

На правах рукописи



Шмирко Константин Александрович

**Методы лазерного зондирования в задачах
изучения пространственно-временной
изменчивости оптических и микрофизических
параметров радиационно-активных
компонентов атмосферы в переходной зоне
материк-океан**

01.04.21 – Лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Владивосток – 2009

Работа выполнена в *Институте автоматике и процессов управления
Дальневосточного отделения РАН.*

Научный руководитель: *д.ф.-м.н.,
профессор,
Бужин Олег Алексеевич*

Официальные оппоненты: *д.ф.-м.н.,
с.н.с.,
Дзюба Владимир Пименович*

Ведущая организация: *к.ф.-м.н.,
Ильин Алексей Анатольевич*
*Институт оптики атмосферы им
В.Е. Зуева, СО РАН*

Защита состоится «29» декабря 2009 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д005.007.02 при *Институте автоматике и процессов управления ДВО РАН*, расположенном по адресу: 690041 г. Владивосток, ул. Радио, 5

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке *Института автоматике и процессов управления ДВО РАН.*

Автореферат разослан «_____» _____ 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д005.007.02,
кандидат технических наук, доцент



Гамаунов Е.Л.

Общая характеристика работы

Актуальность работы Радиационно - активные компоненты атмосферы играют первостепенную роль в формировании климата Земли. Особенности переходной зоны материк - океан состоят в том, что динамику радиационно - активных компонентов атмосферы (аэрозоль, озон) определяют как процессы, протекающие на континенте и в открытом океане, так их взаимовоздействие.

Методы лидарного зондирования успешно используются для исследования радиационно активных компонентов атмосферы в континентальных районах и над акваторией океанов. Однако, сильная динамика атмосферных процессов, формирующих распределение радиационно активных компонентов переходной зоны, многочисленность и разнотипность источников атмосферного аэрозоля, требуют разработки комплексных лазерных методов исследования, позволяющих измерить набор параметров радиационно активных компонентов наиболее полно характеризующих особенности атмосферы переходной зоны.

С другой стороны, в переходной зоне возникает возможность использования, одновременно с методами лазерного зондирования, данных спутникового мониторинга, особенно информативных для восстановления параметров атмосферного аэрозоля. Здесь возможно использовать результаты измерения спектров восходящего от морской поверхности солнечного излучения при восстановлении оптических и микрофизических характеристик атмосферного аэрозоля. Такой комплексный подход значительно повышает достоверность получаемых результатов.

Актуальной является задача разработки технических средств, обеспечивающих комплексный характер мониторинга основных радиационно активных компонентов атмосферы в переходной зоне и их динамику. В работе представлены результаты создания лидарного комплекса, предназначенного для одновременных измерений оптических и микрофизических параметров атмосферы с использованием современных методов дистанционного лазерного контроля (многочастотное лазерное зондирование атмосферного аэрозоля, дифференциальное поглощение лазерного излучения атмосферным озоном). Актуальной является задача повышения эффективности пассивного (спутникового) и активного (лидарного) мониторингов за счёт комплексного анализа их данных. В работе представлены результаты одновременного использования данных спектральных каналов сканеров цвета морской поверхности спутника MODIS AQUA и многочастотного лазерного зондирования для корректного восстановления вертикального распределения микрофизических и оптических параметров атмосферного аэрозоля.

Актуальным является использование новых разработанных комплексов

для исследования тех процессов, которые определяют динамику радиационно-активных компонентов атмосферы в переходной зоне материк-океан. В работе приведены результаты многолетних исследований особенности структуры и динамики атмосферного аэрозоля и озона, планетарного пограничного слоя, их трансформации под действием интенсивных процессов, воздействующих на климат региона (песчаные бури, извержения вулканов).

В переходной зоне материк-океан также является актуальной задача верификации данных спутникового мониторинга.

Целью диссертационной работы является создание лидарного комплекса, доработка методики для проведения комплексных сетевых и стационарных измерений и исследование параметров и особенностей распределения и динамики полей радиационно-активных компонентов атмосферы в переходной зоне матери-океан.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать лазерный комплекс для проведения сетевых и стационарных измерений коэффициентов обратного рассеяния и экстинкции, функции распределения числа частиц по размерам, вертикального распределения озона, структуры и динамики полей радиационно-активных компонентов атмосферы в переходной зоне материк - океан.
2. Доработать существующие методы лазерного исследования атмосферы для совместного лидарного и спутникового зондирования атмосферного аэрозоля в переходной зоне материк - океан.
3. Изучить особенности вертикальной стратификации атмосферного аэрозоля в переходной зоне материк-океан.
4. Исследовать вертикальную зависимость функции распределения частиц по размерам во время интенсивной аэрозольной загрузки атмосферы.
5. Исследовать сезонные особенности процессов, формирующих вертикальное распределение озона (ВРО) в переходной зоне материк-океан.
6. Изучить влияние пылевого аэрозоля на морские экосистемы.

Научная новизна С помощью разработанного лидарного комплекса были получены следующие результаты:

1. Установлена устойчивая трехслойная стратификация атмосферного аэрозоля в диапазонах высот 0-3 км, 4-6 км и 8-10 км, характерная для периодов интенсивного трансграничного переноса азиатской пыли в переходной зоне материк-океан.

2. Впервые получены результаты комплексных исследований структуры аэрозольных полей методами активного и пассивного зондирования в переходной зоне материк-океан Дальневосточного региона.
3. Впервые определено время реакции фитопланктонных сообществ на поступление в верхний слой океана микроэлементов, содержащихся в пылевом аэрозоле с помощью методов лазерной спектроскопии и лазерного зондирования.
4. Экспериментально установлено, что система зональных ветров (субтропическое и полярное струйные течения) приводит к двувёршинному вертикальному распределению концентрации озона в переходной зоне материк-океан в зимне-весенний период.
5. Впервые получена вертикальная зависимость функций распределения числа аэрозольных частиц по размерам для периодов интенсивной аэрозольной загрузки атмосферы в переходной зоне материк-океан.

