

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЗОНДИРОВАНИЯ ЗИМНЕГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ ВЕТРОВЫМИ И ТУРБУЛЕНТНЫМИ ЛИДАРАМИ

Разенков И.А., Ростов И.А., Шерстобитов А.М.

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

e-mail: lidaroff@iao.ru, rostov@iao.ru, sharm@iao.ru

С декабря 2024 г. по апрель 2025 г. в г. Томске был проведен эксперимент, в котором использовались турбулентные и доплеровские ветровые лидары. Один ветровой лидар работал в зенит, а два других, совместно с турбулентными лидарами, производили зондирование под небольшим углом в направлении на север и северо-запад. Цель эксперимента заключалась в изучении возможностей аппаратуры для исследования структуры и динамики мезомасштабных вихрей в пограничном слое атмосферы. Наблюдения производились в холодное время года, когда температурная стратификация погранслоя устойчивая. Основное внимание уделялось атмосферным волнам и организованным (когерентным) структурам. Показания турбулентных лидаров сопоставлялись с данными ветровых лидаров, температурного профилемера и метеопараметрами.

Особое внимание к пограничному слою атмосферы (ПСА) обусловлено его влиянием на климат, поскольку в нем, в основном благодаря турбулентности, происходит обмен теплом, количеством движения и влагой. Основную роль в этом процессе играют крупные образования, вертикальный размер которых сопоставим с толщиной ПСА, а горизонтальный размер при этом может значительно превышать вертикальный размер [1]. Актуальным является создание приборов и методик для дистанционного исследования ПСА.

С этой целью был организован эксперимент, в котором применялись три ветровых лидара и два турбулентных. Была реализована идея – совместить трассы зондирования ветрового и турбулентного лидаров, работающих на разных эффектах и регистрирующих разные параметры воздушного потока. Ветровые волоконные ИК лидары (ДОП-2 и ДОП-3), работающие на эффекте Доплера, измеряли радиальную компоненту скорости, дальность зондирования 3,5 км [2]. Турбулентные УФ лидары (УОР-5 и УОР-6) работают на эффекте увеличения обратного рассеяния (УОР) и регистрируют «оптическую» турбулентность, их дальность до 8 км [3].

Схема эксперимента и карта г. Томска представлены на рис. 1, а. Лидары располагались в здании, вокруг которого нанесены концентрические окружности с шагом 1 км. Одна трасса зондирования была направлена на север (УОР-6) под углом $8,3^\circ$ к горизонту, другая трасса под таким же углом на северо-запад (ДОП-3 и УОР-5, см. рис. 1, б). Лидар ДОП-2 работал в зенит, регистрируя вертикальную компоненту скорости w . Работал температурный профилемер МТР-5, направленный на запад. К востоку от места расположения лидаров на удалении около 3 км (см. рис. 1, а отмечено звездочкой) находилась мачта с датчиками скорости и температуры.

На рис. 2 представлен пример одновременной работы лидаров 15.01.2025. Профилемер показывал наличие температурной инверсии на высоте $z_i = 200$ м. Азимут скорости ветра у земли составлял 200° , с высотой ветер делал правый экмановский поворот.

