

На правах рукописи  
УДК 551.501

Филимонов Павел Анатольевич

**ОПЕРАТИВНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ И НАПРАВЛЕНИЯ  
ВЕТРА АЭРОЗОЛЬНЫМ ЛИДАРОМ НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 355 НМ**

2.2.6.Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Москва — 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» на кафедре лазерных и оптико-электронных систем.

**Научный руководитель:**

**Городничев Виктор Александрович,**  
Доктор технических наук,  
старший научный сотрудник, заведующий кафедрой «Элементы приборных устройств» МГТУ им. Н.Э. Баумана

**Официальные оппоненты:**

**Веселовский Игорь Александрович**  
Доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник ЦФП ИОФ РАН

**Коняев Максим Анатольевич**

Доктор технических наук,  
профессор кафедры «Лазерная техника»  
БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

**Ведущая организация:**

Институт оптики атмосферы им.  
В.Е. Зуева Сибирского отделения  
Российской академии наук

Защита состоится «26» апреля 2023 года в 10 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.331.07 по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д.5, стр.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Автореферат разослан «\_\_\_\_» 2023 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук



М.С. Ковалев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Необходимость оперативного (не более 5 – 10 секунд) мониторинга скорости ветра требует развития существующих и разработки новых методов измерения. Для решения практических задач перспективными дистанционными методами мониторинга скорости ветра являются активные и пассивные оптические методы. Активные методы предпочтительны, так как работают независимо от времени суток, не требуют наличия высококонтрастных объектов на местности и получают информацию о профиле скорости ветра вдоль трассы зондирования.

Лазерные методы измерения скорости ветра можно условно разделить на доплеровские и времяпролётные, включающие корреляционные методы, метод подобия и другие, каждый из которых имеет как свои достоинства, так и свои недостатки.

Теоретическому и экспериментальному исследованию лидарных систем для измерения скорости и направления ветра посвящено большое число публикаций: в России это исследователи из Института оптики атмосферы им. В.Е.Зуева СО РАН (Матвиенко Г.Г., Самохвалов И.В., Разенков И.А., Гришин А.И., Банах В.А., Смалих И.Н., Фалиц А.В., Афанасьев А.Л. и др.), «Раменский Приборостроительный Завод» (Васильев Д.М. и др.), НПП «Лазерные системы» (Андреев М.А., Васильев Д.Н., Пенкин М.С., Смоленцев С.Г. и др.), БГТУ «Военмех» им. Д.Ф. Устинова (Борейшо А.С., Клочкин Д.В., Коняев М.А., Орлов А.Е., Чугреев А.В. и др.), МГУ им. Ломоносова (Гордиенко В.М. и др.), за рубежом можно отметить California State University, Chico (Mayor S.D. et al.), Institute of Atmospheric Physics, DLR, Wessling (Werner C. et al.), George C. Marshall Space Flight Center, NASA (Bilbro J. et al.) и др. Существует ряд коммерчески успешных образцов приборов, из которых можно выделить НПП «Лазерные Системы» ИВЛ-5000 и ПВЛ-300 (Россия), Leosphere WindCube Scan (Франция), ZX lidars модель ZX TM (Великобритания).

Недостатком доплеровских лазерных методов является их способность измерять только продольную составляющую скорости ветра. Полный вектор скорости ветра можно восстановить из данных измерений продольной скорости при угловом сканировании или в многолучевой схеме зондирования, но с существенно большими погрешностями.

Времяпролётные методы обладают меньшей дальностью зондирования, но потенциально позволяют оперативно измерять профиль полного вектора скорости ветра вдоль трассы зондирования, требуют менее сложную аппаратуру, а трасса зондирования может проходить вблизи земной поверхности и объектов на местности.

Однако, на текущий момент задача дистанционного оперативного измерения профиля скорости и направления ветра в условиях сложного рельефа местности, существенно изменяющего вектор скорости ветра вдоль трассы зондирования, является нерешённой — существующая аппаратура не позволяет проводить надёжные измерения с удовлетворительной точностью.

Для решения этой задачи потенциально более перспективными являются времяпролётные методы. Экспериментальные исследования в этом направлении проводятся преимущественно для спектрального диапазона 0,38 – 1,4 мкм, который является опасным для зрения человека.

**Целью диссертационной работы** является разработка лидарного метода оперативного измерения скорости и направления ветра в приземном слое атмосферы в условиях сложного рельефа местности на потенциально безопасной для глаз длины волны.

Для достижения поставленной цели в работе были решены следующие **научно-технические задачи**:

1. Проведён анализ потенциальных возможностей лазерных систем для задачи оперативного измерения скорости и направления ветра.

2. Создан макет и проведены измерения характеристик аэрозольных неоднородностей на длине волны 355 нм.

3. Разработаны оригинальные алгоритмы обработки лидарного сигнала для задач оперативного измерения скорости и направления ветра аэрозольным лидаром с двухлучевой схемой зондирования.

4. Проведена экспериментальная апробация разработанных алгоритмов обработки для измерения скорости и направления ветра и определение погрешности лидарных измерений по сравнению с данными анеморумбометра.

**Объектом исследования** является лидар для оперативного измерения скорости и направления ветра на длине волны 355 нм.

**Предметом исследования** являются методы оперативного измерения скорости и направления ветра.

**Методы исследования.** При решении поставленных задач использовались методы физической оптики, методы имитационного моделирования, математический аппарат теории вероятностей и математической статистики, цифровой обработки сигналов и изображений, методы оптимизации, экспериментальные методы исследований.

