

КОНФЕРЕНЦИЯ D

ФИЗИКА ТРОПОСФЕРЫ

СУТОЧНЫЕ ВАРИАЦИИ ПЛОТНОСТИ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Шаманаева Л.Г.^{1,2}, Потекаев А.И.^{2,3}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия

²Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

³Сибирский физико-технический институт им. В. Д. Кузнецова Томского государственного университета,
г. Томск, Россия

E-mail: sima@iao.ru, kanc@spti.tsu

Ключевые слова: плотность кинетической энергии, турбулентность, акустическое зондирование

С использованием результатов акустического зондирования средних профилей и дисперсии трех компонентов скорости ветра в пограничном 200-метровом слое атмосферы, получены суточные вариации плотности кинетической энергии упорядоченного движения (связанного со средней скоростью ветра) и турбулентного движения воздушных масс для высот 50, 100, 150, и 200 м. Найдено, что плотность турбулентного компонента кинетической энергии значительно превышает плотность кинетической энергии упорядоченного движения, причем их значения растут с высотой, а их суточный ход характеризуется наличием нескольких минимумов и максимумов, появление и величины которых зависят от метеоусловий при проведении зондирования, наличия и характеристик облачности, солнечной радиации. Максимальные значения плотности кинетической энергии турбулентного движения наблюдались в полночь, также как и максимальные значения плотности кинетической энергии упорядоченного движения.

Кинетическая энергия имеет фундаментальное значение в исследованиях структуры и динамики атмосферного пограничного слоя (АПС) и прогнозировании метеоусловий через построение математической модели [1, 2]. Она является одной из важнейших характеристик АПС, определяющей как глобальную, так и локальную циркуляцию атмосферы, перенос момента количества движения, тепла, и влаги. Естественно, что она используется для расчета полей метеопараметров и диффузии загрязняющих примесей, а также для анализа и прогноза условий распространения акустического излучения. В гидродинамике кинетическая энергия, приходящаяся на единицу объема, двигающегося со скоростью $\vec{V} = (V_x, V_y, V_z)$, то есть, плотность кинетической энергии запишется как [1–3]

$$w = w_{MKE} + w_{TKE} = 0.5\rho \left[(\bar{V}_x^2 + \bar{V}_y^2 + \bar{V}_z^2) + (\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2) \right], \quad (1)$$

где w_{MKE} – плотность кинетической энергии, связанная со средней скоростью ветра, w_{TKE} – плотность кинетической энергии турбулентности, \bar{V}_x , \bar{V}_y , \bar{V}_z – средние значения, а

$\sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_z^2$ дисперсии x -, y -, и z -компонентов скорости ветра, ρ - плотность атмосферы.

Применение доплеровских минисодаров позволяет одновременно получать длинные временные ряды непрерывных наблюдений высотных профилей как средних значений, так и дисперсий трех компонентов скорости ветра в пограничном слое атмосферы с высоким временным и пространственным разрешением и использовать эти данные для оценки кинетической энергии. При этом компоненты w_{MKE} и w_{TKE} на заданной высоте z_j рассчитываются по данным минисодара следующим образом [4]:

$$w_{MKE} = \rho(z_j) \left[\langle V_x(z_j, t_k) \rangle^2 + \langle V_y(z_j, t_k) \rangle^2 + \langle V_z(z_j, t_k) \rangle^2 \right] / 2 =$$

$$= \frac{\rho(z_j)}{2N^2} \times \left[\left(\sum_{i=1}^N V_{xij}(z_j, t_k) \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N V_{yij}(z_j, t_k) \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N V_{zij}(z_j, t_k) \right)^2 \right], \quad (2)$$

$$w_{TKE}(z_j, t_k) = \rho(z_j) \left(\sigma_x^2(z_j, t_k) + \sigma_y^2(z_j, t_k) + \sigma_z^2(z_j, t_k) \right) / 2 = \frac{\rho(z_j)}{2N^2} \times$$

$$\times \left[\left(\sum_{i=1}^N V_{xij}(z_j, t_k) - \langle V_x(z_j, t_k) \rangle \right)^2 + \sum_{i=1}^N \left((V_{yij}(t_k)) - \langle V_y(z_j, t_k) \rangle \right)^2 + \sum_{i=1}^N \left((V_{zij}(t_k)) - \langle V_z(z_j, t_k) \rangle \right)^2 \right], \quad (3)$$

где $\rho(z_j)$ – плотность атмосферы в j -том строке z_j k -той серии измерений, начавшейся в момент времени t_k .

Цель данной работы - по результатам минисодарных измерений исследовать суточные вариации плотности кинетической энергии и ее компонентов: плотности кинетической энергии упорядоченного движения воздушных масс w_{MKE} (связанной со средней скоростью ветра) и плотности кинетической энергии турбулентного движения воздушных масс w_{TKE} (связанной с дисперсией скорости ветра).