Практическая значимость

1. Разработан аппаратный лидарный комплекс, позволяющий проводить регулярный мониторинг структуры и динамики основных радиационно активных компонентов атмосферы в переходной зоне материк - океан.
2. Созданы методики и алгоритмы, позволяющие проводить комплексный анализ атмосферного аэрозоля в переходной зоне по данным лидарных, спутниковых и фотометрических измерений.
3. На основе экспериментальных данных показано воздействие атмосферного аэрозоля пылевых бурь на состояние фитопланктонных сообществ окраинных морей северо-западной части Тихого океана.
4. Установлены характерные формы функции распределения числа аэрозольных частиц по размерам для переходной зоны материк-океан, континентальных и морских условий.
5. Экспериментально установлена двувёршинная структура вертикального распределения озона в зимне-весенний период в переходной зоне материк-океан. Установлены основные процессы, ведущие к формированию такого распределения концентрации озона.

Технические средства и методы могут быть использованы для исследования структуры и динамики атмосферы в переходной зоне материк-океан. Результаты, полученные с использованием разработанного комплекса, можно использовать для оценки вклада особенностей структуры полей аэрозоля и озона в процессы формирования регионального климата; использовать для

изучения процессов взаимодействия радиационно-активных компонентов атмосферы с биологическими сообществами.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Оптимальным вариантом лидарного комплекса исследования атмосферных процессов в переходной зоне материк-океан, требующих проведения сетевых измерений распределения характеристик радиационно-активных компонентов атмосферы, является комплекс из двух лидаров с перекрывающимися измерительными каналами. Комплекс на основе твердотельного Nd:YAG и эксимерного XeCl лазеров позволяет измерять коэффициенты обратного рассеяния и экстинкции с ошибкой менее 13%, функции распределения числа частиц по размерам, ВРО с ошибкой до 20%, выполнять взаимную верификацию данных и мобильность в сетевых измерениях.
2. Комплексное использование данных полученных на разработанной станции лазерного зондирования и спутниковых фотометрических измерений позволили определить следующие особенности процессов трансформации микрофизических характеристик пылевого аэрозоля и его вертикального распределения в атмосфере переходной зоны материк-океан:
 - увеличение измеренного методами лазерного зондирования на длине волны 532 нм значения высоты планетарного пограничного слоя (ППС) на величину до 1 км по сравнению с результатами метеозондирования;
 - формирование ярко выраженной трехслойной стратификации аэрозоля с образованием температурных инверсий в области планетарного пограничного слоя, свободной атмосферы и подтропопаузмном слое;
 - увеличение размеров грубодисперсной фракции спектральной плотности распределения числа частиц по размерам с высотой;
3. Всплеск развития клеток фитопланктона наблюдается через три дня после поступления аэрозоля в верхний слой океана.
4. Особенности распределения концентрации озона в зимне-весеннее время в переходной зоне материк-океан состоят в следующем:
 - наблюдается двухвершинное вертикальное распределение концентрации озона, которое формируется специфической системой зональных ветров (субтропическое и полярное струйные течения);
 - максимумы распределения концентрации озона приходятся на высоты 12-13 км и 19-21 км.

Апробация работы Результаты работы были представлены в 15 докладах на конференциях, в том числе 3 доклада на конференциях регионального и 13 на конференциях международного масштаба.

Достоверность полученных результатов обусловлена использованием современных методов и оборудования для получения и анализа экспериментального материала. Результаты работ не противоречат и дополняют ранее полученные данные других авторов.

Публикации Материалы диссертации опубликованы в 20 печатных работах, из них 4 статей в журналах из перечня ВАК [1–4], 1 глава в монографии [5], 15 тезисов докладов [6–20].

Личный вклад автора Автор работы принимал участие в разработке лидарной станции, а именно выполнял расчет параметров малогабаритного трехчастотного лидара для зондирования тропосферы [11, 17]. Проводил экспериментальные работы на лидарной станции, проводил расчеты высоты пограничного слоя атмосферы по лидарным и метеоданным, осуществлял сравнительный анализ данных и их обоснование [3]. Участвовал в экспериментах по зондированию стратосферного озона, выполнял расчет профилей вертикального распределения озона, проводил траекторный анализ движения воздушных масс, обуславливающих особенности на ВРО, участвовал в интерпретации полученных результатов [2]. Проводил экспериментальные работы по лазерному зондированию атмосферы в переходной зоне материк-океан, разработку алгоритма восстановления лидарных данных с привлечением данных сканера MODIS-Aqua, расчет аэрозольной оптической толщины разработанным алгоритмом, определение высот локализации аэрозольных слоев в периоды интенсивных песчаных бурь и их анализ на устойчивость [1, 5]. Выполнял разработку алгоритма, расчет, анализ микрофизических параметров атмосферного аэрозоля для различных географических положений, обоснование полученных результатов, обработка и анализ данных зондирования стратосферного вулканогенного аэрозоля [4].

Структура и объем диссертации Диссертация состоит из введения, обзора литературы и пяти глав основной части, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 143 страницы, включая 36 рисунков и списка литературы из 159 наименований.

Краткое содержание работы

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

Обзор литературы содержит краткую информацию о причинах климатических изменений на планете. Приводится информация о существующих на сегодняшний момент глобальных проблемах, решение которых невозможно без использования лазерных дистанционных методов исследования.

Одним из основных климатообразующих факторов является *радиационный баланс*, который определяется динамикой радиационно-активных компонентов атмосферы. К последним относят водяной пар, углекислый газ, озон и аэрозоль. Эти вещества отвечают за большую часть поглощенной и рассеянной радиации и принимают участие в процессах изменения климата (прямое воздействие). Также выделяют не прямое воздействие аэрозоля, заключающееся в изменении микрофизических и радиационных свойств, количества и времени жизни облаков (косвенное воздействие эффекты Тумея и Альбрехта).

Ключевым параметром для определения косвенного воздействия является эффективность аэрозольных частиц выступать в качестве ядер конденсации, которая, в свою очередь, зависит от размеров, химического состава, степени перемешанности и окружающей среды.

