

О возможности лидарной локализации турбулентности ясного неба

В.А. Банах[✉], И.Н. Смалихо, И.В. Залозная*

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Поступила в редакцию 27.06.2022 г.;
после доработки 1.08.2022 г.;
принята к печати 15.10.2022 г.

Определены диапазоны изменения параметров ветровой и температурной (оптической) турбулентности, соответствующие четырехбалльной шкале интенсивности турбулентной «болтанки» самолетов. Показано, что оценивание дисперсии радиальной скорости, измеряемой когерентным лидаром в направлении полета, и определение структурной постоянной показателя преломления по лидарным измерениям интенсивности оптической турбулентности в этом направлении позволяют судить о потенциальной опасности «болтанки» самолета в зонах турбулентности ясного неба, находящихся впереди по курсу полета.

Ключевые слова: турбулентность ясного неба, ветровой лидар, скорость диссипации турбулентной энергии, дисперсия радиальной скорости, структурная постоянная турбулентных флуктуаций показателя преломления; clear air turbulence, wind lidar, turbulent energy dissipation rate, radial velocity variance, structural constant of turbulent fluctuations of the refractive index.

Турбулентность, возникающая с повторяемостью до 25%, согласно данным самолетных измерений [1] в верхней тропосфере (на высотах 6–10 км) и нижней стратосфере (до высоты ~25 км) сосредоточивается в прерывистых (с характерными горизонтальными размерами отдельных частей ~10 км) и сплошных (с горизонтальными размерами ~100 км) зонах, которые переносятся средним потоком воздуха. Вертикальный размер турбулентной зоны ~1 км. Эти зоны в условиях ясного неба представляют опасность для летательных аппаратов. Для снижения рисков авиапроисшествий важно заблаговременно определять их местонахождение на пути следования воздушного судна.

Турбулентность ясного неба (ТЯН) по степени воздействия на устойчивость полета самолета принято оценивать по четырехбалльной шкале: слабая (b_1), умеренная (b_2), сильная (b_3) и очень сильная, или штормовая (b_4). На основе приведенных в монографии [1] данных для спектра турбулентности продольной компоненты скорости ветра в свободной атмосфере

$$S_u(\kappa) = (2\pi)^{-1} \int_{-\infty}^{+\infty} dr B_u(r) \exp(-j\kappa r)$$

* Виктор Арсентьевич Банах (banakh@iao.ru); Игорь Николаевич Смалихо (smalikho@iao.ru); Ия Викторовна Залозная (iya@iao.ru).

при $\kappa = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$ и с учетом того, что при оценивании турбулентной энергии $\int_{\kappa_1}^{\kappa_2} d\kappa S_u(\kappa)$ в спектральном диапазоне от $\kappa_1 = 3 \cdot 10^{-4}$ до $\kappa_2 = 3 \cdot 10^{-1} \text{ м}^{-1}$ масштабов неоднородностей, оказывающих влияние на самолет, спектр может задаваться в виде $S_u(\kappa) = 0,25\epsilon^{2/3} \kappa^{-5/3}$ были рассчитаны значения скорости диссипации энергии турбулентности ϵ , соответствующие этой четырехбалльной шкале. Результаты представлены в таблице.

Таким образом, измеряя скорость диссипации кинетической энергии турбулентности в направлении полета, можно заблаговременно определять местонахождение зоны ТЯН впереди по курсу движения самолета и оценивать её потенциальную опасность. Для этих целей возможно использование импульсных когерентных доплеровских лидаров.

Важным моментом при лидарном детектировании зон ТЯН во время полета самолета является оперативность получения необходимой информации. Оценивание скорости диссипации кинетической энергии турбулентности методом азимутальной структурной функции [2] или из спектров турбулентных флуктуаций радиальной скорости [3] требует не только длительных измерений (в наземных условиях примерно полчаса), но и временных затрат на расчеты скорости диссипации по итерационному алгоритму. В настоящей статье приводятся результаты анализа возможности использования для индикации ТЯН других параметров атмосферной тур-

булентности, дистанционное определение которых возможно с помощью лидаров.

