

УДК 551.501

## Статистические модели высотного распределения температуры, влажности и ветра в пограничном слое атмосферы Восточной Сибири

Н.Я. Ломакина, В.С. Комаров, С.Н. Ильин\*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 27.12.2011 г.

На основе разработанной ранее оригинальной методологии объективной классификации климатов пограничного слоя атмосферы по комплексу «температура — влажность — ветер», реализованной с использованием метода главных компонент и специальных критериев сходства средних профилей и собственных элементов корреляционных матриц, проведено прикладное климатическое районирование Восточной Сибири, позволившее выявить на ее территории 9 однородных районов зимой и 8 — летом. Для каждого района построены локальные статистические модели, включающие модельные профили высотного распределения средних значений, среднеквадратических отклонений и матрицы межуровневой корреляции температуры, массовой доли водяного пара, скорости зонального и меридионального ветра.

*Ключевые слова:* объективная классификация, климатическое районирование, статистические модели температуры, влажности и ветра, пограничный слой атмосферы, Восточная Сибирь; objective classification, climatic division into districts, statistical models of temperature, humidity and wind, the atmospheric boundary layer, Eastern Siberia.

При решении различных задач атмосферной оптики и дистанционного зондирования атмосферы находят широкое применение статистические модели высотного распределения метеорологических величин и, в частности, региональные модели [1–4]. Согласно климатическому районированию Северного полушария, проведенному на основе объективной классификации полей давления, температуры, влажности и озона в свободной атмосфере [1–3], территория Восточной Сибири и зимой, и летом находится в двух квазиоднородных районах, и вертикальная, структура метеорологических полей такого обширного региона описывается лишь двумя региональными моделями. Кроме того, из-за однокилометрового разрешения данных, использованных в этих моделях, высотное распределение температуры и влажности воздуха в пограничном слое атмосферы (ПСА) дается со значительным приближением. И наконец, данные ветра в региональных моделях не представлены. Отсюда следуют актуальность и необходимость более детального климатического районирования территории Восточной Сибири и создания дополнительно (к региональным) локальных физико-статистических моделей, описывающих высотное распределение температуры, влажности воздуха и ветра в рассматриваемом регионе.

С учетом этого в настоящей статье на основе ранее разработанной методики объективной классификации климатов пограничного слоя атмосферы (она реализована для региона Западной Сибири [4, 5]) представлено климатическое районирование территории Восточной Сибири, и приведены локальные модели высотного распределения температуры, влажности воздуха и ветра. При этом, как и в [4, 5], для объективной классификации климатов пограничного слоя атмосферы Восточной Сибири были использованы следующие информативные признаки:

— средний (климатический) профиль высотного распределения метеорологической величины  $\mathbf{m}_\xi^{(k)}$  (в нашем случае это температура, влажность, зональная и меридиональная составляющие скорости ветра), представляющей собой  $k$ -мерный вектор, компонентами которого являются дискретные значения  $m_\xi(h_k)$  на разных высотах  $h_k$  (при  $k = 1, 2, \dots, K$ );

— главные собственные векторы  $F_\alpha$  и собственные числа  $\lambda_\alpha$  (здесь  $\alpha$  — номер числа разложения) блочной нормированной корреляционной матрицы  $\mu_\xi$ , у которой блоки, расположенные на главной диагонали, представляют собой автокорреляционные матрицы температуры  $\|\mu_{tt}\|$ , влажности воздуха  $\|\mu_{qq}\|$ , скорости зонального  $\|\mu_{UU}\|$  и меридионального  $\|\mu_{VV}\|$  ветра, а остальные блоки — соответствующие взаимные корреляционной матрицы, причем

$$\|\mu_{tq}\| = \|\mu_{qt}\|^T, \quad \|\mu_{tU}\| = \|\mu_{Ut}\|^T, \quad \|\mu_{tV}\| = \|\mu_{Vt}\|^T,$$

$$\|\mu_{qU}\| = \|\mu_{Uq}\|^T, \quad \|\mu_{qV}\| = \|\mu_{Vq}\|^T \quad \text{и} \quad \|\mu_{UV}\| = \|\mu_{VU}\|^T,$$

где  $T$  — оператор транспонирования.

\* Наталья Яковлевна Ломакина (lnya@iao.ru); Валерий Сергеевич Комаров (gfm@iao.ru); Сергей Николаевич Ильин.

В качестве меры сходства, применяемой для выделения границ однородных районов с различным температурно-влажностным и ветровым режимами, использованы три статистических критерия.

