

чительно упростили расчёт индикатрис рассеяния мелкодисперсной океанской взвеси.

5. Использованный ансамблевый подход, на примере сравнения интенсивности рассеяния и степени линейной поляризации случайно ориентированных частиц сложной структуры, полученных экспериментально, с аналогичными характеристиками, рассчитанными для просветленной сферы, взятой в качестве "средней" частицы, позволил установить близость этих характеристик.

6. По точным формулам проведен расчёт факторов эффективности, интенсивности рассеяния и степени линейной поляризации для просветленной сферы в диапазоне размеров и показателей преломления, наиболее часто используемых в гидрооптике. Эти результаты приведены в виде подробных таблиц в Приложении к работе.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Шифрин К.С., Перельман А.Я., Кокорин А.М. Рассеяние света просветленной сферой // Оптика моря и атмосферы. Л.: ГОИ. 1984. С.98-99.

2. Шифрин К.С., Перельман А.Я., Кокорин А.М. Рассеяние света двухслойными диэлектрическими частицами с непрерывными оптическими свойствами // Оптика и спектроскопия. 1985. Т.59. Вып.3. С.597-602.

3. Шифрин К.С., Перельман А.Я., Кокорин А.М. Оптические свойства частиц сложной структуры. Ансамблевый подход // Письма в ЖТФ. 1985. Т.11. Вып.13. С.790-794.

4. Кокорин А.М. Таблицы оптических характеристик просветленных сфер. Депон. ВИНТИ. № 5758-85. Реферативный журнал. 1985. № 11, Ч.1.

5. Кокорин А.М., Шифрин К.С. Использование модели просветленной сферы для расчёта характеристик рассеяния света частицами океанской взвеси // Тезисы докладов III Всесоюзного съезда океанологов. Секция Физика и химия океана. Л.: Гидрометеоиздат. 1987. С.164-165.

Полиграфический участок ВНИГРИ

Тираж 100

Заказ № 93. Подписано к печати 04.08. Бесплатно М-27086

Формат 60x90/16 Объем 1 лр. изд. лист.

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ИНСТИТУТ ОКЕАНОЛОГИИ им. П.П. ШИРШОВА

На правах рукописи

УДК 535.36

КОКОРИН Анатолий Михайлович

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛИ ПРОСВЕТЛЕННОЙ СФЕРЫ
ДЛЯ ОПИСАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОКЕАНСКОЙ
ВОДЫ

Специальность II.00.08 - океанология

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва - 1988

Работа выполнена в Ленинградском отделе Института океанологии им. П.П.Ширшова АН СССР

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор К.С.Шифрин

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук О.В.Копелевич

кандидат физико-математических наук В.А.Яковлев

Ведущая организация: Ленинградское отделение Государственного океанографического института

Защита состоится "24" мая 1988 г.

в 14⁰⁰ часов на заседании Специализированного ученого Совета

К.002.86.02 по присуждению ученой степени кандидата наук в

Институте океанологии им. П.П.Ширшова АН СССР (И17218, Москва, ул.Красикова, 23).

С диссертаци

океанологии

Автореферат

Ученый секр

Специализир

кандидат ге

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Быстрое развитие оптики рассеивающих сред и её практических приложений обусловило широкое применение методов светорассеивания в океанологии. Особый интерес к оптическим методам зондирования океана связан с использованием их в задачах космической океанологии, морской биологии, геологии, а также в связи с усовершенствованием техники прямых измерений в океане. Решение большого количества фундаментальных и прикладных задач оптики океана основано на изучении светорассеивающих свойств взвешенного и растворенного в морской воде вещества. Угловые и спектральные зависимости светорассеивающих характеристик находятся в тесной связи со структурой взвеси: составом, концентрацией, формой и ориентацией частиц в пространстве, спектром размеров, показателем преломления. Изучение этих связей позволяет с помощью оптических методов определять различные характеристики взвеси, биологическую продуктивность районов океана, оказывается полезной при исследовании радиационного взаимодействия океана и атмосферы и т.д.

В настоящее время не существует общего метода расчёта рассеяния света на частицах реальной морской взвеси. Изучение, интерпретация и практическое использование светорассеивающих характеристик для морской воды невозможно без применения при их исследовании упрощенных, идеализированных моделей. Это объясняется чрезвычайной сложностью картины светорассеивания океанской взвесью. Последняя характеризуется разнообразием состава, обилием форм, широким диапазоном размеров и случайным расположением частиц в пространстве.

Основная часть имеющихся аналитических и численных результатов, при изучении светорассеяния морской водой, относится к моделям сферически однородных и изотропных частиц. Замена реальных частиц взвеси однородными сферами (или другими телами правильной формы) позволяет в большом количестве практических случаев в первом приближении описать картину рассеяния. Однако индикатрисы рассеяния и поляризационные характеристики эквивалентных сфер могут сильно отличаться от наблюдаемых характеристик. Эти отличия особенно велики для больших углов рассеяния. Численные методы, учитывающие форму и внутреннюю структуру взвеси, требуют трудоемких расчётов на ЭВМ и зачастую приводит к плохо обозримым результатам. Кроме того, при использовании различных точных и прибли-

ВНГО
№ 2215
Библиотека

венных методов обычно невозможно уверенно оценить величину ошибок, вызванную неточностями в описании геометрических и оптических характеристик реальных частиц взвеси. Учет этих факторов существенно влияет на картину светорассеивания. Это делает актуальной разработку других эффективных методов расчёта рассеяния на частицах взвеси.

Реальный визируемый объем содержит множество частиц, расположенных случайным образом. Задача рассеяния системой частиц сложной формы при определенных условиях сводится к решению этой задачи для одной "средней" частицы случайной структуры. Статистические свойства этой структуры отражают интегральные характеристики исследуемого ансамбля.

Цель работы. Разработка модели просветленной сферы для эффективного расчёта светорассеивающих характеристик ансамбля частиц океанской взвеси.

Научная новизна

1. Исследовано точное решение задачи о рассеянии электромагнитных волн на двухслойной частице с однородным ядром и просветляющим слоем (просветленная частица).

