

## **Высотно-временная динамика средней и турбулентной компонент кинетической энергии атмосферы по данным минисодара**

Н.П. Красненко<sup>1,2</sup>, А.И. Потекаев<sup>3,4</sup>, Л.Г. Шаманаева<sup>3,5</sup>

<sup>1</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,  
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3

<sup>2</sup>Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40

<sup>3</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

<sup>4</sup>Томский научный центр СО РАН,  
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/4

<sup>5</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН,  
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1.

E-mail: krasnenko@imces.ru, potekaev@spti.tsu.ru, sima@iao.ru

*На основе пост-обработки данных измерений высотно-временной динамики трех компонент скорости ветра и их дисперсий минисодаром AV4000 в 200-метровом слое атмосферы, проведены статистические оценки турбулентной,  $E_{ТКЕ}$ , и средней,  $E_{МКЕ}$ , компонент кинетической энергии. Показано, что за суточный период непрерывных наблюдений, кинетическая энергия турбулентности в приземном слое до высот  $\sim 50$  метров мала. В диапазоне высоты от 50 до 100 м, турбулентная кинетическая энергия  $E_{ТКЕ}$  росла, причем на высотах более 100 м, скорость роста возрастала, а наибольшие значения  $E_{ТКЕ}$  наблюдались в интервале высот 150–200 м. Выявлено, что на результаты наблюдения существенное влияние оказывает время суток. Однако в любое время суток наибольшая энергия турбулентностей локализуется в интервале высот  $\sim 100$ –200 м, который и представляет наибольшую опасность для легких малоразмерных летательных аппаратов. Предложен и проиллюстрирован подход к выявлению времени и высоты наибольшей и наименьшей кинетической энергии ветра по данным минисодара, т.е., наиболее и наименее благоприятного времени и высотного интервала для полетов легких летательных аппаратов.*

*Ключевые слова: минисодар, пограничный слой атмосферы, динамика компонентов кинетической энергии*

## **Spatiotemporal dynamics of the mean and turbulent components of the kinetic energy of the atmosphere from minisodar data**

N.P. Krasnenko<sup>1,2</sup>, A.I. Potekaev<sup>3,4</sup>, L.G. Shamanaeva<sup>3,5</sup>

<sup>1</sup>Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,

<sup>2</sup>Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,

<sup>3</sup>Tomsk State University,

<sup>4</sup>Tomsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,

<sup>5</sup>V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

*Based on post-processing of the data of measurements of altitude-time dynamics of the three wind velocity vector components and their variances with an AV4000 minisodar in a lower 200-meter layer of the atmosphere, statistical estimates are carried out of the turbulent,  $E_{ТКЕ}$ , and mean,  $E_{МКЕ}$ , kinetic energy components. It is shown that for the 24 hour period of continuous observations, the turbulent*

kinetic energy in the near-ground layer to altitudes of ~50 m is small. At altitudes from 50 to 100 m, the turbulent kinetic energy  $E_{TKE}$  increased, at altitudes exceeding 100 m, the rate of its growth increased, and the maximum  $E_{TKE}$  values were observed at altitudes of 150–200 m. It was revealed that the results of observations are significantly affected by the time of day. However, at any time the maximum turbulent kinetic energy is localized at altitudes of ~100–200 m that represents the greatest danger to light unmanned flying vehicles. The approach to the detection of time and altitudes of the maximum and minimum kinetic wind energy from minisodar data, i.e., the most and least favorable time and altitude range for flights of the light unmanned vehicles has been proposed and illustrated. Keywords: minisodar, boundary layer of the atmosphere, dynamics of the kinetic energy components

## Введение

Кинетическая энергия играет важную роль в физике атмосферного пограничного слоя (АПС) [1–4]. 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 метеорологических параметров, диффузии загрязняющих примесей. Ветер и турбулентность, воздействуя на существующие и возводимые высотные здания [5], мосты и беспилотные летательные аппараты (БПЛА) [6, 7] могут вызывать аварийные ситуации. Они также определяют энергетический потенциал ветрогенераторов [8, 9]. Все это определяет научный и практический интерес к исследованию характеристик кинетической энергии атмосферы в нижнем, наиболее изменчивом, пограничном слое атмосферы.