В качестве исходных данных для получения оценок плотности кинетической энергии были взяты средние значения $\bar{V}_x, \bar{V}_y, \bar{V}_z$ и дисперсии $\sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_z^2$ трех компонентов скорости ветра по результатам непрерывных суточных измерений 14 сентября 2003 г. доплеровским мини-содаром AV4000 [5]. Рабочая частота минисодара составляла 4900 Гц, длительность импульса излучения 60 мс, период повторения импульсов составлял 4 сек, излучение в одном цикле зондирования последовательно посылалось в трех направлениях – вертикально и под углами $\alpha = 14^\circ$ к вертикали в двух взаимно ортогональных плоскостях, после чего рассчитывались ортогональные компоненты вектора скорости ветра и их дисперсии. При расчетах плотность атмосферы $\rho(z_k)$ задавалась для высот $z_k = 50, 100, 150, \text{ и } 200$ м в соответствии со стандартной моделью [6]. Обработывались

данные измерений в стробах $z_j, j = 1, \dots, 40$, вертикальной протяженностью $\Delta z = 5$ м в диапазоне высот 5–200 м. Обработывались серии из $N = 150$ профилей, что обеспечивало усреднение результатов за 10-минутный период. Суточные вариации двух компонентов плотности кинетической энергии представлены на Рис. 1.

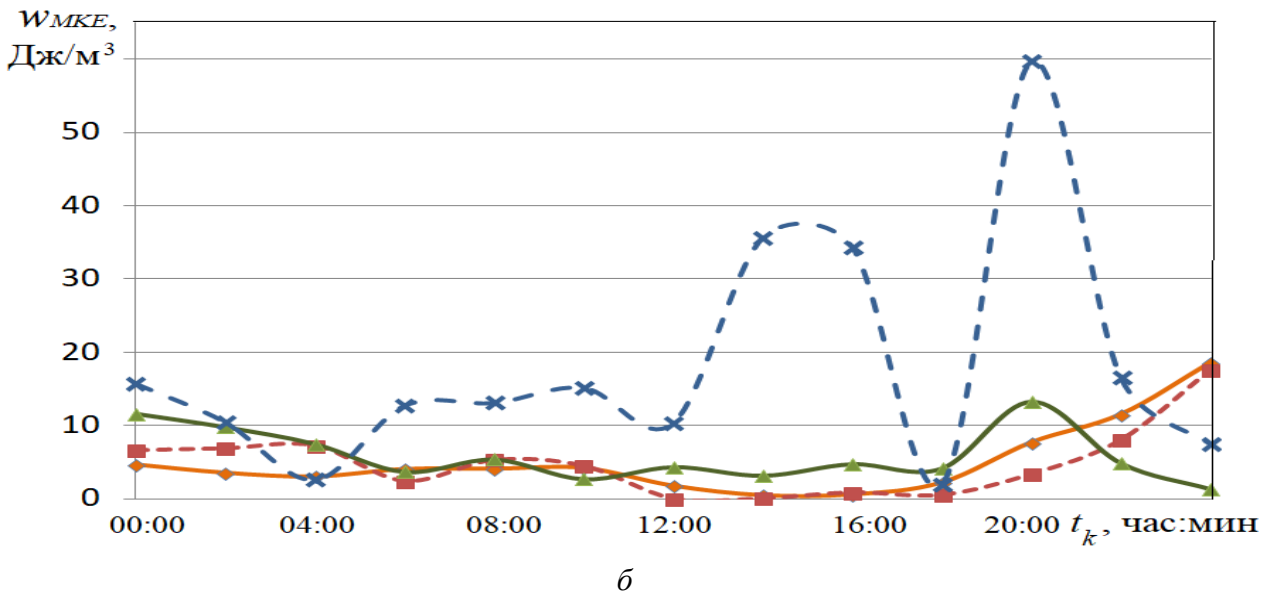
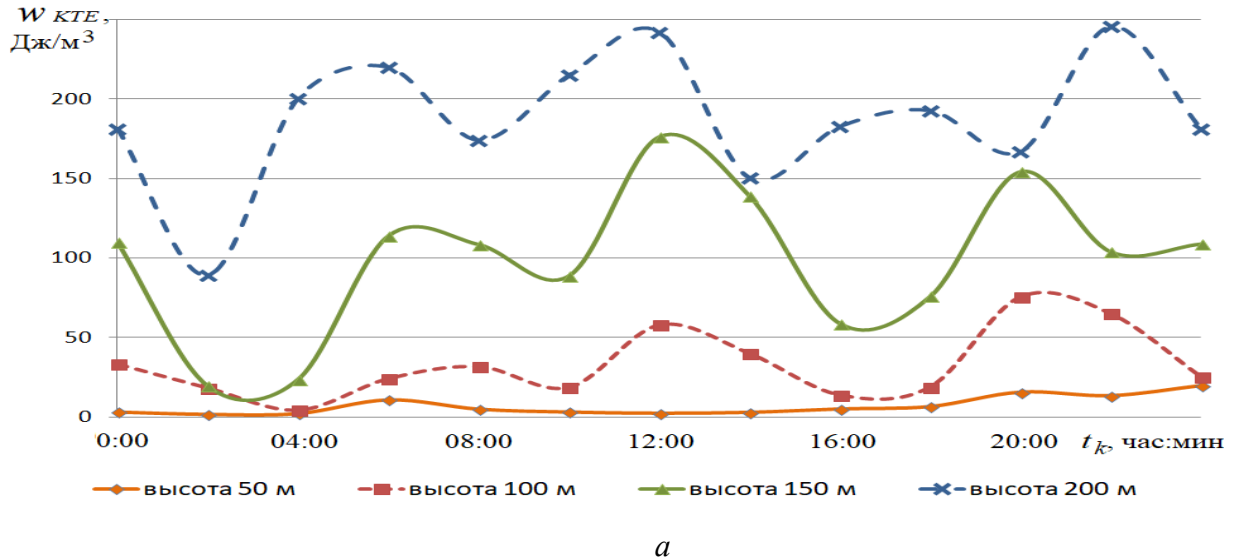


