

PROCEEDINGS OF SPIE

27th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics

Gennadii G. Matvienko
Oleg A. Romanovskii
Editors

5–9 July 2021
Moscow, Russian Federation

Organized by

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS (Russian Federation)
A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS (Russian Federation)
M.A. Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics RAS (Russian Federation)
Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS (Russian Federation)
V.M. Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory SB RAS (Russian Federation)

Sponsored by

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS (Russian Federation)
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (Russian Federation)
"Atmosphere" an Open Access Journal by MDPI (Switzerland)
SOLAR LASER SYSTEM (Belarus)
Photonics Journal (Russian Federation)

Published by
SPIE

Volume 11916
Part One of Three Parts

Proceedings of SPIE 0277-786X, V. 11916

SPIE is an international society advancing an interdisciplinary approach to the science and application of light.

КОНФЕРЕНЦИЯ D

ФИЗИКА ТРОПОСФЕРЫ

ДИНАМИКА КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МИНИСОДАРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

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

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

²Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия

³Сибирский государственный медицинский университет, г. Томск, Россия

e-mail: potekaev@spti.tsu.ru, sima@iao.ru, kulaginavv@mail.ru

В докладе анализируется пространственно-временная динамика полной кинетической энергии в атмосферном пограничном слое в диапазоне высот 5–200 м по результатам постобработки временных рядов высотных профилей как средних значений, так и дисперсий трех компонент скорости ветра, измеренных минисодаром AV4000.

Кинетическая энергия играет важную роль в физике атмосферного пограничного слоя (АПС) [1–3]. Она является одной из важнейших характеристик АПС, определяющей как глобальную, так и локальную циркуляцию атмосферы, перенос момента количества движения, тепла и влаги. Более того, она необходима для прогноза и расчета полей метеопараметров, диффузии загрязняющих примесей, а также для анализа и прогноза воздействия движения воздушных масс на находящиеся в АПС объекты. В последнее время важность исследований физики АПС значительно возросла в связи с революционным развитием и применением легких беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [4], которые, как правило, изготавливаются из легких материалов, используются в АПС (особенно микро- и мини-размерные легкие БПЛА) и, таким образом, подвержены сильному влиянию плотности потока энергии воздушных масс на различных высотах.

Для измерения средних значений и дисперсии компонентов скорости ветра в АПС в настоящее время разработан ряд методов, которые используют лидары, содары и радиолокаторы [5–8]. Применение доплеровских минисодаров позволяет одновременно получать длинные временные ряды непрерывных наблюдений высотных профилей как средних значений, так и дисперсий трех компонентов скорости ветра [3, 7, 9]. При этом получают данные с высоким пространственным (до нескольких метров) и временным разрешением (статистически надежные профили скорости ветра доступны с осреднением, как правило, от 1 до 30 мин) и анализировать их пространственно-временную динамику. Это позволяет использовать данные минисодарных измерений для оценки кинетической энергии как средней, так и турбулентной компонент скорости ветра. Так, в [9] нами были представлены результаты анализа пространственно-временной динамики кинетической энергии атмосферы на основе

постобработки данных минисодарных измерений. Цель данной работы – по результатам постобработки минисодарных измерений исследовать суточную почасовую динамику кинетической энергии $E(z, t)$ и ее компонент $E_{\text{МКЕ}}$ (связанной со средней скоростью ветра) и $E_{\text{ТКЕ}}$ (связанной с дисперсией скорости ветра) в нижнем слое атмосферы для высот $z = 5\text{--}200$ м.

Кинетическая энергия АПС $E_{\Sigma} = mV^2/2$ определяется энергией движения воздушных масс – энергией ветра. В дальнейшем будем использовать плотность кинетической энергии АПС, которую определим как $E = E_{\Sigma} / m$, измеряя ее в единицах $\text{м}^2/\text{с}^2$ ($\text{м}^2/\text{с}^2 = \text{Дж}/\text{кг}$). Естественно, что полученные для плотности кинетической энергии закономерности будут полноправно относиться к кинетической энергии. По этой причине, будем применять термин «кинетическая энергия», подразумевая плотность кинетической энергии. Она равна сумме двух составляющих: кинетической энергии упорядоченного движения $E_{\text{МКЕ}}$ (связанной со средней скоростью ветра) и кинетической энергии турбулентного движения воздушных масс $E_{\text{ТКЕ}}$. Величина $E_{\text{ТКЕ}}$ связана с дисперсией скорости ветра и определяется ею. Тогда полную кинетическую энергию можно представить в виде [1–3]

$$E = (E_{\text{МКЕ}} + E_{\text{ТКЕ}}) / m = (\bar{V}_x^2 + \bar{V}_y^2 + \bar{V}_z^2) / 2 + (\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2) / 2, \quad (1)$$

