

ОТЗЫВ

официального оппонента
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

1. Соответствие содержания диссертации заявленной специальности и отрасли науки

Диссертация А. В. Малинки «Асимптотические и стереологические методы в теории светорассеяния и оптическом дистанционном зондировании» посвящена разработке оптических моделей природных сред, играющих существенную роль в радиационном балансе Земли (снег, морской лёд, облака), и использованию предложенных моделей при обработке данных оптического дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Отличительной особенностью светорассеивающих частиц указанных природных сред, является их несферичность. Для таких частиц не существует строгих решений задачи рассеяния электромагнитных волн, поэтому автор применяет асимптотические приближения, включающие в себя дифракцию Фраунгофера и геометрическую оптику. На основе полученных решений строятся алгоритмы обработки спектральных спутниковых изображений.

Тематика диссертации 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».

2. Актуальность темы диссертации

В условиях стремительно роста объема данных спутниковых наблюдений (Landsat, Sentinel, ICESat, Канопус и др.) задача корректного извлечения информации о характеристиках природных сред из спектральных спутниковых снимков становится всё более важной. Ключевая проблема при обработке спутниковых данных — это адекватное описание взаимодействия электромагнитного излучения с реальными, часто несферическими рассеивающими частицами в атмосфере и на поверхности Земли. Стандартные модели, основанные на сферических частицах, часто приводят к значительным ошибкам в интерпретации данных, особенно для таких сред, как снег и морской лёд, которые играют фундаментальную роль в энергетическом балансе планеты и являются индикаторами климатических изменений. Разработка реалистичных, быстрых и точных моделей взаимодействия света с природными средами для последующего использования в алгоритмах обработки данных ДЗЗ отвечает актуальным потребностям в данной научной области.

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

Наиболее важным результатом работы с точки зрения новизны является разработка конкретных оптических моделей природных сред и получение новых аналитических выражений для их оптических характеристик, непосредственно применимых для решения обратных задач ДДЗ.

Аппроксимационные формулы для индикатрисы рассеяния, полученные для произвольной формы частиц в различных приближениях (Фраунгофера, Рэлея – Ганса, Вентцеля – Крамерса – Бриллюэна) — это не только новый теоретический результат, но и практический инструмент. Эти формулы позволяют существенно ускорить расчеты характеристик рассеяния и создавать оперативные алгоритмы обработки больших объемов данных ДЗЗ.

Вывод формул, связывающих сечение поглощения и индикатрису рассеяния среды с распределением хорд материалов, образующих среду, открывает новые пути для описания сложных сред. Это дает возможность разрабатывать более устойчивые алгоритмы решения обратных задач, которые менее чувствительны к деталям формы частиц, но учитывают их существенные микрофизические статистические характеристики, такие как средняя хорда.

Оптическая модель снега, разработанная автором, основана на статистическом рассмотрении снега как случайной среды, состоящей из смеси льда и воздуха. Такое рассмотрение существенно отлично от традиционного подхода, при котором снег рассматривается как светорассеивающая среда, состоящая из отдельных частиц преопределенной формы.

Оптическая модель снежицы (талой воды на поверхности морского льда), разработанная автором, основана на исследовании светорассеивающих свойств морского льда. Применяя полученное в работе решение для индикатрисы рассеяния к описанию рассеяния на включениях солевого раствора во льду, автор демонстрирует, что транспортный показатель рассеяния морского льда является спектрально независимой величиной и знания его значения, совместно с толщиной льда и глубиной снежицы, достаточно для расчета ее отражательных свойств. Таким образом автор сводит модель, определяющую отражательные свойства снежицы всего к одной оптической характеристике - транспортному показателю рассеяния.

Взяв за основу оптические модели снега и снежицы, автор предлагает новые методы восстановления характеристик снежного покрова Антарктиды и ледяного покрова Арктики. Тот факт, что в основе методов лежат расчеты, основанные непосредственно на физических моделях, отличает их от общепринятых алгоритмов обработки данных ДДЗ, использующих интерполяционные таблицы, и обеспечивает более обоснованную физическую интерпретацию. Кроме того, расчеты, основанные на физических моделях, учитывают угловую зависимость отражения подстилающей поверхностью, что также отличает разработанные методы от большого числа распространенных алгоритмов.