**Научная новизна работы** состоит в следующем:

1. Разработан оригинальный метод обработки лидарных сигналов на основе алгоритмов сегментации и сэмплирования аэрозольных неоднородностей для оперативного измерения скорости и направления ветра,

существенно уменьшающий погрешность измерения по сравнению с существующими методами.

2. Впервые получены данные измерений контраста и характерных размеров аэрозольных неоднородностей в приземном слое атмосферы на длине волны 355 нм.

3. Впервые представлены зависимости вероятности наблюдения аэрозольных неоднородностей от расстояния между лидаром и исследуемым объемом атмосферы на длине волны 355 нм.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Предложенный метод обработки лидарных сигналов на основе алгоритмов сегментации и сэмплирования аэрозольных неоднородностей позволяет надёжно выделять аэрозольные неоднородности и проводить оперативные измерения скорости и направления ветра в схеме двухлучевого зондирования.

2. Результаты измерений с использованием разработанного алгоритма сегментации показывают, что контраст аэрозольных неоднородностей на длине волны 355 нм лежит преимущественно в диапазоне от  $\sim 0,1\%$  до  $\sim 12\%$ , а размеры в диапазоне от 1 м до 10 м.

3. Результаты натурных измерений скорости и направления ветра с использованием метода обработки лидарных сигналов на основе алгоритмов сегментации и сэмплирования показывают, что разработанные алгоритмы позволяют оперативно измерять скорость ветра с погрешностью модуля 1 м/с и направления  $13^\circ$ .

**Практическая ценность работы** заключается в возможности использования полученных результатов при разработке перспективных образцов систем лазерного дистанционного зондирования атмосферы.

**Достоверность** результатов исследований основана на корректном рассмотрении исследуемых процессов, использовании правомерных допущений, обоснованным применением методов исследования, а также на соответствии теоретических и экспериментальных данных.

**Апробация результатов работы.** Основные результаты работы докладывались на четырёх российских и международных научных конференциях:

- Лазеры в Науке, медицине и технике, (Небуг, 2015; Москва, 2018);
- XXIV Международный Симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (Томск, 2018);
- 9 Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы радиофизики» (Томск, 2021);
- Научно-практическая конференция «Оптико-электронные приборы и комплексы» (Красногорск, 2017).

**Публикации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 14 печатных работах, из которых 11 научных работ опубликованы в изданиях, входящих в Перечень ВАК РФ или международную базу цитирования Scopus.

**Личный вклад автора.** Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Во всех работах, выполненных в соавторстве, соискатель непосредственно участвовал в постановке задач, разработке методов их решения, проектирования и расчёта экспериментального макета, получении, обработке и анализе результатов исследований. Все экспериментальные результаты, вошедшие в диссертационную работу, получены совместно с соавторами работ, опубликованных по теме диссертации.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы. Полный объём диссертации составляет 117 страниц машинописного текста, включая 70 рисунков, 15 таблиц и список литературы из 120 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** показана актуальность темы исследований для ряда прикладных задач, сформулированы цели, задачи, защищаемые положения, научная новизна и практическая значимость работы, приведена структура диссертации.

**В первой главе** проведён анализ современных лидарных методов измерения скорости и направления ветра; описана постановка задачи разработки дистанционных методов оперативного измерения скорости и направления ветра.

Основные существующие методы измерения скорости и направления ветра представлены на Рисунке 1. Для решения практических задач перспективными дистанционными методами мониторинга скорости ветра являются лидарные методы измерения. Это связано с использованием лазера как активного источника излучения, что обеспечивает работу независимо от времени суток, отсутствием требований наличия высококонтрастных объектов на местности в отличие от пассивных методов и получением информации о профиле скорости ветра вдоль трассы зондирования.

Допплеровские методы обеспечивают высокую разрешающую способность, измерение высотного профиля скорости и направления ветра. Приборы на их основе успешно решают ряд прикладных задач: обслуживание взлёта и посадки летательных аппаратов, контроль ветровой обстановки на морских платформах и оптимизация энергоэффективности



Рисунок 1. Основные методы измерения скорости и направления ветра

ветровых генераторов, исследование атмосферы Земли. Типовыми характеристиками для допплеровских лидаров в приземном слое атмосферы является дальность зондирования до 20 км, погрешность порядка 0,1 м/с для скорости и 1° для направления – они удовлетворяют требованиям точности и дальности измерений для большинства прикладных задач.

Однако, они обладают следующими существенными недостатками: измерение только продольной относительно направления зондирования компоненты скорости ветра, относительная дороговизна и сложность элементной базы, необходимость пространственного сканирования и, как следствие, большое пространственное и временное усреднение.

Из времяпролётных методов наиболее часто применяется корреляционный метод анализа перемещений аэрозольных полей. По сравнению с допплеровскими методами времяпролётные методы обладают меньшей дальностью зондирования, но потенциально позволяют оперативно измерять профиль полного вектора скорости ветра вдоль трассы зондирования, требуют менее сложную аппаратуру, а трасса зондирования может проходить вблизи земной поверхности и объектов на местности.

В настоящее время нет лидарных систем, которые могли бы оперативно (единицы секунд) измерять с приемлемой точностью скорость и направление ветра.

Таким образом, необходима разработка новых методов, которые позволяют оперативно измерять с приемлемой точностью скорость и направления ветра на безопасной для глаз длине волны зондирования.

**Во второй главе** отмечена актуальность требований безопасности для зрения человека при разработке лидарных систем, для различных длин волн приведены энергетический расчёт аэрозольного лидара и анализ безопасности рассеянного излучения для глаз человека для различных длин

волн, обоснован выбор длины волны зондирования для аэрозольного лидара для анализа аэрозольных неоднородностей.

