

Государственное научное учреждение
«ИНСТИТУТ ФИЗИКИ имени Б.И. СТЕПАНОВА
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»

Объект авторского права

УДК 535.36; 528.8

Малинка Алексей Викторович

Асимптотические и стереологические методы в теории
светорассеяния и оптическом дистанционном зондировании

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук
по специальности 01.04.05 – оптика

Минск 2025

Работа выполнена в Государственном научном учреждении
«ИНСТИТУТ ФИЗИКИ имени Б.И. СТЕПАНОВА
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»

Официальные оппоненты:

Курочкин Юрий Андреевич,
доктор физ.-мат. наук, профессор,
заведующий центром «Фундаментальные
взаимодействия и астрофизика»
ИНСТИТУТА ФИЗИКИ НАН Беларуси

Катковский Леонид Владимирович,
доктор физ.-мат. наук, профессор,
заведующий Лабораторией дистанционной
фотометрии
НИИПФП им. А. Н. Севченко БГУ

Лысенко Сергей Александрович,
доктор физ.-мат. наук, профессор,
директор Института природопользования
НАН Беларуси

Оппонирующая организация: Белорусский государственный университет

Защита состоится 23.09.2025 г. в 14-30 на заседании совета по защите
диссертаций Д 01.05.01 при ИНСТИТУТЕ ФИЗИКИ НАН Беларуси по адресу:
220072, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости 68-2;
тел. ученого секретаря: 270-87-98, e-mail: m.parkhots@ifanbel.bas-net.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИНСТИТУТА ФИЗИКИ
НАН Беларуси.

Автореферат разослан: 01.08.2025 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций,
кандидат физ.-мат. наук



М. В. Пархоц

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы всё больше растет внимание общественности к проблемам глобального изменения климата и воздействия человека на окружающую среду, о чем свидетельствует, в частности, Нобелевская премия по физике, врученная в 2021 г. за «физическое моделирование климата Земли, количественную оценку изменчивости и надежное предсказание глобального потепления». Данные о повышении глобальных температур накапливаются, что подчеркивается в отчетах Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPPC). Наиболее заметны эти изменения в арктическом регионе, где уже произошло повышение температуры на несколько градусов, а также уменьшение летнего минимума ледяной шапки почти в два раза, по сравнению с серединой 20-го века. Антарктический континент является еще более весомым с точки зрения влияния на климат Земли, поскольку содержит более 90% глобальных запасов льда. При этом снежный и ледяной покровы являются системой с сильной обратной связью: возрастание температуры ускоряет таяние, что увеличивает поглощение солнечного света обнажившейся почвой или водной поверхностью, что приводит к дальнейшему ускорению таяния. Эта обратная связь может быть существенно усилена наличием загрязнения вследствие осаждения атмосферных аэрозолей, особенно сажи, которая является, в основном, результатом промышленных выбросов. Помимо этого, аэрозольные частицы, порождённые индустриальной деятельностью, влияют на процесс формирования облаков (аэрозоль-облачное взаимодействие), являясь центрами конденсации водяного пара и увеличивая таким образом долю солнечного излучения, отраженного в космос. Величина охлаждающего эффекта от аэрозоль-облачного взаимодействия по сравнению с нагревающим эффектом от таяния снега до сих пор является вопросом дискуссии. В связи с этим особую важность приобретает постоянный мониторинг состояния окружающей среды, в частности, полярных шапок и облаков. В Антарктиде мониторинг состояния окружающей среды осуществляется в соответствии с положениями Системы Договора об Антарктике. Беларусь присоединилась к Договору 19 июня 2006 г., и с тех пор белорусские ученые выполняют комплексные исследования окружающей среды в Антарктике.

Важнейшей составляющей мониторинга окружающей среды является оптическое дистанционное зондирование. На сегодняшний день существует множество оптических систем, активных и пассивных, космических и наземных, задействованных в дистанционном зондировании окружающей среды. Это лидарные сети (EARLINET, CIS-LiNet, AD-Net), космический лидар CALIOP, наземные сети солнечных фотометров (AERONET, SKYNET) и множество спутниковых спектрорадиометров (MODIS, OLCI, VIIRS, POLDER, SGLI и др.). Однако, при всей масштабности мониторинга и наличии огромных объёмов данных, методы их обработки далеки от совершенства с точки зрения теории светорассеяния.

Например, при зондировании снежного и ледяного покровов в большинстве случаев используется решение Ми для сферических частиц, в то время как форма и снежных зёрен, и включений солевого раствора в морском льду далека от сферической и является в большей степени случайной. При такой обработке индикатриса рассеяния Ми, как правило, искусственно заменяется функцией Хеньи – Гринштейна, чтобы избежать угловых особенностей рассеяния на сфере, таких как радуга. С точки зрения методологии такой подход вряд ли можно признать удовлетворительным.

Существуют строгие подходы к задаче рассеяния света несферическими частицами, основанные на численном решении уравнений Максвелла, такие как метод Т-матрицы, метод дискретных диполей, метод конечных временных разностей. Широкое распространение получил метод Монте-Карло в рамках приближения геометрической оптики. Главным недостатком вышеперечисленных методов является их ресурсоёмкость, которая не позволяет применить их для обработки реальных массивов данных дистанционного зондирования. Причина этого в том, что в таком классическом подходе рассматривается каждая отдельная частица случайной формы, а затем проводится усреднение по ансамблю частиц. При этом время расчёта характеристик отдельной частицы с увеличением её размера растёт нелинейно (например, в методе дискретных диполей число диполей, необходимое для получения приемлемой точности, пропорционально объёму частицы). А поскольку размеры рассеивающих частиц в атмосфере, криосфере и океане, как правило, значительно превышают длину волны видимого света, о применении строгих методов для обработки тех огромных массивов данных, которые получают каждый день системами дистанционного зондирования, не может быть и речи. Как следствие, возникает необходимость в упрощении подходов и получении «быстрых», предпочтительно аналитических, решений.

Несферические рассеивающие частицы, встречающиеся в природе, как правило, имеют случайную форму. Поэтому представляется разумным не проводить расчёт светорассеивающих характеристик частицы для каждой случайной реализации формы, а искать решение сразу для ансамбля частиц, усреднённое по реализациям их формы.

Настоящая работа посвящена разработке теоретических аспектов рассеяния света с точки зрения статистики ансамбля частиц случайной формы, получению аналитических и полуаналитических решений, а также их использованию в методах зондирования и обработке данных.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Тема диссертационного исследования была включена в научные планы работы Института физики и соответствует приоритетному направлению научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 годы «Цифровые информационно-коммуникационные и междисциплинарные технологии, основанные на них производства: Аэрокосмические и геоинформационные технологии».

В процессе работы над диссертационными исследованиями соискатель принимал участие в международных проектах, национальных программах и программах Союзного Государства:

- «Сигналы многократного рассеяния в наземных и космических лидарах от произвольно ориентированных частиц с учетом поляризации и широкого поля зрения» — проект INTAS No. 05-1000008-8024 (2007–2008);

- «Развитие моделирования и инструментов для долговременного изучения природы Арктики» (шифр — DAMOCLES): Grant ID 18509 подпрограммы FP6-SUSTDEV 6-й Рамочной Программы Европейского Союза (2006–2009, № ГР 20072488);

- «Обеспечение информации о характеристиках морского льда в Арктике и Антарктике для заинтересованных потребителей» (шифр — SIDARUS): Grant ID 262922 подпрограммы FP7-SPACE 7-й Рамочной Программы Европейского Союза (2011–2013, № ГР 20110764);

- задание «Разработка методов и системы комплексного дистанционного зондирования атмосферы и подстилающей поверхности, включающей наземные и космические средства наблюдения, и создание устройств с электроуправляемыми оптическими характеристиками для их применения в системах оптического зондирования с целью мониторинга окружающей среды в регионах повышенного экологического риска и исследования полярных областей» ГПНИ «Электроника и фотоника» (2011–2015, № ГР 20110809);

- задание «Развитие оптических технологий дистанционного контроля параметров атмосферы и земной поверхности посредством комплексного наземного и спутникового оптического зондирования, совершенствование систем видения в атмосфере» ГПНИ «Фотоника, опто- и микроэлектроника» (2016–2020, № ГР 20160093);

- задание «Разработка и экспериментальная реализация методов дистанционного зондирования земной поверхности, аэрозольной и газовых составляющих тропосферы и стратосферы спектрометрическими и лидарными системами наземного и спутникового базирования» ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций» (2021–2025, № ГР 20210697);

– задание «Разработать систему приборного, математического и программного обеспечения дистанционного спутникового и наземного мониторинга состояния снежного покрова, атмосферного аэрозоля и облаков в Антарктиде и методов внешней калибровки спутниковых оптических инструментов» (2008–2010, № ГР 20082663) ГЦП «Мониторинг полярных районов Земли и обеспечение деятельности арктических и антарктических экспедиций на 2007 – 2010 гг. и на период до 2015 г.»;

– задание «Осуществить комплексный наземный и спутниковый мониторинг тропосферного аэрозоля, облаков и подстилающей поверхности в Антарктиде, разработать дополнительные каналы зондирования тропосферного озона и стратосферных полярных облаков и создать приборное, методическое и программное обеспечение для калибровки спутниковых оптических инструментов на полигоне в Антарктиде» ГП «Мониторинг полярных районов Земли и обеспечение деятельности арктических и антарктических экспедиций на 2011–2015 годы» (2012–2015, №ГР 20122653);

– задание «Осуществление систематического комплексного наземного и спутникового мониторинга атмосферы и подстилающей поверхности в Антарктиде, радиационной калибровки спектральной аппаратуры белорусского и российского спутников (БКА и космического аппарата «Канопус-В») по снежному полигону в Антарктиде, разработка оптической модели атмосферного аэрозоля и подстилающей поверхности в районе г. Вечерняя» подпрограммы 3 «Мониторинг полярных районов Земли, создание белорусской антарктической станции и обеспечение деятельности полярных экспедиций» ГП «Наукоемкие технологии и техника» (2016–2020, № ГР 20163320);

– задание «Провести исследования пространственно-временных изменений и трендов характеристик атмосферного аэрозоля, снежного и ледяного покрова, водной поверхности в регионе станции “Гора Вечерняя” по данным измерений наземными и спутниковыми оптическими системами» подпрограммы 2 «Развитие деятельности белорусской антарктической станции» ГП «Научно-инновационная деятельность Национальной академии наук Беларуси» (2021-2025, № ГР 20213812);

– задание «Разработка методического и программного обеспечения для оценки аэрозольных загрязнений атмосферы на территории Беларуси по данным оптического спутникового зондирования» ГПОФИ «Природопользование» (2006–2008, № ГР 20063815);

– проекты БРФФИ Ф07МС-026 «Зондирование теплых облаков с помощью многоапертурного рамановского лидара» (2007–2009, № ГР 20072149) и Ф22ТЮБ-001 «Сравнительный анализ характеристик атмосферы и снежной поверхности в Восточной (Земля Эндерби) и Западной (море Росса,

Антарктический полуостров) Антарктике по результатам наземного и спутникового зондирования» (руководитель, 2022–2024, № ГР 20220891);

– задание «Создание методик и программного обеспечения атмосферной коррекции спутниковых данных для наблюдения поверхности Земли в ультрафиолетовом, видимом и инфракрасном диапазонах спектра» Программы Союзного Государства «Космос-СГ» (2004–2007, № ГР 20044179);

– задания «Разработать методы и программное обеспечение для полетной калибровки спектральной съемочной спутниковой аппаратуры» и «Разработать программное обеспечение для оперативной совместной обработки данных гиперспектрометров и многозональных съемочных систем высокого пространственного разрешения с целью восстановления оптических характеристик аэрозольной атмосферы и поверхности Земли» Программы Союзного Государства «Космос-НТ» (2008–2011, №№ ГР 20083388 и 20083389);

– задание «Разработать метод и экспериментальное программное обеспечение для атмосферной коррекции данных многозональных съёмочных систем высокого пространственного разрешения» Программы Союзного Государства «Мониторинг-СГ» (2013–2017, № ГР 20140312).

Цель, задачи, объект и предмет исследования

Цель исследования — разработать реалистичные модели природных сред, играющих существенную роль в радиационном балансе Земли (снег, морской лёд, облака), которые смогут обеспечить быстрый расчёт их оптических свойств, и использовать предложенные модели при обработке данных оптического дистанционного зондирования.

Задачи исследования:

– получить аналитические выражения для характеристик светорассеяния крупными частицами произвольной формы, используя метод стационарной фазы и стереологический подход;

– применить полученные решения к описанию оптических свойств снега, морского льда, облаков;

– провести сопоставление разработанных моделей с данными полевых и лабораторных измерений;

– на основе предложенных моделей разработать методы и алгоритмы восстановления характеристик снега и морского льда по спутниковым измерениям яркости;

– используя полученные аналитические решения, разработать метод восстановления размера рассеивающих частиц в облаках и океане по данным лидарного зондирования.

Объект исследования — светорассеивающие частицы произвольной формы и природные среды, состоящие из таких частиц: снег, морской лёд, облака, полярные шапки Земли.