где $\bar{V}_x, \bar{V}_y, \bar{V}_z$ – средние значения, а $\sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_z^2$ – дисперсии x -, y - и z -компонент скорости ветра. В этом случае изменения значений стоящих в скобках выражений будут определять значения $E_{\text{МКЕ}}$ и $E_{\text{ТКЕ}}$, соответственно.

Для анализа пространственно-временной динамики атмосферной кинетической энергии. нами использовались результаты измерения профилей скорости ветра и дисперсии ее компонент трехлучевым доплеровским моностатическим коммерческим минисодаром AV4000 с рабочей частотой 4900 Гц и длительностью импульса излучения $\tau = 60$ мс, и периодом посылки импульсов 4 с [10]. При этом излучение посылается в трех направлениях – вертикальном и наклонных под углами 18° к вертикали в двух взаимно-ортогональных плоскостях. Обрабатывались серии из $N = 150$ профилей, что обеспечило усреднение полученных результатов за 10 мин. Расчетные формулы приведены в [11].

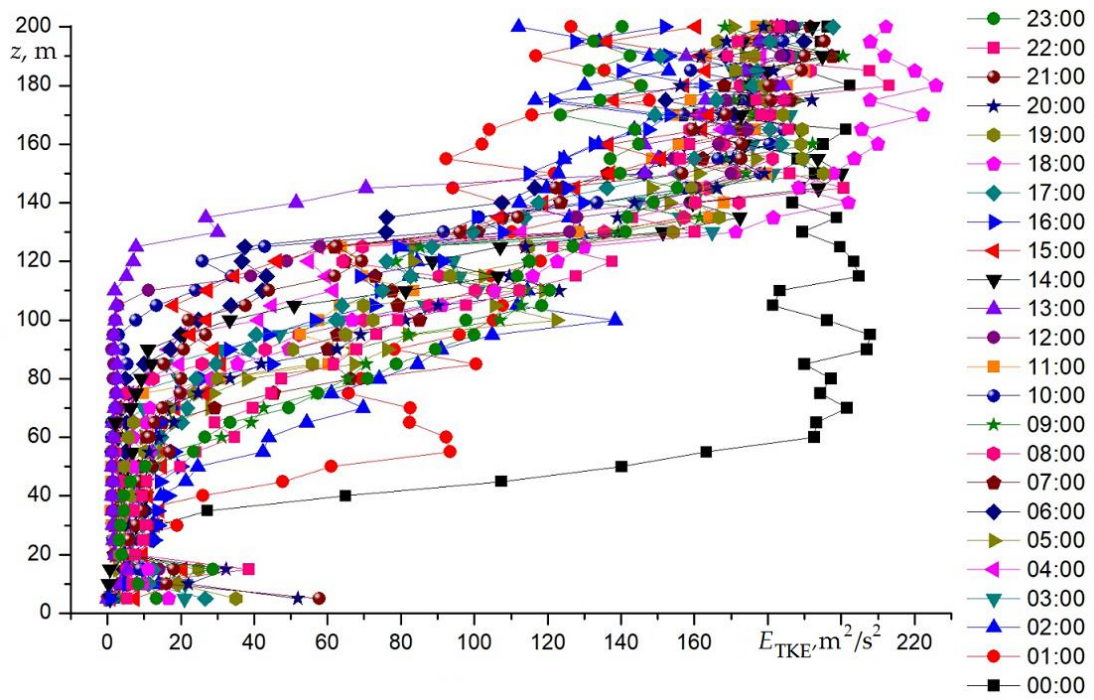
Обрабатывались данные измерений в окрестности г. Санта Клари́та, США [12] над ровной подстилающей поверхностью без высокой растительности в течение шести дней с 12 по 17 сентября 2006 г. Погода была сухая, теплая, солнечная. На рис. 1 представлены вертикальные профили компонент кинетической энергии по результатам постобработки минисодарных данных. Время начала 10-минутных серий измерений указано справа на графиках. На рисунке представлен суточный почасовой ход компонент кинетической энергии за 16 сентября.