Другой возможный эффект присутствия в атмосфере «черного углерода» это изменение режимов региональной и глобальной циркуляции [21]. В настоящее время фоновые концентрации CO_2 в атмосфере являются самыми высокими за последние 400 тыс. лет и превышают предыдущие исторические максимумы на 35% [22–24]. Кроме того, не так страшна эмиссия углерода, как его накопление. По данным авторов [25] общее количество углерода непрерывно растет и близко к триллиону тонн.

По данным [26] среднегодовой вклад аэрозоля в радиационный баланс составляет $-1.57 \pm 0.66 \text{ Вт м}^{-2}$. Интенсивная антропогенная деятельность, увеличение процента пустынных территорий, лесные пожары – способствуют возрастанию концентрации аэрозоля в атмосфере. География основных поставщиков аэрозоля в атмосферу, конкретные метеорологические условия приводят к сильной стратификации его в атмосфере. Аэрозольный эффект зависит от места его (аэрозоля) локализации. В стратосфере он приводит к тому, что уменьшает количество солнечной радиации, достигающей поверхности, т.е. дает отрицательный вклад в радиационный баланс. В тропосфере его воздействие может быть положительным, за счет процесса облакообразования, который он стимулирует. Следует отметить тот факт, что стратосферный аэрозоль может взаимодействовать с озоном и, в зависимости от своего типа, стимулировать разрушение или синтез аэрозоля [27, 28]

Основными источниками получения данных о динамике радиационно-активных компонентов атмосферы и океана являются различные дистанционные методы зондирования, в частности лазерные методы.

В главе 1 приводится обзор основных процессов взаимодействия лазерного излучения с атмосферными составляющими, приводятся основные требования к лидарной системе для зондирования атмосферы в переходной зоне материк-океан, характеристика созданного аппаратного комплекса станции лазерного зондирования ИАПУ ДВО РАН. Обосновывается выбор зондирующих длин волн лазерного излучения. Приводится сравнение разработанной станции зондирования с существующими аналогами. Приводится алгоритм восстановления оптических и микрофизических параметров атмосферного аэрозоля с использованием разработанной станции. Результаты опубликованы в [11, 17].

Глава 2 содержит результаты исследования годовой динамика аэрозоля внутри ППС, в переходной зоне материк - океан вблизи г. Владивосток. Аэрозоль и сам ППС, в атмосфере над данной территорией, формируется под действием процессов, протекающих в океане и на континенте. Необходимо отметить так же, что на структуру атмосферного аэрозоля и характеристики ППС в исследуемом районе оказывают воздействие пылевые бури в период их наибольшей активности весной на территории континентального Китая и Монголии [1]. В этот период, аэрозоль, в основном, переносится в пограничном слое, в редких случаях затрагивая верхнюю тропосферу. Поступление аэрозоля с континента или с океана в ППС меняет его структуру и должно приводить к тому, что значения высот, определяемые по аэрозольному рассеянию (лидарные измерения) и по градиентам температуры (метеозондирование) будут различаться (см. рисунок 1).

Существуют несколько методов определения высоты пограничного слоя, основанные на его различных свойствах [29–32]. Одной из методик является анализ градиента потенциальной температуры $\frac{d\theta}{dz}$.

Был проведен совместный анализ лидарных и метео-измерений, полученных в течение года в переходной зоне материк-океан и сравнили характеристики ППС (высота, структура) восстановленные по этим измерениям. Дополнительно к этому, в летние месяцы проведено сравнение высоты ППС по лидарным данным в переходной зоне и над морской поверхностью Японского и Охотского морей.

Было установлено, что в переходной зоне материк-океан в атмосфере над Амурским заливом наблюдается несовпадение высот пограничного слоя, определенных по результатам метео и лидарного зондирования, в период с весны по осень. Наибольшие отклонения в значениях высот ППС, восстановленных по данным метео и лидарного зондирования, наблюдаются весной и летом, в этот период расхождения в высоте ППС в среднем доходят до 800 м. В осенние и зимние месяцы наблюдались незначительные отклонения в пределах 100 м.

Максимальное превышение высоты пограничного слоя, восстановленно-

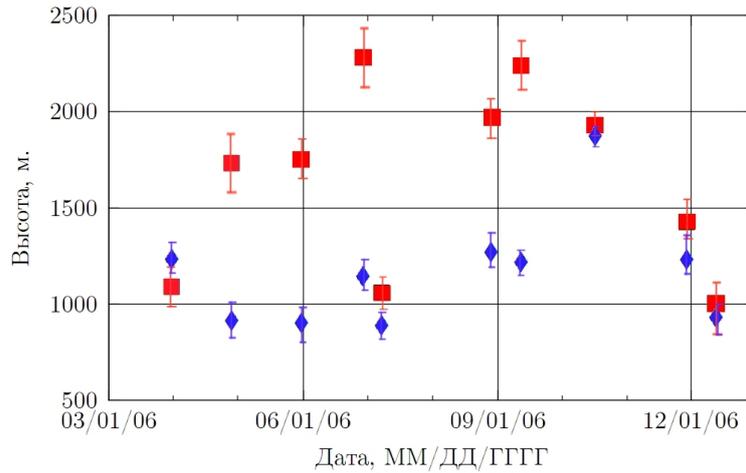


Рисунок 1: Годовой ход высоты ППС при месячном усреднении. ■ - высота ППС по лидарным данным; ◆ - высота ППС по метео данным.

го по лидарным данным, было зарегистрировано в июне и составило 1100 м, столь большое отличие объясняется интенсивным воздействием пылевых бурь, протекающих в этот период в континентальных районах Китая, на структуру аэрозоля в пределах ППС. Пылевые выносы изменяют не только стратификацию внутри пограничного слоя, но и влияют на результат восстановления высоты ППС. Такой эффект проявляется из-за сосредоточения пыли внутри и над пограничным слоем.

Полученные результаты демонстрируют, что расхождение между значениями высоты ППС, определяемой по аэрозольному рассеянию и по градиентам температуры могут превышать 1 км в тех ситуациях, когда структура атмосферного аэрозоля в пределах ППС в переходной зоне формируется интенсивными процессами, переносящими аэрозоль с континента или открытых морских акваторий.

