

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ И НАПРАВЛЕНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВНУТРЕННЕЙ ГРАВИТАЦИОННОЙ ВОЛНЫ ИЗ ИЗМЕРЕНИЙ ТРЕМЯ ИМПУЛЬСНЫМИ КОГЕРЕНТНЫМИ ДОПЛЕРОВСКИМИ ЛИДАРАМИ

Смалихо И.Н.¹, Банах В.А.¹, Фалиц А.В.¹, Шерстобитов А.М.¹

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия

smalikho@iao.ru, banakh@iao.ru, falits@iao.ru, shrarm@iao.ru

Разработан метод оценивания скорости и направления распространения внутренней гравитационной волны (ВГВ) из измерений тремя импульсными когерентными доплеровскими лидарами (ИКДЛ), разнесенными на определенные расстояния между собой по горизонтали. Метод тестирован осенью 2024 года в эксперименте с использованием 1) ИКДЛ ЛРВ-1 на крыше здания ИОА СО РАН, 2) ИКДЛ ЛРВ-2 на территории Базового экспериментального комплекса ИОА СО РАН и 3) ИКДЛ Stream Line на территории частного сектора в Академическом микрорайоне г. Томска при вертикальном направлении всех трех зондирующих пучков. Применение дополнительно конического сканирования в измерениях лидарами ЛРВ-1 и Stream Line дало возможность сопоставления лидарных оценок векторов скоростей ветра и распространения ВГВ.

Изучение внутренних гравитационных волн (ВГВ), образующихся в пограничном слое атмосфере (ПСА) при устойчивой температурной стратификации, является важным для понимания динамических процессов в атмосфере и улучшения алгоритмов численного моделирования ПСА с целью прогноза погоды. В последние годы для экспериментальных исследований ВГВ все большее распространение получают импульсные когерентные доплеровские лидары (ИКДЛ) [1]. Разработаны лидарные методы определения таких параметров ВГВ, как частота (период) и амплитуды квазигармонических колебаний компонент вектора скорости ветра. Однако, способ оценивания скорости и направления распространения ВГВ из измерений одним или двумя ИКДЛ не известен. В настоящей работе предлагается метод определения этих параметров ВГВ из измерений тремя ИКДЛ. Суть метода заключается в следующем.

Будем считать, что в некотором участке атмосферы в пределах определенного временного интервала распространяющаяся ВГВ имеет плоский фазовый фронт. Кроме того, скорость и угол направления ее распространения являются постоянными (не зависящими от координат и времени). На рис.1 показана схема расположения трех лидаров для измерения скорости C_v и угла направления $\theta_{IGW} \equiv \beta$ распространения гравитационной волны. Согласно рисунку, $\beta = \angle BAE$ - угол между осью Y , на которой находятся точки расположения лидаров №1 и №3, и зеленой стрелкой, обозначающей направление распространения ВГВ. Штриховыми линиями,

перпендикулярными к зеленой стрелке, показаны передние фазовые фронты в моменты пересечения ими точек нахождения лидаров t_1 (лидар 1), t_2 (лидар 2) и t_3 (лидар 3). Во время эксперимента каждый из этих лидаров измеряют вертикальную компоненту вектора скорости ветра, как функцию времени t : $V_{z1}(h,t)$, $V_{z2}(h,t)$ и $V_{z3}(h,t)$ на различных высотах h при вертикальном направлении зондирующим пучком.

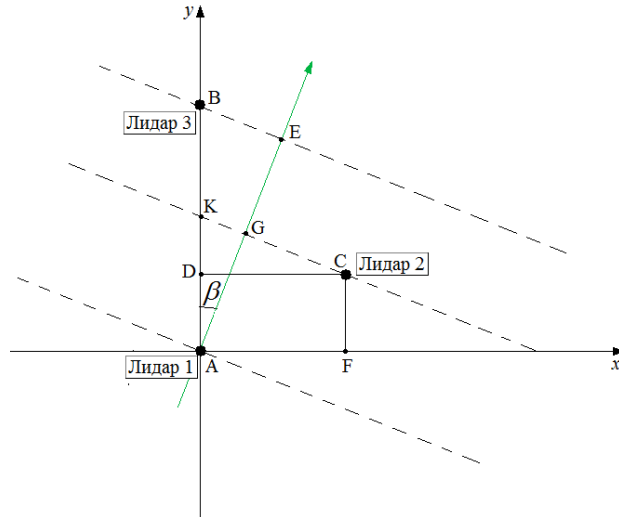


Рисунок 1 – Схема измерения скорости и направления распространения ВГВ тремя ИКДЛ при вертикально направленных зондирующих пучках. Кружочками показаны места расположения лидаров на горизонтальной плоскости $\{x,y\}$.