2. В приближении теории Релея-Дебая (РД) показана целесообразность использования модели просветленной сферы в качестве "средней" частицы при ансамблевом подходе к решению задачи рассеяния на системе изотропно ориентированных несферических частиц моделирующих мелкодисперсную составляющую океанской взвеси.

3. Исследована возможность использования точного решения задачи дифракции света на просветленной сфере для описания оптических свойств частиц сложной структуры. Оценена область применения этого решения для частиц океанской взвеси.

4. Дана методика расчёта точного решения задачи дифракции на просветленной сфере и проведены систематические вычисления светорассеивающих характеристик просветленных сфер для диапазона оптических параметров характерных для крупнодисперсной и мелкодисперсной фракции океанской взвеси при использовании ансамблевой модели.

Практическая значимость. Предложенная в работе модель учитывает факторы несферичности и случайной ориентации в пространстве, свойственные частицам океанской взвеси, устанавливает более точные, чем в методе эквивалентных сфер, связи между оптическими характеристиками океанской воды и микрофизическими характеристиками

взвеси. Проведенные расчёты важны при диагностике разнообразных характеристик океанской воды по оптическим данным, при дистанционном зондировании океана и др.

Полученные в диссертации результаты используются в Институте океанологии АН СССР, в Институте биофизики СО АН СССР, Ленинградском гидрометеорологическом институте и др.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. По своим светорассеивающим свойствам модель просветленной сферы более адекватна системе изотропно ориентированных несферических частиц, чем модель эквивалентных однородных частиц.

2. Использование модели просветленной сферы для оценки коэффициента и индикатрисы рассеяния мелкодисперсной составляющей океанской взвеси в приближении РД существенно упрощает расчёты этих характеристик и увеличивает точность аппроксимации.

3. Модель просветленной сферы более информативна, чем широко используемая модель однородных сфер, поскольку она учитывает минимальный размер частицы и степень её асферичности.

4. Для расчёта светорассеивающих характеристик частиц морской взвеси с малой асферичностью можно эффективно использовать точное решение задачи дифракции света на просветленной сфере. Это значительно расширяет границы применимости этой модели.

Апробация работы. Основные результаты диссертации систематически докладывались на расширенном научном семинаре лаборатории оптики океана и атмосферы Ленинградского отдела ИОАН СССР (1984-1987 гг.), на Пленуме рабочей группы по оптике океана Комиссии по проблемам изучения Мирового океана АН СССР (Батуми, 1984 г.); на III Всесоюзном съезде океанологов в г. Ленинграде (1987 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано пять работ, список которых приведен в конце автореферата.

Структура работы и её объем. Диссертация изложена на 180 страницах машинописного текста, состоит из введения, пяти глав, заключения и приложения. Кроме того, диссертация включает 57 рисунков и список основной использованной литературы из 125 наименований работ отечественных и зарубежных авторов на 13 страницах.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы исследования, дается общая характеристика проблемы, обсуждаются цели и задачи работы, отмечается научная новизна полученных результатов, формулируются положения, выносимые на защиту, излагается краткое содержание по главам.

Первая глава содержит краткий обзор результатов современных исследований по микрофизике океанской взвеси. По данным теоретических и экспериментальных работ рассмотрены основные свойства рассеяния взвесью и факторы их определяющие. Дан обзор основных методов решения дифракционных задач для несферических частиц.

В разделе I.1 излагаются современные представления об океанской взвеси с точки зрения их влияния на формирование оптических характеристик океанских вод. Количественный, гранулометрический и минералогический состав взвеси тесным образом связан с светорассеивающими характеристиками вод. По вещественному составу, форме и размерам взвесь чрезвычайно разнообразна. Основной особенностью спектров взвеси в океане является преобладание мелких частиц. Для оптики океана существенное значение имеют частицы взвеси с размерами от сотых долей микрона до десятков микрон. Почти вся масса взвешенного вещества состоит из двух компонент: мелкодисперсной и крупнодисперсной, которые соответственно определяют рассеяния в области больших и малых углов рассеивания.

Раздел I.2 посвящен анализу экспериментальных данных по интенсивности рассеивания $I(\beta)$ и степени линейной поляризации $P(\beta)$ рассеянного света. Угловое распределение этих характеристик зависит от количества, материала, размеров, формы и ориентации частиц в пространстве. При расчетах последовательный учет всех этих факторов связан с большими трудностями. Показана необходимость для многих задач оптики океана учета формы и ориентации частиц. По данным расчетов и экспериментов дан анализ влияния несферичности частиц на индикатрису рассеяния и степень линейной поляризации. Наиболее существенные отличия этих характеристик наблюдаются в области углов $\beta \approx 45-60^\circ$. Несферичность частиц может также привести к неправильному заключению о поглощении света. Влияние несферичности на степень линейной поляризации и интенсивность рассеяния назад делает невозможным интерпретацию измерений этих характеристик с помощью модели эквивалентных сфер. Существенное влияние на интенсивность рассеяния оказы-

вает ориентация частиц. Так, для случая хаотично ориентированных частиц несферической формы диаграмма рассеяния имеет тенденцию к большей гладкости, характеризуется отсутствием глубоких минимумов. В оптике океана широко используются модели однородных сфер, эллипсоидов и цилиндров вращения, позволяющие в первом приближении описать картину светорассеивания. В целом, использование различных точных и приближенных методов зачастую приводит к плохо обозримым результатам, поскольку невозможно оценить ошибку, вызванную неточностями в описании геометрических и оптических характеристик реальных взвесей. Это делает актуальной разработку методов расчета, свободных от вычисления светорассеивающих характеристик каждой отдельной частицы. Наиболее перспективен здесь ансамблевый метод, рассматривающий некоторую усредненную задачу. В этой задаче рассеяние системой сложных частиц сводится к рассеянию света одной частицей случайной структуры. Статистические свойства этой структуры отражают интегральные характеристики исследуемого ансамбля. Задача рассеяния света в случае равномерной ориентации частиц, как показано в работах К.С.Шифрина и И.А.Микулинского, сводится к рассеянию на "средней" частице. Показатель поляризуемости такой частицы $\alpha(r)$ является радиальной функцией, постепенно убывающей от центра (модель просветленной сферы). Для доказательства близости светорассеивающих характеристик рассматриваемого ансамбля рассеивателей и "средней" частицы в качестве последней были рассмотрены две, ранее не изученные модели просветленных сфер.

