

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Колготина Алексея Викторовича «Методика решения задач многоволнового лидарного зондирования в применении к глобальному мониторингу параметров атмосферных аэрозолей», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 25.00.30 – метеорология, климатология и агрометеорология.

### I. Актуальность темы диссертации.

Диссертационная работа Колготина А.В. посвящена решению важной научной проблемы - разработке и обоснованию метода восстановления параметров атмосферного аэрозоля по данным лидарного зондирования. Важность глобального мониторинга атмосферного аэрозоля определяется, с одной стороны, определяющим воздействием аэрозоля на радиационный баланс планеты и климатообразование. С другой стороны, интенсивные аэрозольные выбросы имеют место при техногенных катастрофах, и дистанционное определение параметров этих сравнительно локальных выбросов позволяет обоснованно судить о процессах, происходящих в зоне аварии.

Воздействие атмосферного аэрозоля на климат с учетом погрешности оценок сопоставимо с уровнем, который достигается при рассмотрении всех остальных климатических факторов. Между тем существующие на сегодняшний день климатологические модели характеризуются значительной неопределенностью предсказаний. Это связано в значительной степени с отсутствием надежной информации о вертикальном распределении микрофизических параметров аэрозолей и о процессах модификации облаков под воздействием внешней среды. Для уменьшения этой неопределённости необходима глобальная долговременная достоверная количественная информация о временных и пространственных вариациях параметров аэрозолей.

Эта важнейшая проблема не может быть решена без применения глобальных дистанционных методов зондирования. Активно развивающимся направлением здесь, безусловно, является лидарное зондирование. Несмотря на большой прогресс, достигнутый в этой области за последнее время, сохраняется ряд проблем, которые сдерживают дальнейшее развитие лидарных методов зондирования. Наиболее существенные из них связаны со следующими особенностями:

1. Данные многоволнового лидарного зондирования аэрозолей в типичном случае в зависимости от конфигурации лидара включают набор из 3-6 коэффициентов обратного рассеяния, 1-2 коэффициентов ослабления, 1-3 значений деполяризации излучения в диапазоне длин волн от 355 до 1064 нм. Этот набор является весьма ограниченным и, строго говоря, без применения целого ряда сильных допущений, недостаточным для оценки важнейших характеристик аэрозолей, присутствующих в атмосфере;

2. Лидарные данные имеют высокую измерительную погрешность, особенно в случае зондирования системами космического базирования, вследствие чего необходимы дополнительная стабилизация, повышение устойчивости и надежности работы алгоритмов для обработки этих данных;

3. Обработка большого объема данных многоволнового лидарного зондирования в реальном времени при глобальном мониторинге параметров аэрозолей предъявляет высокие требования к скорости расчетов;

4. Отсутствует априорная информация о распределении аэрозолей по размерам, комплексном показателе преломления, при этом их размеры могут варьироваться в широком диапазоне от 0.01 до 20 мкм, а показатель преломления в реальной части от 1.3 до 1.8 и в мнимой части от 0 до 0.05;

5. Разработанные ранее алгоритмы применимы для оценки параметров сферических аэрозолей, имеющих фиксированный показатель преломления, однако в общем случае атмосферные аэрозоли представлены частицами нерегулярной формы, а их показатель преломления зависит от длины волны падающего излучения.

Таким образом, **тема диссертационной работы является актуальной**, так как в ней комплексно рассматриваются принципиальные вопросы лидарного зондирования атмосферного аэрозоля.

## **II. Цель и задачи работы, основные научные результаты**

**Целью работы** является разработка метода оценки параметров атмосферных аэрозолей по лидарным измерениям коэффициентов обратного рассеяния, ослабления и деполяризации в условиях ограниченного числа длин волн, высокой измерительной погрешности, отсутствия априорной информации о форме, показателе преломления и распределении аэрозолей по размерам.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих **задач**:

1. Получение лидарных сигналов на нескольких длинах волн в спектральном диапазоне 355-1064 нм;

2. Первичная обработка лидарных данных с целью извлечение набора оптических коэффициентов, состоящего из коэффициентов обратного рассеяния, ослабления и деполяризации излучения на нескольких длинах волн в спектральном диапазоне 355-1064 нм;

3. На основе набора оптических коэффициентов оценка следующих конечных параметров аэрозолей: распределение по размерам, эффективный размер, различные типы концентраций, комплексный показатель преломления, коэффициенты рассеяния и поглощения, альbedo однократного рассеяния.

