

# ЭКСПЕРИМЕНТ С ЦЕЛЬЮ ЛИДАРНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ШЛЕЙФОВ ВЕТРОВЫХ ТУРБИН, ПРОВЕДЕННЫЙ НА ТЕРРИТОРИИ ВЕТРОПАРКА В УЛЬЯНОВСКОЙ ОБЛАСТИ В 2024 ГОДУ

Смалихо И.Н.<sup>1</sup>, Банах В.А.<sup>1</sup>, Гордеев Е.В.<sup>1</sup>, Сухарев А.А.<sup>1</sup>, Фалиц А.В.<sup>1</sup>, Шерстобитов А.М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия

[smalikh@iao.ru](mailto:smalikh@iao.ru), [banakh@iao.ru](mailto:banakh@iao.ru), [gordeev@iao.ru](mailto:gordeev@iao.ru), [sukharev@iao.ru](mailto:sukharev@iao.ru), [falits@iao.ru](mailto:falits@iao.ru), [shrarm@iao.ru](mailto:shrarm@iao.ru)

В рамках проекта РНФ (№ 24-17-00179) в 2024 году был проведен лидарный эксперимент по исследованию динамики шлейфов ветровых турбин. Для обработки исходных экспериментальных данных предложен новый способ лидарной визуализации скорости ветра внутри шлейфа с высоким пространственным и временным разрешением. Анализ результатов визуализации показал, что внутри шлейфа в поперечном сечении имеет место структура дефицита скорости ветра, близкая к кольцевому распределению, что согласуется с данными численного моделирования методами LES и RANS.

Изучение пространственно-временной динамики техногенных когерентных структур в виде шлейфов за турбинами ветровых электрогенераторов вниз по воздушному потоку является важным, так как внутри такого шлейфа образуется дефицит ветровой энергии, что может привести к существенному снижению эффективности генерации электроэнергии другими ветряками, расположенными на территории данного ветропарка. Настоящая работа посвящена лидарным исследованиям динамики шлейфов ветровых турбин. Ниже дано описание геометрии лидарных измерений, применявшейся для визуализации шлейфов ветровых турбин в эксперименте на территории ветропарка в Ульяновской области и представлен один из результатов этого эксперимента.

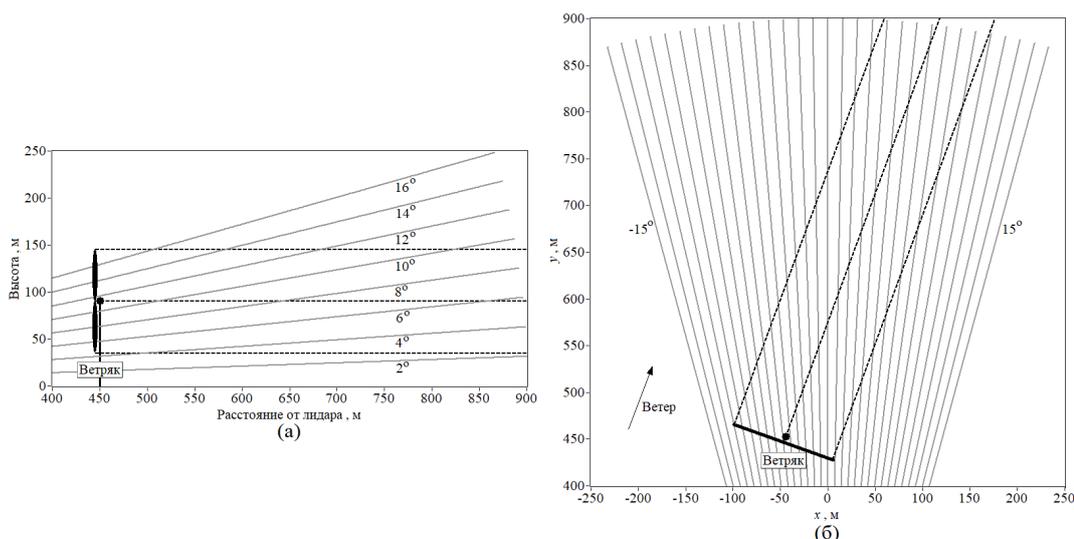


Рисунок 1 – Геометрия измерения лидаром, находящимся на расстоянии 450 м от ветряка (вверх по потоку) с высотой оси турбины 90 м и длина лопасти ветряка 55 м. Пунктирными линиями показы ось и геометрические границы шлейфа ветровой турбины.

На рис.1 показана предложенная нами геометрия измерения сканирующим импульсным когерентным доплеровским лидаром (ИКДЛ), позволяющая с помощью соответствующей обработки исходных данных каждого цикла таких измерений восстанавливать трехмерное распределение скорости ветра внутри шлейфа, образующегося за турбиной вниз по потоку. Здесь используется попеременное секторное коническое сканирование зондирующим пучком с разрешением по азимуту  $1^\circ$  под 8 углами места с  $2^\circ$  по  $16^\circ$  с шагом  $2^\circ$  в пределах сектора от  $-15^\circ$  до  $15^\circ$  азимутального угла. Во время эксперимента данная процедура многократно повторяется.



