

УДК 551.511.6:621.371

Лидарные методы и средства исследования атмосферной турбулентности в ИОА СО РАН

В.А. Банах*

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

Поступила в редакцию 11.06.2019 г.

Представлен обзор основных результатов работ ИОА СО РАН по созданию лидарных методов и средств исследования атмосферной турбулентности, выполненных за последние пять лет.

Ключевые слова: доплеровский ветровой лидар, лидар для измерения интенсивности оптической турбулентности; wind Doppler lidar, lidar for measuring intensity of optical turbulence.

Введение

Для экспериментальных исследований атмосферы в настоящее время широко используются дистанционные средства зондирования, позволяющие получать метеорологические и оптические данные в реальном времени с нужным пространственным и временным разрешением. Важное место в дистанционном зондировании атмосферы занимают лидары. В частности, большую роль в исследованиях динамики и турбулентности атмосферы играют импульсные когерентные доплеровские лидары (КДЛ).

Наибольший потенциал для измерений скорости ветра имеют КДЛ, выпускаемые в США корпорацией Lockheed Martin Coherent Technologies (LMCT) на базе двухмикронного твердотельного лазерного импульсного источника [1]. Они позволяют измерять скорость ветра на высотах до 8–12 км. В последние 10–15 лет также получили развитие световолоконные низкоэнергетические микроимпульсные КДЛ на длине волны 1,5 мкм производства Leosphere (Франция), Halo Photonics (Великобритания), Mitsubishi Electric (Япония), Leice-Lidar Transient Technology (Китай). По своему потенциалу они уступают мощным дорогостоящим лидарным системам LMCT. Высотный потолок ветрового зондирования этими лидарами не превышает 4 км, но они просты в эксплуатации, надежны, относительно недороги и коммерчески доступны. Микроимпульсные КДЛ находят очень широкое применение в исследованиях динамики пограничного слоя атмосферы, в ветровой энергетике. В частности, Leosphere за 10 лет своего существования поставила на рынок более 1200 экз. различных модификаций лидара Wind Cube [2]. В России разработка и создание световолоконных микроимпульсных КДЛ, наряду с когерентными доплеровскими ветровыми лидарами на основе лазерных источников непрерывного излучения,

ведутся в НПО «Лазерные системы» (Санкт-Петербург) [3].

Важная особенность микроимпульсных лидаров, по сравнению с двухмикронными КДЛ, – малая длительность и невысокая энергия зондирующего импульса. Данные, получаемые с использованием этих лидаров, имеют высокое пространственное разрешение, но сильно зашумлены, характеризуются низкими отношениями сигнал-шум (SNR). С другой стороны, у микроимпульсных лидаров очень высокая (10 кГц и более) частота следования импульсов. Это позволяет использовать при одинаковом временном разрешении большее, чем в системах LMCT, число импульсов для аккумуляции исходных данных и тем самым повысить точность оценки радиальной скорости из зашумленных данных.

Разработке лидарных методов и исследованию пограничного слоя атмосферы, высоты слоя турбулентного перемешивания при различной температурной устойчивости и разных типах подстилающей поверхности посвящены работы [4–8]. Возможности лидарных методов в исследованиях ветровой турбулентности и результаты их апробации в атмосферных экспериментах обсуждаются в [9–18]. И если для двухмикронных лидарных систем LMCT методические вопросы лидарного измерения скорости ветра и параметров ветровой турбулентности рассмотрены довольно подробно [9], то для микроимпульсных лидаров они были исследованы в значительно меньшей степени.

В Институте оптики атмосферы (ИОА СО РАН) в последнее время были детально изучены возможности микроимпульсных ветровых лидаров в зондировании турбулентной атмосферы. Разработаны лидарные методы восстановления высотных профилей вектора скорости ветра и оценивания параметров ветровой турбулентности, учитывающие технические особенности микроимпульсных лидаров. Определены оптимальные параметры измерения и обработки исходных лидарных данных для получения информации о ветре и ветровой турбулентности в пограничном

*Виктор Арсентьевич Банах (banakh@iao.ru).

слое атмосферы с заданной погрешностью. Разработанные методы протестированы в замкнутых компьютерных и атмосферных экспериментах с лидарами Stream Line (Halo Photonics) [13, 14, 17, 19–23], Wind Cube (Leosphere) [24] и использованы в исследованиях ветровой турбулентности, струйных течений и атмосферных волн в пограничном слое атмосферы. Освоена световолоконная технология гетеродинамирования. Создан лабораторный макет световолоконного микроимпульсного ветрового КДЛ [25].

Значительно меньшее развитие и применение в исследованиях атмосферы и на практике получили лидарные методы измерения параметров температурной турбулентности, вызывающей флуктуации показателя преломления воздуха. Задача создания дистанционного измерителя структурной постоянной турбулентных флуктуаций показателя преломления воздуха C_n^2 , характеризующей интенсивность оптической турбулентности в атмосфере, давно привлекает внимание исследователей [26, 27]. Однако лишь недавно [28, 29] был предложен действительно лидарный способ определения интенсивности оптической турбулентности, когда приемником регистрируется средняя мощность эхосигнала и не требуется использовать матричный приемник для регистрации распределения интенсивности принимаемого сигнала, как в [26, 27]. Способ основан на использовании эффекта усиления обратного рассеяния (УОР) в случайных средах [30]. Дальнейшее развитие этот подход получил в ИОА СО РАН, где был разработан и создан лидар для измерения интенсивности температурной (оптической) турбулентности, реализующий технически более совершенную, чем в [28, 29], оптическую схему [31–33]. Одновременно были опубликованы работы [34, 35], также посвященные разработке лидара для измерения интенсивности оптической турбулентности в целях обнаружения зон турбулентности ясного неба.

В настоящей статье дается фрагментарный обзор основных результатов исследований ИОА СО РАН, связанных с разработкой и созданием лидарных методов и средств исследования турбулентности в пограничном слое атмосферы, выполненных за последние пять лет.

