

САМОЛЕТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ СКОРОСТИ И ПАРАМЕТРОВ ВЕТРОВОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ЛИДАРОМ ЛРВ-2 ПРИ ЗОНДИРОВАНИИ В НАДИР

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

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

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

Ключевые слова: импульсный когерентный доплеровский лидар, ЛРВ-2, вертикальная скорость ветра, скорость диссипации кинетической энергии турбулентности; pulsed coherent Doppler lidar, LWP-2, vertical wind velocity, turbulent dissipation rate.

В работе представлены результаты измерений, проведённых с помощью лидара ЛРВ-2 при зондировании в надир с борта летящего самолёта. На основе анализа экспериментальных данных были построены высотные профили оценок дисперсии вертикальной скорости (ВС) ветра и скорости диссипации кинетической энергии турбулентности до высоты 1250-1600 метров. Полученные данные свидетельствуют о том, что турбулентные флуктуации ВС над Новосибирским водохранилищем оказались существенно менее интенсивными по сравнению с наблюдаемыми над сушей. Так же, при анализе данных зондирования вблизи облака, удалось зафиксировать сдвиг ВС по одному спектру лидарного сигнала, в котором присутствовали два доплеровских пика.

Существует ряд методов оценивания параметров поля ветра с использованием импульсных когерентных доплеровских лидаров [1,2], установленных на самолетах. Однако [1,2] предполагают применение сканирующей системы. В данной работе тестируется возможность из данных зондирования лидаром ЛРВ – 2 [3] в надир (без сканера) оценивать параметры турбулентности методом спектральной плотности вертикальной скорости [4]. Кроме того, показано, как лидар ЛРВ-2 фиксирует сдвиг вертикальной скорости ветра вблизи облака.

Параметры полета записывались с помощью интегрированной инерциальной системы «КомпаНав-5.2 ИОА»[5], см. рисунок 1. Полет проходил на различных высотных эшелонах (около 7 км, 5.5 км, 4 км, 3 км, 2 км, 1.5 км, 1 км, и 500 м, рис. 1а). Путевая скорость составляла от 120 до 180 м/с (рис. 1б).

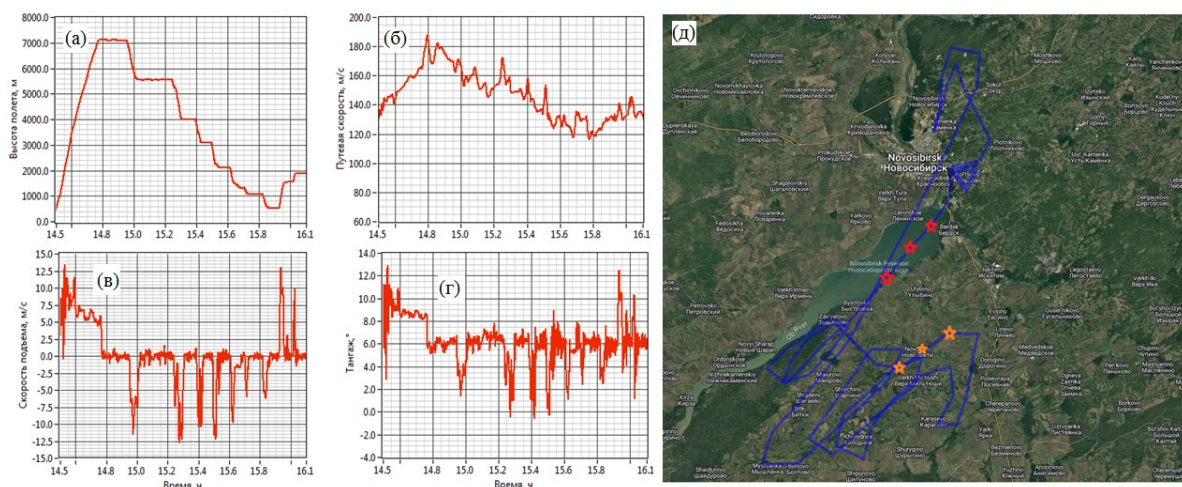


Рисунок 1.— Параметры полета. Данные системы «КомпаНав ИОА» (а,б,в,г);GPS-трек (д).