Предмет исследования — оптические характеристики светорассеивающих частиц (эффективность поглощения, индикатриса и матрица рассеяния) и природных сред (спектральное альбедо, коэффициент яркости) и методы их расчета (прямая и обратная задачи).

Научная новизна

С помощью метода стационарной фазы впервые исследована асимптотическая угловая зависимость дифракции Фраунгофера и рассеяния Вентцеля – Крамерса – Бриллюэна на ансамблях хаотически ориентированных частиц произвольной формы. На основе полученных асимптотик предложены новые аналитические выражения, аппроксимирующие угловую зависимость интенсивности рассеяния в условиях различного фазового сдвига.

С помощью стереологического подхода впервые получены выражения для характеристик рассеяния света (сечения поглощения, индикатрисы и матрицы рассеяния) ансамблем частиц случайной формы в рамках приближения геометрической оптики.

На основе полученных решений разработаны новые модели снега и морского льда, связывающие их оптические и микрофизические характеристики. Снег впервые рассмотрен как светорассеивающая среда, представляющая собой случайную смесь льда и воздуха. К описанию рассеяния света в морском льду впервые применено приближение Вентцеля – Крамерса – Бриллюэна и асимптотические выражения, полученные соискателем с помощью метода стационарной фазы.

Разработанные модели положены в основу новых методов и алгоритмов восстановления характеристик снежного и ледяного покровов по данным оптического спутникового зондирования.

Аппроксимационная формула для угловой зависимости дифракции Фраунгофера положена в основу нового метода восстановления размера рассеивающих частиц в облаках и океане по данным лидарного зондирования.

Положения, выносимые на защиту

1. Аппроксимационные формулы, основанные на асимптотике дифракции Фраунгофера, приближения Рэлея – Ганса и приближения Вентцеля – Крамерса – Бриллюэна, позволяют описать угловую зависимость рассеяния ансамблем крупных хаотически ориентированных частиц произвольной формы в условиях различного фазового сдвига.

2. Стереологический подход к задаче светорассеяния в приближении геометрической оптики позволяет выразить сечение поглощения, индикатрису и матрицу рассеяния на ансамбле крупных оптически жёстких частиц случайной формы через распределение хорд частиц.

3. Оптическая модель снега и белого льда, рассматривающая снег и белый лед как случайную смесь льда и воздуха и использующая приближение геометрической оптики, позволяет рассчитывать спектральное альbedo и коэффициент яркости снега и белого льда по трем независимым характеристикам: средней хорде ледяной фазы, оптической толщине слоя и концентрации загрязнителя (сажи, в случае снега, или органического вещества из морской воды, в случае белого льда).

4. Оптическая модель снежицы, рассматривающая снежицу как слой талой воды на поверхности морского льда и использующая асимптотические формулы приближения Вентцеля – Крамерса – Бриллюэна для описания рассеяния на включениях солевого раствора во льду, позволяет рассчитывать спектральное альbedo и коэффициент яркости снежицы по трем независимым параметрам: её глубине, транспортному показателю рассеяния льда и его толщине.

5. Метод восстановления характеристик снежного покрова Антарктиды, использующий разработанную оптическую модель снега и предположение об отсутствии загрязнения, позволяет определять эффективный размер снежных зёрен и долю не покрытых снегом скал по данным спутниковых измерений спектральной яркости.

6. Метод восстановления характеристик арктического летнего льда, использующий разработанные модели субпиксельных составляющих поверхности льда, позволяет по данным спутниковых измерений спектральной яркости определять долю снежиц с одновременной оценкой характеристик морского льда (оптической толщины, средней хорды и степени загрязнения рассеивающего слоя белого льда, глубины снежиц, транспортного показателя рассеяния и толщины льда, находящегося под снежницами).

7. Метод восстановления размера рассеивающих частиц, использующий вклад многократного рассеяния частицами в направлении вперед в сигнал молекулярного рассеяния назад, позволяет определять размер рассеивающих частиц в облаках и океане посредством зондирования рамановскими лидарами и лидарами высокого спектрального разрешения с множественным полем зрения.

Личный вклад соискателя ученой степени в результаты диссертации

Соискателю принадлежит идея о применении метода стационарной фазы и стереологического подхода для получения аналитических решений задач рассеяния света на частицах случайной формы. Применяя вышеуказанные методы и подходы, соискатель нашёл решения поставленной задачи в рамках нескольких

асимптотических приближений, являющихся классическими в оптике светорассеяния: дифракции Фраунгофера, приближений Рэлея – Ганса и Вентцеля – Крамерса – Бриллюэна, геометрической оптики. На основе полученных решений соискатель разработал оптические модели снега и морского льда, связывающие их отражательную способность с микрофизическими и геометрическими характеристиками. Соискатель провёл сопоставление разработанных моделей с результатами нескольких лабораторных и полевых экспериментов по измерению спектральных характеристик отражения снега и морского льда. Разработал методы и алгоритмы восстановления характеристик снежного и ледяного покрова по спутниковым данным с учётом влияния атмосферы и угловой зависимости яркости отражённого излучения. Исследовал чувствительность лидарного сигнала к размеру облачных капель. Разработал метод и алгоритм восстановления размера рассеивающих частиц в облаках и океане по измерениям сигнала молекулярного рассеяния лидарами с множественным полем зрения.

Соавторы проводили эксперименты по измерению спектральной отражательной способности и микроструктуры снега и льда (А. П. Чайковский, Л. Истомина, М. Дюмон, Ф. Флин и др.), оптических характеристик аэрозолей (А. П. Чайковский и др.), по лидарному зондированию облаков и океана (К. Джименец, Й. Шмидт, Д. Лю, Ю. Чжоу и др.); разрабатывали физическое обоснование методов лидарного зондирования облаков и океана и спутникового зондирования снега и морского льда (Э. П. Зега, И. Л. Кацев); разрабатывали компьютерный код для обработки спутниковых данных (А. С. Прихач) и проводили такую обработку (Л. Истомина, Е. А. Илькевич и др.). Остальные соавторы принимали участие в решении отдельных вопросов, не вошедших в настоящую диссертационную работу.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Результаты доложены на следующих конференциях:

- American Geophysical Union Fall Meeting, New Orleans, USA, 2017;
- Atmospheric Radiation and Dynamics (ISARD), St.-Petersburg, Russia, 2013 (plenary);
- COSPAR Scientific Assembly, Bremen, Germany, 2010;
- Current Problems in Optics of Natural Waters (ONW): St.-Petersburg, Russia, 2011, 2013, 2015, 2019;
- European Geoscience Union General Assembly, Vienna, Austria, 2009, 2017, 2022;
- Forum of Advanced Photonics (FAP), Hangzhou, China, 2019 (invited);
- International Conference and School on Quantum Electronics, Sozopol, Bulgaria, 2016;
- International Electronic Conference on Atmospheric Sciences, online, 2022;

- International Electronic Conference on Remote Sensing, online, 2023;
- International Laser Radar Conference (ILRC): Nara, Japan, 2006; Boulder, Colorado, USA, 2008; St.-Petersburg, Russia, 2010; Porto Heli, Greece, 2012; Bucharest, Romania, 2017; Hefei, China, 2019;
- International Polar Year Oslo Science Conference, Oslo, Norway, 2010;
- International Radiation Symposium (IRS/IAMAS), Berlin, Germany, 2012;
- International Symposium on Atmospheric Light Scattering and Remote Sensing (ISALSaRS), Hangzhou, China, 2019;
- Living Planet Symposium, Prague, Czech Republic, 2016;
- SIDARUS Workshop: Minsk, Belarus, 2011; Bremen, Germany, 2011; Tromso, Norway, 2012;
- Snow Grain Size Workshop: Measurements and Applications, Grenoble, France, 2013;
- SPIE Remote Sensing, 2017, Warsaw, Poland, 2017;
- The International Conference on Coherent and Nonlinear Optics, The International Conference on Lasers, Applications, and Technologies (ICONO/LAT), Minsk, Belarus, 2016 (invited);
- Workshop on Oceanic and Atmospheric Optics of the SPIE/COS Photonics Asia, Hangzhou, China, 2019 (invited);
- Аэрозоль и оптика атмосферы, Москва, Россия, 2014;
- Белорусский космический конгресс, Минск, Беларусь, 2009, 2014, 2017;
- Всеукраинский съезд экологов с международным участием (Ecology), Винница, Украина, 2013;
- Конгресс физиков Беларуси, Минск, Беларусь, 2017, 2023;
- Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы», Москва, Россия, 2023;
- Международный симпозиум стран СНГ «Атмосферная радиация и динамика» (МСАРД), С.-Петербург, Россия, 2009;
- Природная среда Антарктики: Нарочь, Беларусь, 2016; «Форум», Беларусь, 2018; Домжерицы, Беларусь, 2022;
- Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, Москва, Россия, 2010, 2015.

Метод восстановления характеристик снежного покрова Антарктиды был использован для построения карт и изучения трендов изменения характеристик снежного покрова в Восточной и Западной Антарктиде в подпрограмме 2 «Развитие деятельности белорусской антарктической станции» ГП «Научно-инновационная деятельность Национальной академии наук Беларуси» на 2021–2025 годы, а также в совместных исследованиях с Турецким полярным институтом (отдельный проект НАН Беларуси и ТЮБИТАК, выполненный в соответствии с

постановлением Бюро Президиума НАН Беларуси от 30 апреля 2020 г. № 196, проект БРФФИ Ф22ТЮБ-001) [56, 57].

Метод восстановления доли снежиц на арктическом летнем льду был использован Институтом физики окружающей среды Бременского университета для изучения пространственно-временных изменений арктического льда за последние два десятилетия (<https://doi.org/10.5194/tc-19-83-2025>).

Метод восстановления размера рассеивающих частиц в облаках посредством зондирования рамановскими лидарами и лидарами высокого спектрального разрешения с множественным полем зрения был применен Институтом тропосферных исследований (Лейпциг, Германия) (<https://doi.org/10.5194/acp-15-10687-2015>) и Колледжем оптических наук и инженерии (Ханчжоу, Китай) (<https://www.zju.edu.cn/english/2022/0314/c19573a2506368/page.htm>, date of access: 09.12.2024) для изучения аэрозоль-облачного взаимодействия — наиболее неопределённого фактора влияния человеческой деятельности на климат.

Модель снежного покрова была использована в договоре с ОАО «Пеленг» «Разработка методов и алгоритма атмосферной коррекции спутниковых данных перспективной мультиспектральной аппаратуры для съемки участков земной поверхности в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне спектра» при разработке метода идентификации снежных пикселей с различением от облаков (акт об использовании — в приложении А к диссертации).

Опубликованность результатов диссертации

Результаты диссертации опубликованы в 6 главах монографий (10,62 а. л.), 51 рецензируемой статье (59,59 а. л.), 33 из которых (49,59 а. л.) соответствуют п. 19 Положения о присуждении учёных степеней и присвоении учёных званий, 13 нерецензируемых статьях (6,43 а. л.) и 26 тезисах докладов (1,5 а. л.). Общий объем опубликованного материала — 791 с., 78,13 а. л.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из разделов «Содержание», «Термины и определения», «Перечень сокращений и обозначений», «Введение», «Общая характеристика работы», основной части, 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 (соответственно, радиометрического и лидарного) природных сред, в которых существенно многократное рассеяние (снег,

морской лед, облака, морская вода). В приложении даны копии справки и акта об использовании результатов исследования.

Объем диссертации составляет 246 страниц, в том числе 66 рисунков (на 37 страницах), 10 таблиц (на 3 страницах), 343 источника (на 32 страницах), 1 приложение (на 2 страницах).

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В **первой** главе дано краткое описание основных методов, применяемых для расчёта оптических свойств частиц, значительно превышающих по своему размеру длину волны излучения.

Хорошо известно, что лишь немногие задачи теории светорассеяния имеют строгое решение, как решение Ми для сферических рассеивателей. Однако сферические частицы в природе встречаются довольно редко. Это, например, капли в теплых облаках или жидких аэрозолях, пузырьки воздуха в воде и льду, шарики жира в молоке. Но большинство природных частиц, таких как кристаллы в перистых облаках и твердые частицы некоторых аэрозолей (пыль, дым или вулканический пепел) в атмосфере, фитопланктон в морской воде, клетки в биологических тканях, как правило, несферичны.

Методы расчета характеристик светорассеяния несферическими частицами очень сложны и ресурсоемки. В то же время такие классические подходы, как дифракция Фраунгофера, приближения Рэлея – Ганса, Вентцеля – Крамерса – Бриллюэна и геометрической оптики доказали свою эффективность в широком круге задач. В первой главе приведено описание и обозначена область применимости классических асимптотических приближений теории светорассеяния, а также представлен асимптотический метод интегрирования (метод стационарной фазы) и изложены основы стереологического подхода. Последние два метода применяются в последующих главах для получения простых решений для задач светорассеяния на ансамблях случайных частиц в рамках вышеупомянутых классических приближений.

Во **второй** главе метод стационарной фазы был применен к асимптотическим решениям задач светорассеяния: дифракции Фраунгофера (бесконечно большой фазовый сдвиг), рассеяния Рэлея – Ганса (бесконечно малый фазовый сдвиг) и Вентцеля – Крамерса – Бриллюэна (конечный фазовый сдвиг) — для частиц произвольной формы и сред, состоящих из таких частиц.