Вторая глава посвящена изложению основных сведений по решению точной задачи дифракции света на модели просветленной сферы. В ней приводится алгоритм, методика расчета светорассеивающих характеристик. Проанализированы вопросы устойчивости и погрешности решения. В разделах 2.1 и 2.2 отмечается, что формально решение задачи дифракции для просветленной сферы отличается от решения для многослойной сферы. Различия имеются в радиальной функции, для частиц с плавной неоднородностью вместо уравнений Бесселя получаются другие дифференциальные уравнения. С решением этих уравнений для электрических $D_n(\rho)$ и магнитных $B_n(\rho)$ парциальных потенциалов связаны основные затруднения при исследовании рассеивающих свойств радиально-неоднородных частиц, поскольку $D_n(\rho)$ и $B_n(\rho)$ выражаются через гипергеометрические функции. Приводятся основные результаты работы А.Я.Перельмана, в которой выполнен анализ рассеяния для случая, когда оптическая структура радиально неоднородной частицы определяется зависимостью

относительного показателя преломления $m = m_i / m_a$ от дифракционного параметра ρ , и имеет вид:

$$m(\rho) = \begin{cases} m_i > 0, & 0 \leq \rho \leq \rho_2 / m \\ m_a \rho_2 / \rho, & \rho_2 / m \leq \rho \leq \rho_2 \\ m_a > 0, & \rho \geq \rho_2 \end{cases} \quad (1)$$

В этом случае уравнения для $D_n(\rho)$ и $B_n(\rho)$ превращаются в хорошо известные дифференциальные уравнения Эйлера. Здесь $m_i, m_a = 1$ - показатели преломления ядра и внешней среды; $\rho = k_0 r, k_0 = 2\pi\lambda^{-1}, \rho_2 = k_0 r_2$, где λ - длина волны излучения во внешней среде, r_2 - внешний радиус частицы. Это позволяет найти сравнительно простые выражения для амплитудных коэффициентов a_{1n}, a_{2n} , для которых в этом случае были получены следующие выражения: ($j = 1, 2; n = 1, 2, \dots$)

$$a_{jn} = \frac{(m^{\mu_n} - \bar{m}^{\mu_n}) \mathcal{L}_j^+ [\Psi_n(\alpha)]}{m^{\mu_n} \mathcal{L}_j^+ [\Psi_n(\alpha)] \mathcal{L}_j^- [\xi_n(\alpha)] - \bar{m}^{\mu_n} \mathcal{L}_j^- [\Psi_n(\alpha)] \mathcal{L}_j^+ [\xi_n(\alpha)]} \quad (2)$$

Здесь введены линейные операторы

$$\mathcal{L}_j^\pm [f(\alpha)] = f'(\alpha) + \left[\frac{(-1)^{j-1}}{2} \pm \mu_n \right] \frac{f(\alpha)}{\alpha} \quad (3)$$

и обозначения $\alpha = m_a \rho_2, \mu_n = [(n+0,5)^2 - \alpha^2]^{1/2}$, причем величины $\Psi_n(\alpha)$ и $\xi_n(\alpha)$ - сферические функции Бесселя и Ханкеля. Простота решения (2) - есть следствие особенности выбранной модели (1). Толщина переходного слоя в ней задается соотношением $\Delta = \rho_2(1 - m_a/m_i)$. Жесткая связь между Δ и величинами m_a, m_i и ρ_2 ограничивает общность исследования, но главные особенности эффекта просветления при этом сохраняются.

В разделе 2.3 приводится методика расчёта оптических характеристик модели (1). Расчёт на ЭВМ интегральных и угловых функций сопряжен со значительными вычислительными трудностями и требуют больших затрат машинного времени, поэтому разработке эффективного алгоритма и программы в настоящей работе уделялось большое внимание. Согласно теории дифракции плоской волны на сфере, оптические характеристики рассеянного света в волновой зоне определяются с помощью угловых функций Q_n, S_n и амплитудных коэффициентов a_{1n} и a_{2n} . Для их вычисления использованы следующие специальные функции:

$$P_n^{(1)}(\cos \theta), \Psi_n(\alpha), \xi_n(\alpha), \Psi_n'(\alpha), \xi_n'(\alpha), \quad (4)$$

где $P_n^{(1)}(\cos \theta)$ - присоединенная функция Лежандра первого рода. Схема расчёта светорассеивающих характеристик моделей просветленной и однородных сфер во многом идентичны, поскольку при построении решения в них используются функции (4). Однако для модели (1) задача нахождения амплитудных коэффициентов a_{1n} и a_{2n} значительно упрощается, так как она сводится к непосредственному вычислению сферических функций Бесселя и Ханкеля от действительного аргумента. Это позволяет использовать для получения $\Psi_n(\alpha)$ и $\xi_n(\alpha)$ метод прямой рекурсии, область применимости которого здесь значительно расширяется.