В приближении однократного рассеяния регистрируемая фотодетектором мощность лидарного сигнала описывается следующим выражением:

$$P(z) = \frac{1}{z^2} A(z) \beta(z) T(z), \quad (1)$$

где  $z$  – расстояние от лидара до зондируемого объема атмосферы,  $A(z)$  – аппаратная функция лидара,  $\beta(z) = \beta_{aer}(z) + \beta_{ray}(z)$  – коэффициент обратного рассеяния атмосферы, состоящий из аэрозольной и молекулярной компонент,  $T(z)$  – коэффициент пропускания атмосферы.

При моделировании регистрируемого сигнала можно пренебречь нелинейным преобразованием регистрируемой мощности сигнала. Таким образом, регистрируемый сигнал можно переписать в виде:

$$U(z) = K(P(z)) \cong k P(z), \quad (2)$$

где  $U(z)$  – регистрируемый уровень сигнала на выходе АЦП,  $K(\cdot)$  – переходная характеристика электронного тракта,  $k$  – коэффициент линейного преобразования входной мощности сигнала.

Связь регистрируемого лидарного сигнала с флуктуациями коэффициента обратного аэрозольного рассеяния можно представить в виде:

$$\Delta_i^\beta(z) = \frac{P_i(z) - \bar{P}(z)}{\bar{P}(z)} \cong \frac{U_i(z) - \bar{U}(z)}{\bar{U}(z)} = \frac{\bar{\beta}_i^{aer}(z)}{\bar{\beta}^{aer}(z)}, \quad (3)$$

где  $\Delta_i^\beta(z)$  – относительные флуктуации коэффициента обратного аэрозольного рассеяния,  $P_i(z), U_i(z)$  – мощность лидарного сигнала и напряжение на выходе электронного тракта для  $i$  зарегистрированной реализации,  $\bar{P}(z), \bar{U}(z)$  – усреднённая по набору реализаций мощность и значение регистрируемого сигнала,  $\bar{\beta}^{aer}(z)$  – усреднённый по набору реализаций коэффициент аэрозольного рассеяния,  $\bar{\beta}_i^{aer}(z)$  – амплитуда флуктуаций коэффициента обратного аэрозольного рассеяния.

Проведён расчёт дальности зондирования аэрозольного лидара для длин волн, попадающих в окна прозрачности атмосферы и потенциально безопасных для глаз человека – 355, 1570 и 2090 нм. Для проведения расчётов были взяты предельные характеристики доступных компонентов приёмопередающей системы – энергия в импульсе лазера и чувствительность приёмника излучения. Для длины волны 355 нм энергия в импульсе лазера была принята 2 Дж, для ламповой накачки и 40 мДж для лазера с диодной, а для длин волн 1,57 и 2,09 нм энергия в импульсе лазера составила 70 и 50 мДж соответственно. В математической модели учитывалось молекулярное рассеяние и поглощение, аэрозольное ослабление и рассеяние в направлении «назад», а также наличие фоновой помехи от

солнечного излучения. В Таблице 1 представлены результаты расчётов для метеорологической дальности видимости 15 км.

Таблица 1.

Расчётная дальность зондирования при МДВ 15 км

Длина волны, нм	355		1570	2090
Тип накачки	Ламповая		Диодная	
Энергия импульса, мДж	2000	150	40	70
Длительность импульса, нс	4-7	10-14	3-7	11
Частота повторения импульсов, Гц	10	10	100	10
Дальность зондирования, км	2,5	1,4	0,9	1,5
Безопасное расстояние для рассеянного излучения, м	7,0	2,0	1,0	0,3

Результаты расчёта дальности зондирования, представленные в Таблице 1, показывают перспективность применения длины волны 355 нм при разработке импульсного аэрозольного лидара для оперативного измерения скорости и направления ветра.

**Третья глава** посвящена разработке алгоритма сегментации аэрозольных неоднородностей, описанию разработанного макета лидара для проведения натурных измерений характеристик аэрозольных неоднородностей и анализу полученных результатов.

Аэрозольные неоднородности имеют следующие параметры:

- характерный размер;
- выраженность, характеризуемая контрастом и коэффициентом вариации  $\Delta_\beta$ .

Для проведения исследований характеристик аэрозольных неоднородностей был разработан макета лидара, структурно-функциональная схема которого представлена на Рисунке 2.

Источником излучения является твердотельный лазер  $Nd^{3+}$ : *YAG EKSPLA NL204* с диодной накачкой и с блоком генерации третьей гармоники. Лазер работает на длине волны 355 нм в импульсном режиме с длительностью импульса 7 нс и энергией в импульсе 5 мДж с частотой повторения 500 Гц.

Рассеянное в направлении «назад» лазерное излучение собирается с помощью приёмной оптической системы. Объектив по схеме Кассегрена с диаметром главного зеркала 100 мм фокусирует на согласующую оптическую систему для обеспечения условий работы блока спектральных фильтров. Он состоит из двух интерференционных фильтров: пороговый Semrock BPF 350\50 для подавления излучения свыше 424 нм и узкополосный Semrock LL01-355-25 с полосой пропускания  $\Delta\lambda_{FWHM} = 1,3$  нм.