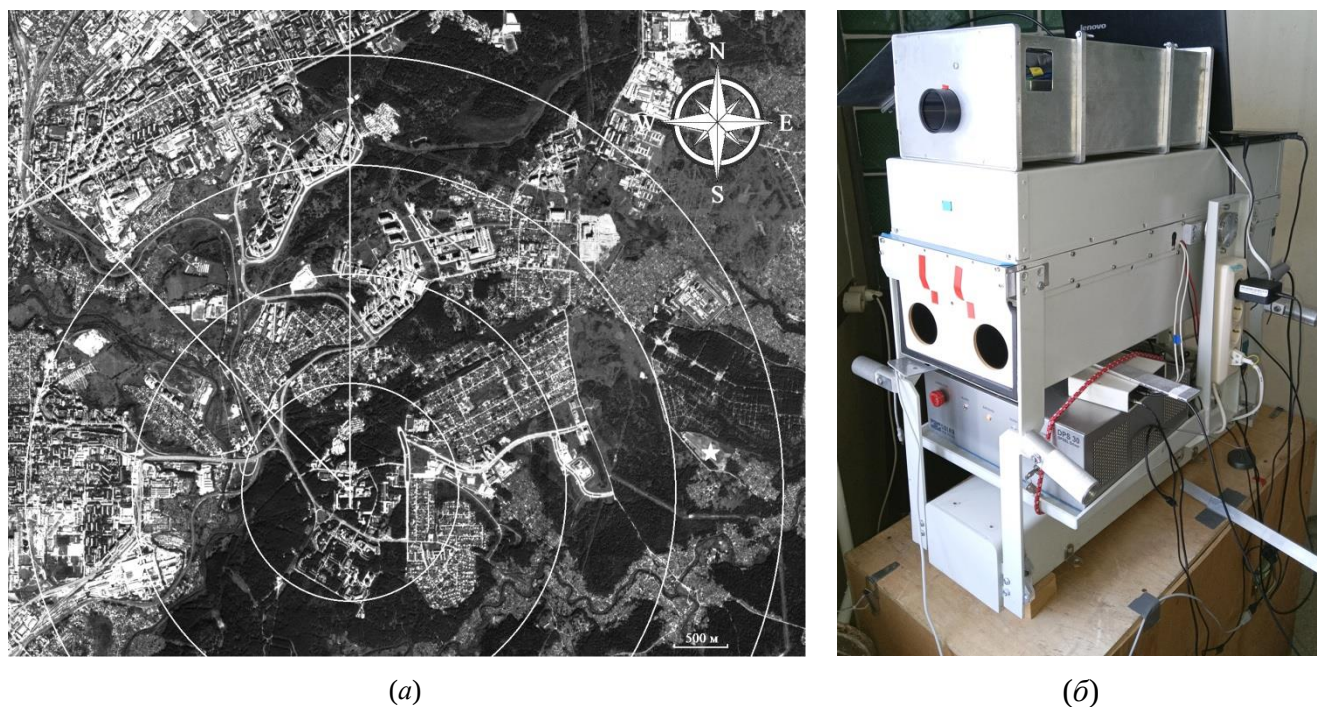


Рисунок 1 — Карта г. Томска (a); лидары (б) УОР-5 (внизу) и ДОП-3 (сверху)

На рис. 2 представлены пространственно-временные контурные графики, которые показывают распределения вертикальной скорости, лидар ДОП-2 (a); радиальной компоненты скорости, лидар ДОП-3 (б); эхосигнал турбулентного лидара УОР-5, канал №1 (в), эхосигнал лидара УОР-6, канал №2 (г) и эхосигнал УОР-6, канал №1 (д). Канал №2 в турбулентном лидаре регистрирует рассеяние от молекул и аэрозоля и предназначен для нормировки эхосигнала канала №1. Эхосигнал №1 от №2 отличается наличием турбулентной добавки за счет эффекта УОР. Сопоставление графиков на рис. 2, г и рис. 2, д указывает на возникновение квазипериодических структур от поверхности до высоты 300 м с периодичностью $\approx 2,5$ мин. Кроме того, оба УОР-лидара в интервале высот 350-600 м зарегистрировали более масштабные образования. Вертикальное расположение нижних структур указывает на то, что они имели наклон близкий к наклону трассы зондирования, равный $8,3^\circ$. Левый наклон верхних структур говорит о том, что эти образования также наклонены в направлении потока и их наклон меньше 8° . Красные вертикальные полосы на рис. 2, а показывают восходящие потоки, синие — нисходящие. Интервал периода восходящих и нисходящих движений сопоставим с периодом нижних (приземных) турбулентных образований.