Метод восстановления характеристик снежного покрова Антарктиды был применен к обработке спутниковых снимков побережья Земли Эндерби (район

Белорусской антарктической станции) спектральным радиометром MODIS за двадцать лет. Анализ снимков привел к обнаружению эффекта уменьшения снежных зёрен (на $3,5 \pm 1,5$ мкм/год) в этом районе за последние два десятилетия. Это является новым результатом в климатологических исследованиях полярных регионов.

Метод восстановления размера рассеивающих частиц в облаках и океане по данным зондирования многоапертурными лидарами, измеряющими сигнал молекулярного рассеяния, использует вклад рассеяния «вперёд» взвешенными частицами в сигнал рассеяния «назад» молекулами среды. Подобные лидарные системы – рамановские лидары и лидары высокого спектрального разрешения с множественным полем зрения – появились только в последние десятилетия в лейпцигском Институте тропосферных исследований (Германия) и Чжэцзянском университете (Китай). Предложенный автором метод позволяет преодолеть ограничения традиционных моделей однократного рассеяния и поставить задачу об определении размера частиц в облаках и аэрозолях, что имеет прямое отношение к изучению аэрозоль-облачных взаимодействий и их роли в климате.

4. Обоснованность и достоверность выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Достоверность выводов определяется корректностью применения математического аппарата и обоснованностью физических приближений. Кроме того, разработанные модели и методы надежно верифицированы.

Модели снега и снежицы верифицированы по данным лабораторных и полевых измерений спектров отражения.

Модель формирования лидарного сигнала в условиях многократного рассеяния верифицирована по данным измерений океанического лидара с одновременным измерением свойств морской воды погружаемыми приборами.

Метод определения доли талой воды на морском льду был верифицирован по спутниковым данным высокого спектрального разрешения (Sentinel-2) и показал коэффициент детерминации восстановленной доли снежиц $R^2 = 0.89$, в то время как распространенные алгоритмы обеспечивают R^2 на уровне, не превышающем 0.4.

5. Научная, практическая, экономическая и социальная значимость результатов диссертации

Созданные автором оптические модели природных сред позволяют уйти от традиционных и упрощенных представлений о морфологии рассеивателей. Полученные автором формулы дают возможность связать измеряемые оптические свойства с реальной геометрической структурой сред через такие параметры, как средний периметр или средняя хорда рассеивателя. Это позволяет получать физически обоснованные модельные оценки, а не просто эффективные параметры, которые могут быть плохо связаны с фактической микрофизикой. Это существенно для повышения точности алгоритмов инверсии данных дистанционного зондирования.

Разработка методов восстановления характеристик геофизических сред по спутниковым данным на основе предложенных моделей и полученных формул является прямым доказательством прикладной значимости результатов диссертации.

Разработка моделей, позволяющих рассчитывать спектральное альбедо и коэффициент яркости по нескольким физическим параметрам, таким как средняя хорда ледяной фазы, доля талой воды или концентрация загрязнителя, является необходимостью спутникового мониторинга полярных регионов. Это позволит более точно оценивать радиационный баланс снежного и ледяного покровов Арктики и Антарктики, что является ключевым показателем их таяния и, как следствие, изменения глобального климата.

Восстановление размера рассеивающих частиц в облаках имеет прямое отношение к изучению аэрозоль-облачного взаимодействия и его роли для климата.

6. Опубликованность результатов диссертации в научной печати

Результаты, изложенные в диссертации, опубликованы в высокорейтинговых научных изданиях, таких как *Optics Letters*, *Applied Optics*, *JOSA*, *Remote Sensing of Environment*, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, *Light: Science & Applications*, *Annals of Glaciology*, *The Cryosphere*, *Journal of Geophysical Research*, *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer* и других. Результаты опубликованы в 6 главах монографий, 51 рецензируемой статье, 33 из которых соответствуют п. 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь.