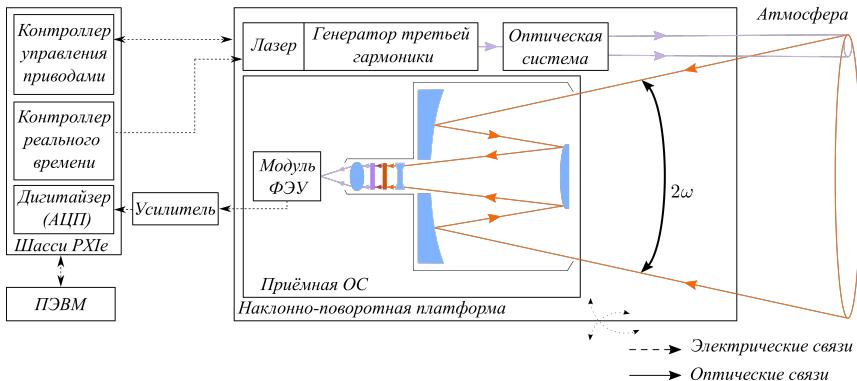


Рисунок 2. Структурно-функциональная схема макета лидара для исследования аэрозольных неоднородностей

После блока спектральных фильтров сигнал регистрировался модулем ФЭУ Hamamatsu H10721-210.

Электрический сигнал с приёмника излучения усиливался на транс-импедансном усилителе Hamamatsu C11184 и подавался на вход высокоскоростного АЦП – дигитайзера NI PXIe-5171R. Управление аппаратной частью и регистрация сигналов осуществлялась с использованием программного обеспечения NI LabVIEW 2016, тематическая обработка и анализ данных осуществлялся с использованием Python 3 и ряда вспомогательных библиотек.

Натурные измерения проводились в весенне-осенний период при различном времени суток в Дмитровском филиале МГТУ им. Баумана в п. Орево Московской области на трассе, удалённой от автомобильных дорог и городов в экологически чистом районе. Трасса зондирования располагалась на высоте 10 м, подстилающей поверхностью являлся травяной покров, водоёмы в районе зондирования отсутствовали.

На Рисунке 3 приведен пример зарегистрированных полей неоднородностей для разработанного макета. На рисунке по оси абсцисс отображено расстояние до рассеивающего объема атмосферы от лидара, а по оси ординат – момент времени регистрации лидарного сигнала, на изображении показана амплитуда относительных флуктуаций лидарного сигнала, а уровень нуля соответствует среднему профилю сигнала.

Обработка полученных данных с целью выделения неоднородностей затруднена наличием шумов на поле флуктуаций лидарных сигналов, вызванных как самим лазерным сигналом, так и фоновым излучением.

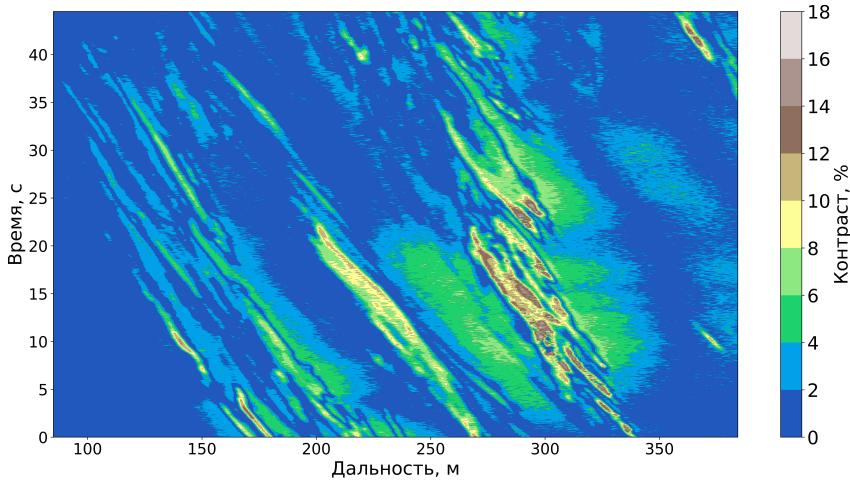


Рисунок 3. Экспериментально измеренное поле аэрозольных неоднородностей в координатах «Дальность-Время»

Поэтому был разработан алгоритм сегментации аэрозольных неоднородностей, который позволяет выделять неоднородности в регистрируемых лазарных сигналах.

Разработанный алгоритм сегментации основан на анализе размеров неоднородностей по ширине автокорреляционной функции для пространственной реализации сигнала. Для областей поля, где неоднородность отсутствует, АКФ лазарного сигнала будет определяться шумом и иметь  $\delta$ -коррелированный вид, а в случае наличия неоднородностей характерная ширина АКФ увеличивается. Последовательность действия алгоритма сегментации:

1. Для поля флуктуаций коэффициента обратного аэрозольного рассеяния используется скользящее окно размером  $9 \times 9$  пикселей, для которого вычисляется двумерная автокорреляционная функция.
2. Для каждой посчитанной двумерной АКФ определяется радиус корреляции одномерной АКФ по дальности и по времени.
3. Значения радиусов корреляции одномерных АКФ по уровню  $1/e$  присваиваются центральному пикселию в скользящем окне, при этом создаётся два поля: радиусов корреляции АКФ по дальности и по времени.
4. Для полей радиусов корреляции АКФ по дальности и времени применяется пороговая обработка, в результате которой получаются два бинарных поля.

5. Применяется операция логического И к этим двум полям, в результате чего получается бинарная маска фильтрации.
  6. К маске неоднородностей применяется морфологическая фильтрация и фильтрация связных областей по площади.
  7. Результат сегментации – полученная маска умножается на исходное поле и в результате получается отфильтрованное поле неоднородностей.
- Иллюстрация применения разработанного алгоритма на данных натурных измерений представлена на Рисунке 4.