В данной работе приводятся статистические оценки средней и турбулентной компонент кинетической энергии, полученные пост-обработкой данных измерений за одни сутки высотно-временной динамики трех компонент скорости ветра и их дисперсий минисодаром AV4000 в пограничном слое атмосферы (ПСА) в интервале высот от 5 до 200 м.

## Постановка задачи

Кинетическая энергия атмосферы  $E_{\Sigma} = mV^2 / 2$  определяется энергией движения воздушных масс – энергией ветра  $V$ . В дальнейшем будем использовать понятие плотности кинетической энергии (на единицу массы воздуха  $m$ ), 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 и к полной кинетической энергии атмосферы. По этой причине, ниже используем 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, стоящие в скобках выражения будут определять значения  $E_{\text{МКЕ}}$  и  $E_{\text{ТКЕ}}$ , соответственно.

## Аппаратура и методика измерений и обработки данных

Измерения в АПС компонент вектора скорости ветра, также определение их средних значений и дисперсий возможно с помощью лидаров [14, 15], радаров [16–18]

или содаров [3, 11–13, 19–22]. Каждый тип дистанционных измерителей имеет свои преимущества и недостатки. На наш взгляд, использование акустического зондирования с применением доплеровских содаров является более предпочтительным для исследования структуры и динамики нижнего слоя атмосферы. Данные содарных измерений (длинные временные ряды непрерывных наблюдений вертикальных профилей компонент скорости ветра и их дисперсий) обеспечивают высокое пространственное и временное разрешение. Статистически достоверные профили компонент скорости ветра доступны с усреднением, как правило, от 1 до 30 мин. Кроме того, высокочастотные содары (минисодары) позволяют получать высокое пространственное (вертикальное) разрешение, которое позволяет анализировать тонкую высотно-временную структуру турбулентных течений.

Исходя из вышесказанного, для оценки высотно-временной динамики компонент средней и турбулентной кинетической энергии, мы использовали данные измерений минисодара с рабочей частотой 4900 Гц, с вертикальным разрешением  $\Delta z = 5$  м и периодом зондирования 4 с. Диапазон высот измерений составлял от 5 до 200 м. Акустическая антенна представляла собой решетку из 50 громкоговорителей, используемых как для передачи, так и для приема звуковых импульсов. Эта акустическая антенная решетка формировала три независимых луча: один вертикальный и два других под углом возвышения  $76^\circ$  в двух взаимно ортогональных плоскостях. Длительность импульса минисодара составляла 60 мс. Использовалось пороговое устройство для отсеки данных с малым отношением сигнал/шум. Паспортная погрешность минисодара при измерении компонент вектора ветра менее 0.2 м/с. Минисодар обеспечивал измерение радиальных компонент скорости ветра во всех трех каналах каждые 4 с, которые использовались для расчета компонент вектора скорости ветра и их дисперсий. Чтобы исследовать суточную часовую динамику, мы отбирали и обрабатывали 150 вертикальных профилей, записанных с начала каждого часа в течение 10 минут.

Высотные профили трех компонент скорости ветра  $V_{mij}(z_k)$ , где  $m = x, y, z$ ,  $i$  – текущий номер измерения в серии и  $j = 1, \dots, 39$ , измерялись в 39 строках  $z_j$  принимаемых сигналов вертикальной протяженностью  $\Delta z = 5$  м в диапазоне высот 5–200 м. Обрабатывались серии из  $N = 150$  профилей, что обеспечивало усреднение полученных результатов за период 10 минут. С использованием формулы (1), анализировалась высотно-временная динамика турбулентной и средней компонент кинетической энергии атмосферы по результатам минисодарных измерений. Компоненты  $E_{МКЕ}(z_j, t_k)$  и  $E_{ТКЕ}(z_j, t_k)$  в  $j$ -ом строке,  $j = 1, \dots, 39$ , в  $k$ -ой измерительной серии, начавшейся в момент времени  $t_k$ , вычислялись по формулам [13]:

$$E_{МКЕ}(z_j, t_k) = \frac{0.5}{N^2} \left[ \left( \sum_{i=1}^N V_{xij}(z_j, t_k) \right)^2 + \left( \sum_{i=1}^N V_{yij}(z_j, t_k) \right)^2 + \left( \sum_{i=1}^N V_{zij}(z_j, t_k) \right)^2 \right], \quad (6)$$

$$E_{ТКЕ}(z_j, t_k) = \frac{0.5}{N^2} \left[ \left( \sum_{i=1}^N V_{xij}(z_j, t_k) - \langle V_x(z_j, t_k) \rangle \right)^2 + \sum_{i=1}^N \left( (V_{yij}(t_k)) - \langle V_y(z_j, t_k) \rangle \right)^2 + \sum_{i=1}^N \left( (V_{zij}(t_k)) - \langle V_z(z_j, t_k) \rangle \right)^2 \right], \quad (7)$$

где  $V_{mij}(z_j, t_k)$ ,  $m = x, y, z$  – компоненты скорости ветра, измеренные минисодаром в  $j$ -ом стробе на высоте  $z_j$  в  $k$ -ой серии измерений, начавшейся в момент времени  $t_k$ , и  $\langle V_m(z_j, t_k) \rangle$  их 10-минутное среднее.

Ниже представлены результаты обработки данных и анализа высотно-временной динамики компонент кинетической энергии за один из дней измерительного периода - 16 сентября. Измерения проводились над ровной подстилающей поверхностью без высокой растительности. Погода была сухая, теплая, солнечная.

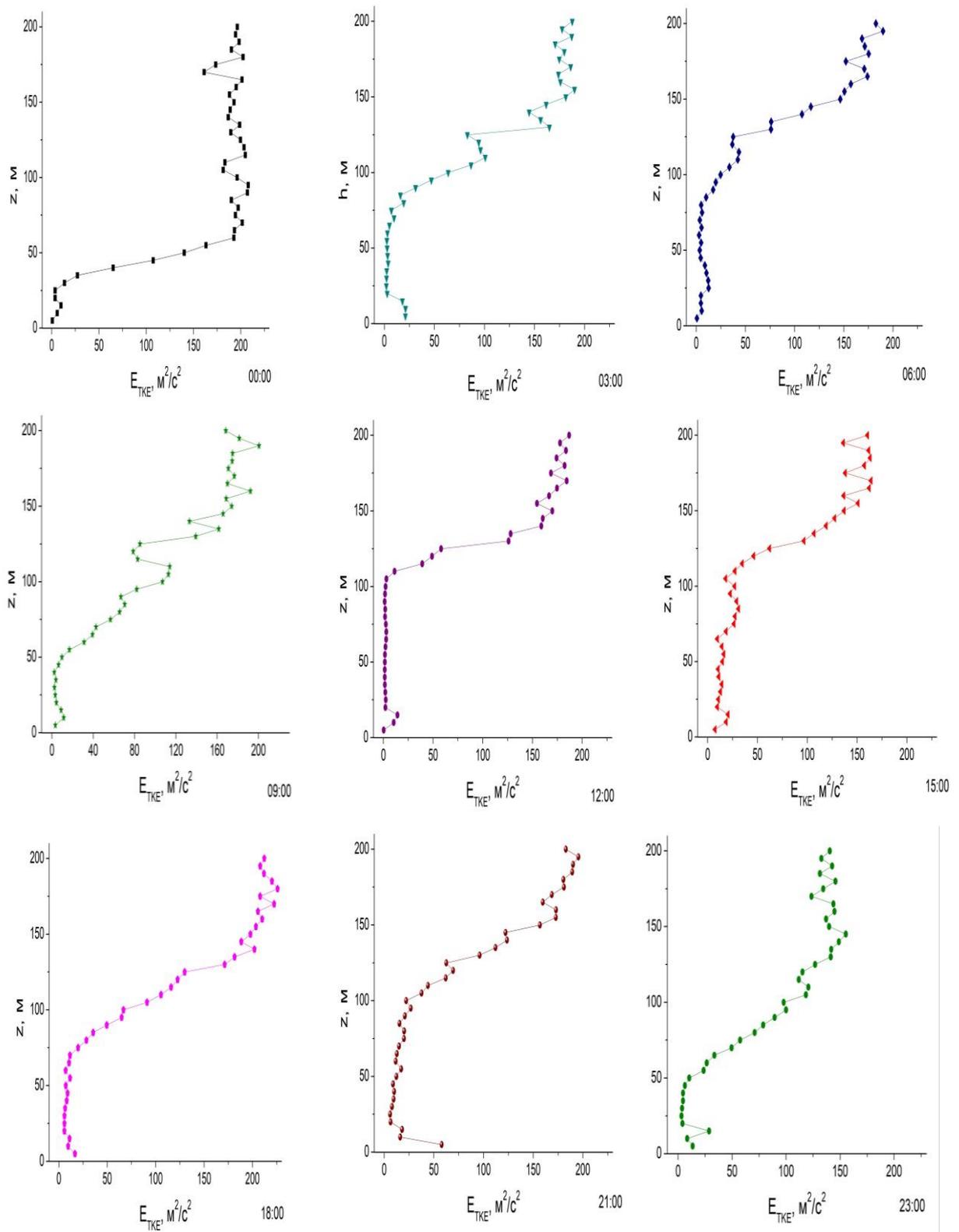
### **Высотно-временная динамика турбулентной кинетической энергии**

