

ОЦЕНИВАНИЕ СКОРОСТИ ДИССИПАЦИИ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ИЗ ДАННЫХ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЛИДАРАМИ ЛРВ - 2 И STREAMLINE

А.М. Шерстобитов, В.А. Банах, И.Н. Смалихо, А.В. Фалиц

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

e-mail: shrarm@iao.ru, banakh@iao.ru, smalikho@iao.ru, falits@iao.ru

Ключевые слова: импульсный когерентный доплеровский лидар, оптоволоконный лидар, спектральная плотность вертикальной скорости, скорость диссипации кинетической энергии турбулентности.

В работе приведены результаты тестирования оптико-электронного блока лидара ЛРВ-2. Показана возможность использовать оценки радиальной скорости, получаемых лидаром ЛРВ-2 при вертикальном зондировании для оценивания скорости диссипации кинетической энергии ветровой турбулентности методом спектральной плотности вертикальной скорости. Коэффициент корреляции между временными ходами оценок скоростей диссипации, полученных лидарами ЛРВ-2 и StreamLine при хорошем уровне сигнала в дневное время, превышает 0,9.

Для исследования процессов в пограничном слое атмосферы, таких как турбулентность, атмосферные волны и струйные течения, нашей лабораторией была создана вторая версия импульсного когерентного доплеровского лидара – ЛРВ-2.

В мае 2024 на Базовом экспериментальном комплексе ИОА СО РАН проводился эксперимент с использованием лидаров ЛРВ-2 и StreamLine. В ходе эксперимента лидар StreamLine осуществлял попеременно коническое сканирование под углом места 60° и зондирование с направленным вертикально вверх пучком. Лидар ЛРВ-2 был размещен внутри постройки на БЭК (см. рис.1).



Рисунок 1. – Расположение лидаров.

Луч лидара ЛРВ-2 проходил через однослойное остекление на установленное снаружи зеркало, которое направляло пучок вертикально вверх. Лидар ЛРВ-2 работал в режиме с «коротким» зондирующим импульсом [1].

На рис.2(а) показан высотный профиль отношения сигнал-шум (ОСШ). Из данного графика видно, что ОСШ лидара StreamLine значительно превышает таковое лидара ЛРВ-2 до высоты 750-800 метров. Далее наоборот, ОСШ лидара ЛРВ больше, что позволяет зондировать дальше.

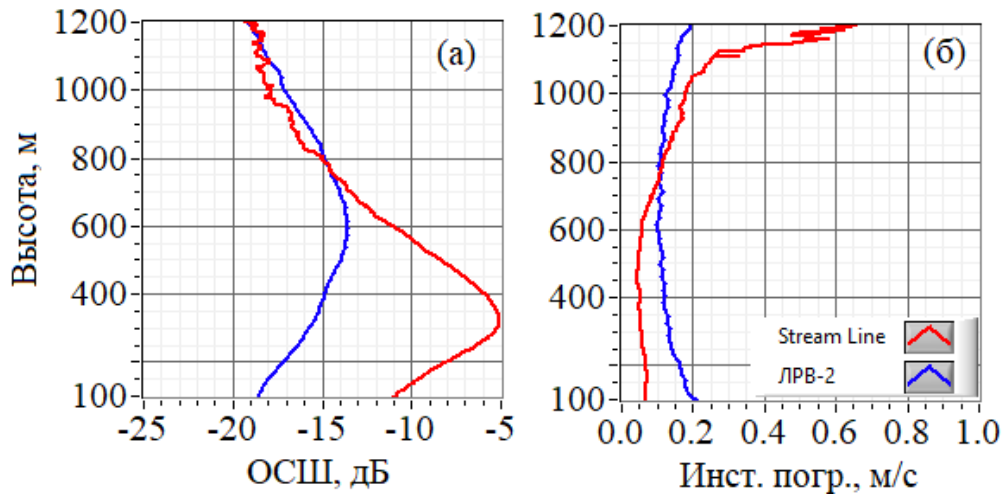


Рисунок 2. (а) – усредненные за час измерения (13.05.2024 с 16:00 по 17:00) отношения сигнал-шум в полосе 50 МГц, полученные при вертикальном зондировании лидарами; (б) – инструментальная погрешность оценок радиальной скорости.