Наиболее подходящим для лидарной индикации зон ТЯН является метод оценивания интенсивности ветровой турбулентности по уширению спектра мощности доплеровского эхосигнала когерентного ветрового лидара, возникающему вследствие случайного (из-за ветровой турбулентности) разброса скоростей рассеивающих частиц в зондируемом объеме. В [4] показано, что ширину доплеровского спектра (при условии, что время регистрации сигнала T_W значительно превышает длительность зондирующего импульса τ_p) можно оценить по простой формуле

$$\sigma_S^2 = (\lambda/2)^2 / (8\pi^2 \sigma_p^2) + 0,45 \varepsilon^{2/3} (T_W c / 2)^{2/3}, \quad (1)$$

где $\sigma_p = t_p / (2\sqrt{\ln 2})$; λ — длина волны; c — скорость света. Из результатов численного моделирования [4] для лидара [5] с параметрами $\lambda = 2,09$ мкм, $\tau_p = 400$ нс и $T_W = T_S M = 20,48$ мкс, где $T_S = 20$ нс — интервал дискретизации регистрируемого комплексного сигнала; $M = 1024$ — число отсчетов, следует, что определение интенсивности турбулентности впереди по курсу самолета по ширине доплеровского спектра сигналов таких лидаров вполне реализуемо.

В таблице приведены значения ширины доплеровского спектра, рассчитанные для этих параметров и соответствующие различным уровням турбулентности ε . При отсутствии турбулентности ($\varepsilon = 0$) ширина доплеровского спектра определяется длительностью зондирующего импульса ($\sigma_S \sim \lambda / \sigma_p$), $\sigma_S \approx 0,49$ м/с, что на порядок больше ширины спектрального канала в единицах скорости $\Delta V = \lambda / (2T_W) \approx 0,05$ м/с. С появлением турбулентности спектр уширяется. Уже при слабой турбулентности (b_1) в соответствии с данными таблицы для выбранных параметров σ_p и T_W ширина спектра $\sigma_S > 0,97$ м/с. С усилением интенсивности турбулентности ширина спектра возрастает до 3,45 м/с и более, что может служить индикатором зон ТЯН (такая ширина спектра — 3,45 м/с — примерно в семь раз превышает приведенную выше оценку инструментального уширения спектра 0,49 м/с).

Однако для световолоконных когерентных лидаров с меньшими длительностью зондирующего импульса и интервалом дискретизации сигнала (например, в лидаре StreamLine (Halo Photonics, Великобритания) $\tau_p = 170$ нс и $T_S = 20$ нс) это не совсем так. Для $\lambda = 1,5$ мкм при отсутствии турбулентности $\sigma_S = 1,5$ м/с ($\tau_p = 170$ нс, $T_W = 120$ нс) и 0,83 м/с ($\tau_p = 170$ нс, $T_W \gg \tau_p$). При $T_W = T_S M = 20,48$ мкс турбулентное уширение спектра также

составляет 3,45 м/с при $\varepsilon = 4,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2/\text{с}^3$, соответствующей штормовому уровню «болтанки» самолета.

Таким образом, если для лидара [5] турбулентное уширение спектра при штормовом уровне в семь раз превышает инструментальное уширение спектра, то в световолоконных лидарах уширение спектра при том же уровне турбулентности превышает инструментальное максимум в $3,45/0,83 \approx 4$ раза. Уменьшение ширины временного окна T_W в конечном итоге приведет к превалированию инструментального уширения спектра над турбулентным при любом уровне турбулентности, что может быть преградой для надежной индикации зон ТЯН.