Метод стационарной фазы рассматривает интегралы быстро осциллирующих функций с множителем вида $\exp[ixf(\mathbf{r})]$, где x — постоянный параметр, и даёт асимптотику этих интегралов при больших x . Суть подхода состоит в том, что быстрые колебания уничтожают друг друга после интегрирования, а отличные от нуля значения, дающие вклад в интеграл, исходят из точек, в которых фаза стационарна. В физике этот эффект называется положительной

интерференцией волн. Таким образом, благодаря такой близкой аналогии эти методы могут быть эффективно применены к рассеянию света частицами, размеры которых значительно превышают длину волны излучения:

$$x \gg 1, \quad (1)$$

где $x = kD$ — безразмерный диаметр частицы (k — волновое число, D — типичный размер частицы).

В главе 1 показано, что дифференциальное сечение фраунгоферовой дифракции ансамблем хаотически ориентированных препятствий произвольной формы имеет асимптотическую (при условии $x\theta \gg 1$, где θ — угол дифракции) угловую зависимость $L\theta^{-3}$. В этом угловом диапазоне дифференциальное сечение зависит только от периметра препятствия L и не зависит от его формы. Еще один вывод из асимптотического решения состоит в том, что разные ансамбли дифрагируют свет практически одинаково, если они имеют одинаковые средние значения площади $\langle S \rangle$, квадрата площади $\langle S^2 \rangle$ и периметра $\langle L \rangle$. Это подталкивает к идее найти универсальную аппроксимационную функцию для описания дифракционной картины Фраунгофера. Такая функция может быть записана в виде

$$p(\theta) = \frac{1}{2V} \exp\left(-\frac{\theta^2}{2V}\right) + \frac{\rho^2}{2(1 + \rho^2 \theta^2)^{3/2}}, \quad (2)$$

где параметры V и ρ выражаются через величины $\langle S^2 \rangle / \langle S \rangle$ и $\langle L \rangle / \langle S \rangle$ таким образом, чтобы обеспечить правильные значения при $\theta = 0$ и $x\theta \gg 1$. (Между этими значениями функция (2) спадает монотонно, а ее интеграл нормирован на 1.) Полученная аппроксимационная функция (2) описывает угловую зависимость дифракции Фраунгофера любым ансамблем хаотически ориентированных частиц, независимо от их формы или распределения по размерам. Более того, полученная зависимость демонстрирует, какие именно параметры микроструктуры ансамбля являются определяющими для дифракционной картины.

Рассеяние на ансамбле крупных оптически мягких частиц рассмотрено в рамках приближения Рэлея – Ганса. Показано, что асимптотическая зависимость дифференциального сечения при $x\theta \gg 1$ имеет вид $S(1 + \cos^2 \theta)(1 - \cos \theta)^{-2}$, где S — площадь поверхности частицы. Полученное решение совпадает с известной асимптотической зависимостью приближения Рэлея – Ганса в области малых углов $S\theta^{-4}$. Индикатриса рассеяния во всем диапазоне углов может быть с высокой точностью аппроксимирована функцией

$$p(\theta) = \frac{1}{N} \frac{2x_{eff}^2 (1 + \cos^2 \theta)}{(1 + 4x_{eff}^2 \sin^2 \theta / 2)^2}, \quad (3)$$

где N — нормировочный множитель, x_{eff} — эффективный размер частицы

$$x_{eff}^2 = \frac{1}{2} k^2 \langle \xi^2 \rangle, \quad (4)$$

где $\langle \xi^2 \rangle$ — второй момент распределения длины случайных хорд частицы.

Таким образом, эффективный размер частицы x_{eff} в приближении Рэлея – Ганса зависит только от ее геометрических характеристик. Оптические свойства среды с оптически мягкими частицами, такие как полный и транспортный показатели рассеяния, в основном определяются удельной поверхностью частиц, а показатель обратного рассеяния зависит только от этого микрофизического параметра.

В приближении Вентцеля – Крамерса – Бриллюэна асимптотическое поведение дифференциального сечения имеет вид $S(1 + \cos^2 \theta) |m - \cos \theta|^{-2}$ ($m = n + i\kappa$ — комплексный показатель преломления частицы), и индикатриса рассеяния для частиц, много больших длины волны, таким образом, аппроксимируется той же функцией (3), что и в приближении Рэлея – Ганса, но с перепределённым параметром размера x_{eff} , который зависит не только от геометрических характеристик частицы, но и от её показателя преломления:

$$x_{eff} = \left| \frac{m+1}{m-1} \right| \sqrt{\frac{Q_{sca}}{8}}, \quad (5)$$

где Q_{sca} — эффективность рассеяния.

Эффективный оптический размер частицы в приближении Вентцеля – Крамерса – Бриллюэна меньше её размера в приближении Рэлея – Ганса и имеет конечный предел ($\frac{|m+1|}{2|m-1|}$), когда геометрический размер стремится к бесконечности.

Третья глава посвящена применению стереологических методов к задачам светорассеяния. Стереология — часть теории вероятностей, которая рассматривает геометрическую статистику. Поскольку в классическом понимании рассеяние света представляет собой взаимодействие электромагнитных волн со средой, содержащей стохастические неоднородности показателя преломления, стереология представляется подходящим способом описания рассеивающих сред, в частности, при интерпретации микрофизических свойств плотно-упакованных сред, распространенных как в природе (снег, песок, морская пена или планетарные реголиты), так и среди искусственных изделий (керамика, фармацевтические таблетки и т.п.).

Методы стереологии применены к описанию рассеяния света в рамках рассмотренных выше приближений, а также в рамках геометрической оптики. Показано, что стереология позволяет обобщить выражения, известные в рамках

дифракции Фраунгофера, рассеяния Рэлея – Ганса и рассеяния Вентцеля – Крамера – Бриллюэна для частных случаев.

Если флуктуации показателя преломления в среде велики и также велики характерные размеры этих флуктуаций в сравнении с длиной волны, рассеяние света в таких материалах описывается в рамках геометрической оптики. Стереологический подход, будучи применённым к законам геометрической оптики, позволяет получить присущие такому пористому материалу оптические свойства, входящие в уравнение переноса излучения: вероятность выживания фотона, индикатрису и матрицу рассеяния. Для смеси с марковской статистикой (экспоненциальным распределением длины хорд) вероятность выживания фотона даётся простым выражением

$$\omega_0 = R + \frac{T^2}{n^2 \alpha a + T}, \quad (6)$$

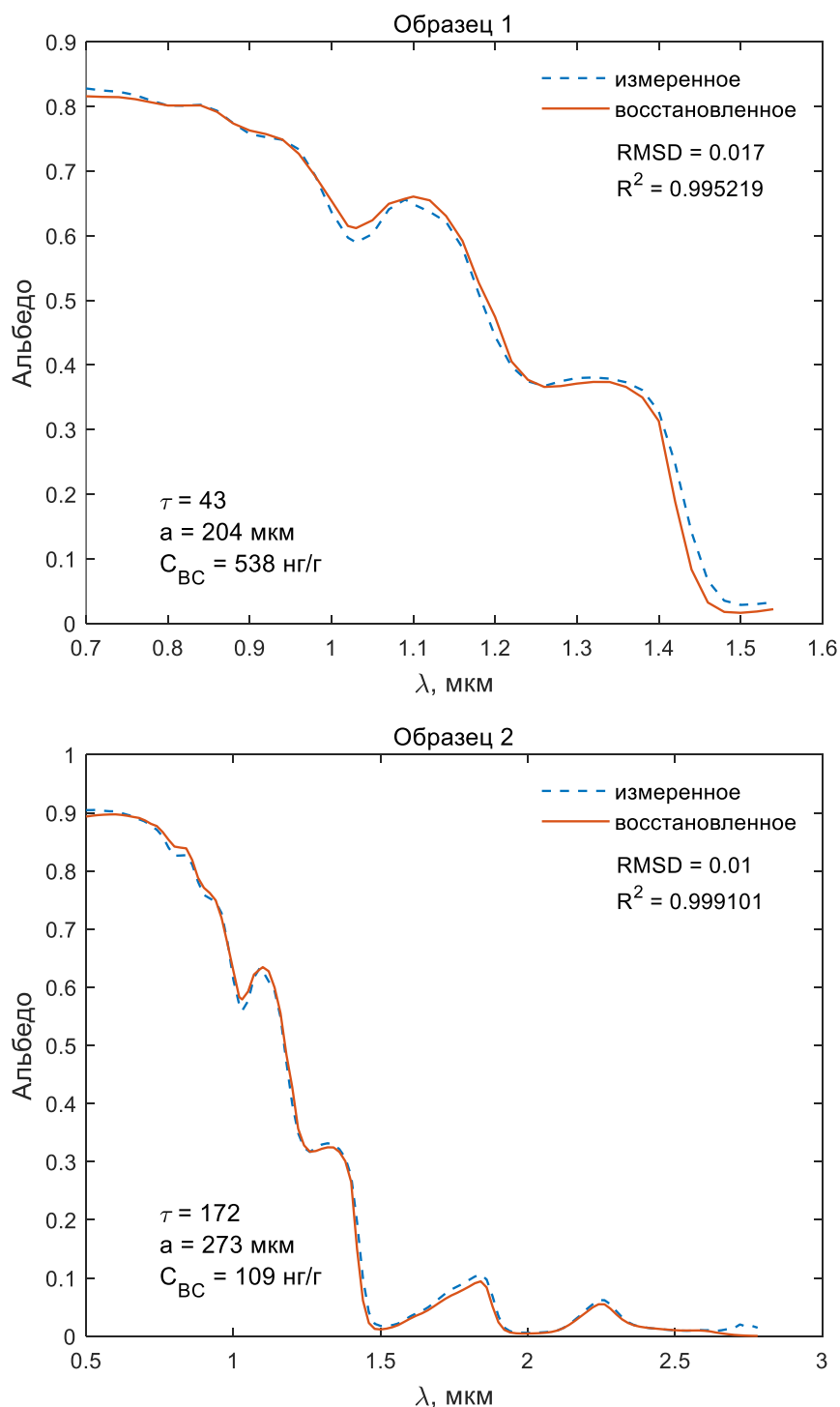
где R и $T = 1 - R$ — френелевские отражательная и пропускательная способности плоской преломляющей границы для диффузного света, n — показатель преломления, α — показатель поглощения, a — средняя длина хорды частицы. Индикатриса и матрица рассеяния выражаются простым разложением по полиномам Лежандра и обобщённым сферическим функциям соответственно.

В **четвертой** главе полученные решения применены к описанию оптических свойств естественных сред, состоящих из частиц случайной формы: снег и белый лёд (сильно гранулированный верхний слой летнего морского льда, обладающий высоким альбедо), морской лёд, снежницы (водоемы талой воды на поверхности морского льда).

Снег и белый лёд рассмотрены как случайная двухкомпонентная смесь льда и воздуха. Разработанная модель снега и белого льда основана на решении, полученном в рамках стереологического подхода к геометрической оптике. Для полной характеристики отражательной способности используется три параметра: оптическая толщина τ , средняя длина хорды ледяной фазы a и концентрация загрязнителя C , наличие которого не влияет на характеристики светорассеяния, но существенно для поглощения. В соответствии с моделью расчёт отражательной способности снежного слоя состоит из трёх шагов: 1) по заданной средней хорде a и показателю преломления n находятся характеристики однократного рассеяния: альбедо однократного рассеяния ω_0 (формула (6)) и индикатриса (при необходимости – матрица рассеяния); 2) ω_0 корректируется на поглощение загрязнителем; 3) по кодам переноса излучения рассчитываются спектральное альбедо или коэффициент яркости слоя оптической толщины τ . Проверка модели была проведена посредством сопоставления с данными нескольких экспериментов.

Один из экспериментов по измерению отражательной способности снега был проведен в Лаборатории гляциологии Альпийского университета в

Гренобле. Для нескольких образцов снега, помимо отражательной способности, с помощью рентгеновской компьютерной томографии (КТ) была исследована микроструктура снега. На рисунке 1 представлено измеренное и восстановленное спектральное альbedo двух образцов.