Оценивание скорости диссипации, из временного ряда оценок вертикальных скоростей $V'_w(h, m\Delta t)$, полученных лидаром Stream Line ($\hat{\varepsilon}_{SL}$) и лидаром ЛРВ-2 ($\hat{\varepsilon}_{LWP2}$) осуществлялось с помощью метода спектральной плотности вертикальной скорости (СПВС)[2]. В [2] скорость диссипации находится путем аппроксимации экспериментального спектра (1) в диапазоне частот от 0,05 до 0,2 Гц теоретической зависимостью (2).

$$\hat{S}(h, f_l) = \frac{\Delta t}{M} \left| \sum_{m=0}^{M-1} V'_w(h, m\Delta t) \exp\left(-2\pi j \frac{lm}{M}\right) \right|^2, \quad (1)$$

где $\Delta t = 1$ с, в случае лидара ЛРВ-2; и $\Delta t = 0,6$ с, для лидара StreamLine; $f_l = l\Delta f$ – частота; $l = 1, 2, 3, \dots, M_1/2$ – номер спектрального канала; и $j = \sqrt{-1}$ – мнимая единица.

$$S_{teor}(f) = \varepsilon^{2/3} G(f, U) + S_N \quad (2)$$

где ε – скорость диссипации, S_N – шум, вызванный инструментальной погрешностью $\sigma_e = \sqrt{S_N / \Delta t}$, $G(f, U)$ – функция, учитывающая усреднение лидарной оценки радиальной скорости[2].

Средняя горизонтальная скорость (U), необходимая для построения функции $G(f, U)$ оценивалась по данным конического сканирования лидаром Stream Line. Для получения одной оценки $\hat{\varepsilon}_{SL}, \hat{\varepsilon}_{LWP2}$ использовался временной ряд оценок $\{V'_w(h, m\Delta t)\}$, накопленных в течение получаса, шаг между оценками $\hat{\varepsilon}_{SL}, \hat{\varepsilon}_{LWP2}$ был задан равным 10 минутам. Полученные оценки представлены на рисунках 3а и 3б.