Метод определения параметров ветровой турбулентности

Суть разработанного в ИОА СО РАН метода оценивания параметров ветровой турбулентности [20–22] заключается в следующем. В процессе измерений импульсным КДЛ выполняется коническое сканирование зондирующим пучком, т.е. при фиксированном угле места (угле между оптической осью и горизонтальной плоскостью на уровне лидара) φ зондирующий пучок вращается вокруг вертикальной оси с постоянной угловой скоростью ω_s (рис. 1). Из исходных данных лидара после предварительной обработки получаем массив оценок радиальной скорости (проекции вектора скорости ветра на ось зондирующего пучка) $V_L(R_k, \theta_m; n)$ для различных расстояний от лидара $R_k = R_0 + k\Delta R$ и ази-

мутальных углов $\theta_m = m\Delta\theta$, где $k = 0, 1, 2, \dots, K-1$; ΔR – шаг по дальности; $m = 0, 1, 2, \dots, M-1$; $\Delta\theta = \omega_s\Delta t$ – разрешение по азимутальному углу; $\Delta t = N_a/f_p$ – продолжительность измерения исходных данных для получения одной оценки радиальной скорости (при фиксированных R_k, θ_m и n), N_a – число аккумулируемых зондирующих импульсов, используемых для одной оценки, f_p – частота следования импульсов; $M = 2\pi/\Delta\theta$ ($\Delta\theta$ в радианах) – число лучей за одно полное сканирование при изменении азимутального угла от 0 до 360° и $n = 1, 2, 3, 4, \dots$ – номер скана. Продолжительность одного сканирования $T_{scan} = M\Delta t$.

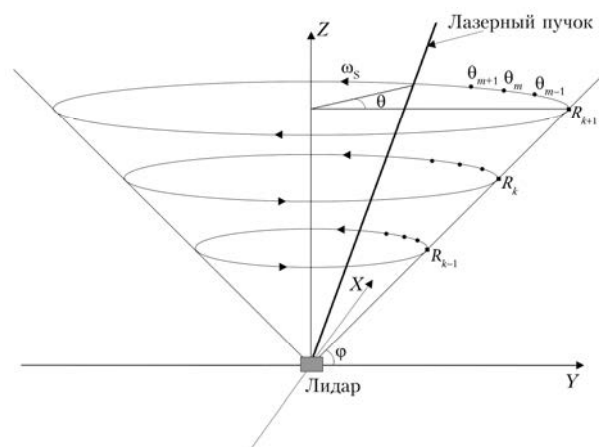


Рис. 1. Схема измерений импульсным КДЛ

Наряду с массивом оценок радиальной скорости $V_L(R_k, \theta_m; n)$ из тех же измеряемых лидаром данных рассчитывается массив оценок отношения сигнал-шум $\text{SNR}(R_k, \theta_m; n)$, определяемого как отношение средней мощности лидарного эхо сигнала к средней мощности шума в полосе частот пропускания приемника 50 МГц. Информация об отношении сигнал-шум может быть использована для определения максимальной дальности зондирования (расстояния R_{k-1}). Расстояниям R_k соответствуют высоты $h_k = R_k \sin \varphi$.

В предположении, что ветер является стационарным процессом (в пределах одного часа) и статистически однороден по горизонтали, из массива $V_L(R_k, \theta_m; n)$ оценивается вектор средней скорости ветра $\langle \hat{V}(h_k) \rangle = \{ \langle \hat{V}_z \rangle, \langle \hat{V}_x \rangle, \langle \hat{V}_y \rangle \}$, где \hat{V}_z – оценка вертикальной, а \hat{V}_x, \hat{V}_y – горизонтальных компонент скорости; угловые скобки означают усреднение по ансамблю реализаций. Для нахождения $\langle \hat{V}(h_k) \rangle$ используется синусоидальная подгонка методом наименьших квадратов [9]:

$$\rho(\hat{V}(R_k, n)) = \sum_{m=1}^M [\mathbf{V}(R_k, n) \cdot \mathbf{S}(\theta_m) - V_L(\theta_m, R_k; n)]^2,$$

где $\mathbf{S}(\theta_m) = \{ \sin \varphi, \cos \varphi \cos \theta_m, \cos \varphi \sin \theta_m \}$ – единичный вектор вдоль оптической оси зондирующего пучка. Потом рассчитываются флуктуации лидарных оценок радиальных скоростей

$$V_L'(R_k, \theta_m; n) = V_L(R_k, \theta_m; n) - \mathbf{S}(\theta_m) \langle \hat{V}(h_k) \rangle. \quad (1)$$

Массив рассчитанных по формуле (1) случайных составляющих лидарной оценки радиальной скорости для каждой высоты h_k используется затем для оценивания усредненных по всем азимутальным углам θ_m , по числу сканирований дисперсии $\bar{\sigma}_L^2$ и азимутальной структурной функции $\bar{D}_L(\psi_l)$ радиальной скорости по формулам

$$\bar{\sigma}_L^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} [V'_L(R_k, \theta_m; n)]^2, \quad (2)$$

$$\bar{D}_L(\psi_l) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{1}{M-l} \times \sum_{m=0}^{M-l-1} [V'_L(R_k, \theta_m + \psi_l; n) - V'_L(R_k, \theta_m; n)]^2, \quad (3)$$

где N – число сканирований, используемых для усреднения; $\psi_l = l\Delta\theta$; $l = 1, 2, 3, 4, \dots$. В (1) в качестве оценки вектора $\langle \hat{\mathbf{V}}(h_k) \rangle$ может использоваться среднее по числу сканирований значение $\langle \hat{\mathbf{V}}(h_k) \rangle = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \hat{\mathbf{V}}(h_k; n)$, где $\hat{\mathbf{V}}(h_k; n)$ – оценка вектора скорости, полученная методом синусоидальной подгонки из лидарных оценок радиальной скорости на n -м сканировании.

В пределах инерционного интервала турбулентности $\psi_l = l\Delta\theta < L_V$ ($\Delta\theta$ в радианах, L_V – интегральный масштаб пространственной корреляции флуктуаций радиальной скорости) [36] скорость диссипации энергии турбулентности ε определяется из азимутальной структурной функции $\bar{D}_L(\psi_l)$ по формуле [13]:

$$\varepsilon = \left[\frac{\bar{D}_L(\psi_l) - \bar{D}_L(\psi_1)}{A(l\Delta y_k) - A(\Delta y_k)} \right]^{3/2}, \quad (4)$$

где функция

$$A(l\Delta y_k) = 2 \int_0^\infty d\kappa_1 \times \int_0^\infty d\kappa_2 \Phi(\kappa_1, \kappa_2) H_{\parallel}(\kappa_1) H_{\perp}(\kappa_2) [1 - \cos(2\pi l \Delta y_k \kappa_2)]$$