Для решения этой задачи с использованием световолоконных короткоимпульсных доплеровских лидаров можно основываться не только на мониторинге турбулентного уширения доплеровских спектров, но и на других характеристиках измеряемых данных, например на дисперсии радиальной скорости, измеряемой лидаром в направлении полета самолета. В отличие от скорости диссипации оценивание дисперсии радиальной скорости из исходных данных лидара не требует больших временных затрат и может осуществляться в режиме реального времени с текущим обновлением по мере получения очередной оценки радиальной скорости с заданной дальности. Для получения статистически устойчивой оценки дисперсии радиальной скорости с приемлемой погрешностью в пограничном слое атмосферы требуются, как и для оценки скорости диссипации кинетической энергии турбулентности, получасовые реализации измеряемых данных. Однако при измерениях с борта самолета наряду с усреднением за счет переноса турбулентных неоднородностей воздуха ветровым потоком со средней скоростью (которая, как правило, на высотах полета самолетов значительно больше, чем у земной поверхности) происходит усреднение за счет движения самолета. При скорости самолетов 800–900 км/ч дополнительный «перенос» турбулентных неоднородностей происходит со скоростью 220–250 м/с, что значительно (примерно в 40 раз) уменьшает время усреднения по сравнению с наземными измерениями, в среднем до 45 с. Если учесть, что средняя скорость ветра на таких высотах составляет несколько десятков метров в секунду и в разы превышает скорость ветра в пограничном слое, то для достижения устойчивой оценки дисперсии радиальной скорости реально потребуются меньше 20 с. За это время самолет пролетает не более 5 км, и у пилота остается время для принятия решения, если эхосигнал регистрируется с дальности 10–15 км.

Диапазоны изменения параметров, характеризующих интенсивность ТЯН

Интенсивность болтанки самолета, баллы	Скорость диссипации турбулентной энергии ε , $\text{м}^2/\text{с}^3$	Ширина доплеровского спектра σ_S , м/с	Дисперсия радиальной скорости σ_r^2 , $\text{м}^2/\text{с}^2$	Структурная постоянная флуктуаций показателя преломления C_n^2 , $\text{м}^{-2/3}$
b_1	$10^{-3} - 5 \cdot 10^{-3}$	0,97–1,65	0,9–2,7	$3,5 \cdot 10^{-14} - 10^{-13}$
b_2	$5 \cdot 10^{-3} - 1,5 \cdot 10^{-2}$	1,65–2,39	2,7–5,7	$10^{-3} - 2,1 \cdot 10^{-13}$
b_3	$1,5 \cdot 10^{-2} - 4,5 \cdot 10^{-2}$	2,39–3,45	5,7–11,8	$2,1 \cdot 10^{-13} - 4,4 \cdot 10^{-13}$
b_4	$\geq 4,5 \cdot 10^{-2}$	$\geq 3,45$	$\geq 11,8$	$\geq 4,4 \cdot 10^{-13}$

Формула для продольного интегрального масштаба турбулентности

$$L_V = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\sigma_r^2}{C_2} \right)^{3/2}, \quad (2)$$

где $C_2 \approx 1,2717$, полученная в [6] в предположении применимости модели турбулентности Кармана, позволяет связать ε с дисперсией измеряемой лидаром радиальной скорости σ_r^2 :

$$\sigma_r^2 = C_2 \cdot (\varepsilon L_V)^{2/3}. \quad (3)$$

Для сопоставления ε и σ_r^2 по формуле (3) мы воспользовались данными измерений в пограничном слое атмосферы когерентным ветровым лидаром StreamLine 21 июля 2019 г. на Базовом экспериментальном комплексе (БЭК) ИОА СО РАН. В этот период в г. Томске стоял смог от лесных пожаров и лидарное отношение сигнал-шум SNR в пределах километрового прилегающего к Земле атмосферного слоя было довольно высоким (не менее -15 дБ, в основном SNR > -10 дБ, достигая порой 0 дБ). Это обеспечивало высокую точность оценивания ε из лидарных данных. В подавляющем числе случаев относительная погрешность оценивания скорости диссипации E_ε , рассчитывавшаяся с применением алгоритма [7], не превышала 30% при условии, что $\varepsilon \geq 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}^3$. Поэтому сопоставление оценок ε и σ_r^2 было проведено для значений $\varepsilon \geq 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}^3$.