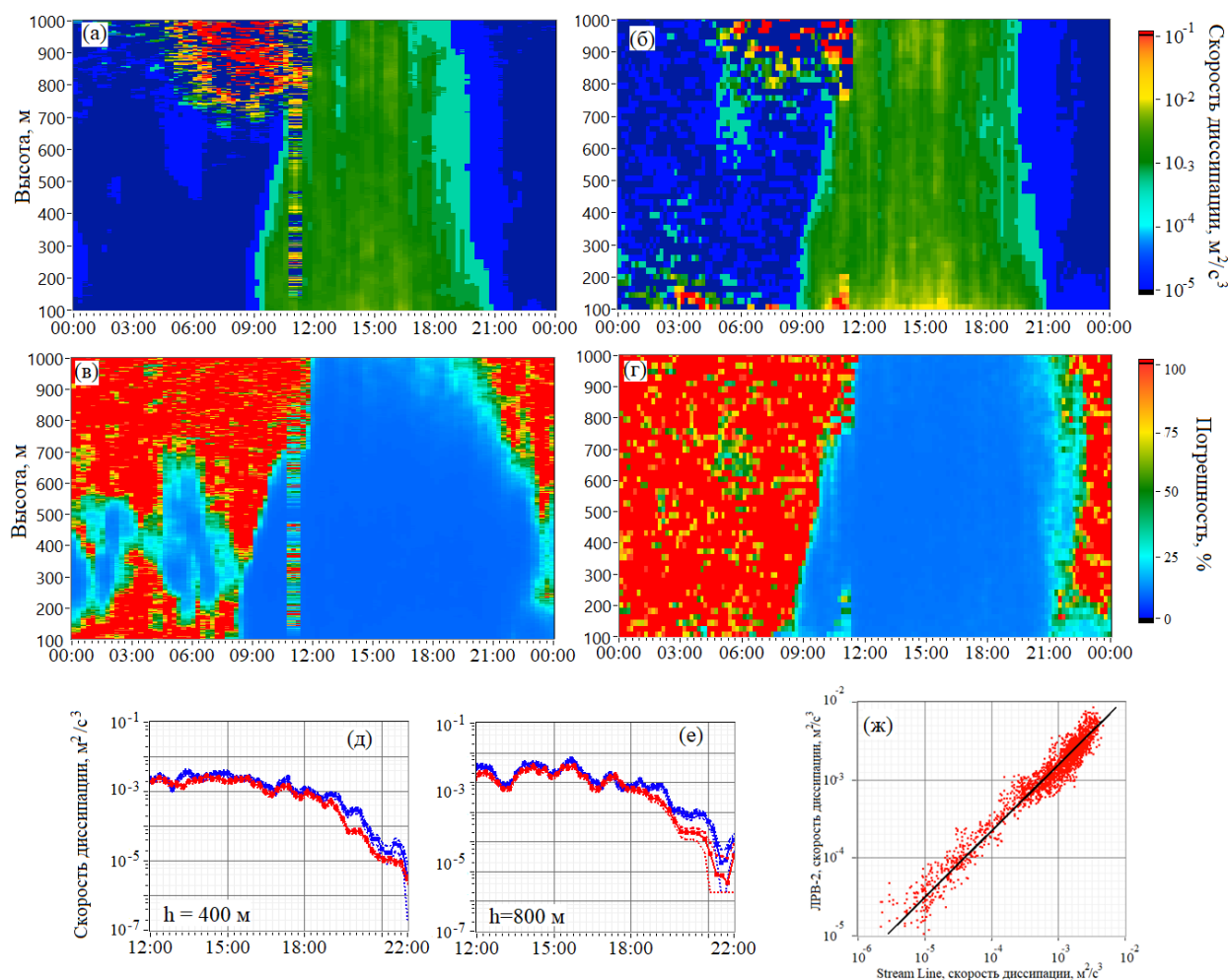


Рисунок 3. – Двумерные распределения лидарных оценок скорости диссипации: $\hat{\varepsilon}_{SL}$ (а), $\hat{\varepsilon}_{LWP2}$ (б); погрешности этих оценок $\Delta \hat{\varepsilon}_{SL}$ (в), $\Delta \hat{\varepsilon}_{LWP2}$ (г); (д), (е) – временные ходы оценок скорости диссипации на высотах 400 и 800 метров: $\hat{\varepsilon}_{SL}$ – красная кривая, $\hat{\varepsilon}_{LWP2}$ – синяя; пунктирными линиями соответствующих цветов обозначены 95% доверительные интервалы; (ж) – сравнение оценок $\hat{\varepsilon}_{LWP2}$ и $\hat{\varepsilon}_{SL}$ с 12:00 до 22:00 в высотном слое от 100 до 800 м. 13.05.2024.

Как видно из рис. 8в около полуночи, и в районе 6 часов утра на двумерном распределении имеются области, в которых лидар StreamLine, в отличие от лидара ЛРВ-2, давал корректные оценки $\hat{\varepsilon}_{SL}$ (с погрешностью 30% и менее). На высоте 800 м и выше уже оценки ЛРВ-2 были точнее. Корректно оценить скорость диссипации для высот более 1 км не

позволила погрешность оценки (U), поскольку горизонтальная скорость оценивалась из конического сканирования лидаром StreamLine.

Сравнение оценок скорости диссипации представлено на рис. 8ж. Для построения данного графика использовались оценки скорости диссипации с 12:00 до 22:00 на высотах от 100 до 900 метров. Была проведена линейная интерполяция ($y = kx + b$) данных (черная линия на рис. 8ж), после их логарифмирования ($x = \lg \hat{\varepsilon}_{LWP2}$; $y = \lg \hat{\varepsilon}_{SL}$). Коэффициенты линейной регрессии составили: $k = 1,17$ и $b = 0,3$. Среднеквадратичная ошибка линейной регрессии составила 0,16; коэффициент взаимной корреляции между $\lg \hat{\varepsilon}_{LWP2}$ и $\lg \hat{\varepsilon}_{SL} - 0,97$.

Результаты атмосферного эксперимента с использованием лидаров ЛРВ-2 и Stream Line подтверждают возможность использования оценок вертикальной скорости, получаемой лидаром ЛРВ-2 в режиме с коротким «импульсом» для оценивания скорости диссипации кинетической энергии турбулентности методом спектральной плотности вертикальной скорости. Так, коэффициент корреляции между временными ходами оценок скоростей диссипации, полученных с использованием спектральных плотностей вертикальных скоростей ветра, измеренных лидарами ЛРВ-2 и StreamLine, превышает 0,9.

Оптический блок лидара создан И.А. Разенковым и К.А. Рынковым.

Финансирование. Работа выполнена по проекту Российского научного фонда № 24-17-00179. Разработка лидара ЛРВ-2 и программ регистрации и обработки доплеровского сигнала проводилась по проекту госзадания ИОА СО РАН.

1 Банах В.А., Разенков И.А., Смалыхо И.Н., Шерстобитов А.М. Тестирование ветрового импульсного когерентного доплеровского лидара ЛРВ-2 при длинном и коротком зондирующих импульсах // *Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы [Электронный ресурс]: Материалы XXX Юбилейного Международного симпозиума, г. Санкт-Петербург, 01-05 июля 2024 г. – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2024. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). С. В127-В130. DOI: ISBN 978-5-94458-200-3.*

2 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, N 11. AN 2071. DOI: 10.3390/rs13112071.