

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ВОЛНОВЫХ И ТУРБУЛЕНТНЫХ СТРУКТУР В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ ИЗ ДИСТАНЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ МЕТЕОПАРАМЕТРОВ

Банах В.А.¹, Смалихо И.Н.¹

¹Институт оптики атмосферы СО РАН, 634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1, Россия

banakh@iao.ru, smalikho@iao.ru

Дано описание созданного в ИОА СО РАН комплекса дистанционного зондирования для исследования термодинамики и турбулентности пограничного слоя атмосферы. Представлены методы и результаты визуализации атмосферных волн, ветровых и турбулентных структур и определения параметров ветровой и температурной турбулентности из данных дистанционных измерений скорости ветра и температуры в пограничном слое атмосферы.

Ключевые слова: когерентный лидар, температурный микроволновый радиометр, турбулентность, внутренние атмосферные волны, пограничный слой атмосферы

В экспериментальных исследованиях атмосферы в настоящее время широко используются дистанционные средства зондирования, которые позволяют получать метеорологические данные в реальном времени с нужным пространственным и временным разрешением. В исследованиях ветрового режима и ветровой турбулентности в пограничном слое атмосферы и в нижней тропосфере важное место занимают когерентные доплеровские ветровые лидары. Использование импульсных когерентных доплеровских лидаров (ИКДЛ) позволяет получать информацию о ветре, ветровых структурах и ветровой турбулентности в пределах всего пограничного слоя атмосферы (ПСА). В последние два десятилетия получили развитие и применение световолоконные ветровые ИКДЛ, отличающиеся высокой надёжностью и позволяющие проводить непрерывные измерения в автоматическом режиме в течение длительного времени. Наряду с мощными дорогостоящими крупногабаритными световолоконными лидарами (Mitsubishi Electric, Япония, Leonardo, Германия), позволяющими измерять скорость ветра на расстояниях до и более 10 км, существуют относительно низкоэнергетические лидарные системы с дальностью зондирования до нескольких километров, но существенно более дешёвые, имеющие сравнительно небольшие габариты и вес, и удобные в эксплуатации, в частности лидар StreamLine (Halo Photonics, Великобритания).

Для измерения температуры в исследованиях пограничного слоя атмосферы широко используются микроволновые радиометры, измеряющие собственное тепловое излучение

атмосферы в микроволновом диапазоне электромагнитного спектра. Известны и коммерчески доступны зарубежные радиометры, позволяющие измерять температуру до высоты 10 км и более. Широкое распространение получил радиометр МТП-5 российской разработки (Атмосферные технологии, Долгопрудный, Московская область), регистрирующий тепловое излучение атмосферы на длине волны 5 мм и позволяющий получать высотные профили температуры до высоты 1 км.

В Институте оптики атмосферы создан аппаратно-программный комплекс дистанционного зондирования для исследования термодинамики и турбулентности пограничного слоя атмосферы. В составе комплекса три доплеровских световолоконных ветровых лидара и два температурных радиометра МТП-5. Из лидаров - один зарубежный (StreamLine), два – разработки ИОА, технология изготовления которых освоена в Институте. Комплекс включает пакет программ, созданный на основе детальных теоретических исследований возможностей ветровых лидаров в зондировании турбулентной атмосферы. В процессе этих исследований разработаны лидарные методы восстановления высотных профилей вектора скорости ветра и оценивания параметров ветровой турбулентности, учитывающие технические особенности световолоконных лидаров. Определены оптимальные параметры измерения и обработки исходных лидарных данных для получения информации о ветре и ветровой турбулентности в пограничном слое атмосферы с заданной погрешностью. Разработаны методы и стратегии лидарных измерений для определения параметров и визуализации атмосферных волн и ветровых структур естественного и техногенного происхождения. Разработанные методы тестированы в замкнутых компьютерных и атмосферных экспериментах. Пакет программ реализует эти методы и стратегии измерения при использовании средств дистанционного зондирования в составе комплекса. Состав и возможности комплекса в исследованиях пограничного слоя атмосферы иллюстрирует рисунок 1.