Измерения проводились при коническом сканировании зондирующим пучком лидара вокруг вертикальной оси под углом места $\varphi = 35,3^\circ$. Подробное описание эксперимента дано в [8]. Рассчитанные по данным лидарных измерений радиальной скорости двумерные распределения $\varepsilon(h_k, t_n)$, $\sigma_r^2(h_k, t_n)$ и $L_V(h_k, t_n)$ по высоте $h_k = h_0 + k\Delta h$ и времени $t_n = n\Delta t$, где $h_0 = 58$ м; $k = 0, 1, 2, 3, \dots$; $\Delta h = \Delta R \sin \varphi = 17,3357$ м; $\Delta R = 30$ м — шаг по дальности; $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ и $\Delta t = 0,035346$ с (2 мин 7 с), представлены на рис. 1 (цв. вкладка). Белый цвет на рис. 1, в означает, что полученные для этих высот оценки L_V превышают 800 м и заведомо некорректны. Также было рассчитано аналогичное высотное-временное распределение относительной погрешности лидарной оценки скорости диссипации $E_\varepsilon(h_k, t_n)$.

На рис. 2 (цв. вкладка) приводится сопоставление лидарных оценок ε и σ_r^2 , взятых из рис. 1, а и б соответственно. Согласно используемой теоретической модели (формула (3)) дисперсия радиальной скорости имеет степенную зависимость от скорости диссипации с показателем степени « $2/3$ » ($\sigma_r^2 \sim \varepsilon^{2/3}$). В результате подгонки рассчитанной по формуле (3) зависимости $\sigma_r^2(\varepsilon)$ при фиксированном значении $L_V = 200$ м методом наименьших квадратов была получена прямая, показанная на рис. 2 в виде красной линии.

Таким образом, интегральный масштаб в пограничном слое атмосферы, где $\varepsilon \geq 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}^3$ (на рис. 1, а этому условию соответствуют зеленые, желтые и коричневые области), в среднем состав-

ляет примерно 200 м. Как видно на рис. 1, в, в пределах этих областей интегральный масштаб существенно изменяется при вариациях h_k и t_n , особенно высоты (в основном имеет место рост L_V с высотой). Этим объясняется довольно широкий разброс точек вокруг красной линии (при фиксированном ε) на рис. 2.

Анализируя рис. 1, 2, мы видим, что до 90% оценок σ_r^2 при фиксированных значениях ε получены при значениях интегрального масштаба, изменявшихся от 50 до 800 м.

Экспериментальное подтверждение зависимости (3) данными, представленными на рис. 2, позволяет использовать ее для оценки диапазонов изменения дисперсии радиальной скорости, соответствующих четырехбалльной системе оценки интенсивности «болтанки» самолета. Из приведенных в [1] данных следует, что интегральный масштаб турбулентности L_V на высотах $10\text{--}12$ км изменяется в пределах от 100 м до $1,9$ км и в среднем составляет 630 м. Результаты расчета диапазонов изменения σ_r^2 для $L_V = 630$ м представлены в четвертой колонке таблицы. Видно, что значения дисперсии радиальной скорости существенно различаются для разных уровней интенсивности «болтанки» самолета, следовательно, дисперсия может использоваться как индикатор ТЯН.

Известны попытки создания лидаров для измерения интенсивности оптической турбулентности [9–11]. В настоящее время существуют экспериментальные прототипы приборов и, хотя их возможности по получению информации о турбулентности в реальном времени не ясны, правомерен вопрос: в каком диапазоне будет изменяться структурная постоянная турбулентных флуктуаций показателя преломления воздуха C_n^2 , характеризующая интенсивность оптической турбулентности, при интенсивностях ветровой турбулентности, определяемых значениями ε в таблице? Соотношение [12]:

$$C_T^2 = a^2 \varepsilon^{-1/3} K_T (\partial T / \partial z)^2, \quad (4)$$

где a — численная константа порядка единицы; K_T — коэффициент турбулентной теплопроводности; $\partial T / \partial z$ — вертикальный градиент потенциальной температуры, связывающий структурную постоянную температуры со скоростью диссипации кинетической энергии турбулентности, открывает возможность оценить этот диапазон. Тогда лидары, позволяющие определять C_n^2 , можно будет использовать для индикации зон ТЯН (C_T^2 и C_n^2 связаны известным соотношением [12]).

