

Отзыв

официального оппонента Лысенко Сергея Александровича
на диссертацию Малинки Алексея Викторовича
«Асимптотические и стереологические методы в теории светорассеяния и оптическом
дистанционном зондировании», представленную на соискание ученой степени доктора
физико-математических наук по специальности 01.04.05 – оптика

Соответствие содержания диссертации заявленной специальности и отрасли науки

Диссертационная работа А.В. Малинки посвящена исследованию процессов светорассеяния в природных средах и разработке методов восстановления характеристик этих сред из данных оптического дистанционного зондирования. Рассеяние света на сложных частицах рассматривается в рамках нескольких классических асимптотических приближений, включающих дифракцию Фраунгофера, приближения Рэлея – Ганса и Вентцеля – Крамерса – Бриллюэна для оптически мягких частиц и приближение геометрической оптики для крупных слабопоглощающих частиц. Полученные в диссертации асимптотические формулы позволяют рассчитывать характеристик рассеяния света частицами в тех случаях, когда строгое аналитическое решение получить невозможно, а численные методы требуют больших вычислительных затрат.

Полученные автором решения применяются для описания оптических свойств снега, морского льда и облаков – рассеивающих сред, оказывающих мощное влияние на радиационный баланс Земли. Автор предлагает новые методы восстановления характеристик этих сред из результатов дистанционного зондирования. Таким образом, рассматриваемая диссертация соответствует пунктам 1 (геометрическая оптика, интерференция и дифракция), 2 (оптика рассеивающих сред) и 5 (разработка основ новых технологий оптической регистрации и обработки изображений, передачи информации и электромагнитной энергии, диагностики биообъектов, природных и техногенных объектов и процессов) раздела III паспорта специальности 01.04.05 – оптика, отрасли «физико-математические науки».

Актуальность

Представленная диссертация затрагивает одну из ключевых и наиболее сложных проблем современной атмосферной оптики — описание светорассеивающих свойств природных сред, состоящих из несферических частиц. Это особенно актуально для понимания процессов радиационного переноса в снеге, морском льду и облаках – важнейших компонентах климатической системы Земли. Традиционные подходы, часто базирующиеся на моделях сферических частиц, имеют ограниченную применимость в этих средах. Поэтому разработка реалистичных моделей для таких сред, позволяющих решать как прямые, так и обратные задачи, имеет огромное значение для повышения достоверности данных дистанционного зондирования и климатического моделирования.

Степень новизны результатов, полученных в диссертации, и научных положений, выносимых на защиту

Автор развил теорию аналитических решений задач рассеяния света частицами сложных форм с применением метода стационарной фазы и стереологического подхода; разработал простые инженерные методы расчета оптических характеристик ансамблей несферических частиц в зависимости от их микроструктуры; разработал аналитические модели переноса излучения в природных многократно рассеивающих средах (лед, морская вода, облака и др.) и применил их для решения обратных задач дистанционного зондирования Земли, что позволило получить новые данные о динамике снежного и ледового покрова в районе Антарктиды, а также о влиянии аэрозолей на микрофизические свойства облаков. Предложенный в диссертации подход является

нетипичным для современной атмосферной оптики, где доминируют численные методы. Новыми результатами являются:

1. **Аппроксимационные формулы для индикатрисы рассеяния.** Автор исследовал асимптотику различных приближений (дифракции Фраунгофера, Рэлея – Ганса, Вентцеля – Крамерса – Бриллюэна) и на их основе вывел новые аппроксимационные формулы, описывающие индикатрису рассеяния ансамблем хаотически ориентированных частиц произвольной формы. Это позволяет значительно ускорить расчеты, сохраняя при этом высокую точность, что критично для оперативных моделей.
2. **Выражения для оптических характеристик частиц случайной формы в приближении геометрической оптики.** Автор получил новые формулы, связывающих сечение поглощения, индикатрису и матрицу рассеяния с распределением хорд частицы в приближении геометрической оптики, что открывает новые возможности для описания оптических свойств дисперсных сред.
3. **Оптическая модель снега и белого льда.** Рассмотрение снега и белого льда как случайной смеси льда и воздуха — новый реалистичный подход, впервые примененный автором для описания оптических свойств снега взамен традиционного подхода, при котором снег рассматривается как среда, состоящая из набора частиц заданной предопределенной формы.
4. **Оптическая модель снежинцы.** Моделирование оптических свойств талой воды на поверхности морского льда является чрезвычайно важным для изучения процессов поглощения солнечной радиации и динамики таяния арктического льда. Автор впервые применил приближение Вентцеля – Крамерса – Бриллюэна к описанию рассеяния на включениях солевого раствора в морском льду и показал, что транспортный показатель рассеяния морского льда является спектрально нейтральным. На основании этого факта автор предложил новую, малопараметрическую, модель отражательных свойства снежинцы.
5. **Алгоритм восстановления характеристик снежного покрова Антарктиды.** Разработанная автором модель снега, основанная на новых аналитических решениях, позволила автору разработать новый алгоритм определения эффективного размера снежных зёрен по спутниковым измерениям яркости. Кроме того, тот факт, что на сегодняшний день в снежном покрове Антарктиды практически отсутствует загрязнение, позволил заложить в алгоритм оценку нового параметра – доли непокрытых снегом скал.
6. **Алгоритм восстановления доли снежинок на арктическом летнем льду.** Новый комплексный метод, позволяющий одновременно оценивать характеристики морского льда (оптическая толщина, средняя хорда, загрязнение) и параметры снежинок, является крайне ценным для изучения климатических изменений в Арктике. Новизна алгоритма состоит в прямом использовании разработанных автором моделей снежинцы и белого льда.
7. **Метод восстановления размера рассеивающих частиц в облаках и океане.** Предложение использовать рамановские лидары и лидары высокого спектрального разрешения с множественным полем зрения для определения размера частиц посредством учета многократного рассеяния частицами в обратном сигнале молекулярного рассеяния — это инновационный подход, предложенный соискателем с соавторами в его кандидатской диссертации. В настоящей работе автор использует полученные им новые выражения для индикатрисы рассеяния в алгоритмах инверсии лидарных сигналов и применяет их к обработке данных реальных лидарных измерений.