Согласно данным системы «КомпаНав-5.2 ИОА» угол тангажа оставался положительным даже при снижении самолета, а при полете на фиксированной высоте составлял около 6° (рис. 1г). Лидар ЛРВ-2 работал в режиме с «длинным» зондирующим импульсом [3]. Из всего временного ряда оценок радиальной скорости (РС) были выбраны два участка с приемлемой точностью (красные и коричневые звездочки на рис 1ж). На рисунке 2 приведены высотные профили вертикальной компоненты скорости ветра ($V'_w(h_i) = V'_R(h) - V_0^L$, где V'_R – лидарная оценка вертикальной скорости, V_0^L – оценка радиальной скорости, полученная из отраженного от подстилающей поверхности сигнала) соответствующие данным двум участкам. Использование поправки V_0^L почти на порядок снизило дисперсию лидарной оценки. Так высоте 400 метров среднее значение $\bar{V}'_R$ составило 9,5 м/с, при этом дисперсия $\bar{V}'_R$ составила $0,7 \text{ м}^2/\text{с}^2$ (рис. 3а). При учете поправки V_0^L дисперсия $\langle [V'_w = V'_R(400) - V_0^L]^2 \rangle$ снизилась до $0,15 \text{ м}^2/\text{с}^2$, а среднее значение составило $\bar{V}'_w \approx -0,1 \text{ м/с}$.

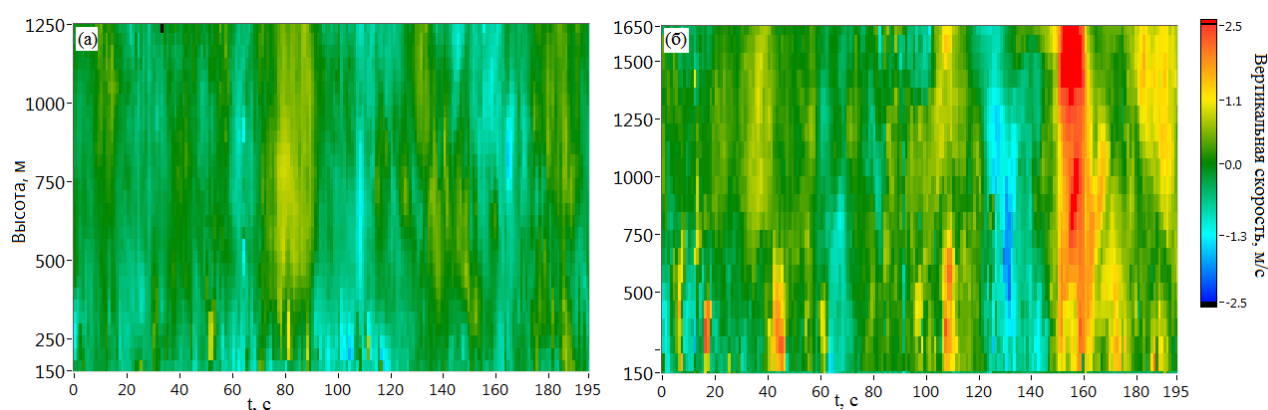


Рисунок 2. – Оценки вертикальной скорости $V'_w(h) = V'_R(h) - V_0^L$. Высота полета 1,5 км (а), и 2 км (б). Нулевой временной отсчет соответствует 15:58 (а), 15:32 (б) 06.08.2024.

На рис. 3 приведены оценки турбулентных параметров, которые были получены из данных рис. 2.а – рис.3 (а-в), и рис.2б – рис.3 (г-е) методом спектральной плотности вертикальной скорости [4]. Горизонтальная скорость U в [4] задавалась равной 130 м/с.

Дисперсия ВС и скорость диссипации при полете над Новосибирским водохранилищем (рис.3а, рис.3б) оказались значительно ниже, чем при полете над сушей (рис. 3г, рис. 3д). Кроме того, из рис. 3г и рис. 3д видно снижение дисперсий ВС и скоростей диссипации с ростом высоты. Однако, на высоте 250 м оценки дисперсий и скоростей диссипации ниже, чем на большей высоте. Это может быть связано с тем, что интегральный масштаб турбулентных

флуктуаций на данных высотах и ниже сопоставим с зондируемым объемом лидара ЛРВ-2, поэтому методику [4] для таких условий использовать некорректно.