С использованием комплекса выполнены обширные лидарные исследования турбулентно волнового взаимодействия в устойчивом пограничном слое атмосферы. Показано, что с возникновением внутренних гравитационных волн (ВГВ) амплитуда спектров турбулентных флуктуаций вертикальной скорости в окрестности частоты вызываемых ВГВ квазигармонических осцилляций существенно, иногда на порядки, увеличивается по сравнению со спектрами в отсутствие ВГВ. Вследствие передачи энергии ВГВ мелкомасштабной турбулентности в инерционном интервале частот амплитуда спектров с $-5/3$ степенной частотной зависимостью Колмогорова-Обухова возрастает. Наклон спектров вертикальной скорости в низкочастотной области между частотой вызываемых ВГВ осцилляций и частотой нижней границы инерционного интервала превышает наклон, соответствующий $-5/3$ степенной

зависимости. В этой частотной области спектры подчиняются степенной зависимости от частоты с показателем степени, изменяющимся в диапазоне от $-4,2$ до $-1,9$ со средним значением -3 .

Приборы и определяемые параметры атмосферы и атмосферных структур



Рисунок 1.

Выполнены эксперименты по одновременному измерению скорости ветра двумя и тремя разнесёнными в пространстве лидарами. Это впервые позволило из лидарных измерений определить не только амплитуду и период квазигармонических осцилляций горизонтальной и вертикальной компонент скорости ветра, но и определить направление, длину и скорость распространения самой гравитационной волны.

Выполнены исследования высоты слоя перемешивания на основе лидарной визуализации высотно-временного распределения скорости диссипации турбулентной энергии. Высокая точность оценивания скорости диссипации на основе программной реализации в комплексе дистанционного зондирования разработанных в ИОА методов обеспечивает более высокую

точность определения высоты слоя перемешивания, чем другие методы. В частности, установлено, что лишь в условиях неустойчивости пограничного слоя атмосферы за счёт конвекции оценивание высоты слоя турбулентного перемешивания из высотно временных распределений числа Ричардсона даёт результаты, близкие к получаемым из распределений скорости диссипации кинетической энергии турбулентности. В других случаях оценки высоты слоя перемешивания по числу Ричардсона могут оказаться сильно заниженными

Выполнены исследования возможности дистанционного определения структурной характеристики турбулентных флуктуаций температуры из измерений скорости ветра и температуры. Показано, что структурная характеристика температуры может быть рассчитана по данным о скорости диссипации кинетической энергии турбулентности (КЭТ) и вертикальных градиентах средней температуры и горизонтальной скорости ветра, полученным из измерений радиальной скорости когерентными лидарами и температуры микроволновыми радиометрами. Из сопоставления высотно-временных распределений скорости диссипации и структурной характеристики установлено, что в противоположность скорости диссипации КЭТ, уменьшающейся в пограничном слое атмосферы с высотой при всех типах термической стратификации, структурная характеристика турбулентных флуктуаций температуры убывает с высотой не всегда. Высотная перемежаемость типов термической стратификации может приводить к тому, что интенсивность флуктуаций температуры в слое с термической неустойчивостью возрастает с увеличением высоты, и лишь затем начинает убывать. Это происходит когда нейтральная или сильно устойчивая стратификация на меньших высотах переходит в неустойчивую или слабо устойчивую на больших высотах.

Выполнены исследования техногенных ветровых структур, в частности ветровых шлейфов, возникающих вниз по потоку за турбинами ветровых электростанций (ВЭС). Лидарная визуализация ветровых шлейфов позволила выявить их внутреннюю структуру и определить локализацию дефицита ветровой энергии, возникающего с подветренной относительно ВЭС стороны.

Материалы доклада основываются на результатах работ, выполненных по госзаданию ИОА СО РАН в части разработки методологии и частичного обеспечения средствами лидарных и микроволновых измерений и по проекту РНФ 24-17-00179 в части результатов исследования ветровых структур и турбулентности в пограничном слое атмосферы.