рассчитывается теоретически для модели Колмогорова двумерного спектра турбулентности $\Phi(\kappa_1, \kappa_2) = 0,0652(\kappa_1^2 + \kappa_2^2)^{-4/3} [1 + (8/3)\kappa_2^2 / (\kappa_1^2 + \kappa_2^2)]$; $H_{\parallel}(\kappa_1) = [\exp\{-\pi\Delta p \kappa_1\}^2 \text{sinc}(\pi\Delta R \kappa_1)]^2$; $H_{\perp}(\kappa_2) = [\text{sinc}(\pi\Delta y_k \kappa_2)]^2$; $\Delta p = c\sigma_p / 2$, c – скорость света; $2\sigma_p$ – длительность зондирующего импульса, определяемая по спадаанию мощности излучения до уровня e^{-1} справа и слева от точки максимума; $\text{sinc}(x) = \sin x / x$; $A(\Delta y_k) = A(l\Delta y_k)$ при $l = 1$; $\Delta y_k = \Delta\theta R_k \cos\phi$ – поперечный размер зондируемого объема; $l\Delta y_k < L_V$. Для удовлетворения требования $l\Delta y_k < L_V$ при планировании лидарного эксперимента можно воспользоваться известными данными

типичных значений интегрального масштаба L_V в различных атмосферных условиях и их вариациях с высотой [37–39].

Усредненная по всем θ_m дисперсия радиальной скорости $\bar{\sigma}_r^2$ определяется как [13]:

$$\bar{\sigma}_r^2 = \bar{\sigma}_L^2 - \bar{D}_L(\psi_1) / 2 + \varepsilon^{2/3} [F(\Delta y_k) + A(\Delta y_k) / 2], \quad (5)$$

где $F(\Delta y_k) = \int_0^\infty d\kappa_1 \int_0^\infty d\kappa_2 \Phi(\kappa_1, \kappa_2) [1 - H_{\parallel}(\kappa_1) H_{\perp}(\kappa_2)]$.

В отличие от ранее использовавшихся подходов [40–44] в (5) учитывается усреднение радиальной скорости по зондируемому объему. Если угол места $\phi = \arctg(1/\sqrt{2}) \approx 35,3^\circ$, то из лидарной оценки дисперсии радиальной скорости по формуле (5) можно определить кинетическую энергию турбулентности E по формуле [13, 45]:

$$E = (3/2)\bar{\sigma}_r^2. \quad (6)$$

В предположении, что пространственная структура ветровой турбулентности описывается моделью Кармана [46, 47], для оценки интегрального масштаба из лидарных данных L_V можно использовать формулу [19]:

$$L_V = 0,6973\bar{\sigma}_r^3 / \varepsilon \quad (7)$$

или при $\phi = 35,3^\circ$ формулу [13]:

$$L_V = 0,3796E^{3/2} / \varepsilon. \quad (8)$$

В пределах инерционного интервала турбулентности является локально изотропной, ее структура подчиняется закону «2/3» («–5/3») Колмогорова–Обухова, и структурная функция радиальной скорости зависит только от скорости диссипации ε [36]. Дисперсия флуктуаций скорости ветра определяется всеми масштабами турбулентных неоднородностей. На величину этого параметра влияет анизотропия турбулентности, т.е. дисперсия радиальной скорости $\sigma_r^2 = \langle V_r^2 \rangle - \langle V_r \rangle^2$, так же как и интегральный масштаб L_V , зависит от угла места ϕ и азимутального угла θ_m . Получаемая по формулам (7), (8) оценка L_V представляет собой интегральный масштаб турбулентности, усредненный по всем θ_m . Однако зависимость оценки L_V (7) от угла ϕ из-за анизотропии турбулентности сохраняется.

На рис. 2 (цв. вклейка) показан пример вызываемых турбулентностью отклонений одиночных оценок радиальной скорости от величины $\mathbf{S}(\theta_m) \langle \hat{\mathbf{V}}(h_k) \rangle$ (1), которые затем используются для расчета параметров ветровой турбулентности по алгоритму (2)–(8).

Точность лидарных оценок ε , $\bar{\sigma}_r^2$ (E) и L_V зависит от инструментальной погрешности оценки радиальной скорости σ_c [13, 14, 48, 49], являющейся функцией SNR, и интенсивности ветровой турбулентности. Погрешность оценивания турбулентных параметров из лидарных данных рассчитывается на основе результатов замкнутого численного моделиро-

вания работы лидара в турбулентной атмосфере по алгоритму [19]. В качестве входных параметров в этом моделировании используются получаемые в экспериментах значения σ_c , ε и L_V . По результатам моделирования отбираются данные измерений лидаром при таких высоких значениях SNR, которые заведомо обеспечивают возможность оценивания параметров турбулентности в пограничном слое с приемлемой погрешностью.

Разработанный метод определения параметров ветровой турбулентности используется в исследованиях пограничного слоя атмосферы при различных термических стратификациях и образовании низкоструйных течений и атмосферных волн [13, 14, 17, 50].

Световолоконный микроимпульсный ветровой КДЛ

В результате выполнения работ по проекту «Лидарный комплекс обнаружения атмосферных турбулентных и ветровых структур, угрожающих авиабезопасности» федеральной целевой программы в 2018 г. в ИОА СО РАН создан лабораторный макет когерентного доплеровского ветрового лидара. Макет реализует схему, использующую световолоконные элементы [51] (рис. 3). Непрерывное излучение лазера на $\lambda = 1,55$ мкм с частотой f_0 поступает на модулятор, где преобразуется в импульсное с частотным сдвигом f_{mod} , усиливается и через циркулятор отправляется на телескоп, а затем в атмосферу. Рассеянное на аэрозольных частицах в атмосфере излучение приобретает доплеровский сдвиг f_{dop} по частоте вследствие ветрового переноса аэрозоля, поступает на телескоп и через циркулятор направляется на вход балансного PIN-детектора, где смешивается с непрерывным излучением на частоте f_0 , поступающим на второй вход детектора. В результате смещения выделяется сигнал на частоте $f_{mod} + f_{dop}$, подающийся на аналого-цифровой преобразователь и далее на матрицу программируемой логической интегральной схемы, где выполняется быстрое преобразование Фурье, рассчитываются

и аккумулируются доплеровские спектры. Затем массивы рассчитанных спектров передаются в компьютер. Макет лидара оснащен сканером, обеспечивающим изменение направления распространения зондирующего пучка по углу места и азимуту.

Программное обеспечение макета лидара [25] позволяет при получении доплеровских спектров использовать временное окно произвольной формы и ширины. Во время работы лидара через определенные промежутки времени (в зависимости от числа импульсов, используемых для спектральной аккумуляции) на компьютер передаются массивы доплеровских спектров. Каждый массив представляет собой набор спектров для различных расстояний от лидара до центра зондируемого объема, максимальное количество спектров в таком наборе – 386. Для массива спектров может задаваться различный шаг по дальности.