1. *Критерий подобия* – для сравнения близости средних профилей, полученных для двух станций  $l$  и  $s$ :

$$\bar{r}_{ls}^{(m)} \geq r_{\text{крит}}^{(m)} = \text{th} z_{\text{крит}}, \quad (1)$$

где  $\bar{r}_{ls}^{(m)} = \left( \sum_{i=1}^4 r_{ls}^{(\xi)} \right) / 4$ , причем  $r_{ls}^{(\xi)} = \frac{1}{\sigma_l \sigma_s} \times$   
 $\times \left( \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k m_i^{(l)} m_i^{(s)} - \bar{m}_l \bar{m}_s \right)$ ,  $\bar{m}$  – среднее послойное значение для каждой из четырех взятых метеорологических величин;  $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение среднего послойного значения  $\bar{m}$ ;  $z_{\text{крит}} = 3\sigma_z$  – критическое значение функции Фишера (при  $\sigma_z = 1/\sqrt{k-3}$  и  $k = 10$ ), определяемое числом высотных уровней и равное в нашем случае (в соответствии с [6]) 0,812.

2. *Критерий устойчивости* – для оценки сходства (подобия) собственных векторов обобщенных корреляционных матриц, полученных для двух сравниваемых станций  $l$  и  $s$ :

$$\bar{r}_{ls}^{(F)} = \left[ \frac{\sum_{\alpha=1}^p r_{\alpha}^{(ls)} \lambda_{\alpha}}{\sum_{\alpha=1}^p \bar{\lambda}_{\alpha}} \right] \geq r_{\text{крит}}^{(F)} = \text{th} z_{\text{крит}}, \quad (2)$$

где  $r_{\alpha}^{(ls)} = \sum_{i=1}^k F_{ai}^{(l)} F_{ai}^{(s)} = \cos(F_{ai}^{(l)}, F_{ai}^{(s)})$  – коэффициент подобия двух собственных  $k$ -мерных векторов  $F_{\alpha}^{(l)}$  и  $F_{\alpha}^{(s)}$ , рассчитанных для  $l$ -й и  $s$ -й сравниваемых блочных матриц  $\mu_x$ ;  $\bar{\lambda}_{\alpha} = (\lambda_{\alpha}^{(l)} + \lambda_{\alpha}^{(s)})/2$  – среднее арифметическое из собственных чисел одного и того же номера  $\alpha$ ;  $p$  – число используемых для классификации членов разложения (нами принято  $p = 5$ , поскольку на первые 5 собственных векторов приходится более 90% от суммарной дисперсии);  $z_{\text{крит}} = 3\sigma_z$  – критическое значение функции Фишера (при  $\sigma_z = 1/\sqrt{n-3}$  и порядке матрицы  $\mu_x$   $n = 4k = 40$ ), определяемое с помощью специальных таблиц [6] и равное в нашем случае 0,456.

3. *Критерий Кохрана* – для оценки значимости расхождения норм обобщенных корреляционных матриц  $\lambda_1$  (при  $\alpha = 1$ )

$$G = \left( S_j / \sum_{l=1}^L S_l \right) \leq G_{0,05}(f, L), \quad (3)$$

где  $S_j$  – наибольшая из  $L$  сравниваемых норм матрицы  $\mu_x$ ;  $L$  – число взятых норм;  $G_{0,05}(f, L)$  – критическое значение критерия Кохрана, определяемое из специальной таблицы [6] при 5%-м уровне значимости для числа степеней свободы  $f = n - 1$  (здесь  $n$  – порядок матрицы  $\mu_x$ , равный 40) и заданного числа сопоставляемых матриц  $L \leq 17$ .

При выполнении условий (1)–(3) все сопоставляемые средние профили, собственные векторы и нормы матриц  $\mu_x$ , рассчитанные для станций  $l$  и  $s$ , относятся к одному и тому же однородному району, в котором поля температуры, влажности воздуха и ветра являются однородными по отношению к атмосферным процессам мезо- и синоптического масштаба.

Для реализации процедуры объективной классификации климатов пограничного слоя атмосферы и климатического районирования Восточной Сибири использованы многолетние (2001–2010) наблюдения 17 аэрологических станций, равномерно расположенных на рассматриваемой территории. Исходные данные, представленные на стандартных изобарических поверхностях и уровнях особых точек, были приведены с помощью процедуры линейной интерполяции к системе геометрических высот: 0, 100, 200, 300, 400, 600, 800, 1000, 1200 и 1600 м.

Прикладное климатическое районирование Восточной Сибири, проведенное по температурно-влажностному и ветровому режимам пограничного слоя атмосферы, позволило выявить на ее территории 9 однородных районов зимой и 8 – летом (рис. 1).