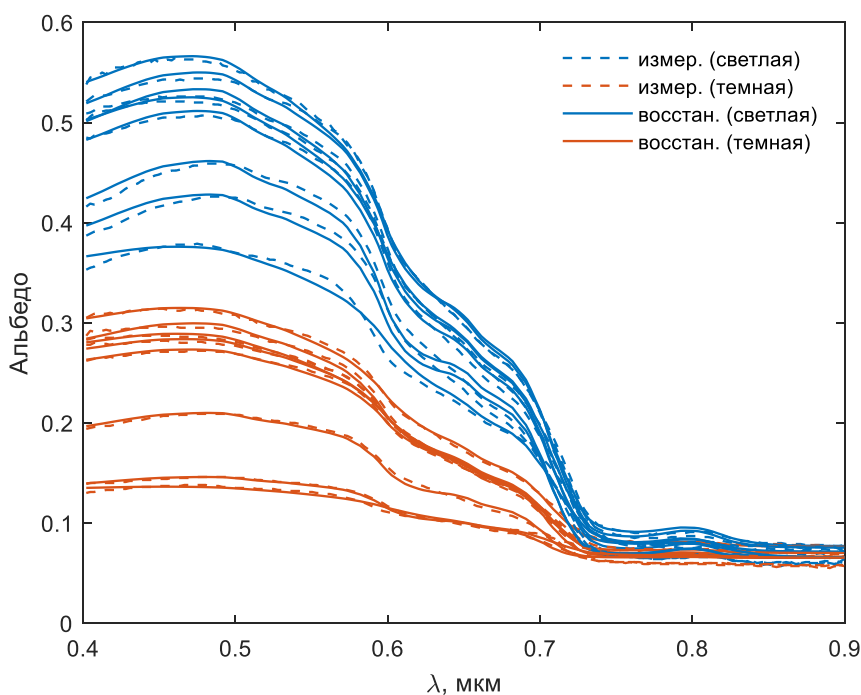
Значения средней хорды, измеренные с помощью КТ:
 $205,5 \pm 5,5$ мкм и 260 ± 23 мкм для 1-го и 2-го образцов соответственно

Рисунок 1 — Измеренные (—) и восстановленные (—) спектры альbedo

Сравнение показало блестящее совпадение предсказанных по модели и измеренных спектров (коэффициент детерминации $R^2 > 0,995$) и значений средних хорд: восстановленные по спектру альбедо средние хорды 204 и 273 мкм соответствуют измеренным значениям $205,5 \pm 5,5$ мкм и 260 ± 23 мкм.

Другой важный тип поверхности морского льда — это снежицы: талая вода, которая собирается в водоемы. Снежица рассматривалась как плоскопараллельный слой чистой воды на слое льда. В такой модели отражение от снежицы определяется ее глубиной и величиной альбедо дна. Для оценки альбедо дна достаточно знать толщину ледяного слоя и его транспортный показатель рассеяния. Асимптотические формулы, полученные в главе 2 в приближении Вентцеля – Крамерса – Бриллюэна, позволяют описать рассеяние на включениях солевого раствора в морском льду. Индикатриса рассеяния света в морском льду оказывается спектрально независимой и, следовательно, транспортный показатель также является спектрально нейтральным. Таким образом, отражательная способность снежицы определяется тремя параметрами: глубиной снежицы, транспортным показателем рассеяния льда и его толщиной.

Разработанная оптическая модель снежицы была проверена по данным трёх полевых экспериментов. На рисунке 2 представлены спектры неоднородной (состоявшей из темной и светлой частей) снежицы, наблюдавшейся в течение нескольких недель во время экспедиции SHEBA, проводившейся в море Бофорта с октября 1997 г. по октябрь 1998 г.



Пунктир — измерения, сплошные кривые — восстановление,
синий — светлая часть, красный — тёмная часть

Рисунок 2 — Спектры отражения неоднородной снежицы на разных стадиях развития

Наклон линейной регрессии для восстановленной толщины льда продемонстрировал скорость таяния 1,9 см/день и 2,6 см/день для светлой и темной частей соответственно. При этом среднее расчетное таяния льда в бассейне SHEBA за период с 17 июля по 14 августа составляло 2,25 см/день.

Совпадение измеренных и восстановленных по модели спектров продемонстрировало, что разработанная модель способна воспроизводить спектр альбедо снежницы в видимом диапазоне со среднеквадратичным отклонением, не превышающим 1,5% для широкого диапазона типов снежниц, наблюдаемых в Арктике.

В целом анализ данных измерений показал, что разработанные модели прекрасно описывают отражательные свойства типичного белого льда, снега и снежниц. Более обширный анализ показал, что случаи, выходящие за рамки исходных моделей, такие как мокрый лед/снег, покрытый коркой снег, замерзшие трещины, подмёрзшие и частично заснеженные водоемы, также могут быть описаны этими моделями вполне удовлетворительно.

Пятая глава описывает алгоритмы обработки данных спутникового зондирования снежного и ледяного покровов, основанные на разработанных моделях снега и льда. В основе алгоритмов – итерационная процедура. Нулевое приближение и границы значений искомых величин оцениваются из физических соображений и метеорологических условий. Рассчитывается сигнал в спектральных каналах спутникового радиометра, сравнивается с измеренным сигналом, затем методом Ньютона-Рафсона вносится поправка в значения искомых величин. Регуляризация проводится усечением сингулярного разложения псевдо-обратной матрицы.

Были разработаны два алгоритма: ASAR (от англ. Antarctic Albedo Retriever), для снежного покрова Антарктиды, и MPD (от англ. Melt Pond Detector), для ледяного покрова Арктики.

Алгоритм ASAR использует разработанную модель снега для восстановления эффективного размера снежных зёрен, который трактуется как средняя хорда ледяной фазы. Кроме того, тот факт, что снег в Антарктиде очень слабо загрязнён, позволяет по уменьшению альбедо в видимой области спектра оценивать долю площади скал, непокрытых снегом.

С помощью алгоритма ASAR были обработаны данные спутникового радиометра MODIS за период наблюдений с 2002 г. по настоящее время и построены временные ряды эффективного размера снежных зёрен и доли скал в различных регионах Антарктиды. Анализ рядов обнаружил небольшое уменьшение среднеянварского значения размера снежных зёрен (-3.5 ± 1.5 мкм/год) за последние два десятилетия на побережье Земли Эндерби (в районе Белорусской антарктической станции).

Алгоритм MPD восстанавливает долю площади, занимаемой снежницами на поверхности морского льда, а также оценивает его характеристики:

оптическую толщину, среднюю хорду и степень загрязнения рассеивающего слоя белого льда, глубину снежниц, транспортный показателя рассеяния и толщину льда, находящегося под снежницами.

Алгоритм MPD был проверен по данным спутников высокого пространственного разрешения и показал коэффициент детерминации восстановленной доли снежниц $R^2 = 0.89$, в то время как другие существующие на сегодняшний день алгоритмы обеспечивают R^2 на уровне, не превышающем 0.4.

Шестая глава посвящена лидарному зондированию облаков и морской воды. Аппроксимационная функция для угловой зависимости пика рассеяния вперед и ее связь с микроструктурой ансамбля, полученные в главе 2, были положены в основу алгоритмов обработки данных лидарного зондирования, использующих вклад многократного рассеяния частицами в направлении вперед в сигнал молекулярного рассеяния назад.

Рассмотрены возможности восстановления размера рассеивающих частиц по сигналу лидара, измеряющего молекулярное рассеяние посредством приемника с двойным полем зрения: стандартным круговым внутренним и кольцевым внешним. Под молекулярным рассеянием понимается либо комбинационное (рамановский лидар), либо рэлеевское рассеяние на молекулах, которое отстраивается от упругого рассеяния на взвешенных частицах посредством приемника высокого спектрального разрешения. Было показано, что сигнал такого лидара чувствителен к эффективному размеру рассеивающих частиц. На основе изучения чувствительности рекомендованы оптимальные поля зрения приемника. Оптимальные значения поля зрения оцениваются как R/H (R — радиус приемника, H — расстояние до среды) для внутренней диафрагмы и $0,01 z/H$ (z — глубина зондирования) для внешней. При таких значениях поля зрения сигнал на внутренней диафрагме определяется в основном однократным рассеянием, поэтому подходит для восстановления профилей ослабления, в то время как сигнал на внешней диафрагме определяется исключительно многократным рассеянием, что позволяет восстанавливать размер рассеивающих частиц по степени размытия лазерного пучка вследствие дифракции. Предложенный алгоритм основан на итерационной схеме и сингулярном разложении обратной матрицы с регуляризацией. Даны рекомендации по восстановлению профиля с переменным разрешением по высоте.

Модель, используемая для расчёта лидарного сигнала с многократным рассеянием, основана на квазиоднократном малоугловом приближении теории переноса. Проведена проверка модели путем сравнения с моделированием методом Монте-Карло и результатами измерений лидарного сигнала от морской воды с борта корабля при одновременном погружении приборов для измерения оптических свойств воды. Коэффициент детерминации R^2 логарифма сигнала и

среднеквадратичное отклонение δ составили $R^2 = 0,998$ и $\delta = 10\%$ при сравнении с моделированием и $R^2 = 0,952$ и $\delta = 46\%$ для лидарного эксперимента.

Развитый алгоритм был использован при обработке данных нескольких измерительных кампаний для изучения аэрозоль облачного взаимодействия и распределения по размерам взвешенных в морской воде частиц биологического и минерального происхождения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Метод стационарной фазы позволяет установить асимптотические зависимости интенсивности от угла рассеяния в рамках классических приближений в теории светорассеяния. Усреднённая по азимуту интенсивность имеет асимптотику $L\theta^{-3}$ для дифракции Фраунгофера (L — периметр препятствия) [10] и $S(1 + \cos^2 \theta) |m - \cos \theta|^{-2}$ для приближения Вентцеля – Крамерса – Бриллюэна (S — площадь поверхности частицы, m — комплексный показатель преломления) [21].

2. Найденная асимптотика дифракции Фраунгофера и приближения Вентцеля – Крамерса – Бриллюэна, а также известная асимптотика приближения Рэлея – Ганса $S(1 + \cos^2 \theta)(1 - \cos \theta)^{-2}$, позволяют предложить простые аппроксимационные формулы, описывающие индикатрису рассеяния во всем диапазоне углов [3, с. 193–234; 11; 14; 21; 42]. Предложенные формулы в явном виде выражают связь с параметрами микроструктуры рассеивающего ансамбля.

3. Стереологический подход к задаче рассеяния в приближении геометрической оптики позволяет получить аналитические выражения для характеристик рассеяния света (сечение поглощения, индикатриса и матрица рассеяния) через функцию распределения хорд по длине [4, с. 141–157; 13; 18; 19; 21; 36].

4. Полученные в рамках стереологического подхода решения позволяют описать оптические свойства снега и белого льда (сильно гранулированного верхнего слоя летнего морского льда, обладающего высоким альбедо). Созданная модель снега и белого льда связывает их оптические свойства с микрофизическими и геометрическими характеристиками. Модель позволяет рассчитывать спектральное альбедо и коэффициент яркости по трем независимым характеристикам: средней хорде ледяной фазы, оптической толщине слоя и концентрации загрязнителя (сажи, в случае снега, или органического вещества из морской воды, в случае белого льда). Сопоставление с данными полевых и лабораторных измерений продемонстрировало высокую точность разработанной модели [25; 27; 32; 36; 77; 78; 81; 90; 91].

5. Асимптотические формулы, полученные в приближении Вентцеля – Крамерса – Бриллюэна, позволяют описать рассеяние на включениях солевого

раствора в морском льду. Индикатриса и показатель рассеяния света в морском льду оказываются спектрально независимыми. Поэтому, в целях расчета спектрального альбедо, морской лёд может быть охарактеризован единственным параметром: транспортным показателем рассеяния [26].

6. Спектральное альбедо и коэффициент яркости снежицы (водоема талой воды на поверхности морского льда) могут быть рассчитаны по модели, представляющей снежицу как плоский слой чистой воды на поверхности льда. При этом водный слой характеризуется глубиной, а лёд — толщиной и транспортным показателем рассеяния. Сопоставление с данными полевых измерений продемонстрировало высокую точность разработанной модели [26; 27; 49; 77–79; 83; 86].

7. Разработанная оптическая модель снега была положена в основу алгоритма обработки данных спутникового зондирования снежного покрова Антарктиды [2, с. 78–87; 5, с. 57–79; 6, с. 79–85; 8; 12; 15; 51; 53; 56–63; 65–67; 69–71; 73–76; 84; 89; 92]. Алгоритм ASAR восстанавливает эффективный размер снежных зёрен и долю открытых скал по спутниковым измерениям спектральной яркости. Алгоритм включает в себя процедуру атмосферной коррекции [24; 37; 64; 68].

8. Разработанные модели белого льда и снежицы были положены в основу алгоритма обработки данных спутникового зондирования ледяного покрова Арктики [20; 22; 23; 47; 48; 54; 80; 82; 85; 87; 88; 94–96]. Алгоритм MPD по спутниковым измерениям спектральной яркости восстанавливает долю снежиц, а также даёт оценку характеристик морского льда (оптической толщины, средней хорды и степени загрязнения рассеивающего слоя белого льда, глубины снежиц, транспортного показателя рассеяния и толщины льда, находящегося под снежницами). Алгоритм включает в себя процедуру атмосферной коррекции [20; 24; 64]. Сопоставление со спутниковыми данными высокого пространственного разрешения продемонстрировало высокую точность алгоритма MPD ($R^2 = 0,89$) [39].

9. Модель формирования неупругого лидарного сигнала с учетом многократного рассеяния [1, с. 125–155; 9] проверена по данным расчёта методом Монте-Карло и данным эксперимента с океаническим лидаром [28].