Спектры содержат 32 частотных канала шириной 3,9 МГц каждый с разрешением по скорости 3,027 м/с. С помощью Фурье-интерполяции разрешение доводится до 0,0473 м/с. Далее в полосе пропускания приемника 50 МГц, центрированной на промежуточной полосе $f_{mod} = 80$ МГц (интервал скоростей от $-19,375$ до $19,375$ м/с), определяется SNR и по положению спектрального максимума оценивается радиальная скорость (проекция вектора скорости ветра на ось зондирующего пучка).

В настоящее время ведутся тестовые испытания макета. Выполнен сравнительный эксперимент [25] с лидаром Stream Line [52].

На рис. 4 (цв. вклейка) представлены временные ходы радиальной скорости на расстоянии 442 м от лидара, полученные из измерений макетом ветрового лидара и лидаром Stream Line в течение 3 сут. Оценки скорости даны через каждый час. Измерения проводились при различных отношениях сигнал-шум, что сказалось на точности измерения скорости. Радиальная скорость в рассматриваемый промежуток времени варьировалась от -1 м/с до 4 м/с. Коэффициент корреляции результатов сравнительных измерений радиальной скорости равен 0,84.

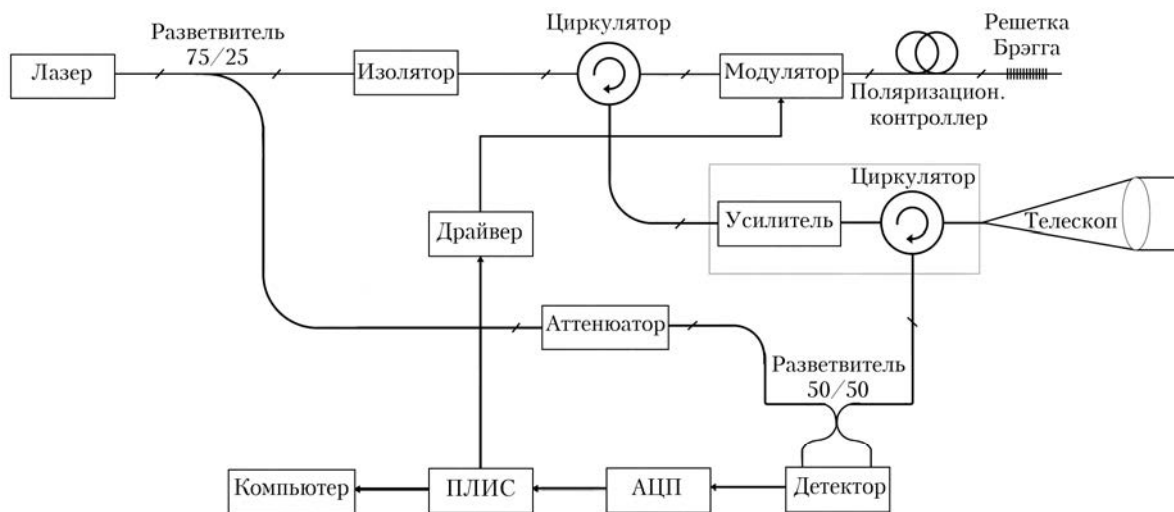


Рис. 3. Схема волоконного доплеровского лидара

Лидар для измерения интенсивности оптической турбулентности

Реализация лидарного способа определения интенсивности оптической турбулентности на основе эффекта усиления обратного рассеяния в случайных средах основывается на одновременной регистрации лидарного эхосигнала двумя разнесенными в приемной плоскости приемниками [31–33]. Один из приемников расположен соосно с зондирующим пучком, другой – на некотором расстоянии от оси пучка. Средняя мощность эхосигнала, регистрируемого «осевым» приемником вследствие эффекта усиления превышает среднюю мощность эхосигнала, регистрируемого неосевым приемником. Отношение этих средних мощностей дает величину эффекта усиления [31–33, 53, 54]. Для определения интенсивности оптической турбулентности из экспериментальных данных об увеличении средней мощности лидарного эхосигнала за счет эффекта УОР необходимо знать в деталях, как изменяются величина и масштабы локализации эффекта усиления средней мощности эхосигнала в зависимости от структурной постоянной C_n^2 .

В [28] впервые исследовано усиление в турбулентной атмосфере не интенсивности [55], а средней мощности рассеянной атмосферным аэрозолем волны для режима слабой оптической турбулентности, когда параметр $\beta_0^2 = 1,23C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}$, характеризующий режим оптической турбулентности, принимает значения меньше единицы. Здесь L – расстояние между источником и рассеивающим аэрозольным слоем; $k = 2\pi/\lambda$, λ – длина волны излучения. Параллельно были проведены расчеты коэффициента усиления средней мощности рассеянного излучения для режимов промежуточной $1 < \beta_0^2 < 20$ [56] и сильной $\beta_0^2 > 20$ [57] интенсивности оптической турбулентности. Теоретический анализ [28, 56] выполнен для сферической волны. Режим сферической волны реализуется на трассах большой протяженности при числах Френеля передающей апертуры $\Omega = ka^2/L < 0,1$, где a – радиус апертуры. На практически реализуемых трассах меньшей протяженности, когда $\Omega > 0,1$, при анализе эффекта усиления требуется учитывать пространственную ограниченность оптического пучка, формируемого передающей апертурой.

Отношения

$$N(\mathbf{R}) = \langle I(\mathbf{R}) \rangle / \langle I(\mathbf{R}) \rangle_{|\mathbf{R}| > R_{\text{cor}}}, \quad (9)$$

$$K(\mathbf{R}) = \frac{\langle I(\mathbf{R}) \rangle - \langle I(\mathbf{R}) \rangle_{|\mathbf{R}| > R_{\text{cor}}}}{\langle I(\mathbf{R}) \rangle_{|\mathbf{R}| > R_{\text{cor}}}} = N(\mathbf{R}) - 1 \quad (10)$$

показывают, насколько возрастает средняя интенсивность рассеянного излучения в турбулентной атмосфере вследствие эффекта усиления обратного рассеяния. Здесь $\langle I(\mathbf{R}) \rangle$ и $\langle I(\mathbf{R}) \rangle_{|\mathbf{R}| > R_{\text{cor}}}$ – средние интенсивности рассеянного излучения в плоскости источника и в той же плоскости на таком удалении от

источника, когда корреляции между зондирующим и рассеянным излучением нет.