Обоснованность и достоверность выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Обоснованность и достоверность подтверждается верификацией полученных теоретически выводов по данным нескольких лабораторных и полевых экспериментов.

Оптическая модель снега верифицировалась по данным лабораторного эксперимента, в котором измерялось спектральное альbedo образцов снега и одновременно исследовалась их микроструктура с помощью компьютерной томографии. Предсказанные по разработанной модели значения средней хорды ледяной фазы в образцах, восстановленные из спектров альbedo, идеально попали в доверительный интервал значений, измеренных с помощью томографии.

Оптическая модель снежицы верифицировалась по данным нескольких полевых экспериментов, проведенных в арктических экспедициях. Результаты сравнения показали, что модель с высокой точностью описывает спектры альbedo различных типов снежиц и позволяют оценить глубину снежицы и толщину нижележащего льда.

Модель формирования лидарного сигнала в условиях многократного рассеяния, которая лежит в основе метода восстановления размера рассеивающих частиц, была верифицирована по данным численного (расчеты методом Монте-Карло) и натурного экспериментов. В процессе натурного эксперимента с борта корабля проводились одновременные измерения оптических свойств воды лидаром и погружаемыми приборами. Лидарные сигналы затем рассчитывались с помощью используемой модели по данным погружаемых приборов и сравнивались с реальными сигналами, измеренными лидаром. Коэффициенты детерминации для сигналов, рассчитанных с помощью модели, и сигналов полученных в численном и натурном экспериментах, составил 0,998 и 0,95 соответственно, что говорит о высокой степени надежности и достоверности модели.

Научная, практическая, экономическая и социальная значимость результатов диссертации

Аппроксимационные формулы для индикатрисы рассеяния позволяют значительно ускорить расчеты переноса излучения, сохраняя при этом высокую точность, что критично для оперативных моделей.

Выражения для оптических характеристик частиц случайной формы через их распределение хорд позволяют перейти от сложной морфологии частиц к более простым статистическим характеристикам ансамбля в целом, что значительно упрощает моделирование их светорассеивающих свойств.

Высокая практическая значимость теоретических разработок автора подтверждается их применением для количественной интерпретации данных современных спутниковых приборов и восстановления по ним физических параметров природных сред.

Разработанные оптические модели снега, белого льда и снежицы обладают высокой прикладной ценностью — они обеспечивают возможность быстрого и точного расчета спектрального альbedo и коэффициентов яркости, что критично для обработки спутниковых данных, и существенно повышают физическое понимание результатов дистанционного мониторинга полярных регионов. Учет загрязнителей (сажи, органики) особенно важен для оценки воздействия антропогенной деятельности на климат.

Особую ценность представляют методы восстановления характеристик снежного покрова Антарктиды и арктического морского льда на основе данных спутниковых радиометров MODIS и OLCI. Эти методы дают возможность отслеживать изменения в полярных регионах, которые являются ключевыми индикаторами глобального изменения климата.

Метод восстановления размера рассеивающих частиц по данным рамановских лидаров и лидаров высокого спектрального разрешения с множественным полем зрения расширяет возможности лидарного зондирования и может существенно улучшить оценку микрофизических

параметров облаков, которые являются основным источником неопределенности в климатических моделях.