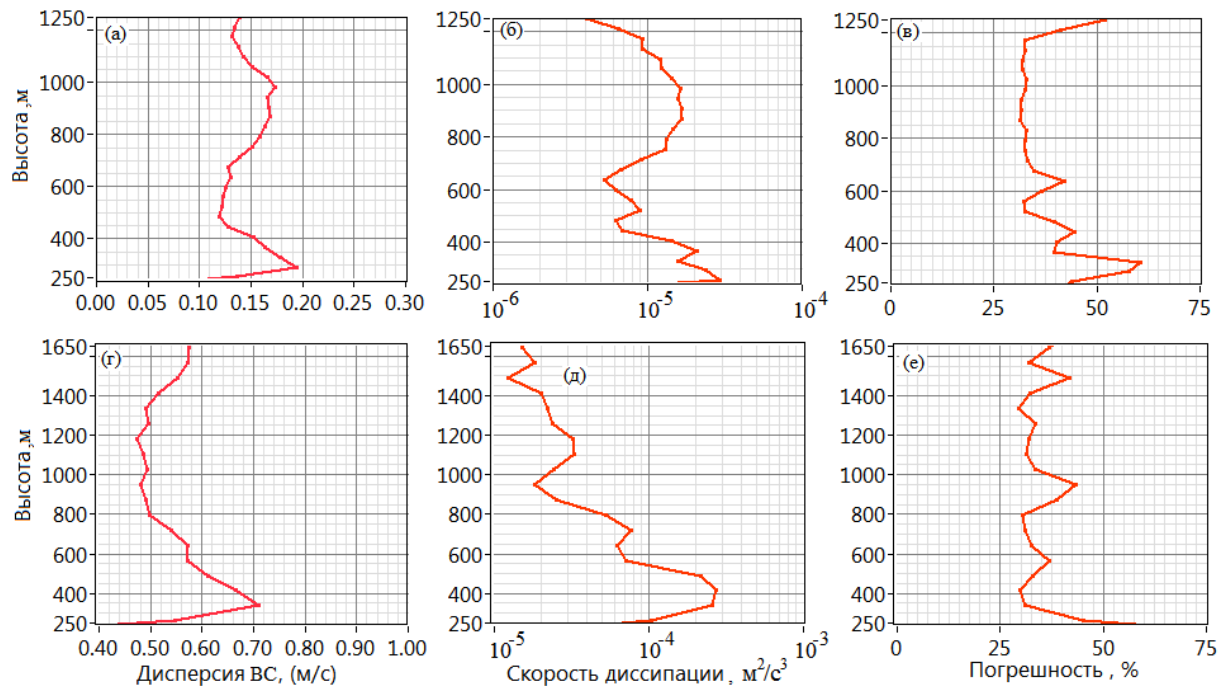


Рисунок 3. – Оценки турбулентности, полученные из двумерных распределений ВС (рис.2).

В момент времени около 14:35 вблизи облака удалось зафиксировать восходящий и нисходящий потоки. Лидарные оценки ВС, соответствующие данному интервалу, показаны на рисунке 4а. По максимальному эхосигналу была определена область, в которой находилось облако (обозначено шестиугольником).