Интегрирование по переменной \mathbf{R} позволяет оценить величину средней мощности рассеянного излучения

$$P = \int_D d\mathbf{R} \langle I(\mathbf{R}) \rangle, \quad (11)$$

где D – площадь приемной апертуры. На рис. 5 показаны расчеты [58] коэффициента усиления средней мощности рассеянного излучения $K_P =$

$$= 2\pi a^2 \int_0^A K(R/a) R dR / \beta_0^2,$$

регистрируемой круглой приемной апертурой радиуса $A = R/a$, для режима слабой оптической турбулентности.

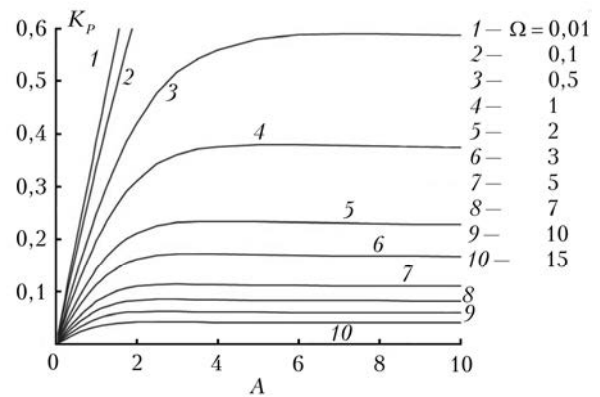


Рис. 5. Коэффициент усиления средней мощности рассеянного излучения, регистрируемой приемной апертурой радиуса A

Из данных на рис. 5 следует, что эффект усиления, в зависимости от числа Френеля Ω (расстояния до рассеивающего слоя), локализуется в пределах окружности диаметром от $3a$ для $\Omega = 15$ до $12a$ для $\Omega = 0,5$. Это, например, означает, что для регистрации «полного» эффекта усиления средней мощности при числе Френеля $\Omega = 0,5$, чему соответствует трасса протяженностью 9120 м, в случае зондирующего пучка диаметром 4 см на $\lambda = 0,5$ мкм требуется приемная апертура диаметром 24 см. «Полный» коэффициент усиления средней мощности рассеянного излучения при изменении числа Френеля передающей апертуры Ω от 15 до 0,5 возрастает в 10 и более раз.

В [31, 32, 56, 57] представлены результаты компьютерного моделирования, обосновывающие технические требования к оптической схеме лидара, необходимые для регистрации усиления средней мощности эхо сигнала за счет эффекта УОР. В работах [33, 34, 53, 54, 59] дано описание конструкции лидара, представлены результаты экспериментов на приземных горизонтальных трассах, демонстрирующие возможность определения интегрального значения структурной постоянной на трассе зондирования по отношению средних мощностей эхосигнала лидара, регистрируемого осевым и неосевым приемниками.

На рис. 6, 7 представлены результаты одновременных измерений коэффициента УОР $N_p = \int_D N(\mathbf{R}) d\mathbf{R}$ лидарного эхосигнала, принимаемого круглой апертурой диаметром $2B = 5$ см, и структурной постоянной турбулентных флуктуаций показателя преломления воздуха [59]. Эксперимент проводился на двухкилометровой горизонтальной приземной трассе 16–17.06.2017 г.

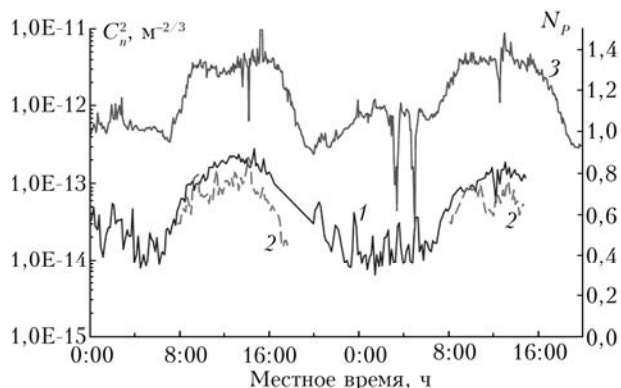


Рис. 6. Динамика изменения структурной постоянной флуктуаций показателя преломления, рассчитанная по данным акустических метеостанций (кривые 1 и 2), и временной ход коэффициента усиления обратного рассеяния на дистанции 500 м (кривая 3)

На рис. 7 приведен пример набора профилей коэффициента усиления за весь период измерений 16 и 17 июня. Для графика были отобраны профили, регистрировавшиеся в начале каждого часа.

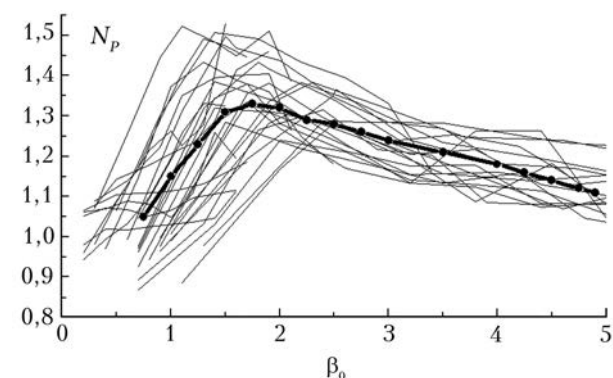


Рис. 7. Коэффициент усиления обратного рассеяния как функция параметра β_0 ; полужирная кривая — результат усреднения по всему данному набору профилей

Видно, что, несмотря на значительный разброс, в среднем кривые параметризуются с помощью β_0 . С увеличением параметра β_0 коэффициент усиления сначала растет, достигая максимальных значений в диапазоне изменения β_0 от 1,5 до 2, затем постепенно убывает с дальнейшим увеличением интенсивности оптической турбулентности на трассе зондирования. Полученные экспериментальные результаты качественно согласуются с теорией усиления мощности обратного рассеянного в атмосфере излучения [28, 56–58, 60].

Заключение

В последние пять лет в ИОА СО РАН выполнен большой объем исследований, направленных на разработку лидарных методов и создание лидарных средств исследования турбулентности в атмосфере. Разработана методология ветрового зондирования и оценивания параметров ветровой турбулентности из зашумленных данных микроимпульсных ветровых КДЛ. Создан макет световолоконного доплеровского лидара. Разработана теория и создана линейка макетов лидара для измерения интенсивности оптической турбулентности на основе эффекта усиления обратного рассеяния в случайных средах. В современных условиях все это было бы невозможно без финансирования, полученного по проектам ФЦП на основании соглашений о предоставлении субсидии № 14.616.21.0058 и № 14.607.21.0151 между ИОА СО РАН и Минобрнауки.