Результаты второй главы опубликованы в работах [3, 12, 13, 16, 18, 19].

В главе 3 представлены результаты исследования микрофизических свойств атмосферного аэрозоля различного происхождения в переходной зоне материк-океан и результаты сетевых наблюдений за динамикой вулканогенного аэрозоля, обусловленного извержениями вулканов Окмок и Касаточи летом 2008 г.

В результате проведенных работ установлено, что в переходной зоне материк-океан распределение аэрозоля преимущественно имеет смешанный тип, при этом распределение числа частиц по размерам имеет два локальных максимума. В фоновых условиях функция распределения может иметь как две, так и одну моду (рисунок 2). В случае двухмодального спектра размеров частиц величина второй моды убывает с высотой в пределах пограничного слоя,

а величина модального радиуса остается неизменной. При наличии интенсивных источников аэрозоля (пылевые выносы) главная мода практически не меняется, за исключением увеличения числа частиц с радиусами в интервале 0.03-0.05 мкм. Кроме того, правое крыло основной моды расширяется до размеров 0.2 мкм. Вторичный максимум испытывает большие изменения. Во-первых, возрастает его интенсивность и уменьшается модальный радиус частиц, соответствующих ему. В пределах пограничного слоя изменения незначительные в марте-апреле. В июне изменения положения и величины вторичного максимума существенны. С увеличением высоты слоя, для которого проводился расчет функции распределения, интенсивность его падает, а модальный радиус сдвигается в сторону больших размеров, что говорит об увеличении размеров частиц вышележащих слоев. Такая динамика второй моды наблюдалась до высот 8 км, функция распределения в последнем рассмотренном слое (8600–9000 м) вообще не содержит второго максимума. Такое поведение второй моды было зарегистрировано только во время пылевых выносов рисунок 3. При регистрации вулканогенного аэрозоля в августе 2008 г. наблюдалось нормальное поведение размеров вторичной моды - уменьшение размеров частиц с высотой. Данные морской экспедиции выявили изменение функции распределения только для прибрежных акваторий. Произошло уменьшение радиусов частиц, соответствующих субмикронной фракции аэрозоля, а также был обнаружен сдвиг на 0.1 мкм модального радиуса и увеличение числа частиц вторичной моды.

Кроме того, совместные лидарные наблюдения, показали, что относительно слабые извержения вулканов Касаточи и Окмок в июле–августе 2008 г. стали причиной длительного аэрозольного возмущения в стратосфере Северного полушария в больших пространственных масштабах.

Результаты третьей главы опубликованы в работах [4, 15, 16, 18].

Глава 4 содержит результаты исследования озонового слоя земли и его динамики в переходной зоне матрикс океан.

По результатам зондирования распределения озона в атмосфере выявлено, что в зимний период времени наблюдается двувершинное распределение. Для выявления источников возникновения наблюдаемых распределений и природы вторичного пика в распределении озона над местом расположения лидарной станции был проведен траекторный анализ движения воздушных масс [33] для высот, соответствующих главному и вторичному максимумам в распределении озона, а также минимуму, разделяющему их. В работах [27, 34], авторами сделано предположение, что вторичный максимум обуславливается северными воздушными массами, обогащенными озоном. Обратный траекторный анализ позволяет восстановить траекторию движения воздушных масс до того, как они достигают координат лидарной станции и оценить время нахождения озонного трассера на различных широтах. Для обобщения