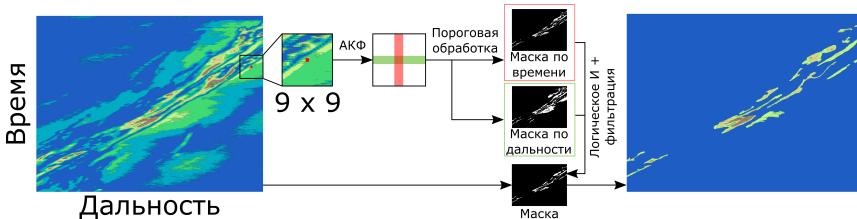


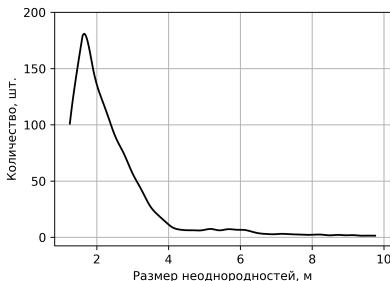
Рисунок 4. Иллюстрация этапов применения алгоритма сегментации неоднородностей

Разработанный алгоритм сегментации неоднородностей применялся для обработки экспериментальных данных измерений измерения и получения гистограмм размеров и контрастов аэрозольных неоднородностей.

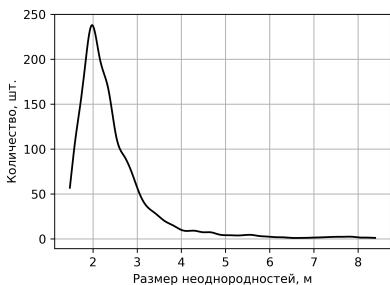
Для различных оптических ситуаций на трассе зондирования были экспериментально получены гистограммы размеров и контрастов для различных оптических ситуаций, примеры которых показаны на Рисунке 5.

Как видно из рисунков, в приземном слое атмосферы присутствуют неоднородности разных масштабов: в подавляющем большинстве случаев от 1 м (пространственное разрешение лидара  $\sim 1$  м не позволяло зарегистрировать неоднородности меньших размеров) до 10 м. В большинстве случаев значение коэффициента вариации объемного коэффициента обратного рассеяния на длине волны 355 нм находится в диапазоне от  $\sim 0,1\%$  до  $\sim 12\%$ .

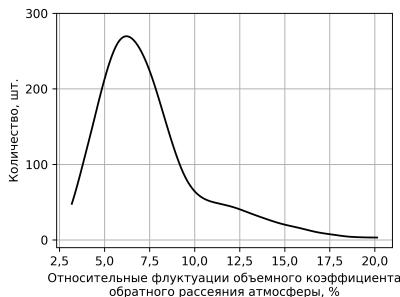
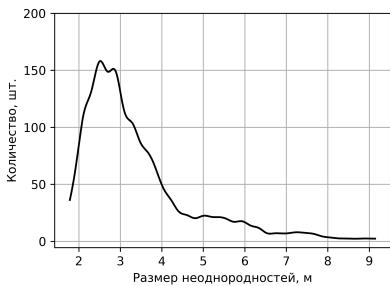
Также в процессе измерений экспериментально получены зависимости вероятности наблюдения от дальности до рассеивающего объема лидара, пример которой представлен на Рисунке 6. Вероятность наблюдения аэрозольных неоднородностей является убывающей и согласуется с зависимостью отношения сигнал/шум при увеличении расстояния от лидара.



а) Весна, солнечно  $+20^{\circ}\text{C}$ . Влажность 60 %. МДВ  $> 15$  км. Среднее значение размера неоднородностей – 2,3 м; коэффициент вариации – 0,3 %.



б) Весна, небольшой снег,  $-2^{\circ}\text{C}$ . Среднее значение размера неоднородностей – 2,4 м; коэффициент вариации – 2,0 %.



в) Весна, небольшой снег,  $0^{\circ}\text{C}$ . Влажность 85 %. Среднее значение размера неоднородностей – 3,4 м; коэффициент вариации – 7,5 %.

Рисунок 5. Примеры гистограмм размеров (слева) и относительных флуктуаций коэффициентов обратного аэрозольного рассеяния (справа) для различных оптических ситуаций

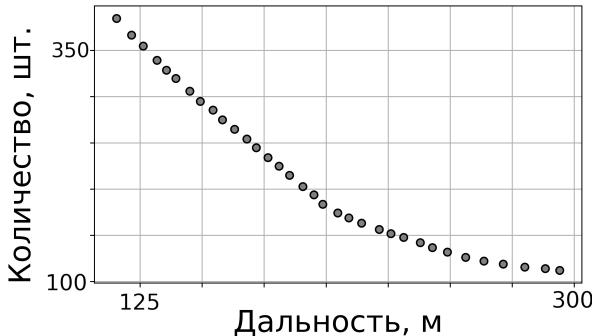


Рисунок 6. Пример зависимости количества наблюдений аэрозольных неоднородностей от расстояния до рассеивающего объема атмосферы

В **четвёртой главе** разработан алгоритм обработки лидарных сигналов на основе сэмплирования, приведено описание процедуры математического моделирования для проверки работоспособности разработанного алгоритма, описан макет для проведения натурных измерений скорости и направления ветра и приведено сравнение результатов, полученных алгоритмом обработки на основе сегментации и сэмплирования, с результатами обработки на основе корреляционных методов.

Для измерения скорости и направления ветра был использован ранее разработанный макет лидара для детектирования аэрозольных неоднородностей. Отличие заключалось в изменении однолучевой на двухлучевую схему измерения – в передающей системе лазерный пучок делился на 2 слаборасходящихся пучка, а в приёмной системе добавлена ветвь с пространственным разделением принимаемого излучения с ножевой призмой для пространственного разделения сигнала. Для контроля скорости и направления ветра во время измерений в непосредственной близости от лазерного луча располагался чашечный анеморумбометр «Ветромер-1» на расстоянии 110 м от лидара (Рисунок 7).