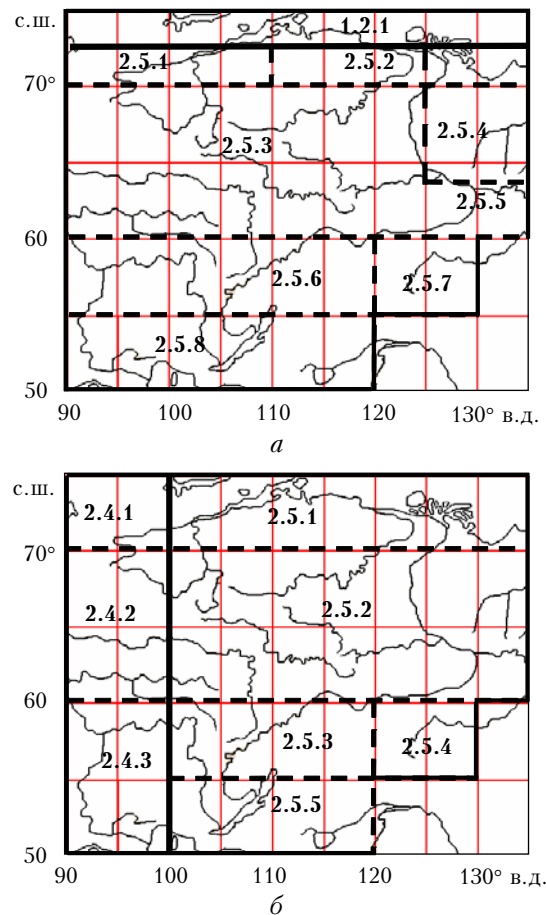


Рис. 1. Климатическое районирование территории Восточной Сибири по температурно-влажностному и ветровому режимам пограничного слоя атмосферы: а – зима; б – лето. (Сплошная жирная линия обозначает границу квазиоднородных районов, пунктирные линии – границы однородных подрайонов.)

Данное климатическое районирование территории Восточной Сибири дополняет проведенное ранее [1, 2] комплексное климатическое районирование Северного полушария. При обозначении номера района две первые цифры соответствуют основному квазиоднородному району, выявленному в процессе комплексного районирования Северного полушария, а третья — однородному подрайону.

Для каждого выявленного однородного подрайона построены локальные физико-статистические мо-

дели, описывающие в нем зимнее и летнее распределения температуры, влажности воздуха и ветра с высотой. При этом в состав моделей входят модельные профили высотного распределения средних значений  $\bar{\xi}(h_k)$  и стандартных отклонений  $\sigma_{\xi}(k)$  температуры ( $t$ , °C), массовой доли водяного пара ( $q$ , ‰), скорости зонального ( $U$ , м/с) и меридионального ( $V$ , м/с) ветров, а также их модельные матрицы межуровневой корреляции  $\|\mu_{ij}\|_{\xi\xi}$ . На рис. 2 в качестве примера приведены модельные зимние профили