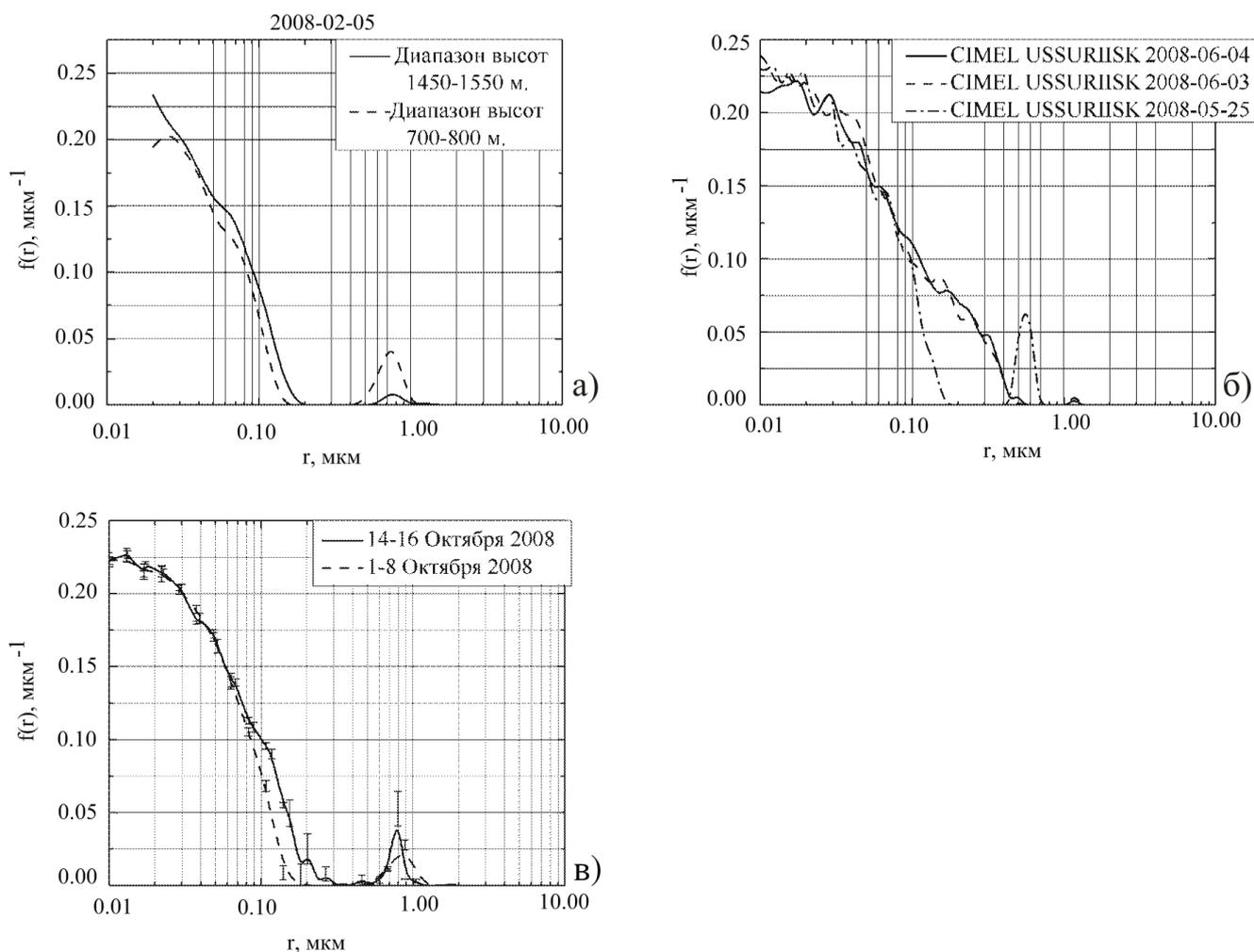


Рисунок 2: Функции распределения числа частиц по размерам (фоновые условия). а) - переходная зона; б) - континентальный район Приморского края; в) - экспедиционные измерения

результатов траекторного анализа и правомерности применения предположения авторов [27, 34, 35] для нашего региона, были построены гистограммы обратного траекторного анализа.

Лидарное зондирование выявило сложную структуру ВРО в переходной зоне материк - океан в месте расположения лидара рисунок 4. На основе совместного анализа полученных ВРО, траекторий воздушных масс и карт потенциального вихря можно предположить, что низко расположенный вторичный максимум на уровне тропопаузы в большом числе случаев обусловлен вторжением слоев арктических воздушных масс практически под ось струйного течения. Но наблюдаемая слоистая структура довольно устойчива в зимний период и может быть обусловлена уменьшением концентрации озона в нижней стратосфере при его транспорте от полярного вихря на юг и перемешиванием при захвате субтропическим струйным течением, которое в нашем регионе за исследуемый период изменяло положение своего центра в пределах

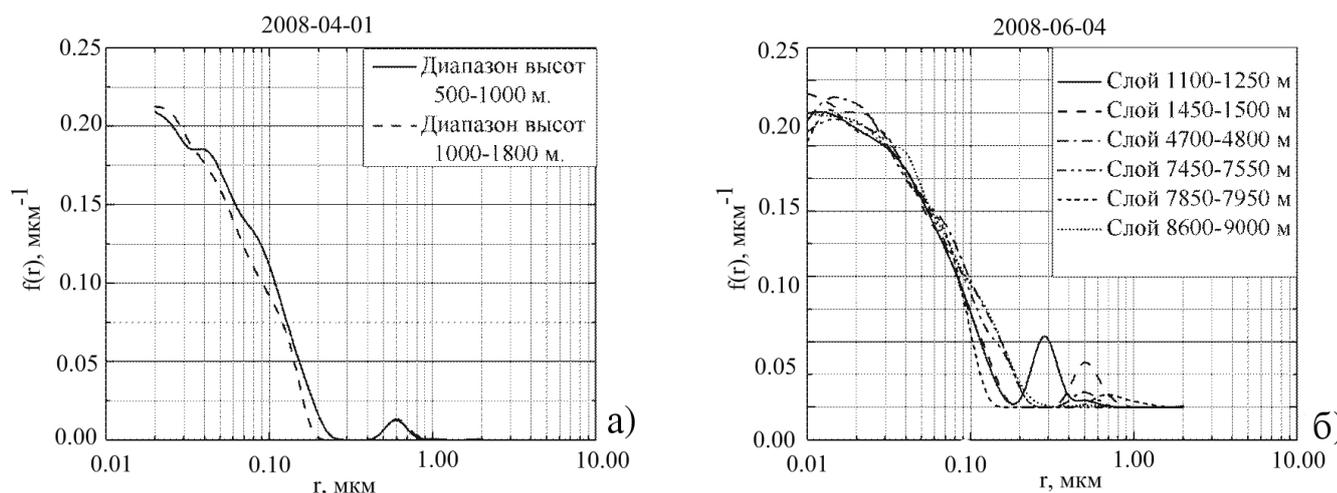


Рисунок 3: Функции распределения числа частиц по размерам (пылевые бури в переходной зоне). а) - слабая пылевая буря; б) - интенсивная буря.

10 градусов.

Вероятность появления локального максимума ВРО, расположенного обычно на высоте 12000–15000 м., в зимний период 2008 г., составляла более 80%.

Результаты четвертой главы опубликованы в работах [2, 14–16, 18].

В 5 главе приводятся результаты исследования стратификации аэрозольных слоев в атмосфере над заливом Петра Великого, проверка выполнимости для них критерия устойчивости, а также результаты исследования воздействия пылевого аэрозоля на процессы функционирования биологических систем Японского и Восточно-Китайского морей.

Атмосферный аэрозоль играет существенную роль не только в формировании климатических условий, но и является одним из факторов, оказывающих существенное влияние на активность фотосинтезирующих систем в океане. Это воздействие осуществляется как прямым образом, в результате поступления огромного количества минеральных веществ с континента в фотический слой океана (что приводит к локальному цветению водорослей на акваториях, подверженных аэрозольному воздействию), так и в результате изменения альбедо и спектрального состава солнечного излучения, достигающего морской поверхности.