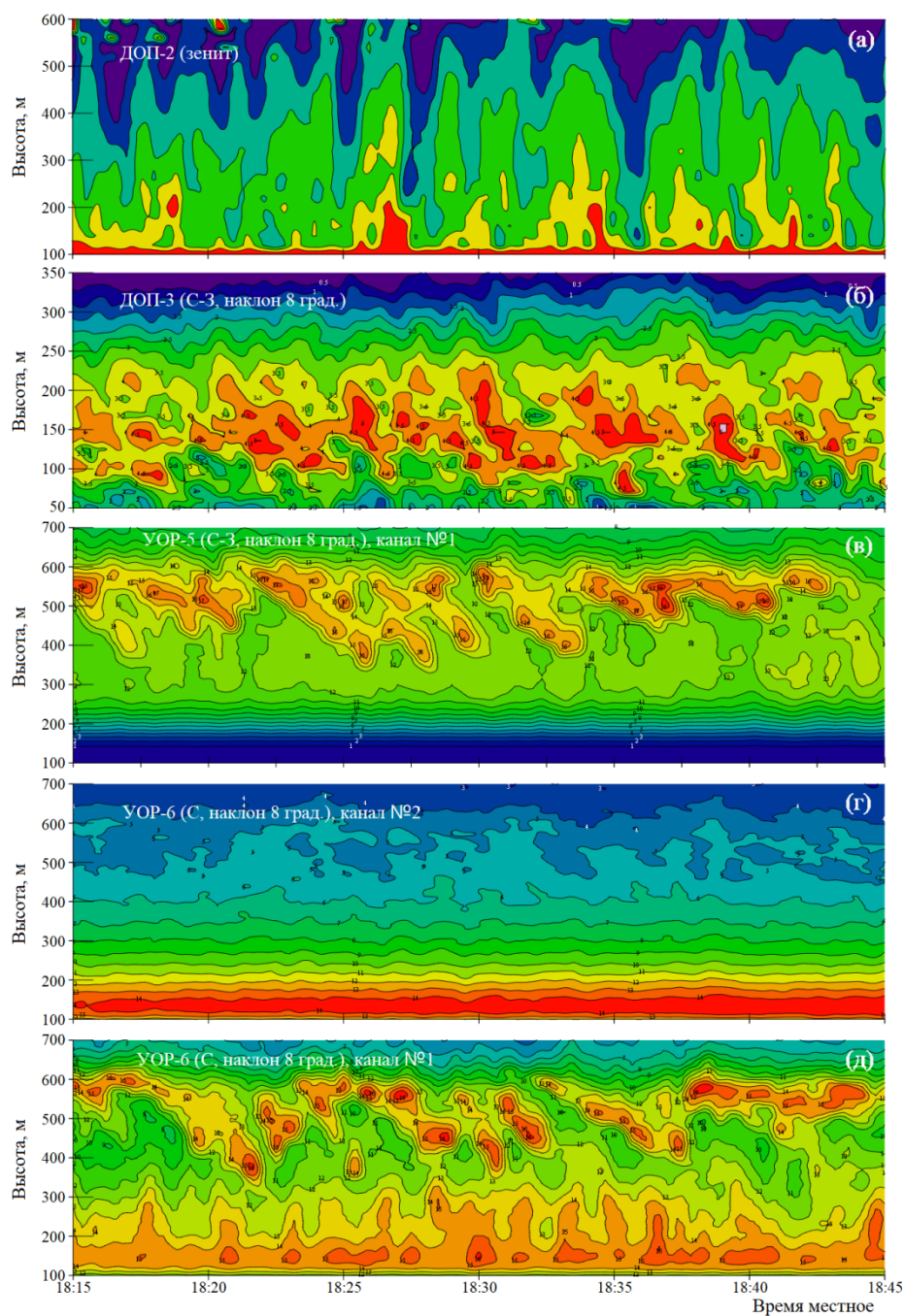


Рисунок 2 — Вертикальная (а) и горизонтальная (б) скорость; эхосигнал УОР-5, канал №1 (в); эхосигналы УОР-6, канал №1 (г) и канал №2 (д). 15.01.2025, г. Томск

Радиальная компонента скорости на рис. 2, б почти не коррелирует с данными турбулентных лидаров (в, д). Данное обстоятельство можно объяснить тем, что турбулентный лидар в большей степени реагирует на флуктуации температуры в потоке, нежели на флуктуации скорости потока.