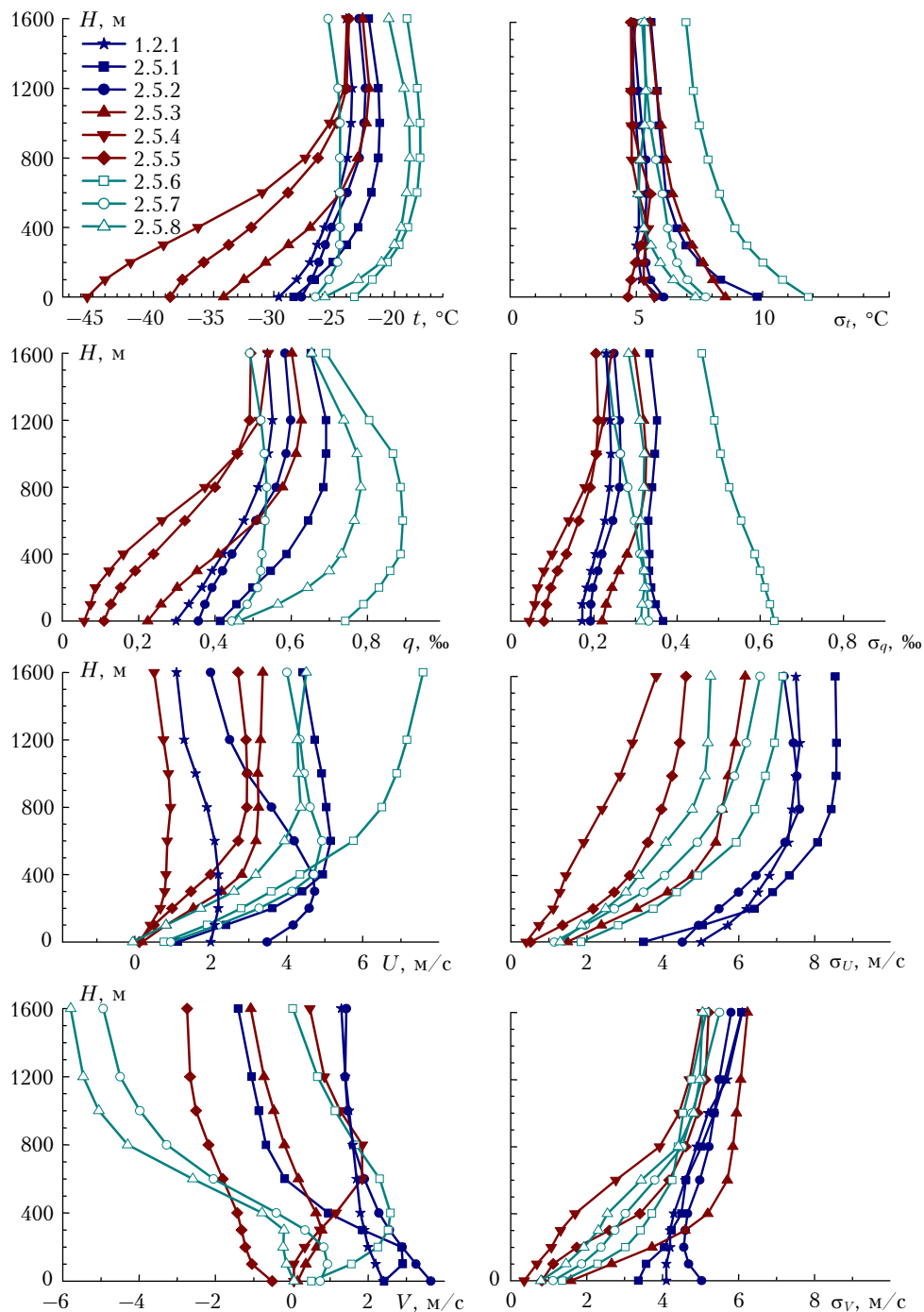


Рис. 2. Локальные модели высотного распределения средних значений (а) и стандартных отклонений (б) температуры, массовой доли водяного пара, скорости зонального и меридионального ветров в пограничном слое атмосферы для различных однородных подрайонов Восточной Сибири. Зима

высотного распределения средних значений и стандартных отклонений указанных метеорологических величин.

Таким образом, разработанные для региона Восточной Сибири локальные физико-статистические модели пограничного слоя атмосферы позволяют не только получить достоверное представление об особенностях вертикальной структуры полей температуры, влажности и ветра в каждом из выявленных однородных подрайонов, но и открывают широкие возможности для их практического использования при решении различных задач атмосферной оптики и лазерного дистанционного зондирования, где требуется ограниченное число статистических характеристик, обеспечивающих, без потери точности, адекватное описание этой структуры в любой точке взятого однородного подрайона.

1. *Зуев В.Е., Комаров В.С.* Статистические модели температуры и газовых компонент атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 264 с.
2. *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.
3. *Комаров В.С.* Статистика в приложении к задачам прикладной метеорологии. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 1997. 254 с.
4. *Комаров В.С., Ломакина Н.Я.* Статистические модели пограничного слоя атмосферы Западной Сибири. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2008. 222 с.
5. *Комаров В.С., Ломакина Н.Я.* Статистические модели высотного распределения температуры, влажности и ветра для пограничного слоя атмосферы Западной Сибири // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20, № 11. С. 1009–1012.
6. *Румицкий Л.З.* Математическая обработка результатов эксперимента. М.: Наука, 1971. 192 с.

*N.Ya. Lomakina, V.S. Komarov, S.N. Il'in. Statistical models of altitude distribution of temperature, humidity, and wind in the atmospheric boundary layer over Eastern Siberia.*

The applied climatic division of Eastern Siberia into districts was conducted on the base of the developed before original methodology of objective classification of the atmospheric boundary layer climates by the complex “temperature – humidity – wind”, realized with the method of principal components and special similarity criterions of average profiles and eigen values of correlation matrices. It was identified nine homogeneous regions for winter season and eight for summer one. Local statistical models are built for each region. These include profiles of altitude distribution of mean values, mean square deviations, and matrices of interlevel correlation of temperature, specific humidity, zonal and meridional wind velocity.