

**РАЗРАБОТКА ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ЛАЗЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ
ТЯН (ТУРБУЛЕНТНОСТИ ЯСНОГО НЕБА) С УЧЕТОМ ЭФФЕКТОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ
ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СЛУЧАЙНОЙ СРЕДЕ,
МОЛЕКУЛЯРНОГО И АЭРОЗОЛЬНОГО РАССЕЙЯНИЯ**

А.Е. Мамонтов

Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН, Москва, Россия
alex12372049@gmail.com

**DEVELOPING A NUMERICAL MODEL FOR LASER SENSING
OF CAT (CLEAR-AIR TURBULENCE), TAKING ACCOUNT OF PROPAGATION EFFECTS
OF LASER RADIATION IN RANDOM ENVIRONMENT,
MOLECULAR AND AEROSOL SCATTERING**

A.E. Mamontov

A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia
alex12372049@gmail.com

Аннотация. Турбулентность ясного неба (ТЯН) представляет серьезную угрозу для полетов гражданской авиации. В 2009–2015 гг. при поддержке Комиссии Европейских Сообществ, как часть 7-й рамочной программы, выполнялся проект DELICAT (DEmonstration of LIdar based Clear Air Turbulence detection, Демонстрация обнаружения турбулентности ясного неба при помощи лидара). В ходе указанного проекта был разработан и изготовлен лидар, предназначенный для установки на самолете с целью заблаговременного обнаружения турбулентности ясного неба. В августе 2013 г. были проведены летные испытания самолетного лидара. В результате проведенных экспериментов был накоплен уникальный архив экспериментальных данных, копия которого имеется в ИФА РАН. В ходе данного проекта предполагается решить следующие задачи. Мы разработаем численную модель лазерного зондирования ТЯН с учетом эффектов распространения лазерного излучения в случайной среде, молекулярного и аэрозольного рассеяния. Анализ существующих экспериментальных данных показывает, что в большинстве случаев эффекты многократного рассеяния в этих измерениях несущественны. Это позволит строить модель на основе модификации метода фазовых экранов. Такая модель позволяет строить реализации случайного сигнала для заданных реализаций поля показателя преломления и распределения аэрозоля. Модификация метода фазовых экранов позволит моделировать расходящийся лазерный пучок. Это позволит моделировать усиление обратного рассеяния. Подбирая компонентный состав аэрозоля можно будет моделировать различную степень корреляции и соотношения интенсивностей сигналов в ко- и кросс-поляризационном каналах. Модель лазерного зондирования ТЯН поможет ответить на вопрос о том, является ли аэрозоль мешающим фактором при использовании эффекта усиления обратного рассеяния (VOP).

Ключевые слова: турбулентность, лидар, авиация, аэрозоль, дистанционное зондирование.

Abstract. Clear air turbulence (CAT) is a serious threat for civil aviation flights. In the years 2009 through 2015, with the support of the European Commission, as a part of the 7th Framework Program, the DELICAT project (DEmonstration of LIdar based Clear Air Turbulence detection) was implemented. In this project, an air-borne lidar was developed and built for an early detection of CAT. In August 2013, flight tests of the lidar were carried out. During the experiments, a large unique data set was collected; a copy of the data set is in the possession of the Obukhov Institute of Atmospheric Physics of Russian Academy of Sciences (IAP RAS). In the proposed project, we propose solving the following problems. We will develop a numerical model of the laser sounding of CAT, considering the effect of the laser beam propagation in a random medium, as well as the aerosol (Mie) and molecular (Rayleigh) scattering. The analysis of the existing observations indicates that, in most cases, the multiple scattering effects are negligible. This will allow us to develop the model on the basis of the multiple phase screen method. This model will produce realizations of the random signal for specific realization of the random refractivity and aerosol distribution fields. A modification of the multiple phase screen method will allow modeling a diverging laser beam. This will also allow modeling of the back-scattering enhancement (BSE). By varying the aerosol composition, it will be possible to model different degree of correlation and intensity ratio in co- and cross-polarization channels.

Keywords: turbulence, lidar, aviation safety, aerosol, distant sensing.