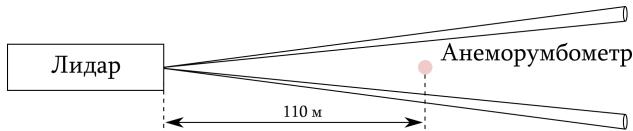


Рисунок 7. Схема расположения анеморумбометра на трассе зондирования

Изображения разработанного макета, анеморумбометра и вид на трассу зондирования представлены на Рисунок 8.



Рисунок 8. Изображения макета, анеморумбометра и трассы зондирования

На Рисунках 9 – 11 приведены примеры зарегистрированных полей неоднородностей для разработанного макета. Для каждого рисунка сверху изображены поля флуктуаций относительных коэффициентов обратного аэрозольного рассеяния для двух лидарных каналов, снизу – результат применения алгоритма сегментации, на каждом из рисунков по оси абсцисс показано расстояние от лидара, а по оси ординат – время измерения.

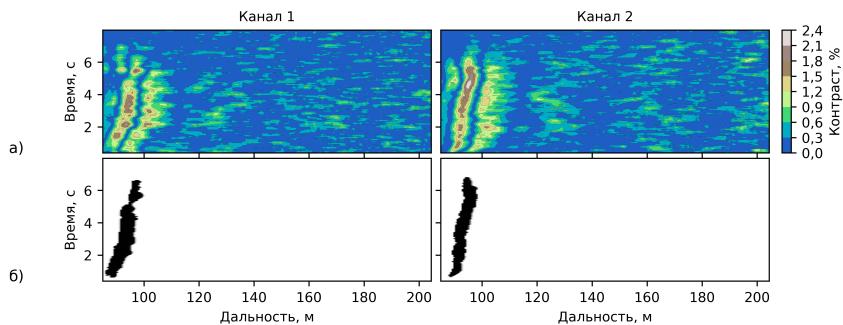


Рисунок 9. Весна, солнечно +20 °С. Влажность 60 %. МДВ > 15 км.

Среднее значение размера неоднородностей - 2,3 м;  
коэффициент вариации – 0,3 %.

Для измерения скорости и направления ветра двухлучевым методом был разработан метод на основе сэмплирования неоднородностей. Разработанный алгоритм основан на представлении траектории смещения аэрозольных неоднородностей на двумерном поле флуктуаций

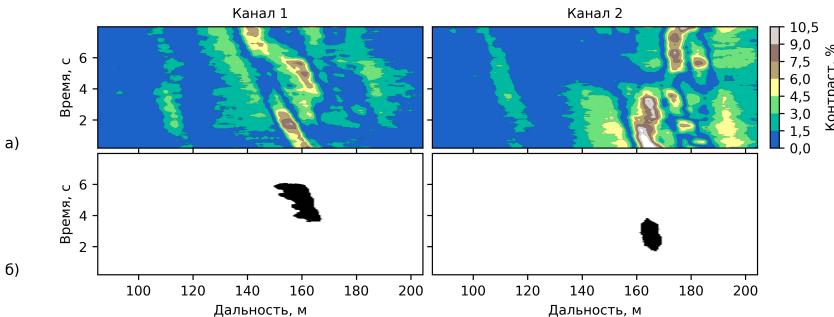


Рисунок 10. Весна, небольшой снег,  $-2^{\circ}\text{C}$ .  
Среднее значение размера неоднородностей – 2,4 м;  
коэффициент вариации – 2,0 %.

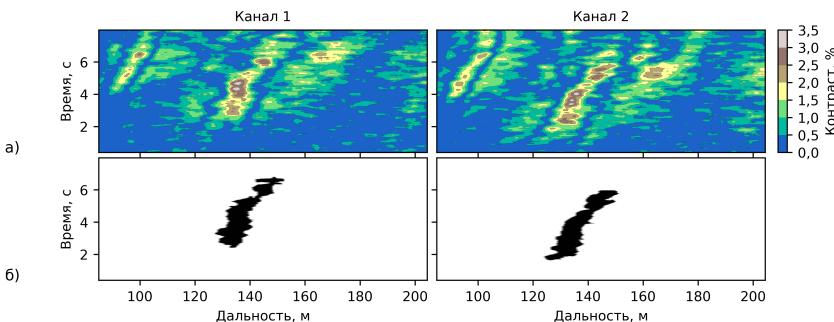


Рисунок 11. Лето, облачно.  $+16^{\circ}\text{C}$ . Влажность 65 %. МДВ  $> 15$  км.  
Среднее значение размера неоднородностей – 3,4 м;  
коэффициент вариации – 0,8 %.

Исходной информацией для алгоритма является пара полей относительных флуктуаций лидарных сигналов в двухлучевой биаксиальной схемой измерений. Информация, которая несёт каждая из зарегистрированных неоднородностей, позволяет вычислять скорость и направления ветра. Увеличение точности определения скорости и направления ветра может быть достигнуто не только за счёт интегрального использования информации о перемещении неоднородности как таковой, но и за счёт информации в локальных областях – срезах неоднородности. Таким образом в представленном алгоритме используется сэмплирование – получение сэмплов

(или срезов) по времени при заданном расстоянии до лидара для каждой из зарегистрированных неоднородностей.