Проведенные экспериментальные исследования выполнялись не только в стационарных, но и в полевых условиях, и требовали не только решения исследовательских задач, но и обустройства измерительных пунктов, организации и ведения круглосуточных измерений. Огромная благодарность сотрудникам лаборатории распространения волн Е.В. Гордееву, В.В. Кускову, В.В. Рейно, А.А. Сухареву, А.Н. Шестернину, принимавшим активное участие во всех экспериментах. Наконец, эти работы просто бы не состоялись без высокопрофессиональной команды ученых — специалистов, без преувеличения, мирового уровня — И.Н. Смалихо, И.А. Раженкова, А.В. Фалица.

1. Henderson S.W., Suni P.J.M., Hale C.P., Hannon S.M., Magee J.R., Bruns D.L., Yuen E.H. Coherent laser radar at 2 μ m using solid-state lasers // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1993. V. 31, N 1. P. 4–15.
2. Cariou J.-P., Thobois L., Spenser P. From Windcube #0001 to Windcube#1000: Doppler lidar as a mature technology // 19 Coherent Laser Radar Conf. 18–21 June 2018, Okinawa, Japan. P. 404–407.
3. Андреев М., Васильев Д., Пенкин М., Смоленцев С., Борейшо А., Клочков Д., Коняев М., Орлов А., Чугреев А. Когерентные доплеровские лидары для мониторинга ветровой обстановки // Фотоника. 2014. № 6/48. С. 20–28.
4. Hogan R.J., Grant A.L.M., Illingworth A.J., Pearson G.N., O'Connor E.J. Vertical velocity variance and skewness in clear and cloud-topped boundary layers as revealed by Doppler lidar // Q. J. Roy. Meteorol. Soc. 2009. V. 135, N 4. P. 635–643.
5. Barlow J.F., Dunbar T.M., Nemitz E.G., Wood C.R., Gallagher M.W., Davies F., O'Connor E., Harrison R.M. Boundary layer dynamics over London, UK, as observed using Doppler lidar during REPARTEE-II // Atmos. Chem. Phys. 2011. V. 11, N 3. P. 2111–2125.
6. Huang M., Gao Z., Miao S., Chen F., Lemone M.A., Li J., Hu F., Wang L. Estimate of boundary-layer depth over Beijing, China, using Doppler lidar data during SURF-2015 // Bound.-Lay. Meteorol. 2017. V. 162, N 9. P. 503–522.
7. Pichugina Y.L., Banta R.M. Stable boundary layer depth from high-resolution measurements of the mean wind profile // J. Appl. Meteorol. Climatol. 2010. V. 49, N 1. P. 20–35.

8. Bonin T.A., Carroll B.J., Hardesty R.M., Brewer W.A., Hajny K., Salmon O.E., Shepson P.B. Doppler lidar observation of the mixing height in Indianapolis using an automated composite fuzzy logic approach // *J. Atmos. Ocean. Technol.* 2018. V. 35, N 3. P. 915–935.
9. Banakh V.A., Smalikho I.N. Coherent Doppler wind lidars in a turbulent atmosphere. Boston, London: Artech House, 2013. 248 p.
10. Sathe A., Mann J. A review of turbulence measurements using ground-based wind lidars // *Atmos. Meas. Tech.* 2013. V. 6. P. 3147–3167.
11. Fuertes F.C., Iungo G.V., Porté-Agel F. 3D turbulence measurements using three synchronous wind lidars: Validation against sonic anemometry // *J. Atmos. Ocean. Technol.* 2014. V. 31. P. 1549–1556.
12. Sathe A., Mann J., Vasiljevic N., Lea G. A six-beam method to measure turbulence statistics using ground-based wind lidars // *Atmos. Meas. Tech.* 2015. V. 8. P. 729–740.
13. 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. P. 4191–4208.
14. Banakh V.A., Smalikho I.N., Falits A.V. 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.
15. Bonin T.A., Choukulkar A., Brewer W.A., Sandberg S.P., Weickmann A.M., Pichugina Y., Banta R.M., Oncley S.P., Wolfe D.E. Evaluation of turbulence measurement techniques from a single Doppler lidar // *Atmos. Meas. Tech.* 2017. V. 10. P. 3021–3039.
16. Newman J.F., Clifton A. An error reduction algorithm to improve lidar turbulence estimates for wind energy // *Wind Energ. Sci.* 2017. V. 2. P. 77–95.
17. Banakh V.A., Smalikho I.N. Lidar studies of wind turbulence in the stable atmospheric boundary layer // *Remote Sens.* 2018. V. 10. P. 1219.
18. Bodini N., Lundquist J.K., Newsom R.K. Estimation of turbulence dissipation rate and its variability from sonic anemometer and wind Doppler lidar during the XPIA field campaign // *Atmos. Meas. Tech.* 2018. V. 11. P. 4291–4308.
19. Смалыхо И.Н., Банах 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.
20. Смалыхо И.Н., Банах В.А., Фалиц А.В., Руди Ю.А. Определение скорости диссипации энергии турбулентности из данных, измеренных лидаром Stream Line в приземном слое атмосферы // *Оптика атмосф. и океана.* 2015. Т. 28, № 10. С. 901–905.
21. Банах В.А., Смалыхо И.Н. Измерение ветра в пограничном слое атмосферы микроимпульсными когерентными доплеровскими лидарами // *Оптика и спектроскоп.* 2016. Т. 121, № 1. С. 164–171.
22. Смалыхо И.Н., Банах В.А., Фалиц А.В. Лидарные измерения параметров ветровой турбулентности в пограничном слое атмосферы // *Оптика атмосф. и океана.* 2017. Т. 30, № 4. С. 342–349.
23. Смалыхо И.Н., Банах В.А., Фалиц А.В. Лидарные исследования ветровой турбулентности при наличии в атмосфере низкоуровневого струйного течения // *Оптика атмосф. и океана.* 2018. Т. 31, № 9. С. 716–724.
24. Stephan A., Wildmann N., Смалыхо И.Н. Измерения параметров ветровой турбулентности лидаром Windcube 200s в пограничном слое атмосферы // *Оптика атмосф. и океана.* 2018. Т. 31, № 10. С. 815–820.
25. Банах В.А., Надеев А.И., Разенков И.А., Смалыхо И.Н., Фалиц А.В., Шерстобитов А.М. Результаты тестирования импульсного когерентного доплеровского лидара, созданного в ИОА СО РАН // XXV Междунар. симпози. «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Новосибирск, 2019 г. (в печати).
26. Беленький М.С., Бороноев В.В., Гомбоев Н.Ц., Муromов В.Л. Оптическое зондирование атмосферной турбулентности. Новосибирск: Наука, 1986. 92 с.
27. Zilbermen A., Kopeika N.S. Lidar measurements of atmospheric turbulence profiles // *Proc. SPIE XVI Free Space Laser Commun. Technol.* Bellingham. 2004. V. 5338. P. 288–297.
28. Гурвич А.С. Лидарное зондирование турбулентности на основе эффекта усиления обратного рассеяния // *Изв. РАН. Физика атмосф. и океана.* 2012. Т. 48, № 6. С. 655–665.
29. Лидар: Пат. 116245. Россия, МПК8, G 01 S 17/88. Гурвич А.С.; Учреждение РАН Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН. № 2011150933/28; Заявл. 15.12.2011; Опубл. 20.05.2012. Бюл. № 14.
30. Виноградов А.Г., Кравцов Ю.А., Татарский В.И. Эффект усиления обратного рассеяния на телах, помещенных в среду со случайными неоднородностями // *Изв. вузов. Радиофизика.* 1973. Т. 16, № 7. С. 1064–1070.
31. Banakh V.A., Razenkov I.A., Smalikho I.N. Laser echo signal amplification in a turbulent atmosphere // *Appl. Opt.* 2015. V. 54, N 24. P. 7301–7307.
32. Банах В.А., Разенков И.А., Смалыхо И.Н. Аэрозольный лидар для исследования усиления обратного атмосферного рассеяния. I. Компьютерное моделирование // *Оптика атмосф. океана.* 2015. Т. 28, № 1. С. 5–11.
33. Банах В.А., Разенков И.А. Аэрозольный лидар для исследования усиления обратного атмосферного рассеяния. II. Конструкция и эксперимент // *Оптика атмосф. и океана.* 2015. Т. 28, № 02. С. 113–119.
34. 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.
35. 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., Beson C. Tentative detection of clear-air turbulence using a ground-based Rayleigh lidar // *Appl. Opt.* 2016. V. 55, N 13. P. 3420–3428.
36. Колмогоров А.Н. Локальная структура турбулентности в несжимаемой вязкой жидкости при очень больших числах Рейнольдса // *Докл. АН СССР.* 1941. Т. 30, № 4. С. 299–303.
37. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. Часть 2. М.: Наука, 1967. 720 с.
38. Бызова Н.Л., Иванов В.Н., Гаргер Е.К. Турбулентность в пограничном слое атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1989. 263 с.
39. Ламли Дж., Пановский Г. Структура атмосферной турбулентности. М.: Мир, 1966. 264 с.
40. Banta R.M., Newsom R.K., Lundquist J.K., Pichugina Y.L., Coulter R.L., Mahrt L. Nocturnal low-level jet characteristics over Kansas during CASES-99 // *Bound. Lay. Meteorol.* 2002. V. 105. P. 221–252.
41. Banta R.M., Pichugina Y.L., Brewer W.A. Turbulent velocity-variance profiles in the stable boundary layer generated by a nocturnal low-level jet // *J. Atmos. Sci.* 2006. V. 63 P. 2700–2719.