На высотах авиасообщения $10\text{--}11$ км в атмосфере реализуется устойчивая термическая стратификация, для которой формулу (4), основываясь на результатах двухпараметрической теории турбулентного замыкания С.С. Зилитинкевича [13], можно записать в виде

$$C_T^2 = A \cdot \varepsilon^{2/3}, \quad (5)$$

где $A = 1,85 \text{ К}^2 \cdot \text{с}^2/\text{м}^2$ — размерная константа, если принять, что, согласно стандартной модели атмо-

сферы, в среднем абсолютная температура на высотах от 10 до 11 км равна 220 К, а градиент потенциальной температуры $\partial T/\partial z = 0,0033$ К/м.

Значения C_n^2 , рассчитанные по формуле (5) с использованием соотношения, связывающего C_T^2 и C_n^2 [12], для диапазонов значений ε , соответствующих четырехбалльной шкале интенсивности «болтанки» самолетов, приведены в таблице. Видно, что C_n^2 изменяется более чем на порядок от $3,5 \cdot 10^{-14}$ до $4,4 \cdot 10^{-13} \text{ м}^{-2/3}$, что позволяет использовать структурную постоянную турбулентных флуктуаций показателя преломления воздуха для индикации ТЯН.

Таким образом, на основе анализа экспериментальных данных и теоретических расчетов показано, что оценивание потенциальной опасности «болтанки» самолета в зонах ТЯН, находящихся впереди по курсу полета, возможно как по дисперсии радиальной скорости, измеряемой импульсным когерентным ветровым лидаром, так и по структурной постоянной показателя преломления, определяемой из лидарных измерений интенсивности оптической турбулентности в направлении полета.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 19-17-00170-П) в части теоретических и экспериментальных исследований возможности лидарной локализации ТЯН и в рамках госзадания ИОА СО РАН в части финансирования разработки методологии измерений и использования инфраструктуры Базового экспериментального комплекса ИОА СО РАН.

Список литературы

1. Винниченко Н.К., Пинус Н.З., Шметер С.М., Шур Г.Н. Турбулентность в свободной атмосфере. Л.: Гидрометеониздат, 1976. 288 с.
2. Smalikho I.N., Banakh V.A. Measurements of wind turbulence parameters by a conically scanning coherent Doppler lidar in the atmospheric boundary layer // Atmos. Meas. Tech. 2017. V. 10, N 11. P. 4191–4208.
3. Banakh V.A., Smalikho I.N., Falits A.V., Sherstobitov A.M. Estimating the parameters of wind turbulence from spectra of radial velocity measured by a pulsed Doppler lidar // Remote Sens. 2021. V. 13. P. 2071.
4. Banakh V.A., Вернер Х., Смалихо И.Н. Зондирование турбулентности ясного неба доплеровским лидаром. Численное моделирование // Оптика атмосф. и океана. 2001. Т. 14, № 10. С. 932–937.
5. Henderson S.W., Hale Ch.P., Magee J.R., Kavaya M.J., Huffaker A.V. Eye-safe coherent laser radar system at 2 μm using Tm. Ho: YAG lasers // Opt. Lett. 1991. V. 16. P. 773–775.
6. Смалихо И.Н., Баных В.А. Точность оценивания скорости диссипации энергии турбулентности из измерений ветра импульсным когерентным доплеровским лидаром при коническом сканировании зондирующим пучком. Часть I. Алгоритм обработки лидарных данных // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 3. С. 213–219; Smalikho I.N., Banakh V.A. Accuracy of estimation of the turbulent energy dissipation rate from wind measurements with a conically scanning pulsed coherent Doppler Lidar. Part I. Algorithm of data processing // Atmos. Ocean. Opt. 2013. V. 26, N 5. P. 404–410.
7. Banakh V.A., Smalikho I.N., Falits V.A. Estimation of the turbulence energy dissipation rate in the atmospheric boundary layer from measurements of the radial wind velocity by micropulse coherent Doppler lidar // Opt. Express. 2017. V. 25, N 19. P. 22679–22692.
8. Баных В.А., Смалихо И.Н., Фалиц А.В. Определение высоты слоя турбулентного перемешивания воздуха из лидарных данных о параметрах ветровой турбулентности // Оптика атмосф. и океана. 2021. Т. 34, № 3. С. 169–184. DOI: 10.15372/AOO20210303.
9. Гурвич А.С. Лидарное зондирование турбулентности на основе эффекта усиления обратного рассеяния // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2012. Т. 48, № 6. С. 655–665.
10. Vrancken P., Wirth M., Ehret G., Barny H., Rondeau P., Veerman H. Airborne forward-pointing UV Rayleigh lidar for remote clear air turbulence detection: System design and performance // Appl. Opt. 2016. V. 55, N 32. P. 9314–9328. DOI: 10.1364/AO.55.0093146.
11. Hauchecorne A., Cot Ch., Dalaudier F., Porteneuve J., Gaudo T., Wilson R., Cénac C., Laqui Ch., Keckhut P., Perrin J.-M., Dolfi A., Cézard N., Lombard L., Besson C. Tentative detection of clear-air turbulence using a ground-based Rayleigh lidar // Appl. Opt. 2016. V. 55, N 13. P. 3420–3428. DOI: 10.1364/AO.55.003420.
12. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967. 548 с.
13. Зилитинкевич С.С. Атмосферная турбулентность и планетарные пограничные слои. М.: Физматлит, 2013. 246 с.