Каждая из поставленных задач является самостоятельной сложной научно-технической проблемой, заслуживающей отдельного исследования. Учитывая, что первые две из них на настоящий момент наиболее глубоко проработаны, автор в своей работе **основное внимание уделяет решению третьей задачи, связанной с оценкой конечных параметров аэрозолей**.

В диссертационной работе построен ряд математических моделей для задач, возникающих в зависимости от степени «глобальности» мониторинга атмосферы.

**1. Для одномерного случая** построена математическая модель, основанная на описании ансамбля аэрозолей в виде смеси из двух компонент, одна из которых представлена частицами сферической формы, а другая – случайно ориентированными сфероидами. В таком представлении ядро интегрального преобразования, связывающего распределение аэрозолей по размерам и оптические коэффициенты, выражается в виде взвешенной суммы двух функций, зависящих от формы частиц.

В случае сферической формы частиц ядро находится на основе строгого решения уравнений Максвелла, полученного Ми – это хорошо изученное и проверенное решение как с теоретической, так и с практической точки зрения.

Что касается случайно ориентированных сфероидов, то соответствующая ядерная функция получена Мищенко. Для проверки того, насколько адекватно построенная математическая модель с использованием ядерной функции Мищенко воспроизводит рассеивающие свойства нерегулярных частиц, автор проводит ряд оценок.

**Во-первых**, для заданного распределения аэрозолей по размерам, образованного в одном случае только сферическими частицами, а в другом случае – только случайно ориентированными сфероидами, вычисляются коэффициенты обратного рассеяния и ослабления путем решения прямой задачи. Сравнение оптических коэффициентов, вычисленных для обоих случаев, показало, что коэффициенты обратного рассеяния сфер превосходят в два раза и более соответствующий коэффициент сфероидов, в то время как «сферические» и «сфероидные» коэффициенты ослабления близки друг к другу. Также показано, что с ростом мнимой части показателя преломления частиц коэффициенты обратного рассеяния сфер и сфероидов сближаются.

**Во-вторых**, проводится анализ величины деполяризации излучения в зависимости от размера частиц, длины волны, показателя преломления. Показано, что она может достигать 30 % и более.

**Полученные результаты являются физически обоснованными**, правильно отражают физические свойства аэрозоля нерегулярной формы. а материал, собранный для сравнения теоретических и экспериментальных данных, – достаточно полным по данной теме.

Однако необходимо отметить, что в общем случае в атмосфере могут присутствовать неоднородные аэрозоли и т.н. цепочечные структуры. **Применимость модели предлагаемого автором типа для рассеяния на реальных аэрозолях общего вида остается открытым вопросом.**

В рамках построенной одномерной математической модели анализируется обратная задача, связанная с восстановлением распределения аэрозолей по размерам по лидарным измерениям коэффициентов ослабления и обратного рассеяния, поляризованного параллельно и перпендикулярно падающему излучению на нескольких длинах волн. Это классическая

некорректная задача, в которой решается интегральное уравнение Фредгольма I рода с неточно заданным ядром. Для поиска его решения автор обобщает подход, разработанный им ранее для сферической модели и основанный на регуляризирующем алгоритме Тихонова с модификациями. Данный выбор обусловлен положительными результатами, которые продемонстрировал этот подход при сравнении с другими существующими методами оценки параметров сферических аэрозолей как дистанционными, так и локальными.

**Отличительной характеристикой** нового алгоритма является то, что он позволяет учитывать в расчетах деполяризацию излучения. В результате становится возможным оценивать параметры аэрозолей как регулярной так и нерегулярной формы. Кроме того, разработана модификация одномерного алгоритма для коррекции решения обратной задачи, учитывающая спектральную зависимость комплексного показателя преломления аэрозолей.