Из измерений тремя лидарами $V_{z1}(h,t)$, $V_{z2}(h,t)$ и $V_{z3}(h,t)$ во время распространения ВГВ можно определить моменты времени t_1 , t_2 и t_3 , а затем рассчитать временные сдвиги $\Delta t_{12} = t_2 - t_1$, $\Delta t_{13} = t_3 - t_1$ и $\Delta t_{23} = t_3 - t_2$. Для отрезков AB, AD, CF, DC и AF на рис.1 введем следующие обозначения $AB = \Delta L_{13}$ - расстояние между лидарами №1 и №3, $AD = CF = \Delta L_{12y}$ - координата точки расположения лидара №2 по оси y ($\Delta L_{12y} = y_2 - y_1$) и $DC = AF = \Delta L_{12x}$ - координата точки расположения лидара №2 по оси x ($\Delta L_{12x} = x_2 - x_1$). В предположении, что скорость распространения ВГВ C_v не зависит от времени t и горизонтальных координат $\mathbf{r} = \{x, y\}$ для показанных на рис.1 отрезков AG, AE и GE можно записать соотношения: $AG = C_v \Delta t_{12}$, $AE = C_v \Delta t_{13}$ и $GE = C_v \Delta t_{23}$.

Знания о ΔL_{13} , ΔL_{12y} , ΔL_{12x} , Δt_{12} и Δt_{13} позволяют определить значения скорости C_v и угла направления β распространения ВГВ по формулам, которые были получены в результате решения геометрической задачи в соответствии с рис.1. Эти формулы имеют вид: $C_v = 1/\sqrt{a^2 + b^2}$ и $\beta = \arctan(b/a) + \pi\mu$, где $a = \Delta t_{13} / \Delta L_{13}$, $b = \Delta t_{12} / \Delta L_{12x} - (\Delta L_{12y} \Delta t_{13}) / (\Delta L_{12x} \Delta L_{13})$,

$\mu = 0$ при $a > 0$ и $b > 0$ (а также при $a = 0$ и $b > 0$ или при $a > 0$ и $b = 0$), $\mu = 1$ при $a < 0$ (а также при $a = 0$ и $b < 0$ или при $a < 0$ и $b = 0$) и $\mu = 2$ при $a > 0$ и $b < 0$.

Описанный выше метод был апробирован в эксперименте, карта места проведения которого показана на рис.2. Во время эксперимента ИКДЛ ЛРВ-1 (Лидар 1) находился на крыше здания Института оптики атмосферы (ИОА) СО РАН, ИКДЛ Stream Line (Лидар 2) - на территории частного сектора (микрорайон Академический г. Томска) и ИКДЛ ЛРВ-2 (Лидар 3) - на территории Базового экспериментального комплекса (БЭК) ИОА СО РАН. На карте отрезкам AD, DC и AB соответствуют расстояния $\Delta L_{12y} = 747$ м, $\Delta L_{12x} = 918$ м и $\Delta L_{13} = 3160$ м. Для получения информации о скорости U и угла направления θ_v ветра, кроме измерений при вертикальном направлении зондирующего пучка, использовалось коническое сканирование для лидаром ЛРВ-1 и Stream Line.

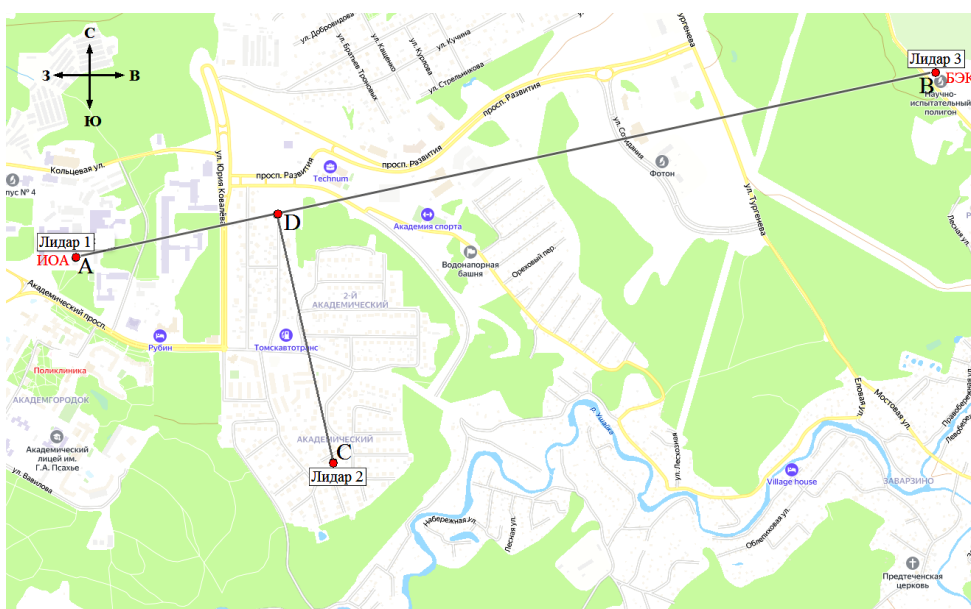


Рисунок 2 – Карта места проведения эксперимента в 2024 году с тремя ИКДЛ, обозначенными как Лидар 1, Лидар 2 и Лидар 3.