V.A. Banakh, I.N. Smalikho, I.V. Zaloznaya. **On the feasibility of lidar localization of the clear air turbulence.**

The ranges of changes in the parameters of wind and temperature (refractive) turbulence estimated from lidar data, corresponding to the intensity of aircraft shaking severity caused by turbulence in the free atmosphere at flight altitudes, are determined. It is shown that both the estimation of the variance of the radial velocity measured by a coherent lidar in the direction of flight, and the determination of the structural constant of the refractive index from the data of the lidar, which measures the intensity of refractive turbulence in flight direction, make it possible to judge the potential danger of aircraft shaking severity in clear air turbulence zones ahead of the aircraft.

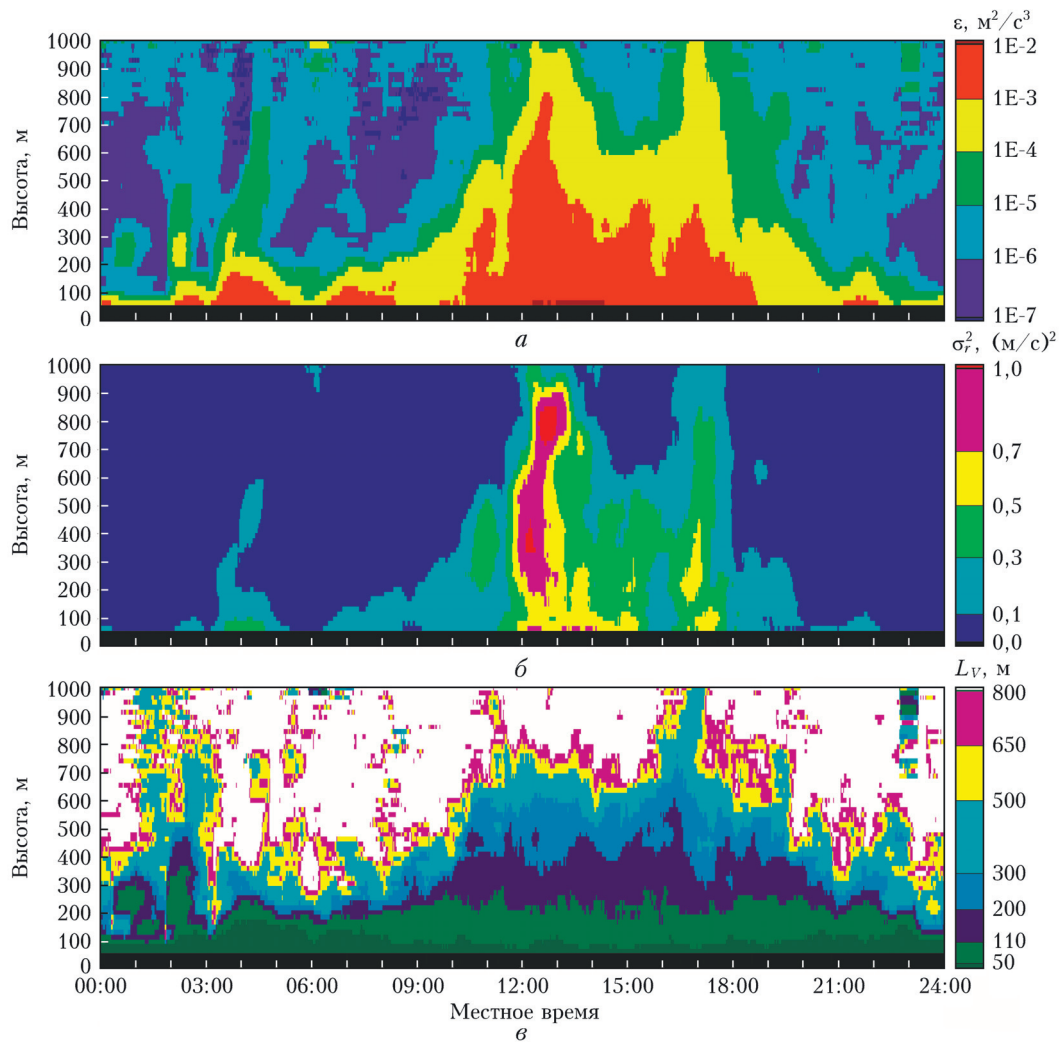


Рис. 1. Распределения по высоте и времени скорости диссипации кинетической энергии турбулентности (*a*), дисперсии радиальной скорости (*b*) и интегрального масштаба турбулентности (*в*), полученных из измерений лидаром StreamLine на БЭК ИОА СО РАН 21 июля 2019 г.

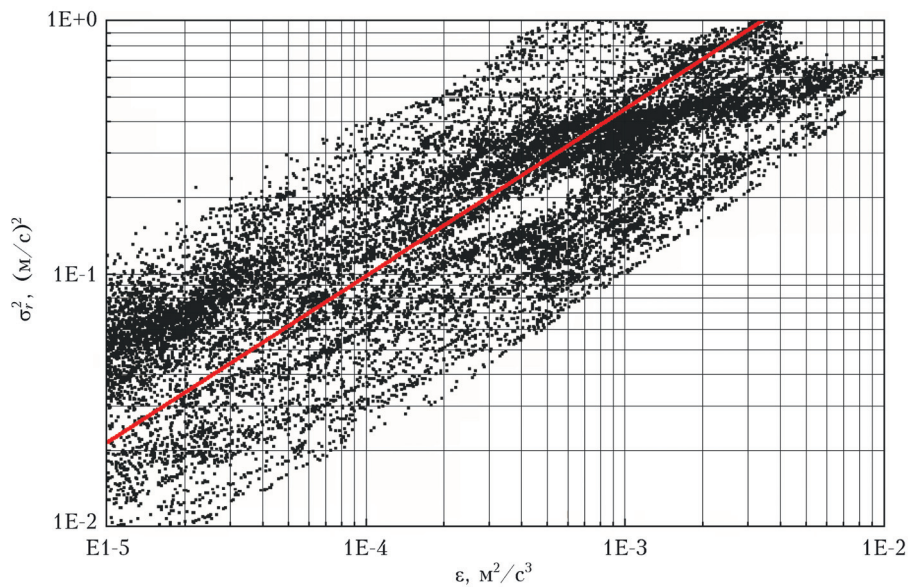


Рис. 2. Сопоставление лидарных оценок скорости диссипации и дисперсии радиальной скорости (точки), взятых из рис. 1, *a* и *b* (точки); красная линия — результат подгонки к полученным оценкам зависимости $\sigma_r^2(\varepsilon)$, рассчитанной по формуле (3) с $L_V = 200$ м