Рисунок 1 – Суточные вариации плотности кинетической энергии турбулентности (а) и плотности кинетической энергии среднего движения (б) для указанных высот по результатам акустического зондирования.

Из рисунка видно, что оба компонента плотности кинетической энергии растут с высотой. При этом следует отметить, что для высот более 50 м плотность кинетической энергии турбулентности существенно выше плотности кинетической энергии среднего движения, т.е. доминирующее влияние на высотах более 50 м оказывает именно турбулентность. Перепады значений плотности кинетической энергии турбулентности

существенно больше перепадов значений плотности кинетической энергии среднего движения. Временные интервалы значительного изменения плотности кинетической энергии турбулентности существенно меньше соответствующих интервалов плотности кинетической энергии среднего движения. Суточный ход w_{KTE} и w_{MTE} для высот наблюдения $z_k = 100, 150, \text{ и } 200$ м характеризуется наличием нескольких максимумов и минимумов, более выраженных для w_{KTE} , что отмечалось также в [3]. Для $z_k = 200$ м, наибольшее значение w_{KTE} наблюдается в полдень и в 22:00 местного времени, а наименьшее в 02:00. Из рисунка видно, что w_{MTE} растет со временем, достигая максимума в ночные часы. При этом для $z_k = 200$ м, суточный ход w_{MTE} имеет максимумы в дневное время (14:00) и вечерние часы (22:00) и минимум в утренние часы 04:00. Очевидно, что их появление и величины зависят от метеоусловий при проведении измерений, включая характеристики облачности и солнечной радиации.

Для высоты $z_k = 50$ м наблюдается обратная картина зависимости: плотность кинетической энергии турбулентности меньше плотности кинетической энергии среднего движения, т.е. доминирующее влияние на высотах менее 50 м оказывает среднее движение. Это, как можно полагать, связано с наличием ветрового сдвига на соответствующих профилях скорости ветра, при этом w_{MKE} для данной высоты растет со временем, достигая максимума к 24:00.

Таким образом, плотность турбулентного компонента кинетической энергии значительно превышает плотность кинетической энергии упорядоченного движения, причем их значения растут с высотой, а их суточный ход характеризуется наличием нескольких минимумов и максимумов, появление и величины которых зависят от метеоусловий при проведении зондирования, наличия и характеристик облачности, солнечной радиации. Максимальные значения плотности кинетической энергии турбулентности наблюдались в полночь, также как и максимальные значения связанной со средней скоростью ветра плотности кинетической энергии.

1. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974. 712 с.
2. Foken T. Micrometeorology. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. 306 p.
3. Haggagy M. A Sodar-Based Investigation of the Atmospheric Boundary Layer // Berichte des Meteorologischen Institutes des Universität Freiburg. 2003. № 8. 235 p.
4. Шаманаева Л.Г., Потеев А.И., Красненко Н.П., Канегешева О.Ф. Динамика кинетической энергии в атмосферном пограничном слое по результатам минисодарных измерений // Известия вузов. Физика. 2018. Т. 61. № 12. С. 126–130.
5. <http://minisodar.org>.
6. Атмосфера стандартная. Параметры / ГОСТ 4401-81. М: Изд-во стандартов, 2004.