Высотно-временная зависимость турбулентной кинетической энергии  $E_{ТКЕ}$  показана на рис. 1. На высотном ходе  $E_{ТКЕ}$  выделяются четыре характерных слоя: приземный слой I с верхней границей на высоте  $z_I = 15$ –20 м, поверхностный слой II с  $z_{II} = 75$  м, слой III линейного роста  $E_{ТКЕ}$  до высоты  $z_{III} = 100$ –150 м, и переходный слой IV для больших высот.

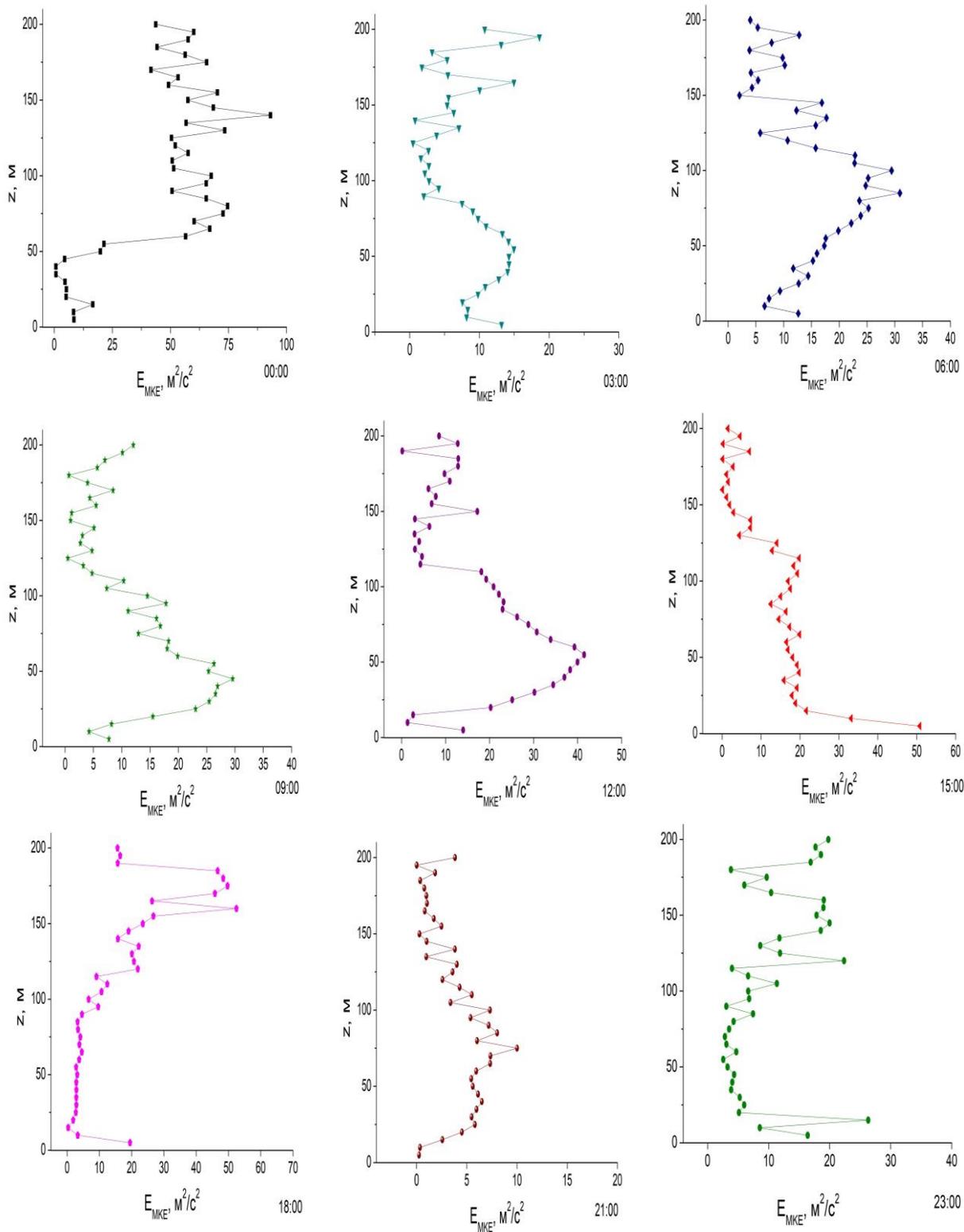
В слое I,  $E_{ТКЕ}$  вначале растет с 3 до 16–20  $\text{м}^2/\text{с}^2$  с высотой с полуночи до 16:00; в вечернее время, с 17:00 до 21:00 местного времени, максимальное значение  $E_{ТКЕ}$  достигает 50  $\text{м}^2/\text{с}^2$  и начинает уменьшаться с высотой; наиболее существенные изменения ТКЕ в слое I наблюдались в вечерние часы (с 17:00 до 21:00), когда  $E_{ТКЕ}$  уменьшается с высотой от 60  $\text{м}^2/\text{с}^2$  до 6  $\text{м}^2/\text{с}^2$ . В слое II,  $E_{ТКЕ}$  остается практически постоянной, но высоты нижней и верхней границ этого слоя варьируют в зависимости от времени. В слое III,  $E_{ТКЕ}$  линейно растет с высотой независимо от времени суток, с 20–40  $\text{м}^2/\text{с}^2$  на нижней границе слоя до 180–210  $\text{м}^2/\text{с}^2$  на верхней границе. В переходном слое IV,  $E_{ТКЕ}$  изменяется незначительно. На высотах более 50 м, также отчетливо видны тонкие слои с повышенной величиной  $E_{ТКЕ}$ , отмеченные также в [23]; при этом высотное разрешение используемого нами метода позволяет оценивать вертикальную протяженность и высоты слоев повышенной кинетической энергией.