Некоторая часть континентального аэрозоля, попадая в атмосферу в результате таких явлений как пылевые бури или извержения вулканов, локализуется на высотах, соответствующих особенностям высотного распределения температуры, где аэрозоль может находиться очень долго [36]. Под действием ветрового режима аэрозольные массы, находящиеся на резких температурных градиентах, могут переноситься на далекие расстояния. Так, выносы

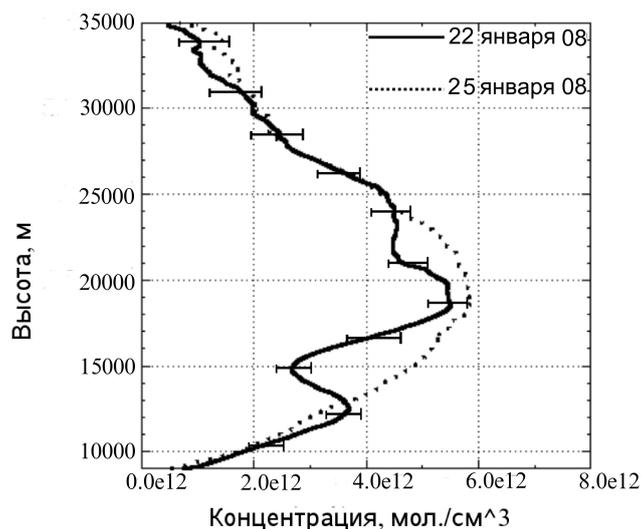


Рисунок 4: Вертикальные профили распределения концентрации озона за 22.01.2008 (сплошная линия), и 25.01.2008 (пунктирная линия).

аэрозоля, вызванные пылевыми бурями в пустыне Сахара, наблюдаются над Атлантическим океаном и достигают берегов Америки [37]. В процессе переноса через Атлантику происходит поступление аэрозоля в океан, что увеличивает концентрацию микроэлементов в верхнем слое океана (ВСО). Увеличение их концентрации (особенно железа, кремния, фосфора) даже в незначительных количествах способно приводить к локальному цветению фитопланктона и к значительному увеличению концентрации хлорофилла «А» [38].

В процессе наблюдения за вертикальной структурой аэрозоля было отмечено, что аэрозоль, как правило, локализуется в несколько слоев (рисунок 5), и с течением времени, возможно их вертикальное перемещение. Направление этого движения в целом зависит от вертикальной составляющей скорости ветра на данных высотах. В некоторых случаях слой, располагающийся на высоте локальной температурной инверсии, испытывает вертикальное движение. Используя данные о высотном распределении температуры можно оценить диапазон высот, где будет выполнен этот критерий и в пределах которого возможна локализация аэрозольных слоев [39].

Анализ временных изменчивостей аэрозольной оптической толщины (АОТ) и концентрации хлорофилла «А», который был проведен для двух районов, расположенных в северо-восточном и восточном направлениях распространения аэрозоля, генерируемого песчаными бурями, показал, что в обоих случаях наблюдаются высокие значения коэффициентов корреляции до 0.6 (см. рисунок 6) между процессами локального цвета и возрастаниями АОТ, вызванными транспортом аэрозоля в период наиболее интенсивных аэрозольных событий в пустыне Гоби в 2006 году. Это позволяет сделать вывод о том, что атмосферный аэрозоль, поступающий на морские акватории в пери-

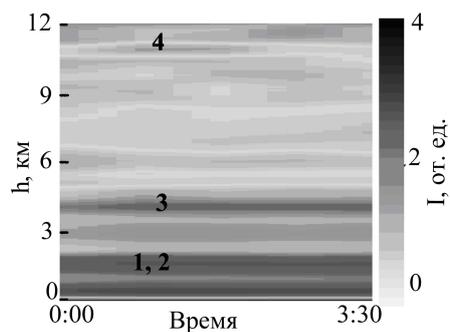


Рисунок 5: Структура атмосферы 27.05.06 г. Вертикальная шкала справа - относительная интенсивность сигнала обратного рассеяния в градациях серого.

од интенсивных песчаных бурь в пустыне Гоби, является одним из важных факторов, влияющих на процессы развития фитопланктонных сообществ в данном регионе.

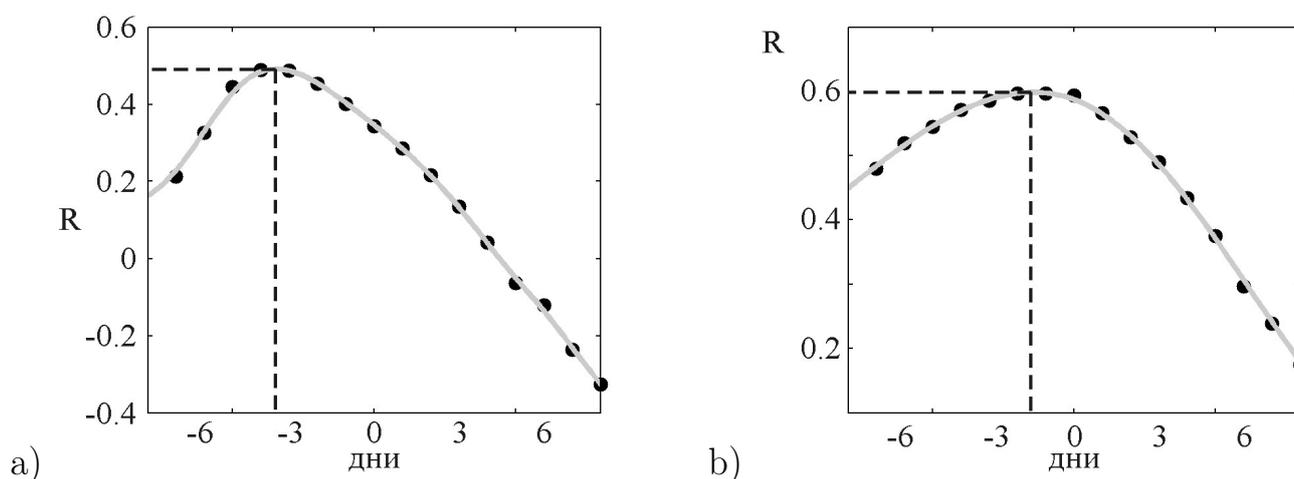


Рисунок 6: а) - Зависимость коэффициента корреляции от смещения временного ряда концентрации хлорофилла «А». Первый район; б) - Зависимость коэффициента корреляции от смещения временного ряда концентрации хлорофилла «А». Второй район.

Результаты пятой главы опубликованы в работах [1, 5–10, 20].