Алгоритм расчёта светорассеивающих характеристик был реализован на ЭВМ БЭСМ6. Результаты вычислений показали, что погрешности, возникающие при нахождении угловых функций Q_n, S_n , практически не накапливаются. Их основной источник - ошибки округления, получающиеся при расчёте функций $\Psi_n(\alpha), \xi_n(\alpha)$. Программа с одинарной точностью для этих функций (12 десятичных цифр в мантиссе) позволила рассчитывать светорассеивающие характеристики просветленных сфер с параметрами $\rho_2 \leq 200$ и $m \leq 1,15$. Однако вычисления $\Psi_n(\alpha), \xi_n(\alpha)$ по методу прямой рекурсии неустойчиво для больших m и ρ_2 и сопровождается неприемлемыми ошибками округления. Использование программы, в которой эти величины описаны с двойной точностью, позволяет существенно расширить область параметров m и ρ_2 ($m \leq 1,7; \rho_2 \leq 1000$). В силу сравнительно низкой сходимости ряда (в формулах для полей) суммирование его членов прекращалось при выполнении условия:

$$|a_{1n}|^2 + |a_{2n}|^2 \leq 10^{-14} \quad (5)$$

Условие (5) обеспечивало учет $n \approx 1,2 \cdot \rho_2$ членов ряда. Проведенные численные эксперименты показывают, что приведенный алгоритм обеспечивает точную воспроизводимость не менее пяти значащих цифр при выполнении условия (5).

Контроль правильности расчётов осуществляется несколькими способами. Проводилось сопоставление результатов расчётов светорассеивающих характеристик модели (1), с малой толщиной просветленного слоя Δ , с аналогичными характеристиками для однородной сферы такого же размера - рассматриваемые характеристики в этом случае оказались близкими по величине. Было сделано несколько независимых проверок, обычно используемых на практике. Это равенство $K_{ос}$ и $K_{рас}$ - факторов эффективности ослабления и рассеяния, стремление при очень больших значениях параметра ρ_2

к пределу 2, близость к нулю значений степени линейной поляризации $P(\beta)$ для углов рассеяния равных 0° и 180° , а также других проверок.

Третья глава посвящается исследованию точного решения задачи дифракции о рассеянии света на модели просветленной сферы. Фактор эффективности $K_{рас}^*$, интенсивности рассеяния $I^*(\beta)$ и степени линейной поляризации $P^*(\beta)$ модели (I) сопоставляются с аналогичными характеристиками для модели однородных сфер. Рассмотрен диапазон оптических параметров: $0,5 \leq \rho_2 \leq 250$; $1,02 \leq m \leq 1,4$. Отмечается, что интегральные и угловые характеристики светорассеяния для модели (I) существенно зависят от внутренней структуры частицы (наличия просветленного слоя), параметров m и ρ_2 . Существует небольшая область (m, ρ_2) , где характеристики $K_{рас}^*, I^*(\beta), P^*(\beta)$ близки аналогичным характеристикам эквивалентным однородных сфер $K_{рас}, I(\beta), P(\beta)$ с $\bar{m} = \int_0^\pi m(\rho) \rho^2 d\rho$. В целом, эти величины существенно отличаются от однородных сфер и добиться улучшения их совпадения подбором некоторого эффективного m практически невозможно. Модель просветленной сферы по своим светорассеивающим свойствам лежит ближе к ансамблю частиц неправильной формы, чем однородные шары. Так, зависимость $I^*(\beta)$ характеризуется для средних и больших углов рассеяния гладкостью формы, отсутствием ярко выраженных минимумов и имеет пологий вид. Степень линейной поляризации, как правило, принимает небольшие значения и положительна в широком диапазоне углов рассеяния.

В разделе 3.2 показано, что существенное влияние на величину $\Delta K = |(K_{рас}^* - K_{рас})| / K_{рас}^*$ оказывает показатель преломления. Для частиц с $m < 1,1$ наблюдается достаточно большой интервал значений ρ_2 , в котором величина $K_{рас}$ для просветленной и однородной сферы оказываются близкими. Так, для модели (I) с $m = 1,06$ и $\rho_2 \leq 20$ величина ΔK не превышает 0,05, для того же дифракционного параметра с ростом m от 1,1 до 1,4 значения ΔK в среднем составляют соответственно 0,09; 0,27. Экстремумы функции $K_{рас}^*(\delta)$ (случай $m > 1,1$) лежат ниже соответствующих экстремумов кривой $K_{рас}(\delta)$. Здесь $\delta = 2 \cdot \rho_2 \cdot |m - 1|$ - фазовый сдвиг падающей волны. При этом наибольшие отклонения K^* от K наблюдаются в области первого минимума. С ростом параметра m у функции $K_{рас}^*(\delta)$ сглаживаются осцилляции, т.е. понижается первый максимум и уменьшается разность между ним и первым минимумом.

В разделе 3.3 рассматриваются угловые характеристики рассеяния света монодисперсных систем просветленных и однородных сфер. Отмечается, что угловые характеристики модели, в отличие от интегральных, значительно более чувствительны к внутренней структуре частицы. Проведено сопоставление интенсивности $I(\beta)$ и индикатрис $\chi(\beta)$ для различных диапазонов углов рассеяния, интенсивность обратного $I(180^\circ)$ рассеяния, угловых зависимостей степени линейной поляризации просветленной и однородных сфер. В частности, отмечается, что при малых $\rho_2 (\leq 1)$ индикатрисы просветленной и однородной сфер практически совпадают. С увеличением ρ_2 они расходятся, причем основное влияние на этот процесс оказывает величина m . Так, например, для случая $m = 1,06 (\Delta/\rho_2 = 0,06)$ и $\rho_2 \leq 30$ кривые $\chi(\beta)$ и $\chi^*(\beta)$ похожи, с увеличением параметра ρ_2 "похожесть" исчезает, причем сначала это происходит в задних углах ($\beta > 100^\circ$). При $\rho_2 > 60$ эти кривые не обнаруживают даже качественного подобия. Отмечается, что зависимость $I^*(\beta)$ характеризуется большей гладкостью, чем $I(\beta)$, у них отсутствует ярко выраженный минимум в области $\beta \approx 120^\circ$. В задней полусфере рассеяния существует значительная область β , в которой выполняется условие $I^*(\beta) > I(\beta)$. Поляризационная характеристика $P^*(\beta)$ с ростом $\rho_2 (> 30)$ существенно отличается от $P(\beta)$. Для $m \geq 1,1$ и $\rho_2 > 10$ у кривых $P^*(\beta)$ наблюдается сильное уменьшение степени поляризации, а также отсутствуют ореольные эффекты. Значения $P^*(\beta)$, как правило, положительно для большого диапазона углов рассеяния. Сильное влияние "просветление" оказывает при рассеянии назад. С ростом m (толщины слоя Δ) осцилляции у кривой $\chi^*(180^\circ, \rho_2)$ сглаживаются, она приобретает плавный вид. Для $\rho_2 > 15$ почти везде выполняется неравенство $\chi^*(180^\circ, \rho_2) < \chi(180^\circ, \rho_2)$, причем для некоторых ρ_2 значение χ^* может быть в несколько раз меньше, чем у χ .