Рисунок 2 – Фото с места проведения эксперимента на территории ветропарка в Ульяновской области, снятое во время работы лидаров ЛРВ-1 (справа) и Stream Line (слева).

В рамках проекта РНФ (№ 24-17-00179) на территории ветропарка Ульяновской области с 24-го июня по 2-е июля 2024 года был проведен эксперимент, в котором задействовались два ИКДЛ (лидары ЛРВ-1 и Stream Line, см. рис.2), акустические анемометры АМК-03 и температурный профилометр МТР-5. Из измерений конически сканирующим лидаром ЛРВ-1 восстанавливались высотные профили скорости и направления ветра, а для лидара Stream Line применялась геометрия измерения, показанная на рис.1, при продолжительности одного цикла около 2,5 мин. Экспериментальное оборудование было размещено на территории ветропарка таким образом, чтобы была возможность лидарного наблюдения шлейфа от различных ветряков в зависимости от направления ветра (т.е. чтобы шлейф был в пределах сектора сканирования, см. рис.1(б)).

Исходными данными одного цикла измерений лидаром Stream Line являются массивы оценок отношения сигнал-шум  $SNR(R_k, \theta_m, \varphi_n)$  и радиальной скорости  $V_L(R_k, \theta_m, \varphi_n)$ , где расстояние от лидара вдоль зондирующего луча  $R_k = R_0 + k\Delta R$ ,  $R_0 = 90$  м - минимальное расстояние,  $k = 0, 1, 2, \dots, K - 1$  и  $\Delta R = 3$  м - шаг по дальности,  $\theta_m = \theta_0 \pm (m - 1)\Delta\theta$  -

азимутальный угол,  $\theta_0 = -15^\circ$  при увеличении и  $\theta_0 = 15^\circ$  при уменьшении азимутального угла,  $m = 1, 2, \dots, 31$  - номер луча в пределах одного секторного сканирования,  $\Delta\theta = 1^\circ$  - разрешение по азимутальному углу,  $\varphi_n = \varphi_0 \pm (n - 1)\Delta\varphi$  - угол места,  $\varphi_0 = 2^\circ$  при увеличении и  $\varphi_0 = 16^\circ$  при уменьшении угла места,  $n = 1, 2, \dots, 8$  - номер сканирования и  $\Delta\varphi = 2^\circ$  - шаг по углу места. Так как из-за отражения зондирующего излучения от ветряка, некоторые оценки радиальной скорости сильно искажены, при обработке данных мы использовали процедуру фильтрации хороших оценок радиальной скорости  $V_L(R_k, \theta_m, \varphi_n)$ , учитывающую сильное возрастание  $\text{SNR}(R_k, \theta_m, \varphi_n)$  при отражении от ветряка.

Затем, в соответствие с показанной на рис.1 геометрией измерения, воспользовавшись информацией о направлении ветра и интерполяцией данных, из отфильтрованных  $V_L(R_k, \theta_m, \varphi_n)$  можно получить трехмерное распределение скорости ветра  $U(z', x', y')$  в узлах расчетной сетки  $\{z', x', y'\}$  с размером ее ячейки 1 м в системе координат, связанной с точкой положения оси турбины ветряка ( $z'$  - вертикальная,  $x'$  и  $y'$  - горизонтальные оси,  $y'$  - совпадает с направлением ветра).

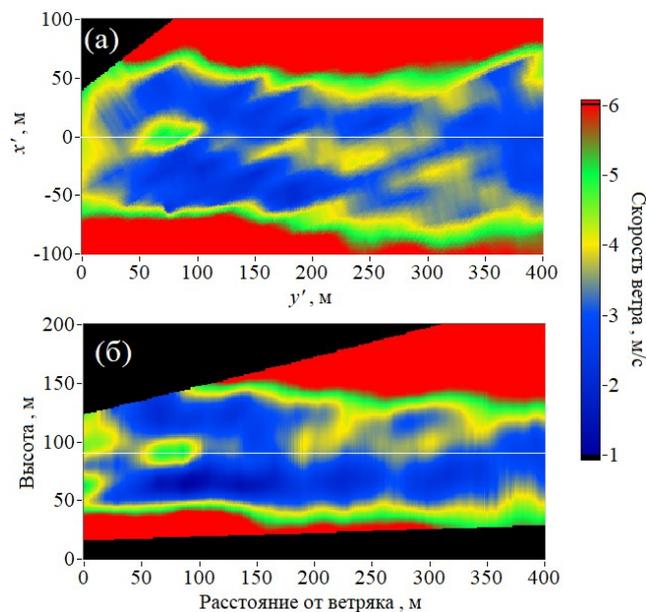


Рисунок 3 – Распределения скорости ветра в горизонтальной плоскости ( $x', y'$ ) на высоте оси ветровой турбины 90 м (а) и в вертикальной плоскости, проходящей через ось турбины ветряка вдоль направления ветра (б), полученные из лидарных измерений 27.06.2024, в течение 2,5 мин, начиная с 11:44:27 местного времени.

