрены во второй части данной статьи, помещенной в настоящем выпуске журнала.

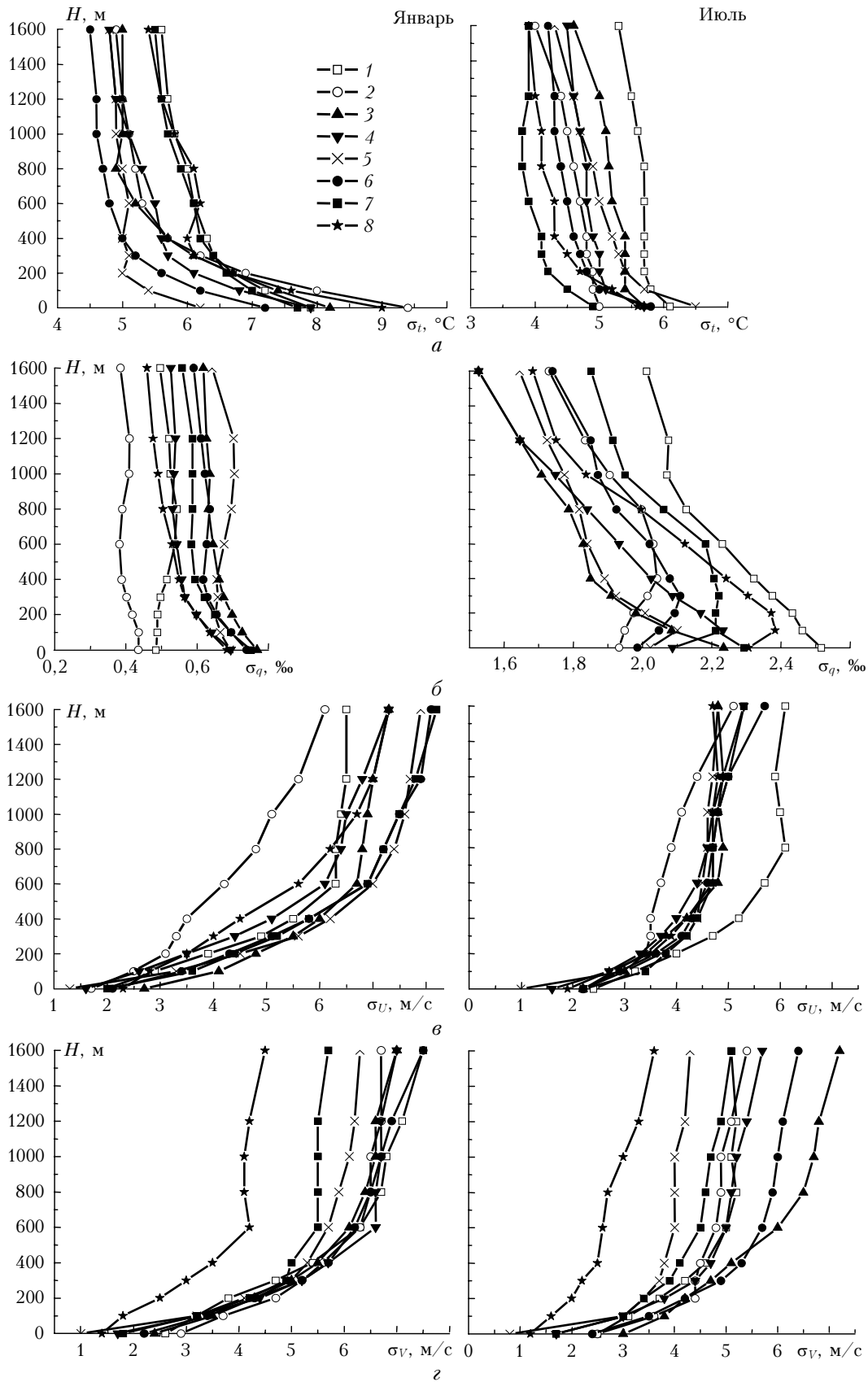


Рис. 2. Вертикальное распределение средних квадратических отклонений температуры (а), влажности воздуха (б), зонального (в) и меридионального (г) ветра в пограничном слое атмосферы над Западной Сибирью. Условные обозначения см. на рис. 1

1. *Статистическая структура метеорологических полей* / Под ред. Л.С. Гандина, В.И. Захарьева, Р. Целнай. Будапешт, 1976. 365 с.
2. *Гордин В.А.* Математические задачи гидродинамического прогноза погоды. Л.: Гидрометеониздат, 1987. 264 с.
3. *Зуев В.Е., Комаров В.С.* Статистические модели температуры и газовых компонент атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1986. 264 с.
4. *Комаров В.С., Акселевич В.И., Креминский А.В., Ломакина Н.Я.* Региональные климатические модели высотного распределения температуры и ветра для пограничного слоя атмосферы // *Оптика атмосф. и океана*. 1995. Т. 8. № 2. С. 1855–1865.
5. *Zuev V.E., Komarov V.S., Kreminskii A.V.* Application of correlation lidar data to modeling and prediction of wind components // *Appl. Opt.* 1997. V. 36. N 9. P. 1906–1914.
6. *Невзорова И.В., Одицов С.А.* Корреляция компонентов скорости ветра в пограничном слое атмосферы // *Оптика атмосф. и океана*. 2005. Т. 18. № 1–2. С. 124–129.
7. *Математическая статистика* / Под ред. А.М. Длинна. М.: Высш. школа, 1975. 398 с.
8. *Статистические характеристики температуры и влажности в свободной атмосфере над СССР. Часть 1. Параметры распределения температуры* / Под ред. В.С. Комарова. М.: Гидрометеониздат, 1972. 160 с.
9. *Технический регламент*. Т. 1 (общая часть). Изд. 2-е. ВМО. № 49. ОД-2. Женева, 1959, Дополнение № 2. Женева, 1963.

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. 1. Background characteristics and variability.

The results of complex physical-statistical analysis of the vertical structure of the temperature, humidity, and wind fields within boundary layer of the Western Siberia atmosphere from many-year observations of eight aerologic stations are under discussion. Some methodical aspects of the initial data preparation are described; peculiarities of vertical distribution of background (mean climatic) characteristics and dispersions of temperature, humidity, and wind up to 1600 m height in dependence of the season and the geography of the station are presented.