В четвертой главе предложена и разработана модель просветленной сферы для расчёта индикатрисы рассеяния света ансамблем частиц мелкодисперсной взвеси. В приближении теории Релея-Дебая (РД) мелкодисперсная часть океанской взвеси моделируется изотропным ансамблем вытянутых и сжатых частиц. В диапазоне размеров и коэффициентов преломления существенных для океанской взвеси, сравниваются коэффициенты и индикатрисы рассеяния подобного ансамбля с аналогичными характеристиками моделей однородной, двухслойной и просветленной сферы. Показано, что последняя дает луч-

шую аппроксимацию для описания светорассеивающих характеристик изотропного ансамбля, чем однородные и двухслойные частицы. Предложены простые формулы для расчёта интенсивности рассеяния просветленной сферы. Рассмотрены границы применимости их в приближении РД.

В разделе 4.1 отмечается, что частицы океанской взвеси, как правило, имеют сложную структуру и случайно ориентированы в пространстве. Точное определение индикатрис рассеяния света на частицах сложных форм в настоящее время невозможно - нет общей теории. В отличие от традиционных способов метод, предложенный К.С. Шифриным, И.А. Микулиным, не предусматривает проведение расчетов интенсивности рассеяния на каждой отдельной частице. Вычисление индикатрис рассеяния на ансамбле "мягких" несферических частиц (при условии выполнения закона больших чисел) сводится к усреднению параметров отдельных частиц и вычислению среднего значения интенсивности. Если частицы взвеси таковы, что их можно представить реализациями случайной частицы с некоррелированными значениями показателей поляризуемости, то тогда задача рассеяния на ансамбле может быть сведена к определению интенсивности на одной "средней" частице. Показатель поляризуемости такой частицы $\alpha_r(r')$ определяется усреднением показателя поляризуемости рассматриваемых частиц. Нами предлагается в качестве "средней" частицы для ансамбля частиц мелкодисперсной океанской взвеси модель просветленной сферы. Для проверки этого утверждения светорассеивающие характеристики $I(\beta)$ и $\sigma_{рас}$ ($\sigma_{рас}$ - коэффициент рассеяния) изотропно ориентированного ансамбля вытянутых и сплюснутых частиц, моделирующих мелкодисперсную взвесь, сравниваются с теми же характеристиками модели просветленных, двухслойных и однородных сфер. Объемные поляризуемости должны быть равными для сравниваемых моделей. Это требование налагает определенные условия на выбор геометрических параметров и коэффициентов преломления. Все расчёты выполняются для естественного, неполяризованного света методом РД.

В разделе 4.2 обосновывается метод расчёта (приближения РД) и обсуждаются возможности использования моделей изотропно ориентированной системы эллипсоидов и цилиндров вращения (система I и II) для оценки $I(\beta)$ и $\sigma_{рас}$ океанской и морской взвеси.

В разделе 4.3 приводятся формулы для расчёта интенсивности рассеяния моделей случайно ориентированных эллипсоидов и цилиндров вращения, а также двухслойных и однородных сфер в приближе-

нии РД. Рассматривается модель просветленной сферы. Оптическая структура такой частицы определяется зависимостью относительного показателя преломления m от r и записывается как

$$m(r) = \begin{cases} m_i > 0, & 0 \leq r \leq r_1 \\ Ar + B, & r_1 \leq r \leq r_2 \\ m_a = 1, & r \geq r_2 \end{cases}, \quad (6)$$

где $A = (1 - m) / (r_2 - r_1)$; $B = (m r_2 - r_1) / (r_2 - r_1)$;
 $\alpha(r) = [m(r) - 1] / 2\pi$.

Формула для расчёта интенсивности рассеяния для модели (6) имеет вид:

$$I_{пр}(\beta) = C(\beta) [\alpha_1 f(q r_1) V_1 + Q(\beta)]^2, \quad (7)$$

где

$$Q(\beta) = \frac{2}{3} (B - 1) [r_2^3 f(q r_2) - r_1^3 f(q r_1)] + Q^*(\beta),$$

$$Q^*(\beta) = \frac{2}{q^4} A [2q r_2 \sin(q r_2) - 2q r_1 \sin(q r_1) - (q^2 r_2^2 - 2) \cos(q r_2) + (q^2 r_1^2 - 2) \cos(q r_1)],$$

$$C(\beta) = \frac{1}{2} (\cos^2 \beta + 1) k_0^4, \quad \alpha_1 = (m - 1) / 2\pi,$$

$$q = 2k_0 \sin(\beta/2).$$

Функция $f(x)$, использованная в (7), имеет вид

$$f(x) = 3(\sin x - x \cos x) / x^3.$$

Близость "точных" величин $I^*(\beta)$, $\sigma_{рас}^*$ для систем I и II (мы их обозначаем звездочкой) с модельными $I(\beta)$, $\sigma_{рас}$ определяются величиной относительных ошибок $\Delta \sigma = (\sigma_{рас}^* - \sigma_{рас}) / \sigma_{рас}^*$, $\Delta I(\beta) = [I^*(\beta) - I(\beta)] / I^*(\beta)$. Для оценки близости интенсивности выбраны два критерия:

$$\hat{S} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{\ell=1}^N \left[\frac{I(\beta_\ell) - I^*(\beta_\ell)}{I(\beta_\ell)} \right]^2}; \quad \bar{\Delta} = \frac{1}{N} \sum_{\ell=1}^N \left| \frac{I(\beta_\ell) - I^*(\beta_\ell)}{I^*(\beta_\ell)} \right|, \quad (8)$$

где $\beta_\ell = 0(1) 180^\circ$, $N \leq 181$.