Основные результаты и выводы

1. Показано, что для исследования атмосферных процессов в переходной зоне материк-океан, требующих проведения сетевых измерений распределения характеристик радиационно-активных компонентов атмосферы, необходим комплекс из двух лидаров с перекрывающимися измерительными каналами. Разработанный экспериментальный комплекс на основе твердотельного Nd:YAG и эксимерного XeCl лазеров обеспечива-

ет наиболее полную систему измеряемых характеристик радиационно-активных компонентов, взаимную верификацию данных и мобильность в сетевых измерениях.

2. При помощи разработанной аппаратуры лазерного зондирования выявлены основные признаки процессов трансформации микрофизических характеристик пылевого аэрозоля и его вертикального распределения в атмосфере переходной зоны материк-океан, которые состоят в:
 - формировании ярко выраженной трехслойной стратификации аэрозоля с образованием температурных инверсий в области планетарного пограничного слоя, свободной атмосферы и подтропопаузном слое;
 - увеличении размеров грубодисперсной фракции спектральной плотности распределения числа частиц по размерам с высотой (с 0.4 до 0.9 мкм);
 - увеличении до 1 км высоты ППС определенной лидарными методами в периоды пылевых бурь по сравнению с высотой, определенной по данным метеозондирования.
3. Установлено, что через три дня, после поступления аэрозоля в верхний слой океана наблюдается всплеск развития клеток фитопланктона;
4. Показано, что ключевую роль в формировании двувершинного вертикального распределения концентрации озона с максимумами на высотах 13 км и 20 км в переходной зоне материк-океан играют система зональных ветров и процессы формирования двойной тропопаузы.

Основные публикации по теме диссертации

1. Бужин О. А., Павлов А. Н., Шмирко К. А. и др. Особенности высотного распределения аэрозоля во время прохождения пылевых бурь над заливом Петра Великого в 2006 году и их воздействие на фитопланктонные сообщества Японского моря. // *Оптика атмосферы и океана*. — 2007. — Т. 20, № 4. — С. 341–348. — (Из перечня ВАК).
2. Бужин О. А., Шмирко К. А., Павлов А. Н. и др. Особенности высотного распределения озона в переходной зоне “материк-океан” по данным лидарного зондирования // *Оптика атмосферы и океана*. — 2008. — Т. 21, № 10. — С. 884–889. — (Из перечня ВАК).
3. Бужин О. А., Шмирко К. А., Павлов А. Н., Столярчук С. Ю. Особенности структуры планетарного пограничного слоя атмосферы в переходной зоне материк - океан по данным лидарного и метео - зондирования. //

- Известия РАН. Физика атмосферы и океана.* — 2008. — Т. 44, № 6. — С. 822–827. — (Из перечня ВАК).
4. Зуев В. В., Шмирко К. А., Букин О. А. и др. Результаты совместных лидарных наблюдений аэрозольных возмущений стратосферы на станциях сети CIS-LiNet в 2008 г. // *Оптика атмосферы и океана.* — 2008. — Т. 22. — С. 557–569. — (Из перечня ВАК).
 5. Букин О. А., Салюк П. А., Шмирко К. А. Книга 4. Физические методы исследования // Под ред. Г. И. Долгих. — Москва “Наука”, 2007. — С. 600. — (Из перечня ВАК).
 6. Bukin O. A., Salyuk P. A., Pavlov A. N., Shmirko K. A. Phytoplankton Communities and Climate, Active and Passive optical methods for investigations // XIV International Symposium Atmospheric and Ocean Optics Atmospheric Physics, June 24-29. — 2007.
 7. Salyuk P. A., Bukin O. A., Akmaykin D. A. et al. Phytoplankton Communities in Earth climate system // CITES-07, 21-25 July. — 2007.
 8. Salyuk P. A., Bukin O. A., Shmirko K. A. et al. Estimation of phytoplankton community response to Asian dust forcing in the northwestern Pacific // Program abstracts of 17 Annual Meeting of North Pacific Marine Science Organization "Beyond observations to achieving understanding and forecasting in a changing North Pacific: Forward to the FUTURE 24 October - 2 November. — 2008.
 9. Salyuk P. A., Bukin O. A., Shmirko K. A. et al. Joint use of lidar and satellite methods in the investigation of interactions between climate formative factors and phytoplankton communities state // International Scientific Conference "Advances of Satellite Oceanography: Understanding and Monitoring of Asian Marginal Seas 3-6 October. — 2007.
 10. Salyuk P. A., Shmirko K. A., Akmaykin D. A. Spatio-temporal distribution of Asian dust events and its correlation with biological activity in the Far-Eastern seas of Russia // XV International Symposium "Atmospheric and ocean optics June 22-28. — 2008.
 11. Shmirko K. A., Bukin O. A., Mayor A. Yu., Pavlov A. N. Comparative Analysis of Aerosol Dynamics According to Satellite, Stationary and Shipborne Lidar Data // ICONO/LAT 2007 Conference, May 28-June 1. — 2007.
 12. Shmirko K. A., Bukin O. A., Pavlov A. N. PBL Parameters dynamics in the atmosphere of Vladivostok // XV International Symposium "Atmospheric and ocean optics June 22-28. — Krasnoyarsk: 2008.
 13. Shmirko K. A., Bukin O. A., Pavlov A. N. Analysis of Atmosphere Layers Dynamics in Transition Continent-Ocean Zone // abstracts of XIV International Symposium Atmospheric and Ocean Optics Atmospheric Physics, June 24-29. — 2007.
 14. Shmirko K. A., Bukin O. A., Pavlov A. N. Some results of the lidar sounding