**В результате исследования установлено,** что оптимальный набор измеряемых с погрешностью до 10 % оптических данных для распознавания аэрозольной смеси из сферических и нерегулярных частиц достигается при использовании трех коэффициентов обратного рассеяния, двух коэффициентов ослабления и одного коэффициента деполяризации излучения в диапазоне длин волн 355-1064 нм.

**2. При построении двумерной модификации** математической модели рассматриваемой задачи автор использует одно из преимуществ, которое реализуется при лидарном зондировании, а именно: измерение данных с высоким разрешением по высоте. Для этого вводится понятие двумерного распределения аэрозолей по размерам и по дистанции зондирования.

В рамках построенной модификации математической модели формулируется двумерная обратная задача и разрабатывается двумерный регуляризирующий алгоритм её решения. Он обеспечивает более высокую надежность восстановления профилей параметров аэрозолей, таких как эффективного размера, концентрации, общей площади поверхности и объёма при использовании в условиях ограниченного набора оптических данных и значительной погрешности их измерения (до 20 %).

Работа регуляризирующего алгоритма основана на применении специально построенного двумерного стабилизатора для функционала Тихонова. Построенный стабилизатор позволяет повысить устойчивость и точность восстановления профиля параметров аэрозолей в результате регуляризации решения обратной задачи одновременно по размеру частиц  $r$  и по дистанции зондирования  $z$ .

Следует отметить, что для разработке двумерного регуляризирующего алгоритма **в работе отсутствует строгое обоснование критерия,** в соответствии с которым производится выбор оптимального значения параметра регуляризации, отвечающего за «степень» сглаживания решения в направлении зондирования.

**3. Следующая модификация** математической модели допускает исследование глобального характера параметров атмосферных аэрозолей.

Использование этой модификации позволяет принимать в расчетах лидарные данные, измеряемые одновременно с высоким разрешением по высоте и по времени.

Чтобы оптимизировать вычислительный процесс, автор использовал **несколько упрощений**.

**Во-первых**, параметры аэрозолей находятся, минуя непосредственное восстановление распределения аэрозолей по размерам. С одной стороны, это не требует выполнения интегрирования при нахождении каждого параметра аэрозолей, а с другой стороны, оценка «интегральных значений» распределения аэрозолей по размерам является заведомо более устойчивой операцией, нежели оценка самого распределения аэрозолей по размерам.

**Во-вторых**, вместо регуляризации по Тихонову, требующей оценки оптимального регуляризирующего параметра, автором предложен альтернативный подход, в котором регуляризация осуществляется путем редуцирования ковариационной матрица рассматриваемой задачи. В результате редуцирования из ковариационной матрицы выводятся её минимальные собственные значения и соответствующие им собственные вектора, «отвечающие» за неустойчивость при выполнении обращения.

Благодаря используемым упрощениям, разработан альтернативный метод решения рассматриваемой обратной задачи. На его основе построен быстрый алгоритм линейной оценки поля микрофизических параметров аэрозолей, описывающего пространственно-временное поведение частиц и их динамику.

Опираясь на результаты численного моделирования, автор приходит к выводу, что погрешности оценки параметров аэрозолей быстрым и одномерным регуляризирующим алгоритмами, являются близкими. Однако необходимо отметить, что при исследовании точности быстрого алгоритма не приводятся результаты моделирования с тестовыми распределениями аэрозолей по размерам сложной формы, например, бимодальной. **Поэтому нельзя оценить его применимость для таких случаев**.

**Для валидации** результатов разработанной методики она используется при обработке данных лидарного зондирования, полученных в реальных экспериментах для аэрозолей различного типа и происхождения. Среди исследованных типов аэрозолей хотелось бы выделить минеральную пыль, образованную над пустыней Сахара, продукты горения биомассы, возникшие вследствие пожаров в Африке и Северной Америке, аэрозоли континентального и антропогенного происхождения Европы и Северной Америки.

**Достоверность полученных результатов** оценивается их сравнением с результатами локального забора проб и результатами, полученными при измерениях солнечным радиометром, выполненными одновременно с лидарным зондированием.