42. Banta R.M., Pichugina Y.L., Newsom R.K. Relationship between low-level jet properties and turbulence kinetic energy in the nocturnal stable boundary layer // *J. Atmos. Sci.* 2003. V. 60 P. 2549–2555.
43. Newsom R.K., Banta R.M. Shear-flow instability in the stable nocturnal boundary layer as observed by Doppler lidar during CASES-99 // *J. Atmos. Sci.* 2003. V. 60, N 1. P. 16–33.
44. Pichugina Y.L., Banta R.M., Kelley N.D., Brewer W.A. Nocturnal boundary layer height estimate from Doppler lidar measurements // *Proc. 18th Symp. on Bound.-Lay. and Turbulence.* June 2008. Stockholm, Sweden. 7B.6.
45. Eberhard W.L., Cupp R.E., Healy K.R. Doppler lidar measurement of profiles of turbulence and momentum flux // *J. Atmos. Ocean. Technol.* 1989. V. 6. P. 809–819.
46. Von Kàrmàn T. Progress in the statistical theory of turbulence // *Proc. Nat. Acad. Sci.* 1948. V. 34, N 11. P. 530–539.
47. Винниченко Н.К., Пинус Н.З., Шметер С.М., Шур Г.Н. Турбулентность в свободной атмосфере. Л.: Гидрометеоиздат, 1976, 336 с.
48. Банах В.А., Смалихо И.Н. Оценивание скорости диссипации турбулентной энергии в пограничном слое атмосферы из измерений радиальной скорости ветра микроимпульсными когерентными доплеровскими лидарами. Часть I. Численный анализ // *Оптика атмосфер. океана.* 2017. Т. 30, № 8. С. 631–637.
49. Банах В.А., Смалихо И.Н., Фалиц А.В. Оценивание скорости диссипации турбулентной энергии в пограничном слое атмосферы из измерений радиальной скорости ветра микроимпульсными когерентными доплеровскими лидарами. Часть II. Эксперимент // *Оптика атмосфер. океана.* 2017. Т. 30, № 8. С. 638–643.
50. Banakh V.A., Smalikho I.N. Lidar observations of atmospheric internal waves in the boundary layer of atmosphere on the coast of Lake Baikal // *Atmos. Meas. Tech.* 2016. V. 9, N 10. P. 5239–5248.
51. Pearson G.N., Facock J., Olsson F. A 1.5 mkm coherent pulsed Doppler lidar using fibre-optics components // *Proc. 11th Coherent Laser Radar Conf.* 1–6 July 2001. Malvern, Worcestershire. P. 144–146.
52. Pierson G., Davies F., Collier C. An analysis of performance of the UFAM pulsed Doppler lidar for the observing the boundary layer // *J. Atmos. Ocean. Tech.* 2009. V. 26, N 2. P. 240–250.
53. Banakh V.A., Razenkov I.A. Refractive turbulence strength estimation based on the laser echo signal amplification effect // *Opt. Lett.* 2016. V. 41, N 19. P. 4429–4432.
54. Банах В.А., Разенков И.А. Лидарные измерения усиления обратного атмосферного рассеяния // *Оптика и спектроскоп.* 2016. Т. 120, № 2. С. 339–348.
55. Банах В.А., Миронов В.Л. Локационное распространение лазерного излучения в турбулентной атмосфере. Наука, 1986. 173 с.
56. Смалихо И.Н. Расчет коэффициента усиления обратного рассеяния лазерного излучения, распространяющегося в турбулентной атмосфере, с использованием численного моделирования // *Оптика атмосфер. и океана.* 2012. Т. 25, № 9. С. 796–800; Smalikho I.N. Calculation of the backscatter amplification coefficient of laser radiation propagating in a turbulent atmosphere using numerical simulation // *Atmos. Ocean. Opt.* 2013. V. 26, N 2. P. 135–139.
57. Банах В.А. Усиление средней мощности обратно рассеянного в атмосфере излучения в режиме сильной оптической турбулентности // *Оптика атмосфер. и океана.* 2012. Т. 25, № 10. С. 857–862.
58. Банах В.А., Фалиц А.В., Залозная И.В. Влияние пространственной ограниченности лазерного пучка на эффект усиления обратного рассеяния в турбулентной атмосфере // XXV Междунар. симпоз. «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Новосибирск. 2019 г. (в печати).
59. Банах В.А., Герасимова Л.О., Залозная И.В., Фалиц А.В. Усиление лидарного сигнала в режиме сильной оптической турбулентности // *Оптика атмосфер. океана.* 2018. Т. 31, № 8. С. 609–615; Banakh V.A., Gerasimova L.O., Zaloznaya I.V., Falits A.V. Lidar signal amplification in a turbulent atmosphere under strong optical scintillations // *Atmos. Ocean. Opt.* 2019. V. 32, N 1. P. 1–7.
60. Банах В.А., Фалиц А.В. Численный анализ проявления эффекта усиления обратного рассеяния в зависимости от интенсивности оптической турбулентности // XXV Междунар. симпоз. «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы», Новосибирск, 2019 г. (в печати).