На рис. 3 представлены безразмерные спектры S флуктуаций вертикальной w (а) и продольной u (б) компонент скорости для двух интервалов высот в зависимости от

безразмерного волнового числа. Заметим, что временное разрешение турбулентных лидаров составляло 10 с, а ветровых - 3 с. Скорость трения u_* определялась из градиентных измерений на метеорологической мачте и составила 0,8 м/с.

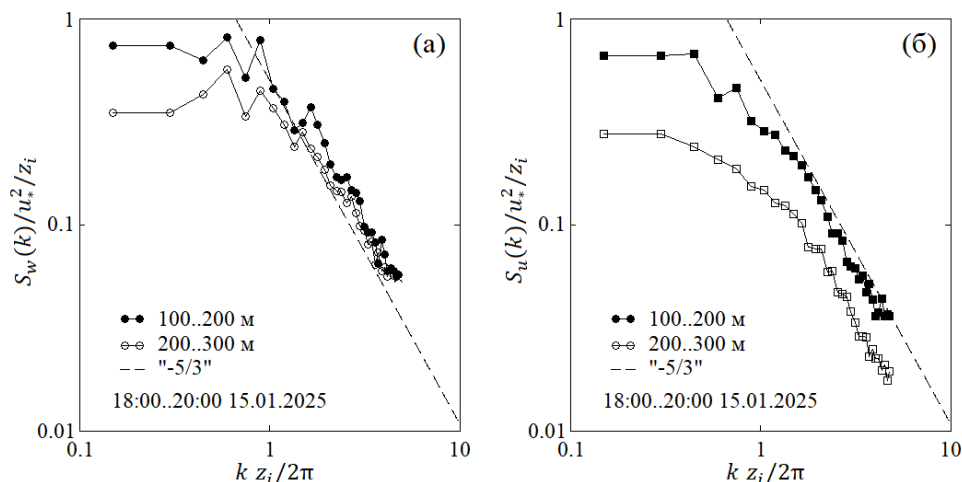


Рисунок 3 — Обезразмеренные спектры вертикальной (а) и горизонтальной (б) скорости

Все спектры на рис. 3 имеют инерционный интервал с наклоном «-5/3» [4]. Для вертикальной компоненты w (а) инерционный интервал начинается с масштаба неоднородностей, сопоставимого с высотой инверсии z_i , где обезразмеренное волновое равно 1. Для продольной компоненты u (б) инерционный интервал существенно меньше.

Приведенный пример показывает, что совместное использование лидаров разного типа позволяет получать больше информации о таком сложном объекте исследования, как пограничный слой атмосферы. Накопленный материал еще предстоит обработать и систематизировать. Основное внимание мы планируем уделить организованным структурам.

Работа выполнена в рамках госзадания ИОА СО РАН.

1. Дымников В.П. , Е.М. Володин, В.Я. Галин, А.В. Глазунов, А.С. Грицун, Н.А. Дианский, В.Н. Лыкосов. Климат и его изменения: математическая теория и численное моделирование.// Сибирский журнал вычислительной математики. 2003. Т. 6 № 4. С. 347-379..

2. Смалихо И. Н., Банах В. А., Разенков И. А., Сухарев А. А., Фалиц А. В., Шерстобитов А. М. Сравнение результатов совместных измерений скорости ветра когерентными доплеровскими лидарами Stream Line и ЛРВ. // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 10. С. 826–835. DOI: 10.15372/AOO20221005.

3. Разенков И. А. Анализ технических решений при проектировании турбулентного лидара. // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 09. С. 766–776. DOI: 10.15372/AOO20220910.

4. Монин А.С., Обухов А.М. Основные закономерности турбулентного обмена в приповерхностном слое // Тр. Института геофизики АН СССР. 1954. No. 24. С. 163-187.