В целом, продемонстрирована близость оценок параметров аэрозолей, сделанных различными методами, что подтверждает **достоверность**

результатов методики, разработанной в рамках диссертационного исследования.

**Таким образом, достоверность** полученных результатов базируется на использовании проверенных теоретических основ теории рассеяния света на малых частицах, а также на сравнении теоретических оценок с экспериментальными данными.

### **III. Научная новизна**

Ключевым результатом работы является разработка метода оценки параметров атмосферных аэрозолей при многоволновом лидарном зондировании. На его основе создан программный комплекс, который позволяет моделировать оптические параметры аэрозолей, обрабатывать лидарный сигнал и восстанавливать микрофизические характеристики аэрозолей по данным многоволнового лидарного зондирования.

### **IV. Апробация результатов работы**

Основные результаты исследования, полученные в диссертации, опубликованы в научной печати и пользуются заслуженной известностью среды специалистов, подтверждены актом внедрения в ООО «Оптосистемы» (Троицк, Россия), экспериментами, выполняемыми в рамках работы европейской аэрозольной лидарной сети (EARLINET).

### **V. Необходимо отметить следующие недостатки:**

1. При восстановлении параметров пыли предлагаемой методикой наблюдается систематическая недооценка мнимой части комплексного показателя преломления по сравнению с данными локального забора проб. Возможные причины этого в работе никак не комментируются.

3. В общем случае в атмосфере могут присутствовать неоднородные аэрозоли и т.н. цепочечные структуры. Применимость моделей предлагаемого автором типа для восстановления параметров реальных аэрозолей общего вида остается открытым вопросом.

4. При исследовании точности «быстрого» алгоритма не приводятся результаты моделирования с тестовыми распределениями аэрозолей по размерам сложной формы, например, бимодальной. Поэтому нельзя оценить его применимость для таких случаев.

5. Неоднозначно применение автором термина «рамановский лидар». В ряде случаев под этим понимается лидар, работающий на принципе комбинационного рассеяния света. В данном же случае термин применяется для обозначения метода получения зондирующего излучения. Это несколько затрудняет чтение текста работы.

6. Для многоволновых лидаров характерно, что исходные результаты измерений, полученные на разных длинах волн, в типичном случае имеют разную погрешность и разное соотношение сигнал / шум. В то же время в работе автором предполагается некоторая универсальная характеристика качества исходных результатов по всему массиву данных. Влияние этого фактора в работе не рассмотрено, что может затруднить практическое применение полученных результатов.

7. В реальных атмосферных условиях может отсутствовать возможность получения качественных исходных данных на всех необходимых длинах волн. В работе нет оценок диапазона применимости многоволновых методов зондирования в терминах состояния атмосферной среды, а также рекомендации и методы обработки таких «неполных» данных.

### Заключение

Выполненная А.В. Колготиним диссертационная работа является важным шагом в развитии лидарных методов дистанционного зондирования и содержит решение важной научной и технической проблемы - разработке и обоснованию нового метода восстановления параметров атмосферного аэрозоля по данным дистанционного лидарного зондирования, обеспечивающего возможность глобального мониторинга параметров атмосферных аэрозолей.


Диссертационная работа представляет собой законченное исследование на актуальную тему, результаты которого имеют большое теоретическое и практическое значение.

Диссертационная работа Колготина А.В. полностью соответствует паспорту специальности 25.00.30 – метеорология, климатология и агрометеорология.

Несмотря на указанные недостатки, работа полностью соответствует требованиям, предъявляемым ВАК к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 25.00.30 - метеорология, климатология, агрометеорология.

Согласен на включение моих персональных данных в аттестационное дело и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент,  
д.т.н., профессор БГТУ «Военмех»

 Савин  
Андрей Валерьевич

тел. +7-911-818-40-02  
домашний адрес:  
г. Санкт-Петербург,  
ул. Зверинская, д. 29, кв. 7  
э/а: izooandrey@inbox.ru

Подпись Савина А.В. заверяю:  
Ученый секретарь Ученого Совета  
БГТУ ВОЕНМЕХ им. Д.Ф. Устинова