### **Высотно-временная динамика средней кинетической энергии**

Высотно-временная динамика средней кинетической энергии  $E_{МКЕ}$  показана на рис. 2. В полночь,  $E_{МКЕ}$  растет в диапазоне высот 50–70 м на 25  $\text{м}^2/\text{с}^2$ . После полуночи, с 01:00 до 3:00 местного времени,  $E_{МКЕ}$  вначале резко уменьшается с увеличением высоты зондирования, а затем ее разброс резко уменьшается, оставаясь в пределах 10  $\text{м}^2/\text{с}^2$ . В утренние часы, характер высотной зависимости  $E_{МКЕ}$  изменяется. В нижнем слое до 10–15 м,  $E_{МКЕ}$  уменьшается с высотой в течении всего периода наблюдения. В диапазоне высот 50–70 м, наблюдается быстрый рост  $E_{МКЕ}$  до 40–50  $\text{м}^2/\text{с}^2$  с увеличением высоты зондирования. В диапазоне высот от 50–70 до 100–120 м, наблюдается резкое уменьшение  $E_{МКЕ}$ . Выше 100–120 м, существенных изменений не наблюдалось. С 15:00 до 18:00, характер высотной зависимости не изменяется. В приземном слое, до высот 15–20 м, наблюдается уменьшение энергии с ростом высоты. Однако выше 150 м, отчетливо наблюдается слоистая структура. С 18:00 до 20:00, наблюдается уменьшение  $E_{МКЕ}$  с ростом высоты зондирования. После заката солнца, с 20:00 до 21:00 в диапазоне высот 50–75 м,  $E_{МКЕ}$  растет до 10  $\text{м}^2/\text{с}^2$ .



**Рис. 1. Суточная динамика турбулентной кинетической энергии  $E_{ТКЕ}$ . Усреднение 10 мин, время начала серии измерений в часах указано справа под графиками**



**Рис. 2. Суточная динамика средней кинетической энергии ветра  $E_{MKE}$ , в  $m^2/c^2$ . Усреднение 10 мин, время начала серии измерений в часах указано справа под графиками**

## **Заключение**

Таким образом, предложен подход, который позволяет на основе минисодарных измерений в пограничном слое атмосферы проанализировать высотно-временную динамику компонент турбулентной и средней кинетической энергии атмосферы. Полученные результаты показывают, что за период непрерывных суточных наблюдений, энергия турбулентности мала до высот ~50 метров. Естественно полагать, что данная ситуация связана с тем, что в приземном слое из-за взаимодействия воздушных масс с земной поверхностью существенно замедляются скорость ветра и турбулентное движение.

Кинетическая энергия турбулентных перемещений воздушных масс быстро возрастает при увеличении высоты от 50 до 100 метров. Стремительное возрастание энергии турбулентности происходит на высотах более 100 метров, а наибольшие ее значения наблюдаются в диапазоне высот 150–200 м. Отсюда следует, что турбулентные потоки оказывают наибольшее воздействие в интервале высот 150–200 м, которые представляют наибольшую опасность для легких беспилотных летательных аппаратов.

Следует особо подчеркнуть, что время суток не оказывает существенного влияния на значения кинетической энергии турбулентности вплоть до высот 50–100 м. Это связано с тем, что до этих высот, энергия турбулентности практически не меняется со временем суток. В то же время, в любое время суток наибольшая плотность турбулентной энергии наблюдается в диапазоне 100–200 м, который и представляет наибольшую опасность с точки зрения воздействия движения воздушных масс.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Российской академии наук в рамках государственного задания ИМКЭС СО РАН и ИОА СО РАН.*