Диссертация вносит значимый вклад в понимание взаимосвязи между микроструктурой природных сред, их оптическими свойствами и глобальными климатическими процессами. Полученные результаты имеют большое значение для климатического моделирования и мониторинга, а также для разработки новых инструментов дистанционного зондирования с целью изучения динамики полярных и атмосферных систем. Предложенные методы могут быть применены при анализе сезонной и межгодовой динамики снежного и ледяного покровов полярных регионов, в изучении последствий глобального потепления, для уточнения параметров взаимодействия аэрозолей с облаками — одного из наименее изученных климатообразующих факторов.

Опубликованность результатов диссертации в научной печати

Результаты диссертации и положения, выносимые на защиту, опубликованы до начала предварительной экспертизы и представлены в 96 работах (6 глав в монографиях, 64 статьи, 26 тезисов). Из них 29 статей опубликованы в зарубежных журналах, входящих в наукометрические базы Scopus и Web of Science. 33 статьи соответствуют п. 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий.

Соответствие оформления диссертации требованиям ВАК

Оформление диссертации (разбиение по главам, представление рисунков и таблиц, список использованных источников и собственных работ автора) выполнено в соответствии с требованиями ВАК. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Замечания по диссертации

По диссертации имеется несколько замечаний, уточняющего характера:

1) Из текста диссертации неясно, как соотносятся разработанные методы расчета характеристик рассеяния света частицами с известными методами, в частности, для приближения дифракции Фраунгофера, на котором основан широко применяемый на практике метод лазерного дифракционного анализа распределения частиц по размеру.

2) В алгоритме MPD по спутниковым данным восстанавливается целый комплекс параметров (доля и глубина снежиц, размер зерен и толщина белого льда, а также степень его загрязнения морской органикой). Однако соответствующая обратная задача является математически некорректной, что на практике проявляется в неустойчивости решения к ошибкам измерений и неоднозначности решения. Кроме того, геометрические толщины слоев среды невозможно восстановить из спектра ее отражения без априорной информации о показателе ослабления. В этой связи в диссертации стоило бы оценить точность и саму возможность определения заявленного комплекса параметров среды по данным ее оптического дистанционного.

3) В выражения для лидарного сигнала комбинационного рассеяния, очевидно, должна входить концентрация рассеивающего вещества (при атмосферных исследованиях это, как правило, кислород или озон). Однако, в формулах 6.1 и 6.10 перед экспонентой стоит только мощность лазерного излучения, что не согласуется с физикой процесса и требует пояснения.

Соответствие научной квалификации соискателя ученой степени, на которую он претендует

Содержание диссертационной работы отражает личный вклад автора в опубликованные научные материалы. Научная квалификация автора диссертации соответствует квалификации

соискателя искомой ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.05 – оптика.

Заклучение

Работа соответствует высоким научным стандартам, полученные результаты имеют мировую новизну, о чем свидетельствует высокий уровень научных журналов, в которых они опубликованы, и большой практический потенциал для создания новых методов дистанционного зондирования Земли и получения новых данных о радиационных процессах в атмосфере.

Работа полностью соответствует требованиям, установленным главой 3 «Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий».

Автор диссертационной работы Малинка Алексей Викторович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.05 – оптика за:

- 1) развитие теории рассеяния света частицами сложных форм с применением метода стационарной фазы и стереологического подхода, позволивших получить аналитические выражения для индикатрисы рассеяния в асимптотических приближениях дифракции Фраунгофера, Рэлея – Ганса и Вентцеля – Крамерса – Бриллюэна;
- 2) высокоточные аналитические методы расчета оптических характеристик ансамблей не-сферических частиц в зависимости от их микроструктуры в приближении геометрической оптики;
- 3) модели зависимостей лидарного сигнала комбинационного рассеяния, альбедо и спектрального коэффициента яркости природных сред (многослойного облака, морской воды, снежного и ледового покрова и др.) от их оптических и микрофизических параметров, что стало основой создания новых методов дистанционного зондирования Земли и позволило получить новые данные о динамике снежного и ледового покрова в районе Антарктиды, а также количественно оценить влияние аэрозолей на микрофизические свойства облаков.

Директор Института природопользования
НАН Беларуси, доктор физ.-мат. наук,
профессор



С. А. Лысенко

Я, Лысенко Сергей Александрович, даю согласие на публикацию данного отзыва в открытом доступе на официальном сайте Института физики НАН Беларуси в сети Интернет.

«01». 09. 2025

С. А. Лысенко

Подпись(ми) <u>С.А. Лысенко</u>
УДОСТОВЕРЯЮ
Ученый секретарь ГНУ Института природопользования НАН Беларуси <u>Кеелер Т.А. Кеелер</u>
«01» 09 2025г.