ВВЕДЕНИЕ

В 2009–2015 гг. при поддержке Комиссии Европейских Сообществ, как часть 7-й рамочной программы, выполнялся проект DELICAT (DEmonstration of LIdar based Clear Air Turbulence detection, Демонстрация обнаружения турбулентности ясного неба при помощи лидара). В ходе указанного проекта был разработан и изготовлен лидар, предназначенный для установки на самолете с целью заблаговременного обнаружения турбулентности ясного. В августе 2013 г. были проведены летные испытания самолетного лидара. Практически одновременно, в 2011–2016 гг., в Институте

физики атмосферы им. Обухова А.С. Гурвичем была предложена и проанализирована концепция лидара основанного на принципах усиления обратного рассеяния. Подобная концепция была творчески проработана и реализована в реальном устройстве прошедшем полетные испытания в Томске В.А. Бананом и его группой. Вопрос возникновения ошибок в оценке турбулентности является критическим для обоих типов устройств. В последних публикациях [Гурвич, Куликов 2013, 2017] был тщательно рассмотрен вопрос о влиянии шумов на лидарный сигнал для обоих типов лидаров. Сделан предварительный вывод о существенном влиянии аэрозольного

рассеяния назад на анализ турбулентности на трассе перед самолетом. Предлагаемый проект позволит сформулировать количественные критерии для оценки этого влияния и необходимых условий для успешного зондирования турбулентности в присутствии существенных аэрозольных помех.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Модель будет строиться на основе модификации метода фазовых экранов. Такая модель позволяет строить реализации случайного сигнала для заданных реализаций поля показателя преломления и распределения аэрозоля. Для генерации случайных реализаций этих полей мы будем задавать определенную спектральную плотность. В частности, для поля показателя преломления предполагается пользоваться изотропным спектром Колмогорова–Обухова. Модификация метода фазовых экранов позволит моделировать расходящийся лазерный пучок. В стандартном варианте этого метода используются плоские фазовые экраны, что является оптимальным решением, когда на статистически однородную среду падает плоская волна. Для расходящегося пучка удобно пользоваться сферическими фазовыми экранами. В параксиальном (малоугловом) приближении мы получим формулы для пропагатора, описывающего распространение волны с экрана на экран. Для моделирования некогерентного рассеяния мы воспользуемся принципом взаимности. Это, в сочетании с приближением однократного рассеяния, позволит вместо решения задачи распространения излучения назад пользоваться решением задачи для распространения излучения вперед. Модель будет учитывать конечность апертур излучателя и приемника. Это позволит моделировать также усиление обратного рассеяния; для этого необходимо выполнить моделирование двух случаев: 1) апертуры излучателя и приемника совпадают; 2) апертуры излучателя и приемника разнесены.

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ В ДАННОЙ ОБЛАСТИ

Анализ обнаружения турбулентности ясного неба с помощью лидарного зондирования основанного на флуктуациях плотности приведен в [Veerman et al., 2014; Nauchecorne et al., 2016; Vranckken et al., 2016]. Лидарная система была установлена на самолете в конфигурации, подробно описанной в [Vranckken et al., 2016]. Обнаружение зоны турбулентности было основано на лидарных измерениях флуктуации плотности воздуха, связанных с турбулентностью [Feneugou et al., 2009; Vranckken et al., 2016; Nauchecorne et al., 2016]. Двухканальная схема, основанная на усилении обратного рассеяния, также выглядит очень перспективной для будущих бортовых приложений в свете, как тщательного теоретического анализа, так и экспериментальных доказательств успеха, о которых сообщалось в [Banakh, Smalikhov, 2011; Banakh et al., 2015; Banakh, Razenkov, 2016a, b]. Эффект усиления обратного рассеяния для оптических волн в турбулентной среде изначально был открыт в теоретических исследованиях [Vinogradov et al., 1973], а затем

экспериментально подтвержден [Gurvich, Kashkarov, 1977]. В рамках проекта DELICAT была теоретически проанализирована и проанализирована идея возможной оценки турбулентности на основе BSE [Gurvich, 2012; Gurvich, Kulikov, 2013] и флуктуациях плотности воздуха в присутствии аэрозоля [Gurvich, Kulikov, 2017].