## **Литература**

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 des Universität Freiburg. 2003. No. 8. 235 p.
4. Fangwei Hou; Mohammad Jatari. Investigation approaches to quantify wind-induced load and response of tall buildings: A review // Sustain. Cities Soc. 2020. 62. 102376.
5. Bo Hang Wang; Dao Bo Wang; Zain Anwar Ali; Bai Ting Ting; Hao Wang. An overview of various kinds of wind effects on unmanned aerial vehicle // Meas. Control. 2019. 52(7-8). P. 731–739.
6. Valavanis K.P., ed. Unmanned Aerial Vehicle. Netherlands Springer, 2011. 585 p.
7. Peña A., Hasager C. B., Badger M., Barthelmie R. J.,; Bingöl F., Cariou J-P, Wagner R. Remote Sensing for Wind Energy / DTU Wind Energy-E-Report-0084(EN). Technical University of Denmark. 2015. 260 pp.
8. Monzikova A.K., Kudryavtsev V.N., Larsen E.S., Chapron B. Estimation wind power potential of the Gulf of Finland // Scientific Notes of Russian State Hydrometeorological University. 2013. No. 30. P. 116–133.
9. Valdecabres L., Nygaard N.G., Vera-Tudela L., Von Bremen L., Kühn M. On the use of dual Doppler radar measurements for very short-term wind power forecasts // Remote Sens. 2018. 10(11). P.1701. <https://doi.org/10.3390/rs/10111701>.

10. 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.
11. Potekaev A.I., Shamanaeva L.G., Kulagina V.V. Spatiotemporal dynamics of the kinetic energy in the atmospheric boundary layer from minisodar measurements // *Atmosphere*. 2021, 12(4). 421. <https://doi.org/10.3390/atmos12040421>.
12. Potekaev A.I., Krasnenko N.P., Shamanaeva L.G. Diurnal dynamics of the Umov kinetic energy density vector in the atmospheric boundary layer from minisodar measurements // *Atmosphere*. 2021. 12(10), 1347. <https://doi.org/10.3390/atmos12101347>.
13. Банах В.А., Смалихо И.Н. Когерентные доплеровские ветровые лидары в турбулентной атмосфере. Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2013. 304 с.
14. Bolbasova L.A., Shikhovtsev A.Yu., Kopylov E.A., Selin A.A., Lukin V.P., Kovadlo P.G. Daytime optical turbulence and wind speed distributions at the Baikal Astrophysical Observatory // *MNRAS*. 2019. No.482. P. 2619–2626.
15. Valldecabres L., Nygaard N.G., Vera-Tudela L., Von Bremen L., Kühn M. On the use of dual Doppler radar measurements for very short-term wind power forecasts // *Remote Sens*. 2018. 10(11). P.1701. <https://doi.org/10.3390/rs/10111701>.
16. Горелик А.Г., Коломиец С.Ф., Щукин Г.Г. Информационные возможности ветровых профайлеров при зондировании атмосферы // *Ученые записки Российского гидрометеорологического университета*. 2011, № 18, с. 70-89.
17. Готюр И.А., Жуков В.Ю., Кулешов Ю.В., Чернышев С.В., Щукин Г.Г. Доплеровский радиолокационный метод определения характеристик поля ветра и некоторые результаты // *Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета*. – 2011. – №. 21. – С. 66-75.
18. Doppler MiniSoDAR System. Operation and Maintenance Manual. 2008. Atmospheric Systems Corporation. 44 p.
19. Underwood K.H., Shamanaeva L.G. Turbulence characteristics from minisodar data // *Russ. Phys. J.* 2010. **53**. P. 526–532.
20. Emeis S. *Wind Energy Meteorology: Atmospheric Physics for Wind Power Generation*. Springer Science & Business Media. 2012. 202 p.
21. Emeis S. *Surface-Based Remote Sensing of the Atmospheric Boundary Layer*. Springer Science & Business Media. 2010. 181 p.
22. Greenhut G.K., Mastrantonio G. Turbulence kinetic energy budget profiles retrieved from Doppler sodar measurements // *J. Appl. Meteorol.* 1989. **28**. P. 99–106.
23. Shikhovtsev A.Y., Kiselev A.V., Kovadlo P.G., Kolobov D.Y., Lukin V.P., Tomin V.E. Method for estimating the atmospheric layers with strong turbulence // *Atm. Ocean. Opt.* 2020. **33**. P. 295–301.