- of aerosol carried out from continental areas of China in the atmosphere above Vladivostok // XIII International symposium. Atmospheric and ocean optics. Atmospheric physics, July 2-7. — 2006.
15. *Shmirko K. A., Bukin O. A., Pavlov A. N., Stolyarchuk S. Yu.* Bimodal vertical ozone distribution structure in transition ocean-continent zone according to lidar measurements // XV International Symposium "Atmospheric and ocean optics". — 2008.
 16. *Shmirko K. A., Bukin O. A., Pavlov A. N., Stolyarchuk S. Yu.* Atmosphere Aerosols and Ozone dynamics in the atmosphere over The Peter The Great bay // Proceedings of PICES 17th Annual Meeting. "Beyond observations to achieving understanding and forecasting in a changing North Pacific: Forward to the FUTURE". — 2008.
 17. *Shmirko K. A., Pavlov A. N., Bukin O. A., Stolyarchuk S. Yu.* Lidar station based on excimer and solid state lasers for investigations of the atmosphere // Asia-Pacific Conference on Fundamental Problems of Opto and Microelectronics, APCOM 2009, September, 14 – 17. — 2009.
 18. *Шмирко К. А.* Особенности динамики радиационно-активных компонентов атмосферы в переходной зоне материк - океан. // Тезисы докладов конференции молодых ученых ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИЕ ИСЛЕДОВАНИЯ. — Владивосток: изд-во Тихоокеанского океанологического института, 2008.
 19. *Шмирко К. А.* Лидарное исследование динамики радиационно активных компонентов атмосферы. // Тезисы ФФПИО, 15-18 октября. — Владивосток.: 2007.
 20. *Шмирко К. А.* Структура аэрозольных слоев в переходной зоне материк-океан и их воздействие на состояние фитопланктонных сообществ // ПДММ-07, 13-16 июня. — 2007.
 21. *Kaufman Y. J., Tanre D., Leon J.-F., Pelon J.* Retrievals of profiles of fine and coarse aerosols using Lidar and radiometric space measurements // *IEEE transactions on geoscience and remote sensing.* — 2003. — Vol. 41, no. 8. — Pp. 1743–1754.
 22. *Petit J. R., Jouzel J., Raynaud D.* 420,000 years of climate and atmospheric history re-vealed by the Vostok deep Antarctic ice core. // *Nature.* — 1999. — Vol. 399. — Pp. 429–436.
 23. *Keeling C. D., Whorf T. P.* Atmospheric carbon dioxide record from Maunu Loa. — [Электронный ресурс]. unicorn.ps.uci.edu/151/handout/CO2atmos.pdf.
 24. *Keeling R. F., Piper S. C., Ballenbacher A .F., Walker J. S.* Atmospheric carbon dioxide record from the South Pole. — [Электронный ресурс]. <http://cdiac.ornl.gov/trends/co2/sio-spl.html>.
 25. *Allen M. R., Frame D. J., Huntingford C. et al.* Warming caused by cumula-

- tive carbon emission towards the trillionth tonne. // *Nature*. — 2009. — Vol. 458. — Pp. 1163–1166.
26. *Quaas J., Ming Y., Menon S. et al.* Aerosol indirect effects – general circulation model intercomparison and evaluation with satellite data // *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*. — 2009. — Vol. 9, no. 3. — Pp. 12731–12779. <http://www.atmos-chem-phys-discuss.net/9/12731/2009/>.
 27. *Зуев В. В., Ельников А. В., Бурлаков В. Д.* Лазерное зондирование средней атмосферы. — Томск: ООО Издательство “Раско”, 2002. — С. 280.
 28. *Artaxo P., erntsen T., Betts R. et al.* The Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Chapter 2.: Tech. rep.: Cambridge University Press, 2007.
 29. *Stull R. B.* An Introduction to Boundary Layer Meteorology. — Boston: Kluwer Academic Publishers, 1988. — P. 666.
 30. *Plant R. S., Atkinson B. W.* Sea-Breeze modification of the growth of a marine internal boundary layer. // *Boundary-Layer Meteorology*. — 2002. — Vol. 104. — Pp. 201–228.
 31. *Балин Ю. С., Ершов А. Д., Пеннер И. Э.* Лидарные корабельные исследования аэрозольных полей в атмосфере оз. Байкал. Часть 2. Поперечные разрезы. // *Оптика атмосферы и океана*. — 2003. — Т. 16, № 7. — С. 587–597.
 32. *Kovalev V. A., Newton J., Wold C., Hao Wei Min.* Simple Algorithm to determine the near-edge smoke boundaries with scanning lidar. // *Applied optics*. — 2005. — Vol. 44, no. 9. — Pp. 1761–1768.
 33. Air Research Laboratory. — [Internet Resource]. www.arl.noaa.gov.
 34. *Lemoine R.* Secondary maxima in ozone profiles. // *Atmos. Phys. Chem. Discuss.* — 2004. — no. 4. — Pp. 1791–1816.
 35. *Зуев В. В., Маричев В. Н., Хрянов П. А.* Особенности стратосферного распределения озона над Томском // *Оптика атмосферы и океана*. — 1999. — Т. 12, № 12. — С. 632–634.
 36. *Williams J., Reus M., Krejci R., Fischer H.* Application of the variability-size relationship to atmospheric aerosol studies: estimating aerosol lifetimes and ages, Atmos. // *Chem. Phys. Discuss.* — 2002. — Vol. 2, no. 1. — Pp. 43–74.
 37. *Rao D. V. Subba, Al-Yaman F., Rao C. V. Nageswara.* Eolian Dust Affects Phytoplankton in the Waters off Kuwait, the Arabian Gulf // *Naturwissenschaften*. — 1999. — Vol. 86, no. 11. — Pp. 525–529.
 38. *Coale K. H., Johnson K. S., Fitzwater S. E.* A massive phytoplankton bloom induced by an ecosystem-scale iron fertilization experiment in the equatorial Pacific Ocean. // *Nature*. — 1996. — Vol. 383, no. 6600. — Pp. 495–501.
 39. *Хржан А. Х.* Физика атмосферы. — Л.: «Гидрометеиздат», 1969. — С. 670.

Шмирко Константин Александрович

Методы лазерного зондирования в задачах изучения пространственно-временной изменчивости оптических и микрофизических параметров радиационно-активных компонентов атмосферы в переходной зоне материк-океан

Автореферат

Подписано к печати
Формат 60x84/16.

Усл. п. л. 1,0.
Тираж 100.

Уч. изд. л. 0,8
Заказ 49

Издано ИАПУ ДВО РАН. 690041, г. Владивосток, ул. Радио , 5.
Отпечатано группой оперативной полиграфии ИАПУ ДВО РАН.
690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5