Раздел 4.4 посвящен оценке точности и границам применимости приближения РД для рассматриваемых моделей. Рассматривается диапазон оптических параметров $m = 1,02(0,01) 1,2$ и $\beta_2 = 0,2(0,2) 15$. Оценка точности производилась путем сравнения

$I(\rho)$ и $\beta_{рас}$, рассчитанных для модели (6) с аналогичными характеристиками для (2), при этом геометрические размеры ядра и оболочки у этих моделей выбирались одинаковыми. В целом граница применимости РД для модели (6) оказалась несколько шире, чем для однородных сфер. Так, при $m = 1,05; 1,1; 1,15; 1,2$ допустимые значения фазового сдвига δ будут равны 1,6; 2,2; 0,86; 0,54 соответственно. Граница применимости РД при расчёте индикатрис зависит от угла рассеяния. Для каждого из углов $\beta = 0^\circ (5^\circ) 20^\circ, 30^\circ (20^\circ) 170^\circ$ в плоскости (m, ρ_2) были построены 4 области, соответствующие $|\Delta I| = 0,1; 0,3; 0,5; 1$. Использование этих диаграмм позволяет для любого конкретного случая быстро найти возможную границу применимости формулы (7). На основании теоретических и экспериментальных работ, имеющих в литературе, приведены границы применимости приближения РД для однородных сфер и систем I и II. Как показал анализ данных, в целом для этих моделей и систем I и II, усреднения по ориентации приводят к заметному расширению границ применимости приближения РД.

В разделе 4.5 приводятся результаты расчётов и их анализ. Выбор геометрических параметров, сравниваемых моделей, осуществлялся при соблюдении двух условий: 1) применимости РД; 2) равенства объемной поляризуемости. Показатели преломления частиц систем I и II, ядра просветленной и двухслойной сферы, а также однородного шара принимаются равными m_i . Будем характеризовать эллипсоид вращения параметрами a, b (соответственно малая и большая полуоси), $\rho = b/a$ - асферичность. Примем радиус основания цилиндра вращения равным a . Тогда из равенства объемов эллипсоида и цилиндра вращения и однородного шара следует, что высота цилиндра составляет $h = 4\rho a/3$, асферичность $\rho^* = 2\rho/3$, радиус эквивалентного шара $r_{экр} = a\rho^{1/3}$. Из условия равенства объемной поляризуемости величины r_1, r_2 и ρ для просветленной сферы удовлетворяют уравнению

$$r_2^3 + r_2^2 r_1 + r_2 r_1^2 + r_1^3 = 4\rho a^3. \quad (9)$$

Формально требование (9) может быть выполнено при любом r_1 . Был рассмотрен вопрос об оптимальном выборе r_1 для описания систем I и II. Для этого при различных m и a нами рассчитывалась зависимость \bar{S} от ρ . Анализ результатов показал, что величина \bar{S} принимает минимальное значение при $r_1 = a$. Внешний радиус r_2 определялся из (9). Отсюда для соотношения b/r_2

можно записать

$$(1-4\rho)(b/r_2)^3 + (b/r_2)^2 + b/r_2 = -\rho^3. \quad (10)$$

Размеры двухслойной сферы принимались такими же, как у просветленной сферы. Показатель преломления оболочки $m_{об}$ брался равным среднеобъемному показателю преломления оболочки модели (6):

$$m_{об} = 1 + [(b-1)(r_2^3 - r_1^3) + 0,75A(r_2^4 - r_1^4)] / (r_2^3 - r_1^3). \quad (11)$$

В разделе 4.5.2 рассматривается поведение коэффициента рассеяния системы I, II и относительной ошибки при аппроксимации этой характеристики моделями просветленной Δb_1 , двухслойной Δb_2 и однородной Δb_3 сфер в зависимости от $\rho_{экр} = k_0 r_{экр}$. Показано, что аппроксимация РД для просветленных сфер дает наилучшее приближение по сравнению с моделями однородной и двухслойной сфер. Так, для случая $m = 1,05$ и $\rho_{экр} \leq 15$ величина $\Delta b_1 \leq 0,07$, в то время как $\Delta b_2, \Delta b_3$ достигает в отдельных случаях 0,22. Аналогичные результаты получены и при сравнении этих моделей с системой II.

Наряду с этим были рассмотрены: система III - равнообъемных эллипсоидов (цилиндров) вращения разных длин и толщин, а также система IV - эллипсоиды (цилиндры) вращения, имеющие одинаковую толщину $2a = 0,175$ мкм, но разные длины ($\rho = 1,1+4,5$). Для этих систем была рассмотрена зависимость $\beta_{рас}$ и относительных ошибок $\Delta b_1, \Delta b_2, \Delta b_3$ от ρ ($\rho = 1,1(0,1) 4,5$). Результаты расчётов показали (в случае системы III), что деформация частиц от шара до вытянутых форм (с $\rho = 4,5$) приводит к уменьшению $\beta_{рас}$ на 30%. Величина Δb_1 для всех рассматриваемых вариантов была заметно меньше значений $\Delta b_2, \Delta b_3$. Так, для $m = 1,05$ и $V = 23 \cdot 10^{-3}$ мкм³ максимальное значение Δb_1 ($\rho = 4,5$) составила 0,12, тогда как величина Δb_3 в этом случае равна 0,25. Для системы IV максимальная относительная ошибка Δb_1 не превышает 0,05, в то время как для однородной и двухслойной модели эта величина составляет 0,18+0,2.

В разделе 4.5.3 рассматривается вопрос, насколько угловая структура интенсивности рассеяния моделей просветленной и однородной и двухслойных сфер соответствует системе I. Сравнение $I^*(\rho)$ с $I(\rho)$ рассматриваемых моделей по критерию Δ показал явное преимущество модели (6), значения Δ для неё меньше аналогичных для однородной и двухслойных сфер. Сопоставление ин-

тенсивностей рассеяния по параметру ΔI показало, что наибольшие значения ΔI наблюдаются в области интерференционных нулей, но и там эти величины для модели (6) значительно меньше. Так, для случая $m = 1,15$, $\rho_{\text{экв}} = 1,44$, $a = 0,09$ мкм, $\rho = 3$ максимальная величина ΔI составляла 0,16 для просветленной и 0,32 для однородной сферы.