НАУЧНАЯ НОВИЗНА ИССЛЕДОВАНИЯ

В проекте предлагается оценить влияние присутствия атмосферного аэрозоля на различные типы лидарного зондирования для обнаружения турбулентности ясного неба. В связи с тем, что такие лидары находятся в настоящий момент на стадии проектирования, разработки и предварительного тестирования проблема влияния аэрозоля в присутствии флуктуации параметров полета является критически важной и может помочь при выборе устройств компенсации самолетной вибрации и методов исключения аэрозольной компоненты рассеяния назад (настолько, насколько это возможно). В связи с, например, высокой ценой устройств компенсации шума и ее ростом с точностью компенсации, для потокового производства необходимо выбрать диапазон компенсации достаточный для определения опасных для самолета турбулентных зон и, одновременно, с отсутствием излишне точного исправления таких флуктуаций. Экспериментальные свидетельства существенного влияния аэрозоля на лидарный сигнал и определение турбулентности обсуждаются в статье Гурвича и Куликова принятой в печать в Журнале Atmospheric Measurements Techniques. Препринт доступен на сайте журнала DOI: 10.5194/amt-2017-132.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На данный момент в рамках проекта удалось следующее:

1. Анализ спектральных характеристик измеряемого сигнала (на основании архива данных о лидарных измерениях с борта самолета проведенных в рамках проекта DELICAT).
2. Построена численная модели лидарного зондирования на основе метода фазовых экранов.
3. Выделены характерных частотных характеристик шумов сигнала и их связь с параметрами аэрозоля и флуктуациями направления полета самолета (на основании анализа архива данных о лидарных измерениях с борта самолета проведенных в рамках проекта DELICAT и результатов численного моделирования).
4. Выделены характерных параметров аэрозоля и типов флуктуации самолета, несущих существенные изменения в наблюдаемый сигнал и искажающих оценку турбулентности.

В процессе исследования была создана численная модель лидарного зондирования с борта самолета в присутствие аэрозоля основанная на существующей аналитической теории. Предварительный анализ показал сходство наблюдаемых паразитных/шумовых эффектов в лидарном сигнале с предсказаниями, полученными в модели. Эти результаты

приняты к публикации в ведущем европейском журнале по техникам атмосферных измерений. Углубленный анализ на основе модели фазовых экранов позволит получить количественные критерии для возможности характеристики турбулентности в присутствии аэрозоля для различных типов лидаров (как основанных на эффекте усиления обратного рассеяния, так и на флуктуациях плотности).

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-35-00368.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Федорова О.В., Коваль О.А., Мамонтов А.Е. Лидарные наблюдения строения и эволюции скоплений аэрозоля в проекте DELICAT. Турбулентность, динамика атмосферы и климата: сборник трудов / под ред. Г.С. Голицына, И.И. Мохова, С.Н. Куличкова и др. М.: Физматкнига, 2018. 587 с.

Gurvich A.S., Kulikov V.A. Impact of pitch angle fluctuations on airborne lidar sensing ahead along the flight direction // Preprint, Atmospheric Measurements Techniques. 2017. URL: <https://doi.org/10.5194/amt-2017-132>.

Mamontov A.E., Gurvich A.S. The study of the evolution of aerosol concentrations at altitudes of civil aviation // In EGU General Assembly Conference Abstracts. 2017. V. 19. P. 1520.

Banakh V.A., Smalikho I.N. Determination of optical turbulence intensity by atmospheric backscattering of laser radiation // Atmos. Oceanic Optic. 2011. V. 24, N 5. P. 457–465.

Banakh V.A., Razenkov I.A., Smalikho I.N. Laser echo signal amplification in a turbulent atmosphere // Applied Optics. 2015. V. 54, N 7. P. 7301–7307.

Gurvich A.S. Lidar sounding of turbulence based on the backscatter enhancement effect // Atmos. Oceanic Phys. 2012. V. 48, N 6. P. 585–594.