7. Соответствие оформления диссертации требованиям ВАК

Диссертация А.В. Малинки состоит из разделов «Содержание», «Термины и определения», «Перечень сокращений и обозначений», «Введение», «Общая характеристика работы», основной части из шести глав, заключения, списка использованных источников. Основная часть состоит из шести глав. Первая глава содержит литературный обзор. Вторая посвящена использованию метода стационарной фазы в решении задач светорассеяния. Третья — стереологическому подходу к задачам светорассеяния. В четвертой главе полученные решения применяются для описания оптических свойств снега и морского льда. Пятая и шестая главы посвящены методам дистанционного зондирования. В приложении даны копии справки и акта об использовании результатов исследования. Диссертация хорошо структурирована и написана четким научным языком.

8. Замечания по диссертации

По результатам рассмотрения работы можно сделать замечания, которые не влияют на общую положительную оценку диссертации.

1. На приведенных сравнениях полученных теоретических оценок с экспериментальными данными (как на графиках, так и в тексте) в большинстве случаев отсутствует информация о погрешностях (неопределенностях) используемых экспериментальных данных, которые получены в результате наземных измерений или обработки спутниковых данных. Также, за небольшим исключением, нет и неопределенностей собственных теоретических оценок.
2. На стр. 154 приводится относительная ошибка формулы (5.1) для коэффициента яркости на верхней границе атмосферы (7-8% в худшем случае), но в работе не приводится точность результата самой атмосферной коррекции, а именно, восстановления коэффициентов яркости или альбедо на нижней границе атмосферы, тем более, что в алгоритмах атмосферной коррекции спутниковых данных по полярным регионам используются априорные данные о характеристиках атмосферы.
3. При исследовании чувствительности процедуры атмосферной коррекции к используемой модели атмосферы и аэрозольной оптической толщине на основании численного эксперимента утверждается (стр. 178), что восстанавливаемое альбедо поверхности и доля в пикселе одной из двух поверхностей практически не чувствительны к модели атмосферы и аэрозольной оптической толщине, при этом ничего не говорится о физических причинах такого результата.

9. Соответствие научной квалификации соискателя ученой степени, на которую он претендует

А. В. Малинка является признанным специалистом в теории светорассеяния и оптического дистанционного зондирования. Он принимал участие в ряде международных конференций и семинаров (более 60 докладов). Согласно базе данных Google Scholar Малинка А.В. на 2025 год имеет высокий индекс Хирша 18 и более 1200 ссылок на свои работы. Научная квалификация соискателя соответствует ученой степени доктора физико-математических наук, а его специальность – специальности 01.04.05 – оптика.

10. Выводы

Считаю, что данная диссертация заслуживает высокой оценки, в том числе за фундаментальные исследования в теории светорассеяния, результаты которых были напрямую применены к решению актуальных задач дистанционного зондирования Земли. Полученные модели и методы обладают высоким потенциалом для интеграции в существующие и будущие алгоритмы обработки спутниковых данных, что существенно повысит возможности мониторинга и прогнозов изменения в определяющих климат регионах. Работа соответствует требованиям главы 3 «Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий», является значимым вкладом в развитие теории и методов ДЗЗ, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук за новые результаты в теории светорассеяния и оптическом дистанционном зондировании, включающие:

- аналитические выражения для характеристик рассеяния света частицами произвольной формы через их микрофизические характеристики в условиях различного фазового сдвига;
- оптические модели естественных сред, состоящих из частиц нерегулярной формы: снега и морского льда, в том числе, покрытого талой водой;
- методы восстановления характеристик природных сред, играющих существенную роль в радиационном балансе Земли (снег, морской лёд, облака), по данным оптического дистанционного зондирования.

Даю свое согласие на публикацию данного отзыва в открытом доступе на официальном сайте Института физики НАН Беларуси в сети Интернет.

Доктор физ.-мат. наук, профессор,
заведующий Лабораторией
дистанционной фотометрии
НИИПФП им. А. Н. Севченко БГУ



Л. В. Катковский

15.09.2025 г.



С Латковским удостоверяю
Зачальник ОК Лат 15.09.25