В разделе 4.5.4 оценивается область возможного применения для океанской взвеси точной модели (2), позволяющей рассчитывать характеристики $G_{\text{рас}}, I(\beta), P(\beta)$ для частиц любых размеров. Анализ многочисленных результатов сравнения $G_{\text{рас}}$ модели (6) и систем I, II показал, что эти характеристики лежат наиболее близко друг к другу при задании b/r_2 из следующих регрессионных соотношений:

$$b/r_2 = 0,3\rho + 0,78, \text{ при } 1,2 \leq \rho \leq 4,5 \text{ (система I)} \quad (I2)$$

$$l/r_2 = 0,155\rho^* + 0,24, \text{ при } 0,68 \leq \rho^* \leq 3 \text{ (система II)} \quad (I3)$$

Область значений параметров модели (2), которая совпадает с областью, определяемой соотношением (I2) и (I3), составляет:

$$1,02 \leq m \leq 1,12 \quad \text{при } 1,1 \leq \rho \leq 1,4 \quad (I4)$$

$$1,12 \leq m \leq 1,25 \quad \text{при } 1,4 \leq \rho \leq 2$$

Раздел 4.6 посвящен оценке точности модели (6) на примере сравнения фактора эффективности последней с аналогичной характеристикой, полученной в результате измерений на типичных суспензиях клеток морских бактерий вида *Pseudomonas sp.*, *Vibrio sp.*, *Flavobacterium sp.*, *Deleya vinustus*, *Moraxella sp.*, *Bacillus mycoides*, проведенных О.В.Копелевичем с сотрудниками. Рассматриваемые бактерии имеют палочкообразную форму, их показатели преломления и размеры соответствуют "мягким" частицам. Согласно приведенным в разделе оценкам, возникновение их преимущественной ориентации в визируемом объеме маловероятно. Все это позволяет использовать для оценки их светорассеивающих свойств систему II, а следовательно, и модель просветленной сферы. Для оценки факторов эффективности рассеяния суспензий клеток бактерий были рассчитаны спектральные характеристики $K_{\text{рас}}(\lambda)$ для системы II и моделей просветленной и однородной сфер в диапазоне длин волн 0,4-0,7 мкм.

Анализ полученных результатов показал, что в целом кривые $K_{\text{рас}}(\lambda)$ системы II хорошо совпадают с экспериментальными данными. Исключение составляют результаты измерений для бактерий

Pseudomonas sp.. Здесь наблюдается сильное отклонение экспериментальных данных от теоретических расчетов, которое нельзя объяснить ошибками, связанными с погрешностями измерения размеров и показателя преломления. В остальных случаях относительные ошибки для модели (6) при $\lambda = 0,55; 0,7$ мкм не превышают 9%, в то время как для однородной сферы составляют 12-16%. Для длины волны $\lambda = 0,4$ мкм погрешности аппроксимации возрастают и составляют в отдельных случаях 31%.

Было исследовано влияние показателя преломления, размеров и формы модели просветленной сферы, на точность аппроксимации светорассеивающих характеристик бактерий. Ошибки, возникающие при оценке показателя преломления, сильно сказываются на результатах вычислений. Так, для вида *Deleya vinustus* изменение m на $\pm 0,05$ приводит к изменению $K_{\text{рас}}(\lambda)$ на 25-31%, для вида *Moraxella sp.* в среднем на 24%. Изменение длины частиц системы II на $\pm 0,3$ мкм приводит к отклонению кривой $K_{\text{рас}}(\lambda)$ в отдельных случаях на 20%. Влияние формы тоже существенно - относительные ошибки при расчете $K_{\text{рас}}(\lambda)$ для однородных сфер отличаются от аналогичных для системы II в целом в 1,5-2 раза.

В пятой главе рассматривается возможность использования модели просветленной сферы (2) в качестве "средней" частицы при ансамблевом подходе для оценки оптических свойств частиц сложной структуры. Используя данные прямых измерений, полученных в микроволновом эксперименте Gise R.H. и др., проводится сопоставление интенсивности рассеяния и степени поляризации с аналогичными характеристиками для модели (2). Расчеты показывают близость этих характеристик для частиц сложной структуры и для просветленной сферы. Они демонстрируют, что использование модели (2) дает физически правильную картину явления светорассеяния изотропного ансамбля частиц сложной структуры.

Раздел 5.2 посвящен анализу экспериментальных данных характеристик $I(\beta)$ и $P(\beta)$ частиц сложной структуры. В ряде работ Gise R. и др. удалось значительно продвинуться в оценке точности метода эквивалентных сфер. Эти работы были посвящены оптике частиц межпланетной пыли, формирующей зодиакальный свет. С помощью уникальных модельных микроволновых экспериментов были получены надежные данные об интенсивности рассеяния и степени поляризации света. Авторам не удалось подобрать как монодисперсную, так и полидисперсную систему однородных диэлектрических сфер в широком клас-

се возможных распределений, которые хотя бы грубо воспроизводили экспериментальную кривую. В целом, полученные экспериментальные данные отличаются изотропностью интенсивности в области средних и задних углов рассеяния; отсутствует "глубокая яма", характерная для $I(\beta)$ однородной сферы; наблюдаются небольшие по величине значения для степени линейной поляризации ($|P(\beta)| \leq 0,2$).