На рис.3 приведен пример распределения скорости ветра в горизонтальной плоскости на высоте оси ветровой турбины и в вертикальной плоскости в направлении ветра. Видно существенное уменьшение скорости ветра внутри шлейфа. Воспользовавшись этими же данными, по формуле  $VD(z',x',y')=[1-U(z',x',y')/U_a(z',x',y')]\times 100\%$ , где  $U_a(z',x',y')$  - скорость ветра вне шлейфа ветровой турбины, нами было рассчитано трехмерное распределение дефицита скорости ветра.

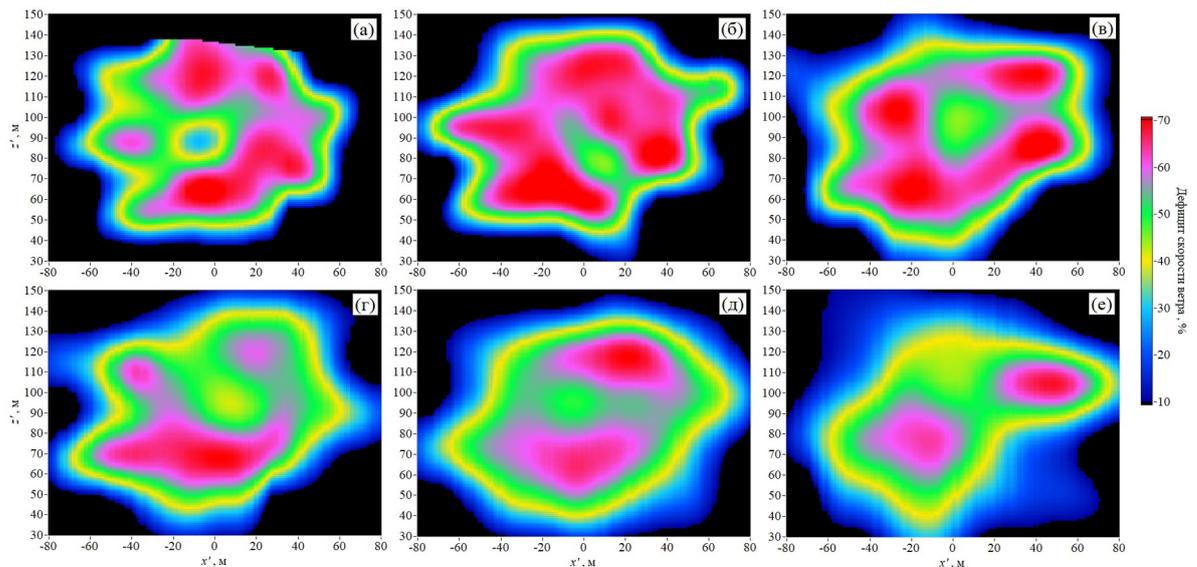


Рисунок 4 – Распределения дефицита скорости ветра в плоскости, перпендикулярной направлению ветра, на расстояниях от ветряка  $r_T$  (а),  $2r_T$  (б),  $3r_T$  (в),  $4r_T$  (г),  $5r_T$  (д),  $6r_T$  (е), полученное из лидарных измерений 27.06.2024 ( $r_T = 55$  м – длина лопасти ветряка).

На рис.4 представлены распределения дефицита скорости ветра в вертикальных плоскостях, перпендикулярных направлению ветра, на различных расстояниях от ветряка. Из данных рис.4 следует, что внутри шлейфа в поперечном сечении имеет место структура дефицита скорости ветра, близкая к кольцевому распределению, что согласуется с результатами численного моделирования методами LES и RANS, опубликованными, в частности, в [1,2].

Работа выполнена по проекту Российского научного фонда № 24-17-00179.

1. Vollmer L., Lee J. C.-Y., Steinfeld G, Lundquist J.K. A wind turbine wake in changing atmospheric conditions: LES and lidar measurements // IOP Conf. Series: Journal of Physics. 2017. V. 854. 012050. doi:10.1088/1742-6596/854/1/012050
2. van der Laan M.P., Kelly M., Baungaard M., Dicholkar A., Hodgson E.L. A simple steady-state inflow model of the neutral and stable atmospheric boundary layer applied to wind turbine wake simulations // Wind Energy. Sci. 2024. V. 9, P. 1985–2000. <https://doi.org/10.5194/wes-9-1985-2024>