10. Модель формирования неупругого лидарного сигнала использована для разработки метода определения размера рассеивающих частиц. Метод использует вклад многократного рассеяния частицами в направлении вперед в сигнал молекулярного рассеяния назад [7; 31; 34] и позволяет восстанавливать размер облачных капель посредством зондирования облаков рамановским лидаром [16; 17; 41; 43; 44; 46; 72], поляризационным лидаром [29; 30; 52] и лидаром высокого спектрального разрешения [33] с двойным полем зрения, а также размер взвешенных частиц в морской воде с помощью лидара высокого спектрального разрешения с тройным полем зрения [35; 38; 40; 45; 50; 55; 93].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Проведенное исследование показывает, насколько полезными могут быть метод стационарной фазы и стереологический подход в проблемах светорассеяния, особенно для крупных несферических частиц, когда нет строгих аналитических решений, а численные методы громоздки, сложны и ресурсоемки. Эти методы дают аналитические решения для задач рассеяния на частицах неправильной формы в классических приближениях дифракции Фраунгофера, Рэлея – Ганса, Вентцеля – Крамерса – Бриллюэна и геометрической оптики. Эффективности ослабления и поглощения света случайно ориентированными частицами или частицами неправильной формы выражаются через характеристические функции, расчет которых для заданной формы частицы требует гораздо меньше времени, чем численное моделирование с использованием более строгих методов, таких как метод дискретных диполей или Монте-Карло. Более того, стереологический подход естественным образом описывает не только единичную частицу, но и плотноупакованный ансамбль, представленный мозаикой или смесью, что позволяет определить элементарный объем пористого материала и рассчитать его оптические характеристики, которые можно в дальнейшем использовать в теории переноса излучения. С другой стороны, оба подхода не требуют, чтобы форма частиц была строго случайной: их можно применять и к хаотически ориентированным частицам правильной несферической формы.

Полученные решения в дальнейшем могут быть использованы как для прямой, так и для обратной задачи рассеяния света. Это может помочь в изучении распределения яркости в средах, состоящих из частиц неправильной формы, композитных материалах и плотноупакованных геофизических средах, а также в дальнейшей разработке различных методов восстановления их микрофизических характеристик.

Практической значимостью работы является расширение знаний о последствиях климатических изменений и о состоянии природы, в частности в полярных регионах. Беларусь является участником Договора по Антарктике и выполняет научные исследования в рамках этого Договора. Проведенное диссертационное исследование вносит вклад в изучение изменений окружающей среды в Антарктиде и может помочь Республике Беларусь в приобретении статуса Консультативной Стороны в международном Договоре по Антарктике (приложение А к диссертации).

Методы восстановления характеристик снежного и ледяного покровов предполагается в дальнейшем использовать для исследования климатических изменений в полярных регионах Земли. Метод восстановления размера рассеивающих частиц по данным лидарного зондирования рекомендуется использовать для исследования аэрозоль-облачного взаимодействия как наиболее

неопределённого фактора воздействия человеческой деятельности на климат планеты, а также для изучения морских экосистем.

Дальнейшее развитие методов спутникового зондирования атмосферы и снежного покрова будет осуществляться в мероприятиях Национальной системы мониторинга окружающей среды в республике Беларусь, а также в будущих национальных программах исследований полярных регионов. Практическое применение результатов продолжится в мероприятиях подпрограммы «Исследование и использование космического пространства в мирных целях» и в договорах с белорусскими предприятиями и научными организациями, разрабатывающими спутниковую съёмочную аппаратуру (ОАО «Пеленг», Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко).

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

В монографиях

1. Malinka, A. Raman lidar remote sensing of geophysical media / A. Malinka // *Light Scattering Reviews 2 : Remote sensing and inverse problems*, A. Kokhanovsky ed. / Berlin : Springer, 2007. — Ch. 4. — P. 125–155. — DOI: 10.1007/978-3-540-68435-0_4.
2. Оптические исследования атмосферы и подстилающей поверхности в Антарктике / А. П. Чайковский, Э. П. Зеге, И. Л. Кацев, М. М. Король, А. П. Иванов, С. В. Денисов, В. П. Дик, А. В. Малинка, Ф. П. Осипенко, А. С. Прихач, А. С. Слесарь, Л. И. Чайковская, В. П. Кабашников, Н. С. Метельская, Я. А. Король, Л. А. Бондарчик, В. А. Свидинский, А. Н. Красовский, Л. Н. Турышев, А. Г. Светашев, В. С. Дёмин, В. Я. Венчиков, В. Н. Венчиков, В. В. Жучкевич, В. Л. Тавгин, С. К. Бородко, И. И. Бручковский, Я. М. Мицкевич, P. Goloub, T. Podvin, L. Blarell, A. Laryonok, В. Ф. Радионов, А. А. Гайдашов, В. Ф. Логинов, А. К. Карабанов // *Беларусь в Антарктике: к 10-летию начала регулярных научных и экспедиционных исследований* ; под ред. акад. В.Ф. Логинова / Минск : Беларуская навука, 2016. — Гл. 2. — С. 50–99.
3. Malinka, A. Asymptotic methods in the theory of light scattering by nonspherical particles / A. Malinka // *Springer Series in Light Scattering*, Vol. 5, A. Kokhanovsky ed. / Cham : Springer, 2020. — P. 193–234. — DOI: 10.1007/978-3-030-38696-2_5.
4. Malinka, A. Stereological methods in the theory of light scattering by nonspherical particles / A. Malinka // *Springer Series in Light Scattering*, Vol. 6, A. Kokhanovsky ed. / Cham : Springer, 2021. — P. 111–174. — DOI: 10.1007/978-3-030-71254-9_3.
5. Наземные и спутниковые исследования атмосферы и земной поверхности в Антарктике / А. П. Чайковский, А. В. Малинка, М. М. Король, Э. П. Зеге, И. Л. Кацев, А. С. Прихач, А. И. Бриль, В. П. Дик, В. А. Базылевич, С. В. Денисов, Ф. П. Осипенко, А. С. Федоренко, А. Ч. Сватко, А. Ю. Макас, В. А. Пещеренков, Е. А. Илькевич // *Научные исследования Беларуси в Антарктике* ; под ред. акад. В. Ф. Логинова / Минск : Беларуская навука, 2021. — Гл. 4. — С. 57–79.
6. Optical remote sensing of the atmosphere and Earth's surface / A. P. Chaikovsky, A. V. Malinka, V. P. Dick, M. M. Korol, V. A. Bazylevich, I. L. Katsev, E. P. Zege, A. S. Prikhach, A. I. Bril, N. S. Miatselskaya, V. A. Peshcherenkov, Ya. A. Ilkevich, I. A. Alekseev, A. I. Kalevich, F. P. Asipenka // *Belarusian Antarctic Research : Annual Scientific-Information Bulletin* / Minsk : Belaruskaya navuka, 2024. — Issue 1. — Ch. 4. — P. 79–92.

Статьи в рецензируемых журналах

7. Malinka, A. Possibilities of warm cloud microstructure profiling with multiple-field-of-view Raman lidar / A. Malinka, E. Zege // *Appl. Opt.* — 2007. — Vol. 46, No. 35. — P. 8419–8427. — DOI: 10.1364/AO.46.008419.
8. New algorithm to retrieve the effective snow grain size and pollution amount from satellite data / E. P. Zege, I. L. Katsev, A. V. Malinka, A. S. Prikhach, I. N. Polonsky // *Annals of Glaciology.* — 2008. — Vol. 49. — P. 139–144. — DOI: 10.3189/172756408787815004.
9. Коррекция искажений, вносимых многократным рассеянием в лидарные измерения матриц обратного рассеяния облаков / И. В. Самохвалов, Б. В. Кауль, В. В. Брюханова, А. А. Дорошкевич, Э. П. Зеге, Л. И. Чайковская, А. В. Малинка // *Известия ВУЗов. Физика.* — 2008. — Т. 51, № 9. — С. 71–76.
10. Malinka, A. Fraunhofer diffraction by arbitrary-shaped obstacles / A. Malinka, E. Zege // *J. Opt. Soc. Am. A.* — 2009. — Vol. 26, No. 8. — P. 1762–1766. — DOI: 10.1364/JOSAA.26.001762.
11. Malinka, A. Approximation of the Fraunhofer diffraction peak, produced by particles of arbitrary shape / A. Malinka // *Optics Letters.* — 2010. — Vol. 35, No. 20. — P. 3411–3413. — DOI: 10.1364/OL.35.003411.
12. Algorithm for retrieval of the effective snow grain size and pollution amount from satellite measurements / E. P. Zege, I. L. Katsev, A. V. Malinka, A. S. Prikhach, G. Heygster, H. Wiebe // *Rem. Sens. of Env.* — 2011. — V. 115, No. 10. — P. 2674–2685. — DOI: 10.1016/J.RSE.2011.06.001.
13. Malinka, A. Fraunhofer diffraction by a random screen / A. Malinka // *J. Opt. Soc. Am. A.* — 2011. — Vol. 28, No. 8. — P. 1656–1661. — DOI: 10.1364/JOSAA.28.001656.
14. Malinka, A. Light scattering by optically soft large particles of arbitrary shape / A. Malinka // *J. Opt. Soc. Am. A.* — 2011. — V. 28, No. 10. — P. 2086–2090. — DOI: 10.1364/JOSAA.28.002086.
15. Remote sensing of sea ice: advances during the DAMOCLES project / G. Heygster, V. Alexandrov, G. Dybkjær, W. von Hoyningen-Huene, F. Girard-Ardhuin, I. Katsev, A. Kokhanovsky, T. Lavergne, A. Malinka, C. Melsheimer, L. Toudal Pedersen, A. Prikhach, R. Saldo, R. Tonboe, H. Wiebe, and E. Zege // *The Cryosphere.* — 2012. — Vol. 6. — P. 1411–1434. — DOI: 10.5194/tc-6-1411-2012.
16. Schmidt, J. Dual-field-of-view Raman lidar measurements for the retrieval of cloud microphysical properties / J. Schmidt, U. Wandinger, A. Malinka // *Appl. Opt.* — 2013. — Vol. 52, No. 11. — P. 2235–2247. — DOI: 10.1364/AO.52.002235.
17. Dual-FOV Raman and Doppler lidar studies of aerosol-cloud interactions: Simultaneous profiling of aerosols, warm-cloud properties, and vertical wind / J. Schmidt, A. Ansmann, J. Bühl, H. Baars, U. Wandinger, D. Müller, and A.V. Malinka

// J. Geophys. Res. Atmos. — 2014. — Vol. 119. — P. 5512–5527. — DOI: 10.1002/2013JD020424.

18. Malinka, A. Light scattering in porous materials: Geometrical optics and stereological approach / A. Malinka // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. — 2014. — Vol. 141. — P. 14–23. — DOI: 10.1016/J.QSRT.2014.02.022.

19. Malinka, A. Comment to the paper “Light scattering in porous materials: Geometrical optics and stereological approach”—Phase shift between the parallel and perpendicular components in total internal reflection / A. Malinka // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. — 2014. — Vol. 147. — P. 60–62. — DOI: 10.1016/j.jqsrt.2014.05.018.

20. Algorithm to retrieve the melt pond fraction and the spectral albedo of Arctic summer ice from satellite optical data / E.P. Zege, A.V. Malinka, I.L. Katsev, A.S. Prikhach, G. Heygster, and L. Istomina // Rem. Sens. of Env. — 2015. — Vol. 163. — P. 153–164. — DOI: 10.1016/j.rse.2015.03.012.

21. Malinka, A. Analytical expressions for characteristics of light scattering by arbitrarily shaped particles in the WKB approximation / A. Malinka // J. Opt. Soc. Am. A. — 2015. — Vol. 32. — P. 1344–1351. — DOI: 10.1364/JOSAA.32.001344.

22. Melt pond fraction and spectral sea ice albedo retrieval from MERIS data – Part 1: Validation against in situ, aerial, and ship cruise data / L. Istomina, G. Heygster, M. Huntemann, P. Schwarz, G. Birnbaum, R. Scharien, C. Polashenski, D. Perovich, E. Zege, A. Malinka, A. Prikhach, I. Katsev // The Cryosphere. — 2015. — Vol. 9. — P. 1551–1566. — DOI: 10.5194/tc-9-1551-2015.

23. Melt pond fraction and spectral sea ice albedo retrieval from MERIS data – Part 2: Case studies and trends of sea ice albedo and melt ponds in the Arctic for years 2002–2011 / L. Istomina, G. Heygster, M. Huntemann, H. Marks, C. Melsheimer, E. Zege, A. Malinka, A. Prikhach, I. Katsev // The Cryosphere. — 2015. — Vol. 9. — P. 1567–1578. — DOI: 10.5194/tc-9-1567-2015.

24. Учет влияния атмосферы при интерпретации данных спутниковых и наземных оптических измерений / А. В. Малинка, Э. П. Зеге, И. Л. Кацев, А. С. Прихач, Л. Истомина // Журн. прикл. спектр. — 2016. — Т. 83, № 5. — С. 698–706.

25. Reflective properties of white sea ice and snow / A. Malinka, E. Zege, G. Heygster, L. Istomina // The Cryosphere. — 2016. — Vol. 10. — P. 2541–2557. — DOI: 10.5194/tc-10-2541-2016.