В разделе 5.3 рассмотрен ансамблевый подход, примененный Шифриным и Микулинским. При достаточно большом числе частиц ансамбль приобретает элементы симметрии, который не имеют отдельные частицы. Сама задача о рассеянии света системой сложных частиц сводится к рассеянию на одной "средней" частице случайной формы. В целом эта задача доказана для системы оптически "мягких" частиц, имеющих структуру "белого шума". С этих позиций нами рассмотрены оптические свойства ансамбля ворсистых частиц. Модель (2) используется в качестве "средней" частицы для оценки светорассеивающих характеристик системы "fluffy" частиц. Для решения этой задачи были рассчитаны величины $I(\beta)$, $P(\beta)$ в диапазоне параметров: $m_i = 1,5$; $m_a = 1$; дифракционный параметр $\rho_a = 19,3 (0,1)48$; угол рассеяния $\beta = 20(5)170^\circ$. Значения $I(\beta)$, $P(\beta)$ сравнивались с экспериментальными данными $I^*(\beta)$, $P^*(\beta)$. При этом вычислялись три характеристики близости кривых. Первая - число углов рассеяния N_1 , для которых относительное отклонение попадало в интервал $0,4 \leq \delta \leq 0,6$. Вторая - оценка \hat{S} (8). Третья характеристика \hat{K} идентична коэффициенту корреляции. Анализ полученных данных показал, что максимальная близость сравниваемых кривых $I(\beta)$, $P(\beta)$ отмечалась для интервала $34 \leq \rho_2 \leq 45$. Кривые $I(\beta)$ и $P(\beta)$ существенно ближе, чем аналогичные, полученные по методу эквивалентных сфер. У модельной $I(\beta)$ так же, как у $I^*(\beta)$, нет минимума в области углов $60-150^\circ$. Степень линейной поляризации $|P(\beta)| \leq 0,2$ для диапазона углов $10^\circ \leq \beta \leq 170^\circ$.

В разделе 5.4 сравниваются светорассеивающие характеристики модели (2) с результатами микроволновых измерений, проведенных Weiss K. и др. на частице кварца, представляющей собой тело с шероховатой поверхностью и малой асферичностью. Характеристики $I^*(\beta)$ и $P^*(\beta)$ для этих частиц были усреднены по ориентации. Сопоставление результатов вычислений для эквиобъемных просветленной и однородных сфер с $\rho_2 = 150$ показали, что кривые $I(\beta)$ для модели (2) лежат значительно ближе к экспериментальным данным, чем аналогичные характеристики для однородных сфер. Приведенные результаты дают качественные оценки адекватности модели просвет-

ленной сферы реальной частице сложной формы, имеющей случайную ориентацию в пространстве.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. В рамках статистического подхода, развитого в работах Шифрина и Микулинского, для ансамбля изотропно ориентированных рассеивателей произвольной формы в качестве "средней" частицы случайной структуры предложена и обоснована модель просветленной сферы.

2. Предложен алгоритм и создана программа для вычисления светорассеивающих характеристик точного решения задачи дифракции света на просветленной сфере.

3. Исследованы оптические свойства модели просветленной сферы. Проведено сопоставление её светорассеивающих характеристик с аналогичными характеристиками для однородной сферы, данными расчётов и эксперимента на случайно ориентированных частицах неправильной формы. Показано их существенное различие при сравнении с однородными сферами и близость светорассеивающих свойств с ансамблем изотропно ориентированных частиц произвольной формы. Так, поведение кривых интенсивности рассеивания в целом характеризуется гладкостью и пологостью формы в средней и задней области углов рассеяния, а также отсутствием ярко выраженного минимума $\beta \approx 120^\circ$. Поляризационная характеристика $P(\beta)$ отличается отсутствием ореольных эффектов. Величина $P(\beta)$, как правило, положительна для большого диапазона углов рассеяния. Имеет место существенное уменьшение степени поляризации и интенсивности рассеяния назад.

4. В приближении теории РД для оценки коэффициента и индикатрисы рассеяния системы изотропно ориентированных несферических частиц, моделирующих мелкодисперсную составляющую океанской взвеси была использована модель просветленной сферы. Исследована граница применимости этого приближения, дана оценка точности модели (6) на примере сравнения результатов расчётов с экспериментальными данными. Результаты вычислений показали, что эта модель дает более точную аппроксимацию индикатрис и коэффициентов рассеяния, чем модели однородной и двухслойной сферы. Модель просветленной сферы более информативна, поскольку для описания оптических характеристик использует параметры, характеризующие минимальный размер частиц и степень их асферичности. Полученные формулы зна-

чительно упростили расчёт индикатрис рассеяния мелкодисперсной океанской взвеси.

5. Используемый ансамблевый подход, на примере сравнения интенсивности рассеяния и степени линейной поляризации случайно ориентированных частиц сложной структуры, полученных экспериментально, с аналогичными характеристиками, рассчитанными для просветленной сферы, взятой в качестве "средней" частицы, позволил установить близость этих характеристик.

6. По точным формулам проведен расчёт факторов эффективности, интенсивности рассеяния и степени линейной поляризации для просветленной сферы в диапазоне размеров и показателей преломления, наиболее часто используемых в гидрооптике. Эти результаты приведены в виде подробных таблиц в Приложении к работе.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Шифрин К.С., Перельман А.Я., Кокорин А.М. Рассеяние света просветленной сферой // Оптика моря и атмосферы. Л.: ГОИ. 1984. С.98-99.

2. Шифрин К.С., Перельман А.Я., Кокорин А.М. Рассеяние света двухслойными диэлектрическими частицами с непрерывными оптическими свойствами // Оптика и спектроскопия. 1985. Т.59. Вып.3. С.597-602.

3. Шифрин К.С., Перельман А.Я., Кокорин А.М. Оптические свойства частиц сложной структуры. Ансамблевый подход // Письма в ЖТФ. 1985. Т.11. Вып.13. С.790-794.

4. Кокорин А.М. Таблицы оптических характеристик просветленных сфер. Депон. ВИНТИ. № 5758-85. Реферативный журнал. 1985. № 11. Ч.1.

5. Кокорин А.М., Шифрин К.С. Использование модели просветленной сферы для расчёта характеристик рассеяния света частицами океанской взвеси // Тезисы докладов III Всесоюзного съезда океанологов. Секция Физика и химия океана. Л.: Гидрометеоиздат. 1987. С.164-165.