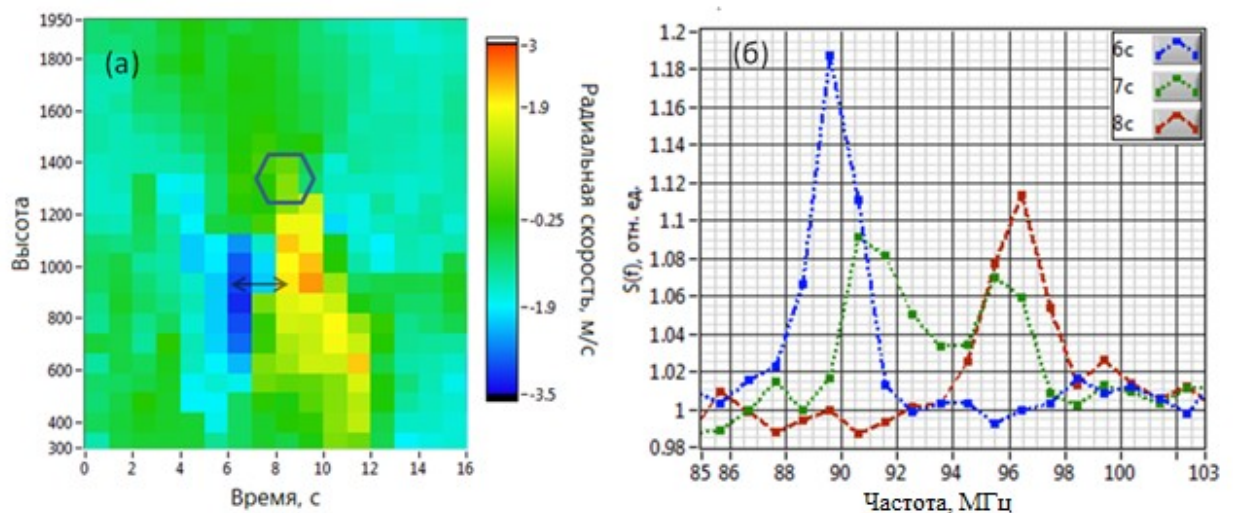


Рисунок 4. – (а): лидарные оценки $V_w'(h) = V_R'(h) - V_0^L$ вблизи облака. Нулевой отсчет по времени соответствует 15.573 ч.; (б): спектры лидарного сигнала соответствующие высоте $h \approx 900$ м.

На рис. 4а стрелочкой показаны три оценки ВС, полученные из спектров мощности (рис. 4б). Из-за большого пространственного усреднения по горизонтали (скорость полета около 130 м/с, а время аккумуляции одного профиля оценок РС 1с), в доплеровском спектре, соответствующему высоте 900 метров и моменту времени 7с, появляется два сигнальных пика на частотах около 91 и 96 МГц. Доплеровский сдвиг, полученный из отраженного от подстилающей поверхности сигнала, составил 94 МГц ($V_0^L = 10,85$ м/с). Разность оценок вертикальных скоростей, полученных в моменты времени 6с и 8с (синяя и красная кривые на рис 12б) составляет около 6 м/с, при их пространственном разнесении около 260 метров. Положение максимумов в спектре (рис 4б, зелёная кривая) соответствует сдвигу ВС 3 м/с, расстояние между соответствующими потоками менее 130 м.

Заключение

Таким образом, при зондировании с самолёта на высоте 1.5–2 км лидаром ЛРВ-2 получены профили оценок вертикальной скорости ветра (ВС). После корректировки по доплеровскому сдвигу сигнала, отраженного от подстилающей поверхности, дисперсия лидарных оценок ВС почти на порядок уменьшилась, что позволило оценить скорость диссипации кинетической энергии турбулентности с точностью 25%–60%. Было замечено, что турбулентные флуктуации ветра над Новосибирским водохранилищем слабее, чем над сушей.

В ходе эксперимента был зарегистрирован сдвиг вертикальной скорости, вызванный термическими потоками вблизи облака. Разность оценок скоростей, полученных с временным разнесом 2 секунды (что при скорости полета самолета 130 м/с соответствует расстоянию 260 м) составила около 6 м/с. Так же удалось зафиксировать сдвиг по одному спектру лидарного сигнала, в котором находилось два доплеровских пика. Разница между соответствующими данным пикам оценками ВС составила 3 м/с.

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

1. Zhang X. et al. Evaluation and Wind Field Detection of Airborne Doppler Wind Lidar with Automatic Intelligent Processing in North China // *Atmosphere*. – 2024. – Т. 15. – №. 5. – С. 536.

2. Emmitt S. G., Zhang S. Q. Joint Analysis of Convective Structure from the APR-2 Precipitation Radar and the DAWN Doppler Wind Lidar During the 2017 Convective Processes Experiment (CPEX).

3. Банах В.А., Разенков И.А., Смалихо 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. B127-B130. DOI: ISBN 978-5-94458-200-3.*

4. 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.

5. Электронный ресурс URL: <https://iao.ru/ru/structure/juc/plane/equip> (дата обращения 16.10.2024)