26. Reflective properties of melt ponds on sea ice / A. Malinka, E. Zege, L. Istomina, G. Heygster, G. Spreen, D. Perovich, C. Polashenski // The Cryosphere. — 2018. — Vol. 12. — P. 1921–1937. — DOI: 10.5194/tc-12-1921-2018.

27. Отражательные свойства арктического летнего льда в видимом и инфракрасном диапазонах / Э. П. Зеге, А. В. Малинка, И. Л. Кацев, А. С. Прихач, Л. Истомина, Г. Хейгстер, Г. Сприн // Фундаментальная и прикладная гидрофизика.

— 2018. — Т. 11, № 3. — С. 17–25. — DOI: 10.7868/S2073667318030024 (на англ. языке).

28. Validation of the analytical model of oceanic lidar returns: comparisons with Monte Carlo simulations and experimental results / Y. Zhou, Q. Liu, X. Cui, A. Malinka, B. Han, Zh. Liu, X. Wang, P. Xu, W. Zhuo, H. Che, Q. Song, X. Zhu, and D. Liu // *Remote Sens.* — 2019. — Vol. 11. — Art. 1870. — 18 p. — DOI: 10.3390/rs11161870.

29. The dual-field-of-view polarization lidar technique: A new concept in monitoring aerosol effects in liquid-water clouds — Theoretical framework / C. Jimenez, A. Ansmann, R. Engelmann, D. Donovan, A. Malinka, J. Schmidt, P. Seifert, and U. Wandinger // *Atmos. Chem Phys.* — 2020. — Vol. 20. — P. 15247–15263. — DOI: 10.5194/acp-20-15247-2020.

30. The dual-field-of-view polarization lidar technique: A new concept in monitoring aerosol effects in liquid-water clouds — Case studies / C. Jimenez, A. Ansmann, R. Engelmann, D. Donovan, A. Malinka, P. Seifert, M. Radenz, Zh. Yin, R. Wiesen, J. Bühl, J. Schmidt, U. Wandinger, and B. Barja // *Atmos. Chem Phys.* — 2020. — Vol. 20. — P. 15265–15284. — DOI: 10.5194/acp-20-15265-2020.

31. Malinka, A. Improved algorithm for the quasi-discrete Hankel transform / A. Malinka // *J. Opt. Soc. Am. A.* — 2021. — Vol. 38, No. 3. — P. 401–404. — DOI: 10.1364/JOSAA.403065.

32. Experimental and model-based investigation of the links between snow bidirectional reflectance and snow microstructure / M. Dumont, F. Flin, A. Malinka, O. Brissaud, P. Hagenmuller, Ph. Lapalus, B. Lesaffre, A. Dufour, N. Calonne, S. Rolland du Roscoat, E. Ando // *The Cryosphere.* — 2021. — Vol. 15. — P. 3921–3948. — DOI: 10.5194/tc-15-3921-2021.

33. Dual-field-of-view high-spectral-resolution lidar: simultaneous profiling of aerosol and water cloud to study aerosol–cloud interaction / N. Wang, K. Zhang, X. Shen, Y. Wang, J. Li, Ch. Li, J. Mao, A. Malinka, Ch. Zhao, L. M. Russell, J. Guo, S. Gross, Ch. Liu, J. Yang, F. Chen, L. Wu, S. Chen, J. Ke, D. Xiao, Y. Zhou, J. Fang, and D. Liu // *P. Natl. Acad. Sci. USA.* — 2022. — Vol. 119. — Art. e2110756119. — 9 p. — DOI: 10.1073/pnas.2110756119.

34. Multiple scattering effect of water clouds on spaceborne oceanic lidar signals / X. Cui, Q. Liu, Q. Gu, Sh. Ma, P. Xu, K. Zhang, Y. Chen, Y. Zhou, Ch. Liu, C. Jamet, A. Malinka, D. Liu // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* — 2022. — V. 288. — Art. 108253. — 9 p. — DOI: 10.1016/j.jqsrt.2022.108253.

35. Shipborne oceanic high-spectral-resolution lidar for accurate estimation of seawater depth-resolved optical properties / Y. Zhou, Y. Chen, H. Zhao, C. Jamet, D. Dionisi, M. Chami, P. D. Girolamo, J.H. Churnside, A. Malinka, H. Zhao, D. Qiu, T. Cui, Q. Liu, Y. Chen, S. Phongphattarawat, N. Wang, S. Chen, P. Chen, Z. Yao, Ch. Le, Y. Tao, P. Xu, X. Wang, B. Wang, F. Chen, Ch. Ye, K. Zhang, Ch. Liu and D. Liu

// Nature. Light: Sci. Appl. — 2022. — Vol. 11. — Art. 261. — 13 p. — DOI: 10.1038/s41377-022-00951-0.

36. Malinka, A. Stereological approach to radiative transfer in porous materials. Application to the optics of snow / A. Malinka // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. — 2023. — Vol. 295. — Art. 108410. — 14 p. — DOI: 10.1016/j.jqsrt.2022.108410.

37. Модель антарктического прибрежного аэрозоля по данным измерений в районе горы Вечерней / А.В. Малинка, М.М. Король, И.А. Алексеев, В.А. Базылевич, А.И. Калевич, В.А. Пещеренков, В.П. Дик // Журнал прикладной спектроскопии. — 2023. — Т. 90, № 2. — С. 310–315.

38. Comprehensive, Continuous, and Vertical Measurements of Seawater Constituents with Triple-Field-of-View High-Spectral-Resolution Lidar / K. Zhang, Y. Chen, H. Zhao, Zh. Lee, E. Boss, I. Stachlewska, D. Dionisi, C. Jamet, P. D. Girolamo, A. Malinka, Ch. Jiang, H. Wu, L. Wu, F. Chen, X. Zhu, N. Wang, Ch. Chen, Q. Liu, L. Wu, Y. Zhou, W. Chen, and D. Liu // Research. — 2023. — Vol. 6. — Art. 0201. — 11 p. — DOI: 10.34133/research.0201.

39. Melt pond fractions on Arctic summer sea ice retrieved from Sentinel-3 satellite data with a constrained physical forward model / H. Niehaus, L. Istomina, M. Nicolaus, R. Tao, A. Malinka, E. Zege, G. Spreen // The Cryosphere. — 2024. — Vol. 18. — P. 933–956. — DOI: 10.5194/tc-18-933-2024.

Статьи в рецензируемых сборниках

40. Malinka, A. Retrieval of hydrosol characteristics with MFOV Raman lidar / A. Malinka, E. Zege // The 23rd International Laser Radar Conference (ILRC-2006), Nara, Japan, 24–28 July 2006 : Reviewed and Revised Papers / ed.: Ch. Nagasawa, N. Sugimoto. — Nara, 2006. — P. 915–918.

41. Malinka, A. V. Liquid cloud microstructure profiling with multiple-field-of-view Raman lidar / A. V. Malinka, E. P. Zege // The 24th International Laser Radar Conference (ILRC-2008), Boulder, Colorado, USA, 23–27 June 2008 : Reviewed and Revised Papers : in 2 vols. / ed.: M. Hardesty [et al.] — Boulder, 2008. — P. 619–622.

42. Malinka, A. V. Analytical Approximation of the phase function, specified by Fraunhofer diffraction by cloud ice crystals / A. V. Malinka // The 25th International Laser Radar Conference (ILRC-2010), St. Petersburg, Russia, 5–9 July 2010 : Reviewed and Revised Papers : in 2 vols. / ICLAS, Curran Associates Inc., 2011. — P. 717–719.

43. Malinka, A. V. Overlap function of a lidar with a field stop shifted from the focal plane / A. V. Malinka, J. Schmidt // The 25th International Laser Radar Conference (ILRC-2010), St. Petersburg, Russia, 5–9 July 2010 : Reviewed and Revised Papers : in 2 vols. / ICLAS, Curran Associates Inc., 2011. — P. 79–81.

44. Schmidt, J. Dual-field-of-view Raman lidar for measurement of cloud droplet size and liquid-water content / J. Schmidt, U. Wandinger, A. Malinka // The 25th

International Laser Radar Conference (ILRC-2010), St. Petersburg, Russia, 5–9 July 2010 : Reviewed and Revised Papers : in 2 vols. / ICLAS, Curran Associates Inc., 2011. — P. 754–757.

45. Malinka, A. V. Phase function of light scattering by phytoplankton particles / A. V. Malinka, E. P. Zege // Current Problems in Optics of Natural Waters (ONW-2011) : proc. of the VI International Conference, St.-Petersburg, Russia, 6–10 September 2011 / D.S. Rozhdestvensky Optical Society. — St.-Petersburg, 2011. — P. 90–94.

46. Determination of cloud microphysical properties with dual-field-of-view Raman lidar measurements / J. Schmidt, U. Wandinger, A. Malinka, J. Buehl // The 26th International Laser Radar Conference (ILRC-2012), Porto Heli, Greece, 25–29 June 2012 : Reviewed and Revised Papers / Porto Heli, 2012. — 4 p. — 1 CD-ROM.

47. New approach for radiative transfer in sea ice and its application for sea ice satellite remote sensing / E. P. Zege, I. L. Katsev, A. V. Malinka, A. S. Prikhach, G. Heygster // Radiation Processes in the Atmosphere and Ocean (IRS-2012) : International Radiation Symposium (IRS/IAMAS), Berlin, Germany, 6–10 August 2012 / AIP Conference Proc. — 2013. — Vol. 1531. — P. 43–46. — DOI: 10.1063/1.4804703.

48. Optical methods and algorithms for satellite remote sensing of sea ice in arctic region / E. P. Zege, A. V. Malinka, I. L. Katsev, A. S. Prikhach, G. Heygster, L. Istomina // Current Problems in Optics of Natural Waters (ONW-2013) : proc. VII International Conference, September 10–14, 2013, St.-Petersburg, Russia / Nauka. — St.-Petersburg, 2013. — P. 36–40.

49. Sea ice optics / E. P. Zege, A. V. Malinka, I. L. Katsev, A. S. Prikhach // Current Problems in Optics of Natural Waters (ONW-2015) : proc. of the VIII International Conference, St.-Petersburg, Russia, September 8–12, 2015 / Nauka. — St.-Petersburg, 2015. — P. 26–31.

50. Malinka, A. V. Analytical description of light scattering by phytoplankton particles in the WKB approximation / A. V. Malinka // Current Problems in Optics of Natural Waters (ONW-2015) : proc. of the VIII International Conference, St.-Petersburg, Russia, September 8–12, 2015 / Nauka. — St.-Petersburg, 2015. — P. 113–118.

51. Combined ground-based and satellite remote sensing of atmospheric aerosol and Earth surface in the Antarctic / A. Chaikovsky, M. Korol, A. Malinka, E. Zege, I. Katsev, A. Prikhach, S. Denisov, V. Dick, P. Goloub, L. Blarel, L. Chaikovskaya, A. Lapyonok, T. Podvin, N. Denishchik-Nelubina, A. Fedarenka, V. Svidinskaya // Laser Physics and Applications (ICSQE-2016) : proc. of the 19th International Conference and School on Quantum Electronics, Sozopol, Bulgaria, 26–30 September 2016 / Proc. SPIE 10226. — 2017. — Art. 102260T. — 16 p. — DOI: 10.1117/12.2261794.

52. Retrieval of microphysical properties of liquid water clouds from atmospheric lidar measurements: Comparison of the Raman dual field of view and the depolarization techniques / C. Jimenez, A. Ansmann, D. Donovan, R. Engelmann, A. Malinka, J. Schmidt, and U. Wandinger // SPIE Remote Sensing, 11–14 September 2017, Warsaw,

Poland / Proc. SPIE 10429. — 2017. — Art. 1042907. — 9 p. — DOI: 10.1117/12.2281806.

53. Ground-based and satellite optical investigation of the atmosphere and surface of Antarctica / A. Malinka, L. Blarel, L. Chaikovskaya, A. Chaikovsky, N. Denishchik-Nelubina, S. Denisov, V. Dick, A. Fedaranka, P. Goloub, I. Katsev, M. Korol, A. Lapyonok, T. Podvin, A. Prikhach, V. Svidinsky, E. Zege // The 28th International Laser Radar Conference (ILRC-2017), 25–30 June 2017, Bucharest, Romania / EPJ Web Conf. — 2018. — Vol. 176. — Art. 10006. — 4 p. — DOI: 10.1051/epjconf/201817610006.

54. Retrieval of the structure of pixels of the Arctic Ocean ice cover and characteristics of its components from satellite data / E. P. Zege, A. V. Malinka, I. L. Katsev, A. S. Prikhach, G. Heygster, L. Istomina, G. Spreen // Современные проблемы оптики естественных вод (ONW-2019) : труды 10-й Всероссийской конференции с международным участием, С.-Петербург, Россия, 9–11 октября 2019 / ХИМИЗДАТ. — С.-Петербург, 2019. — С. 37-41.

55. Oceanic Lidar: Theory and Experiment / D. Liu, Y. Zhou, Q. Liu, W. Chen, A. Malinka, B. Han, Zh. Mao, P. Xu, Zh. Liu, X. Cui, X. Wang, H. Che, P. Chen, Q. Song, X. Zhu, Ch. Le, Ch. Liu // Proc. of the 29th International Laser Radar Conference (ILRC 2019), June 24–28, 2019, Hefei, China / EPJ Web Conf. — 2020. — Vol. 237. — Art. 07021. — 4 p. — DOI: 10.1051/epjconf/202023707021.