V.A. Banakh. Lidar methods and means for the study of atmospheric turbulence developed at Institute of Atmospheric Optics SB RAS.

The main results Institute of Atmospheric Optics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, on the research and development of lidar methods and means for the study of atmospheric turbulence performed at the last five years are received.

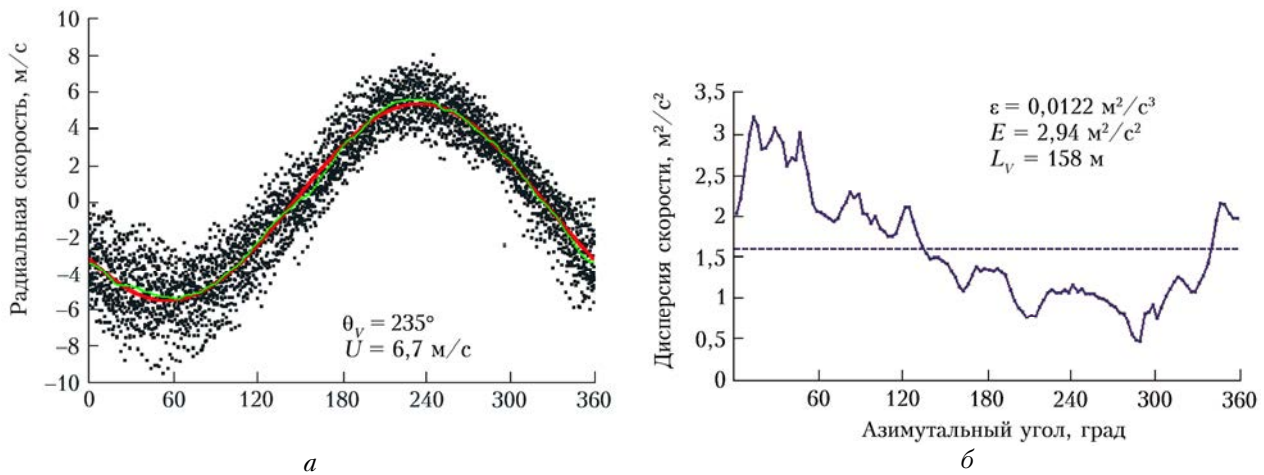


Рис. 2. Пример обработки данных доплеровского ветрового лидара: *a* – одиночные оценки радиальной скорости $V_L(\theta_m, R_k; n)$ (точки); радиальные скорости, усредненные по 30 сканированиям, $\langle V_L(\theta_m, R_k) \rangle$ (зеленая кривая); радиальные скорости как результат синусоидальной подгонки, $V_L(\theta_m, R_k) = S(\theta_m) \langle \hat{V}(h_k) \rangle$ (красная кривая); *б* – дисперсии лидарной оценки радиальной скорости (синяя сплошная кривая) в зависимости от азимутального угла θ_m , полученные из измерений лидаром Stream Line 22.07.2016 г. с 14:09 до 14:39 по местному времени на высоте 109 м; значения дисперсии, усредненной по азимутальным углам (пунктирная линия). Значения оценок средней скорости U , направление ветра θ_V и параметров турбулентности найдены в результате обработки лидарных данных

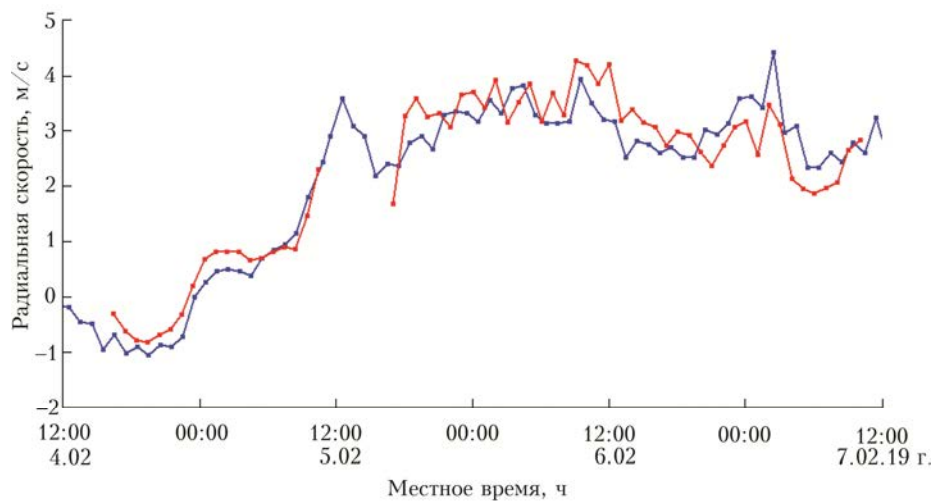


Рис. 4. Временные ходы радиальной скорости на расстоянии 442 м от лидара, полученные из измерений лидаром Stream Line (синяя кривая) и созданным в ИОА СО РАН макетом ветрового лидара (красная кривая)