Обращает на себя внимание малый разброс значений $E_{ТКЕ}$ до высоты $z \approx 50$ м (~ 20 м²/с²), а наибольший на высотах от 50 до 150 м от нескольких м²/с² в 10:00 местного времени на высоте 80 м до $E_{ТКЕ \max} = 220$ м²/с² в 18:00 на высоте $z \approx 170$ м. С 03:00 до 15:00, вклад кинетической энергии среднего движения в нижнем 100-метровом слое превышает вклад турбулентного компонента кинетической энергии, что связано с наличием ветрового сдвига на соответствующих профилях скорости ветра. Из рисунка также видно, что высотный профиль $E_{МКЕ}$ растет в утренние часы с 05:00, достигает наибольших значений в 13:00, и затем уменьшается до полуночи. Наибольшее значение турбулентной компоненты кинетической энергии на высоте $z = 180$ м наблюдается в 18:00, а наименьшее в 23:00 местного времени.

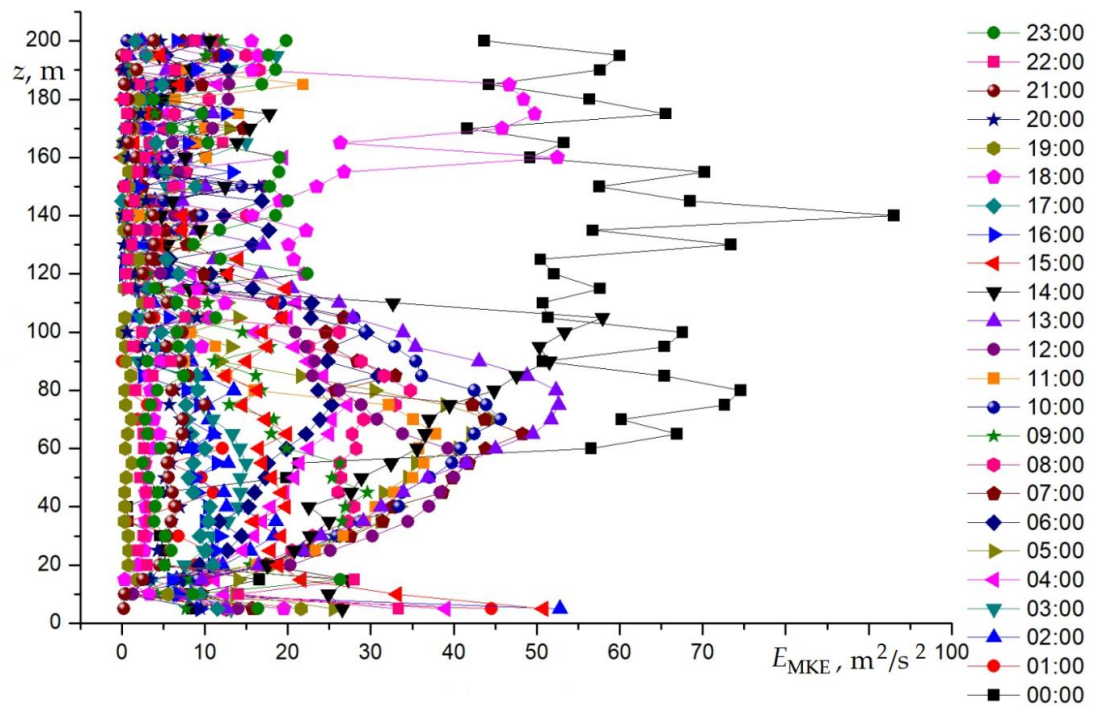
Аналогичное поведение компонентов кинетической энергии отмечалось в [3] по результатам измерений содаром FAS64 для трех диапазонов высот $z = 20\text{--}50$, $50\text{--}80$ и $80\text{--}110$ м. По данным [3], суточный ход кинетической энергии также характеризовался наличием минимумов и максимумов. Очевидно, что их появление и величины зависят от метеоусловий при проведении измерений, наличия и характеристик облачности, солнечной радиации.