56. Integrated Ground-Based and Satellite Remote Sensing of the Earth Surface and Atmosphere in East and West Antarctica with Lidar and Radiometric Systems / A. Malinka, A. Chaikovsky, A. Prikhach, E. Ilkevich, A. Bril, V. Peshcharankou, N. Mitelskaya, V. Dick, M. Korol, V. Basylevich, A. Kalevich, I. Alekseev, F. Asipenka, B. Ozsoy, M.O. Selbesoglu, O. Oktar, B. Celik, M.F. Karabulut // 5th International Electronic Conference on Atmospheric Sciences, 16–31 July 2022 / Environ. Sci. Proc. — 2022. — Vol. 19, No. 1. — Art. 11. — 6 p. — DOI: 10.3390/ecas2022-12808.

57. Characteristics of the snow cover in East and West Antarctica and their 20-year trends retrieved from satellite remote sensing data / A. Malinka, Y. Ilkevich, A. Prikhach, E. Zege, I. Katsev, B. Özsoy, M. Selbesoğlu, Ö. Oktar, M. Karabulut, E. Günaydın, B. Çelik // 5th International Electronic Conference on Remote Sensing, 7–21 November 2023 / Environ. Sci. Proc. — 2024. — Vol. 29, No. 1. — Art. 43. — 6 p. — DOI: 10.3390/ECRS2023-15862.

Статьи в нерецензируемых журналах/сборниках трудов

58. Алгоритм восстановления эффективного размера снежных зерен и степени загрязнения снежного покрова из спутниковых данных / Э. П. Зеге, И. Л. Кацев, А. В. Малинка, А. С. Прихач // Четвертый белорусский космический конгресс, Минск, 27–29 октября 2009 / ОИПИ НАН Беларуси. — Минск, 2009. — Т. 2. — С. 95–99.

59. Оптический приборно-методический комплекс для изучения природной среды Антарктиды / А. П. Иванов, А. П. Чайковский, Э. П. Зеге, И. Л. Кацев, В. П. Дик, М. М. Король, А. В. Малинка, Ф. П. Осипенко, А. С. Прихач, А. С. Слесарь // IV Всеукраинский съезд экологов с международным участием (Ecology-2013), Винница, Украина, 25–27 сентября 2013 / Винница, 2013. — С. 487–489.

60. Дистанционное зондирование снега и льда в полярных регионах с помощью спутниковых оптических сенсоров / Э. П. Зеге, А. В. Малинка, И. Л. Кацев, А. С. Прихач, Г. Хейгстер, Л. Истомина // Материалы Шестого Белорусского космического конгресса, Минск, 28–30 октября 2014 / ОИПИ НАН Беларуси. — Минск, 2014. — Т.1. — С. 297–300.

61. Спутниковый мониторинг состояния снежного покрова Антарктиды / А. В. Малинка, Э. П. Зеге, И. Л. Кацев, А. С. Прихач // Природная среда Антарктики: современное состояние изученности : труды II Международной научно-практической конференции, Нарочь, Беларусь, 18–21 мая 2016 / Конфидо. — Минск, 2016. — С. 226–230.

62. Оптические исследования атмосферного аэрозоля и подстилающей поверхности в Антарктиде / А. П. Чайковский, Э. П. Зеге, И. Л. Кацев, М. М. Король, А. А. Гайдашов, В. Ф. Радионов, Р. Goloub, В.Ф. Логинов, А.К. Карабанов, Т. Podvin, L. Blarel, A. Laryonok, С. В. Денисов, В. П. Дик, А. П. Иванов, В. П. Кабашников, Я. А. Король, А. В. Малинка, Н. С. Метельская, Ф. П. Осипенко, А. С. Прихач, А. С. Слесарь, В. А. Свидинский, А. С. Федоренко, Л. И. Чайковская // Природная среда Антарктики: современное состояние изученности : труды II Международной научно-практической конференции, Нарочь, Беларусь, 18–21 мая 2016 / Конфидо. — Минск, 2016. — С. 346–355.

63. Валидация алгоритма и программного обеспечения атмосферной коррекции данных многозональных спутниковых систем высокого пространственного разрешения / И. Л. Кацев, А. С. Прихач, Э. П. Зеге, А. В. Малинка, А. П. Чайковский, В. П. Дик, М. М. Король // 7-й Белорусский космический конгресс, 24–26 октября 2017 / ОИПИ НАН Беларуси. — Минск, 2017. — С. 19–22.

64. Тестирование алгоритма атмосферной коррекции данных многозональных спутниковых систем высокого пространственного разрешения / И. Л. Кацев, А. С. Прихач, Э. П. Зеге, А. В. Малинка // 7-й Белорусский космический конгресс, 24–26 октября 2017 / ОИПИ НАН Беларуси. — Минск, 2017. — С. 15–18.

65. Оптическое дистанционное зондирование атмосферы и земной поверхности в Антарктиде / А. В. Малинка, А. П. Чайковский, Э. П. Зеге, И. Л. Кацев, М. М. Король, С. В. Денисов, В. П. Дик, Ф. П. Осипенко, А. С. Прихач, В. А. Базылевич, А. Ч. Сватко // Природная среда Антарктики: экологические проблемы и охрана : матер. III Междунар. науч.-прак. конф., учебный центр «Форум», Минский район, Беларусь, 17–19 сентября 2018 / ГНПО «НПЦ НАН

Беларуси по биоресурсам» ; ред.: Д. А. Лукашанец [и др.]. – Минск, 2018. — С. 249–263.

66. Исследование характеристик снежного покрова Антарктиды по спутниковым данным / Е. А. Илькевич, А. В. Малинка, А. С. Прихач, Б. Осзой, М. О. Селбесоглу, О. Октар, Б. Челик, М. Ф. Карабулут // Природная среда Антарктики: междисциплинарные подходы к изучению : матер. IV Междунар. науч.-практ. конф., Домжерицы, 21-23 сентября 2022 / Институт природопользования НАН Беларуси [и др.] ; редкол.: акад. В. Ф. Логинов [и др.]. — Минск, 2022. — С. 131–134.

67. Исследования атмосферного аэрозоля и снежного покрова Антарктиды методами оптического дистанционного зондирования / А. В. Малинка, А. П. Чайковский, И. А. Алексеев, В. А. Базылевич, В. П. Дик, Е. А. Илькевич, А. И. Калевич, И. Л. Кацев, М. М. Король, В. А. Пещеренков, А. С. Прихач // VII Конгресс физиков Беларуси (26–28 апреля 2023) : сборник научных трудов / НАН Беларуси [и др.] ; редкол.: С. Я. Килин (гл. ред.) [и др.]. — Минск : Ковчег, 2023. — С. 81–82.

68. Оптические свойства атмосферного аэрозоля в районе горы Вечерней, Антарктида / Е. А. Илькевич, А. В. Малинка, М. М. Король, И. А. Алексеев, В. А. Базылевич, А. И. Калевич, В. А. Пещеренков, В. П. Дик // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы : матер. XXIX Международного симпозиума, Москва, 26-30 июня 2023 г. / Институт оптики атмосферы СО РАН ; Москва, 2023. — 169 MB. — 1 CD-ROM. — С. В-425–В-428.

69. Взвешенные в атмосфере частицы и снежный покров: взгляд с Земли и из космоса / А. Иванов, А. Малинка, А. Чайковский, И. Алексеев, В. Базылевич, В. Дик, Э. Зеге, Е. Илькевич, А. Калевич, И. Кацев, М. Король, Ф. Осипенко, В. Пещеренков, А. Прихач // Наука и инновации. — 2023. — №6. — С. 15–18.

70. Илькевич, Е. А. Временные ряды и тенденции изменения характеристик снежного покрова Антарктиды за последние десятилетия / Е. А. Илькевич, А. В. Малинка, А. С. Прихач // Природная среда Антарктики : сб. материалов V Международной научно-практической конференции, аг. Каменюки, Брестская область, 25–27 сент. 2024 г. / ИВЦ Минфина ; редкол.: В. Ф. Логинов, С. А. Лысенко, В. А. Рыжиков, Ю. Г. Гигиняк. — Минск, 2024. — С. 124–129.

Список тезисов докладов

71. Retrieval of snow grain size and pollution amount in Polar regions from MODIS data with atmospheric correction / E. Zege, I. Katsev, A. Malinka, A. Prikhach, G. Heygster, H. Wiebe // European Geoscience Union General Assembly 2009, Vienna, Austria, 19–24 April 2009 / Geophysical Research Abstracts. — 2009. — Vol. 11. — Art. EGU2009-3172. — 1 p.

72. Восстановление размеров капель теплого облака по измерениям многоапертурным рамановским лидаром / А.В. Малинка, Э.П. Зеге, У. Уондингер, Й. Шмидт // Международный симпозиум стран СНГ «Атмосферная радиация и динамика» (МСАРД-2009), Санкт-Петербург, Россия, 22–26 июня 2009 г. / СПбГУ [и др.] ; прог. ком.: акад. Г.С. Голицын (почет. пред.) [и др.]. — С.-Петербург, 2009. — С. 44.

73. Retrieval of the effective snow grain size and pollution amount from satellite measurements in Polar Regions / E. P. Zege, I. L. Katsev, A. S. Prikhach, A. V. Malinka, J. O. Grudo, G. Heygster, H. Wiebe // International Polar Year Conference, Oslo, 8–12 June 2010 / The International Council for Science and the World Meteorological Organization. — Oslo, 2010. — 1 p. — 1 CD-ROM.

74. Determining and validating the effective snow grain size and pollution amount from satellite measurements in polar regions / G. Heygster, H. Wiebe, E. P. Zege, I. L. Katsev, A. S. Prikhach, A. V. Malinka, J. O. Grudo // International Polar Year Conference, Oslo, 8–12 June 2010 / The International Council for Science and the World Meteorological Organization. — Oslo, 2010. — 1 p. — 1 CD-ROM.

75. Determining and validating the effective snow grain size and pollution amount from satellite measurements in Polar regions / G. Heygster, H. Wiebe, A. Kokhanovsky, E. P. Zege, I. L. Katsev, A. S. Prikhach, A. V., Malinka, J. O. Grudo // The 38th COSPAR Scientific Assembly, 18–25 July 2010, Bremen, Germany / University of Bremen [et al.]. — Bremen, 2010. — A21-0055-10. — 2 p. — 1 CD-ROM.

76. Восстановление эффективного размера снежных зёрен и загрязнений снега по спутниковым данным в полярных регионах / Э.П. Зеге, И.Л. Кацев, А.В. Малинка, А.С. Прихач, Я.О. Грудо, Г. Хейгстер, Х. Вейбе // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса : Восьмая Всероссийская Открытая конференция, Москва, 15–19 ноября 2010 г. / ИКИ РАН [и др.]. — Москва, 2010. — VIII.A.244. — С. 26.

77. Malinka, A. Optical models of Arctic summer ice: Theoretical approach / A. Malinka, E. Zege // SIDARUS Workshop, Minsk, 23 August 2011 / Nansen Environmental and Remote Sensing Center ; ed.: S. Sandven. — Bergen, 2011. — 1 p. — 1 CD-ROM.

78. Albedo of summer sea ice: experimental data and core of remote sensing approach / E. Zege, A. Malinka, I. Katsev, A. Prikhach // SIDARUS Workshop, Minsk, 23 August 2011 / Nansen Environmental and Remote Sensing Center ; ed.: S. Sandven. — Bergen, 2011. — 1 p. — 1 CD-ROM.

79. Sea ice albedo (melting ice) / E. Zege, I. Katsev, A. Malinka, A. Prikhach // SIDARUS Workshop, Bremen, 8–9 December 2011 / Nansen Environmental and Remote Sensing Center ; ed.: S. Sandven. — Bergen, 2011. — 1 p. — 1 CD-ROM.

80. Satellite Remote Sensing of Melting Sea Ice / E. Zege, A. Malinka, G. Heygster, I. Katsev, A. Prikhach // SIDARUS Workshop, Tromso, 18–19 June 2012 //

Nansen Environmental and Remote Sensing Center ; ed.: S. Sandven. — Bergen, 2012. — 1 p. — 1 CD-ROM.

81. Malinka, A. Stereology approach to snow optics / A. Malinka // Snow Grain Size Workshop: Measurements and Applications, Grenoble, 02–05 April 2013 / Laboratory of Glaciology and Geophysics of the Environment. — Grenoble, 2013. — 1 p. — 1 CD-ROM. — URL: https://snowgrain2013.sciencesconf.org/conference/snow-grain2013/pages/snow_grain_size_2013_preliminary_program_2.pdf (date of access: 10.12.2024).

82. Remote sensing of snow and ice in polar regions with satellite optical sensors / E. P. Zege, A. V. Malinka, I. L. Katsev, A. S. Prikhach, G. Heygster, L. Istomina // Atmospheric Radiation and Dynamics (ISARD-2013) : International Symposium, St.-Petersburg, 24–27 June 2013 (plenary) / St.-Petersburg State University [et al.] ; prog. com.: acad. G.S. Golitsyn (honor. chair.) [et al.]. — St.-Petersburg, 2013. — P. 7.