Предполагалось, что скорость ветра  $V$  за время измерения  $t$  одноковая и постоянная для всех точек поля в окрестности выбранной неоднородности. После этого формировался квадратичный функционал, представляющий собой разность полей во втором канале и поля в первом канале, смещённого из-за наличия ветра. При формировании функционала использовалось разложение скорости ветра на продольную  $V_{\parallel}$  и поперечную  $V_{\perp}$  составляющие относительно направления зондирования. Для определения продольной компоненты скорости ветра функционал представлялся в виде:

$$F(V_{\parallel}) = \frac{1}{K} \sum_{K} \sum_{s} w_s^k (V_{\parallel} t_s - r_s)^2, \quad (4)$$

где  $s$  – номер сэмпла для неоднородности,  $K$  – общее количество неоднородностей,  $k$  – номер неоднородности,  $w_s^k$  – весовой коэффициент,  $b(z)$  – расстояние между лучами на расстоянии  $z$  от лидара,  $r_s$  – положение координаты неоднородности на трассе зондирования в момент времени  $t_s$ . Вес каждого сэмпла был пропорционален максимальному контрасту в срезе и нормировался на L2-норму. Вид функционала для поперечной компоненты определялся выражением:

$$F(V_{\perp}) = \frac{1}{K} \sum_{K} \sum_{s} w_s (x_2 - (b(z) + V^{\perp} \tau_s))^2, \quad (5)$$

где  $s$  – номер сэмпла для неоднородности,  $w_s$  – весовой коэффициент,  $x_2$  – положение неоднородности во 2-м луче,  $\tau_s$  – разница по времени для одной области неоднородности в разных лучах.

Продольная и поперечная компоненты скорости ветра находились в результате минимизации функционалов (4) и (5) при варьировании модуля скорости и направления ветра. На Рисунке 12 представлены иллюстрации к пояснению процесса формирования сэмплов для формирования функционала. На Рисунке 12а показано, как происходит разбиение зарегистрированной неоднородности для формирования функционала, на Рисунке 12б – процесс перемещения неоднородности через пару лазерных лучей.

Для проверки работоспособности алгоритма на основе сэмплирования было проведено моделирование полей неоднородностей и скорости ветра с использованием метода формирующего фильтра. При моделировании использовались 20 вариантов пространственных полей относительных флуктуаций коэффициента обратного аэрозольного рассеяния с известной корреляционной функцией. Размер смоделированного поля составлял

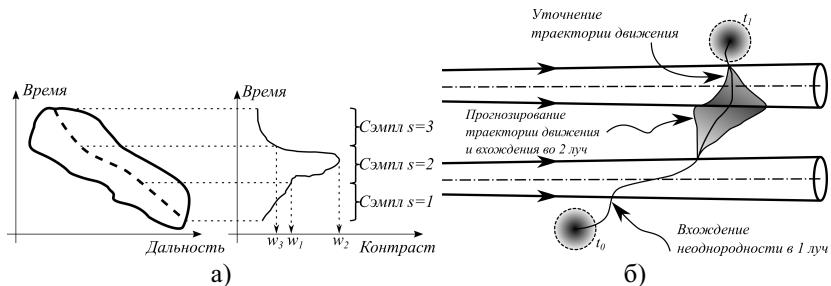


Рисунок 12. Иллюстрации к алгоритму обработки лазарных сигналов на основе сэмплирования: а) сэмплирование неоднородности и б) перемещение неоднородности через лазерные пучки

300x300 м. Для моделирования были использованы скорости ветра от 0 до 15 м/с с шагом 0,5 м/с с различными направлениями относительно лазерного луча. Ширина корреляционной функции составляла величины от 0,5 до 10 м с шагом 0,5 м. При моделировании эхо-сигнала симулировалась флюктуация мощности лазерного импульса с СКО 1% и добавлялся дробовой шум. Пример синтезированного поля в координатах «Дальность – Время» представлен на Рисунке 13.

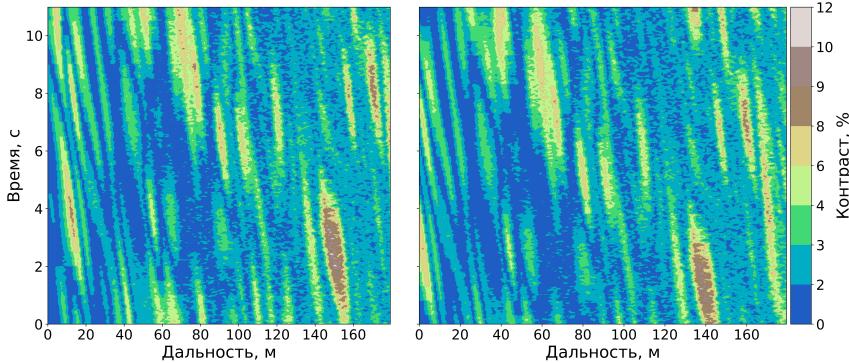


Рисунок 13. Пример синтезированного поля аэрозольных неоднородностей:  $V_{\parallel} = 2,0$  м/с,  $V_{\perp} = -3,0$  м/с

Полученные результаты математического моделирования применения алгоритма на основе сэмплирования с применением предварительной сегментации показало лучший результат по сравнению с корреляционным методом.

При натурных экспериментах было проведено 672 сеанса измерений и в 416 из них были зарегистрированы неоднородности и проведена последующая обработка. Для сравнения результатов обработки с использованием разных алгоритмов были использованы корреляционный алгоритм и корреляционный алгоритм с предварительной сегментацией неоднородностей для выделения наиболее значимых областей. Результаты сравнения представлены в Таблице 2.

Таблица 2.

Средняя погрешность определения скорости и направления ветра  $\Delta V$ , м/с ( $\Delta\varphi$ , град.)