На рис.3 представлены временные ходы вертикальной скорости ветра $V_{z3}(t)$, $V_{z2}(t)$ и $V_{z1}(t)$ на высоте 400 м, полученные из совместных измерений тремя лидарами, соответственно, ЛРВ-2, Stream Line и ЛРВ-1. По положениям максимумов во временных зависимостях вертикальной скорости $V_{z3}(t)$, $V_{z2}(t)$ и $V_{z1}(t)$ были определены моменты времени $t_3 = 4070$ с, $t_2 = 3936$ с и $t_1 = 3725$ с, указанные вертикальными линиями на рис.4.8, и по ним рассчитаны временные сдвиги $\Delta t_{12} = t_2 - t_1$, $\Delta t_{13} = t_3 - t_1$ и $\Delta t_{23} = t_3 - t_2$. Затем, задав в формулах (1.6) - (1.9) $\Delta L_{12y} = 747$ м, $\Delta L_{12x} = 918$ м, $\Delta L_{13} = 3160$ м, $\Delta t_{12} = 211$ с и $\Delta t_{13} = 345$ с и проведя по ним

вычисления, мы получили следующие оценки для скорости C_v и угла β (см. рис.1.1) распространения ВГВ: $C_v = 5,6$ м/с и $\beta = 52,3^\circ$.

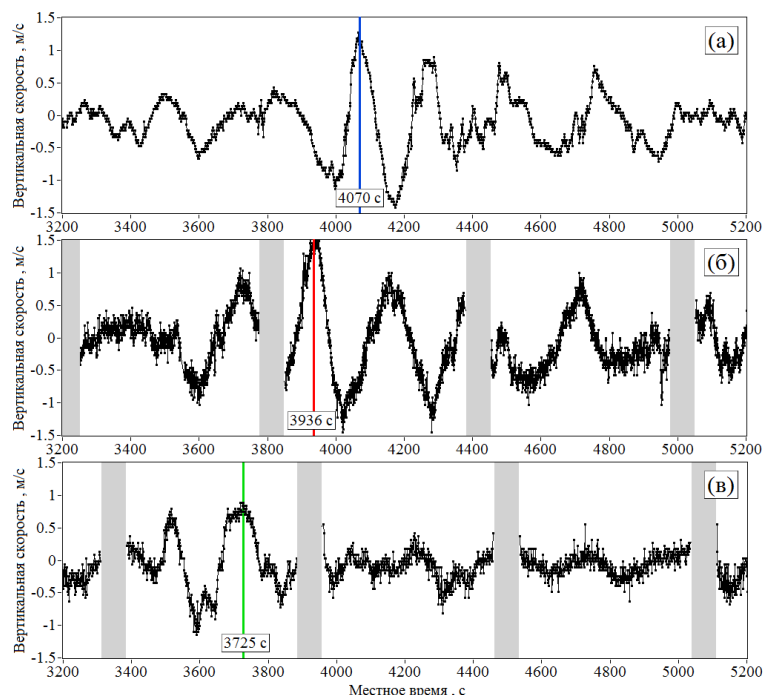


Рисунок 3 – Временные ходы вертикальной составляющей вектора скорости ветра на высоте 400 м (черные кривые), полученные из измерений 07.10.2024 лидарами ЛРВ-2 (а), Stream Line и ЛРВ-1 при вертикальном направлении зондирующего пучка. Серым цветом отмечены промежутки времени, во время которых использовалось коническое сканирование.

Согласно полученным в этом эксперименте лидарным оценкам U и θ_v на высоте 400 м, скорость ветра примерно в два раза превышает скорость распространения ВГВ, а различие между углами направления ветра и ВГВ составляет около 80° .

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 24-17-00179). Разработка и усовершенствование лидара ЛРВ-2 проводились по проекту государственного задания ИОА СО РАН.

1. Смалихо И. Н., Банах В. А., Фалиц А.В., Шерстобитов А. М. Лидарные исследования волновых структур и ветровой турбулентности // Оптика атмосферы и океана. 2024. Т. 37. № 12. С. 1040–1052.