83. Radiative transfer in sea ice / E. P. Zege, A. V. Malinka, I. L. Katsev, A. S. Prikhach // Atmospheric Radiation and Dynamics (ISARD-2013) : International Symposium, St.-Petersburg, 24–27 June 2013 / St.-Petersburg State University [et al.] ; prog. com.: acad. G.S. Golitsyn (honor. chair.) [et al.]. — St.-Petersburg, 2013 — P. 62–63.

84. Спутниковое и наземное зондирование атмосферы и подстилающей поверхности Антарктиды / А. П. Иванов, А. П. Чайковский, Э. П. Зеге, И. Л. Кацев, В. П. Дик, М. М. Король, А. В. Малинка, Ф. П. Осипенко, А. С. Прихач, А. С. Слесарь // Аэрозоль и оптика атмосферы : международная конференция, Москва, 21–24 октября 2014 / Институт физики атмосферы РАН [и др.] ; прог. ком.: акад. Г. С. Голицын (сопред.), чл.-корр. РАН И. И. Мохов (сопред.) [и др.]. — Москва : ГЕОС, 2014. — С. 93.

85. Алгоритм восстановления альбедо летнего арктического льда и доли площади, занимаемой талой водой, по данным спутникового зондирования / Э. П. Зеге, А. В. Малинка, И. Л. Кацев, А. С. Прихач, Г. Хейгстер, Л. Истомина // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса : Тринадцатая Открытая Всероссийская конференция, Москва, 16–20 ноября 2015 / ИКИ РАН [и др.]. — Москва, 2015. — XIII.E.178. — С. 260.

86. Оптические свойства морского льда / А. В. Малинка, Э. П. Зеге, И. Л. Кацев, А. С. Прихач, Г. Хейгстер, Л. Истомина // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса : Тринадцатая Открытая Всероссийская конференция, Москва, 16–20 ноября 2015 / ИКИ РАН [и др.]. — Москва, 2015. — XIII.E.119. — С. 287.

87. Algorithms to retrieve the sea ice and snow optical characteristics from satellite optical observations / E. P. Zege, A. V. Malinka, I. L. Katsev, A. S. Prikhach, G. Heygster, L. Istomina // Living Planet Symposium 2016, Prague, Czech Republic, 9–13 May 2016 / ESA [et al.]. — Prague, 2016. — Sec.: Snow 2: Sea Ice, 664. — 2 p. —

1 CD-ROM. — URL: https://lps16.esa.int/page_session86.php#664p (date of access: 10.12.2024).

88. Melt pond fraction and spectral sea ice albedo retrieval from MERIS data: validation, case studies, trends / L. Istomina, H. Marks, G. Heygster, M. Huntemann, P. Schwarz, G. Birnbaum, R. Scharien, C. Polashenski, D. Perovich, C. Melsheimer, E. Zege, A. Malinka, I. Katsev, A. Prikhach // Living Planet Symposium 2016, Prague, Czech Republic, 9–13 May 2016 / ESA [et al.]. — Prague, 2016. — Sec.: Snow 2: Sea Ice, 1965. — 1 p. — 1 CD-ROM. — URL: https://lps16.esa.int/page_session86.php#1965p (date of access: 10.12.2024).

89. Optical Studies of the Atmosphere and Surface in Antarctica / E. Zege, I. Katsev, M. Korol, F. Goloub, A. Ivanov, L. Blarel, S. Denisov, V. Dick, A. Malinka, F. Osipenko, T. Podvin, A. Prikhach, L. Chaikovskaya, A. Fedarenka, A. Lapyonok, V. Svidinsky // The International Conference on Coherent and Nonlinear Optics, The International Conference on Lasers, Applications, and Technologies (ICONO/LAT 2016), Minsk, Belarus, 26–30 September 2016 (invited) / NAS of Belarus [et al.] ; S. Bagayev, N. Kazak, E. Giacobino (general chairs). — Minsk, 2016. — P. 25. — URL: http://iconolat16.phys.msu.ru/ICONO_LAT-2016/Proceedings_files/ICONO-LAT%202016%20Program.pdf (date of access: 10.12.2024).

90. Experimental and model-based investigation of the links between snow bidirectional reflectance and snow microstructure / M. Dumont, F. Flin, A. Malinka, O. Brissaud, P. Lapalus, P. Hagenmuller, B. Lesaffre, A. Dufour, N. Calonne, S. Rolland du Roscoat, and E. Ando // European Geosciences Union General Assembly 2017 (EGU-2017), Vienna, Austria, 23–28 April 2017 / Geophysical Research Abstracts. — 2017. — Vol. 19. — Art. EGU2017-8744-1. — 1 p.

91. Experimental and model-based investigation of the links between snow bidirectional reflectance and snow microstructure / M. Dumont, F. Flin, A. Malinka, O. Brissaud, P. Hagenmuller, A. Dufour, Ph. Lapalus, B. Lesaffre, N. Calonne, S. R. du Roscoat, and E. Ando // AGU Fall Meeting, New Orleans, USA, 11–15 December 2017 / American Geophysical Union. — New Orleans, 2017. — C13C-1409. — 1 p. — URL: <https://agu.confex.com/agu/fm17/meetingapp.cgi/Paper/249505> (date of access: 10.12.2024).

92. Чайковский, А. П. Комплексное дистанционное зондирование атмосферы и земной поверхности наземными и спутниковыми системами / А. П. Чайковский, А. В. Малинка // Программа 6-го Конгресса физиков Беларуси, Минск, 20–23 ноября 2017 г. / Институт физики НАН Беларуси [и др.]. — Минск, 2017. — С. 12.

93. Oceanic Lidar Multiple Scattering from Upper Ocean / Y. Zhou, D. Liu, Q. Liu, W. Chen, A. Malinka, B. Han, P. Xu, Z. Liu, X. Cui, X. Wang, C. Haochi, Q. Song, X. Zhu, C. Le, and C. Liu // International Symposium on Atmospheric Light

Scattering and Remote Sensing (ISALSaRS-2019), Hangzhou, 17–21 June 2019 / Zhejiang University [et al.]. — Hangzhou, 2019. — 1 p. — 1 CD-ROM.

94. Retrieval of the sea ice concentration and melt pond fraction from satellite data using information on cumulative melting degree day / A. Malinka E. Zege, I. Katsev, A. Prikhach, L. Istomina, G. Heygster, G. Spreen // Workshop on Oceanic and Atmospheric Optics of the SPIE/COS Photonics Asia, Hangzhou, 20–23 October 2019 / SPIE [et al.] ; chairs: Zh. Lee and D. Liu. — Hangzhou, 2019. — 1 p. — 1 CD-ROM.

95. Malinka, A. Optical Remote Sensing of the Atmosphere and Earth Surface in the Arctic and Antarctica / A. Malinka // Forum of Advanced Photonics (FAP-2019), Hangzhou, 19 October 2019 / Zhejiang University ; chair: D. Liu. — Hangzhou, 2019. — P. 2.

96. Satellite Remote Sensing of Melt Ponds and Albedo in the Arctic / H. Niehaus, L. Istomina, A. Malinka, E. Zege, T. Sperzel, G. Spreen // European Geoscience Union General Assembly 2022, Vienna, 23–27 May 2022 / EGU General Assembly. — 2022. — Art. EGU22-4719. — 1 p. — DOI: 10.5194/egusphere-egu22-4719.

РЭЗІЮМЭ

Малінка Аляксей Віктаравіч

Асімптатычныя і стэрэалагічныя метады ў тэорыі рассеявання святла і аптычным дыстанцыйным зандаванні

Ключавыя словы: рассеяванне святла, несферычныя часціцы, метады стацыянарнай фазы, стэрэалагія, снег, марскі лёд, воблакі, дыстанцыйнае зандаванне

Мэта працы — распрацаваць рэалістычныя мадэлі прыродных асяроддзяў, якія адыгрываюць істотную ролю ў радыяцыйным балансе Зямлі (снег, марскі лёд, воблакі), якія змогуць забяспечыць хуткі і дакладны разлік іх аптычных уласцівасцяў, і выкарыставаць прапанаваныя мадэлі дзеля апрацоўкі даных аптычнага дыстанцыйнага зандавання.

Метады даследавання — метады стацыянарнай фазы і стэрэалагічны падыход.

Атрыманыя вынікі і іх навізна. У працы атрыманы шэраг новых аналітычных выказаў для святлорассейвальных уласцівасцяў несферычных часціц, а таксама асяроддзяў, якія складаюцца з такіх часціц. Атрыманыя рашэнні прымяняюцца да апісання аптычных уласцівасцяў прыродных асяроддзяў, якія выконваюць істотную ролю ў радыяцыйным балансе Зямлі (снег, марскі лёд, воблакі). На аснове прапанаваных мадэляў распрацаваны новыя метады пошуку характарыстык падобных асяроддзяў па вынікам аптычнага дыстанцыйнага зандавання.

Рэкамендацыі па выкарыстанні. Атрыманыя рашэнні могуць быць скарыстаны як для прамой, так і для зваротнай задачы рассеявання святла. Гэта можа дапамагчы ў вывучэнні размеркавання яркасці ў асяроддзях, якія складаюцца з часціц няправільнай формы, кампазітных матэрыялах і шчыльназапакаваных геафізічных асяроддзях, а таксама ў распрацоўцы метадаў пошуку іх мікра-фізічных характарыстык.

Вобласць прымянення — маніторынг навакольнага асяроддзя, дыстанцыйнае зандаванне Зямлі.

РЕЗЮМЕ

Малинка Алексей Викторович

Асимптотические и стереологические методы в теории светорассеяния и оптическом дистанционном зондировании

Ключевые слова: рассеяние света, несферические частицы, метод стационарной фазы, стереология, снег, морской лёд, облака, дистанционное зондирование

Цель работы — разработать реалистичные модели природных сред, играющих существенную роль в радиационном балансе Земли (снег, морской лёд, облака), которые смогут обеспечить быстрый и точный расчет их оптических свойств, и использовать предложенные модели при обработке данных оптического дистанционного зондирования.

Методы исследования — метод стационарной фазы и стереологический подход.

Полученные результаты и их новизна. В работе получен ряд новых аналитических выражений для светорассеивающих свойств несферических частиц, а также сред, состоящих из таких частиц. Полученные решения применены к описанию оптических свойств естественных сред, играющих существенную роль в радиационном балансе Земли (снег, морской лёд, облака). На основе предложенных моделей разработаны новые методы восстановления характеристик подобных сред по результатам оптического дистанционного зондирования.

Рекомендации по использованию. Полученные решения могут быть использованы как для прямой, так и для обратной задачи рассеяния света. Это может помочь в изучении распределения яркости в средах, состоящих из частиц неправильной формы, композитных материалах и плотноупакованных геофизических средах, а также в разработке методов восстановления их микрофизических характеристик.

Область применения — мониторинг окружающей среды, дистанционное зондирование Земли.

RESUMÉ

Malinka Aleksey Victorovich

Asymptotic and stereological methods in light scattering theory and optical remote sensing

Keywords: light scattering, non-spherical particles, stationary phase method, stereology, snow, sea ice, clouds, remote sensing

The aim of the work is to develop realistic models of natural environments that play a significant role in the Earth's radiation balance (snow, sea ice, clouds), which can provide a fast and accurate calculation of their optical properties, and implement the proposed models in the processing of optical remote sensing data.

Research methods are the stationary phase method and the stereological approach.

The obtained results and their novelty. In the work, a number of new analytical expressions were obtained for the light scattering properties of non-spherical particles, as well as media consisting of such particles. The solutions obtained are applied to the description of the optical properties of natural media that play a significant role in the Earth's radiation balance (snow, sea ice, clouds). Based on the proposed models, new methods have been developed to retrieve characteristics of such media from optical remote sensing data.

Recommendations for use. The solutions obtained can be used for both direct and inverse light scattering problems. This can help in studying the brightness distribution in media consisting of irregularly shaped particles, composite materials and densely packed geophysical media, as well as in developing methods for retrieving their microphysical characteristics.

Application area: environmental monitoring, Earth remote sensing.

МАЛИНКА АЛЕКСЕЙ ВИКТОРОВИЧ

**АСИМПТОТИЧЕСКИЕ И СТЕРЕОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕОРИИ
СВЕТОРАССЕЯНИЯ И ОПТИЧЕСКОМ ДИСТАНЦИОННОМ
ЗОНДИРОВАНИИ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание
ученой степени доктора физико-математических наук
по специальности 01.04.05 – оптика



Подписано в печать 07.07.2025 г. Формат 60 x 90 1/16
Тип бумаги – офисная. Печать – ризография.
Объем: 3 усл. печ. л., 2.4 уч. изд. л..
Тираж 60 экз. Заказ № 3.

Государственное научное учреждение
«ИНСТИТУТ ФИЗИКИ имени Б.И. СТЕПАНОВА
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»
220072, г. Минск, пр. Независимости, 68-2
Отпечатано на ризографе ИНСТИТУТА ФИЗИКИ НАН Беларуси