Компонента	Алгоритм		
	корр.	сегментация + корр.	сегментация + сэмпл.
Продольная	1,09	0,81	0,56
Поперечная	3,11	2,34	1,47
Полная	2,23(30,8)	1,46(22,7)	1,05(13,3)

Результаты математического моделирования и приведённые в Таблице 2 результаты для натурных экспериментов показывают возможность оперативного лидарного измерения скорости ветра с приемлемой для практического применения точностью в УФ диапазоне на длине волны 355 нм при разных оптических состояниях атмосферы и перспективность (с точки зрения уменьшения погрешности измерений) использования алгоритмов сегментации и сэмплирования при обработке двумерных полей аэрозольных неоднородностей в координатах «Дальность – Время измерения» для задачи оперативного определения скорости и направления атмосферного ветра.

**В заключении** сформулированы основные результаты работы.

## ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Разработан алгоритм сегментации аэрозольных неоднородностей для надёжного выделения неоднородностей.
2. Экспериментально исследованы контрасты и характерные размеры аэрозольных неоднородностей и зависимости вероятностей их наблюдения от расстояния между лидаром и исследуемым объемом атмосферы в приземном слое атмосферы на длине волны 355 нм. Показано, что контраст аэрозольных неоднородностей на длине волны 355 нм лежит преимущественно в диапазоне от  $\sim 0,1\%$  до  $\sim 12\%$ , а размеры в диапазоне от 1 м до 10 м.

3. Разработан алгоритм обработки лидарных сигналов на основе сэмплирования для оперативного измерения скорости и направления ветра в схеме двухлучевого зондирования.

4. На созданном макете лидара на длине волны 355 нм проведена экспериментальная апробация разработанного метода обработки на основе алгоритмов сегментации и сэмплирования для оперативного измерения скорости и направления ветра и сравнение его по точности с существующими корреляционными методами; в результате использования разработанного метода обработки скорость и направление ветра определялась со средней погрешностью 1 м/с для модуля и 13° для направления.

### **Основные результаты диссертации изложены в следующих работах:**

1. Belov, M.L. Comparative Analysis of Aerosol Lidar Potential Possibilities to Measure Wind Speed in Different Spectral Ranges / M.L. Belov, A.A. Samsonova, P.A. Filimonov [et al.] // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2022. № 1. С. 49-61. (0,44 п.л./0,22 п.л.)

2. Филимонов, П.А. Измерения скорости и направления ветра аэрозольным УФ-лидаром / П.А. Филимонов, С.Е. Иванов, В.А. Городничев [и др.] // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 5. С. 380-384. (0,30 п.л./0,20 п.л.)

3. Филимонов, П.А. Исследование характеристик аэрозольных неоднородностей в приземной слое атмосферы в ближнем УФ диапазоне / П.А. Филимонов, С.Е. Иванов, В.А. Городничев [и др.] // Радиостроение. 2021. №1. С. 14-28. (0,37 п.л./0,2 п.л.)

4. Филимонов, П.А. Алгоритм на основе сэмплирования аэрозольных неоднородностей в задаче измерения скорости ветра / П.А. Филимонов, М.Л. Белов, С.Е. Иванов [и др.] // Компьютерная оптика. 2020. Т. 44. № 5. С. 791-796. (0,47 п.л./0,3 п.л.)

5. Филимонов, П.А. Алгоритм сегментации аэрозольных неоднородностей / П.А. Филимонов, М.Л. Белов, Ю.В. Федотов [и др.] // Компьютерная оптика. 2018. Т. 42, № 6. С. 1062-1067. (0,32 п.л./0,16 п.л.)

6. Filimonov, P.A. Monitoring of aerosol inhomogeneities parameters in atmosphere at 355 nm / P.A. Filimonov, S.E. Ivanov, M.L. Belov [et al.] // 24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. Т. 10833. SPIE. 2018. С. 752-757. (0,28 п.л./0,14 п.л.)

7. Филимонов, П.А. Экспериментальные исследования статистических характеристик лазерных сигналов, регистрируемых аэрозольным лидаром на безопасной для глаз длине волны 0,355 мкм / П.А. Филимонов, С.Е. Иванов, Ю.В. Федотов [и др.] // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журнал. 2017. №2. С. 70-86. (0,36 п.л./0,18 п.л.)

8. Филимонов, П.А. Лазерный измеритель характеристик атмосферных аэрозольных неоднородностей в видимом и ультрафиолетовом диапазонах спектра / П.А. Филимонов, С.Е. Иванов, Ю.В. Федотов [и др.] // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана – Приборостроение. 2016. № 02. С. 67-78. (0,42 п.л./0,21 п.л.)

9. Филимонов, П.А. Анализ зависимости зоны засветки приёмника от параметров атмосферы и лазерного локатора в УФ спектральном диапазоне / П.А. Филимонов, М.Л. Белов, В.А. Городничев [и др.] // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журнал. 2016. Т. 3. С. 180-196. (0,44 п.л./0,22 п.л.)

10. Филимонов, П.А. Сравнительная оценка отношения сигнал-шум для лидаров дистанционного зондирования на безопасных для зрения лазерных длинах волн / П.А. Филимонов, С.Е. Иванов, М.Л. Белов [и др.] // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журнал. 2016. №9. С. 155-170. (0,28 п.л./0,14 п.л.)

11. Иванов, С.Е. Сравнительный анализ дальности зондирования ветрового корреляционного лидара в УФ, видимом и ближнем ИК спектральных диапазонах / С.Е. Иванов, П.А. Филимонов, М.Л. Белов [и др.] // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журнал. 2015. №. 2. С. 220-232. (0,22 п.л./0,11 п.л.)

*Филимонов Павел Анатольевич*

Оперативное измерение скорости и направления ветра аэрозольным лидаром на  
длине волны 355 нм

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук

Подписано в печать \_\_\_\_\_.\_\_\_\_\_.\_\_\_\_\_. Заказ № \_\_\_\_\_  
Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 60 экз.  
Типография \_\_\_\_\_