На протяжении 12, 14, 15 и 16 сентября 2006 г. суммарная энергия турбулентности изменялась от нескольких десятков до нескольких сотен м²/с², что согласуется с имеющимися литературными данными [3, 13]. Из рисунка 1 видно, что кинетическая энергия турбулентного движения растет с высотой наблюдения z . В приземном слое, до высот 25–50 м, она слабо зависит от z . Так, 12 сентября она изменяется от 10 до 90 м²/с² на $z = 25$ м, а 14, 15 и 16 сентября слабо меняется с высотой до $z = 50$ м. Разброс значений кинетической энергии также увеличивается с ростом z , а на высоте 200 м она меняется уже от 70 до 200 м²/с², т.е. почти утраивается в течение суток. Аналогичное поведение кинетической энергии отмечено в [3, 14].

Таким образом, на основе приведенных данных можно заключить, что величина кинетической энергии в приземном слое до высот 25–100 м слабо зависит от высоты наблюдения z и растет при дальнейшем увеличении z . Суточный ход радиационного нагрева поверхности земли обуславливает наличие минимумов и максимумов кинетической энергии, время появления которых зависит от метеорологических условий.



а)



б)

Рисунок 1 – Суточная почасовая динамика атмосферной кинетической энергии: а) турбулентная кинетическая энергия $E_{ТКЕ}$ и б) средняя кинетическая энергия $E_{МКЕ}$ по результатам постобработки данных минисодара AV4000

1. Lundquist J.K., Clifton A., Dana S., et al. Wind Energy Instrumentation Atlas. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-5000-68986, 2019; <https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/68986/pdf>.

2. Foken T. Micrometeorology. Berlin; Heidelberg: Springer Verlag, 2008. 306 p.

3. *Haggagy M.E.* A Sodar-Based Investigation of the Atmospheric Boundary Layer. Berichte des Meteorologischen Institutes der Universität Freiburg. 2003. No. 8. 235 p.
4. *Valavanis K.P., ed.* Unmanned Aerial Vehicle. Netherlands Springer, 2011. 585 p.
5. *Debnath M. et al.* Assessment of virtual towers performed with scanning wind lidars and Ka-band radars during the XPIA experiment // Atmos. Meas. Tech. 2017. V.10. P. 1215–1227.
6. *Courtney M., Wagner R., and Lindelöw P.* Commercial lidar profilers for wind energy. A comparative guide. In Proc. EWEC 2008.
7. *Emeis S.* Wind Energy Meteorology: Atmospheric Physics for Wind Power Generation. Springer Science & Business Media. 2012. 202 p.
8. *Emeis S.* Surface-Based Remote Sensing of the Atmospheric Boundary Layer. Springer Science & Business Media. 2010. 181 p.
9. *Shamanaeva L.G., Potekaev A.I., Krasnenko N.P., Kapegesheva O.F.* Dynamics of the kinetic energy in the atmospheric boundary layer from the results of minisodar measurements // Russ. Phys. J. 2018. V.61. P. 2282–2287.
10. Doppler MiniSoDAR System. Operation and Maintenance Manual. 2008. Atmospheric Systems Corporation. 44 p.
11. *Shamanaeva L.G., Potekaev A.I., Kalugina V.V.* Diurnal dynamics of the reduced turbulent kinetic energy in the atmospheric boundary layer from minisodar measurements // Sciforum Electronic Conference Series. V. 3. Article ID: sciforum-038292, 6 p.
12. *Underwood K.H., Shamanaeva L.G.* Turbulence characteristics from minisodar data // Russ. Phys. J. 2010. V.53. P. 526–532.
13. *Тарасенков М.В., Красненко Н.П., Шаманаева Л.Г.* Программа построения высотно-временного распределения компонент скорости ветра в нижней атмосфере по данным акустического зондирования. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016619428. Дата государственной регистрации в реестре программ для ЭВМ 18 августа 2016 г.
14. *Greenhut G.K., Mastrantonio G.* Turbulence kinetic energy budget profiles retrieved from Doppler sodar measurements // J. Appl. Meteorol. 1989. V. 28. P. 99–106.