

На правах рукописи



Шибанов Евгений Борисович

**ОПТИЧЕСКИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ
МОРСКОЙ ВОДЫ И АТМОСФЕРЫ НАД МОРЕМ**

Специальность 25.00.28 – океанология

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Севастополь – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре «Морской гидрофизический институт РАН»

Официальные оппоненты: Карабашев Генрик Сергеевич

доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Институт океанологии им. П.П. Ширшова
Российской академии наук, главный научный
сотрудник Лаборатории оптики океана

Самохвалов Игнатий Викторович

доктор физико-математических наук, профессор,
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский
государственный университет», заведующий кафедрой
оптико-электронных систем и дистанционного
зондирования радиофизического факультета

Суторихин Игорь Анатольевич

доктор физико-математических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Институт водных и экологических проблем
Сибирского отделения Российской академии наук,
главный научный сотрудник Лаборатории гидрологии
и геоинформатики

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук

Защита состоится 8 октября 2020 г. в 13 часов 00 минут на заседании Диссертационного совета Д 900.010.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре «Морской гидрофизический институт РАН» по адресу: 299011, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Морской гидрофизический институт РАН» и на сайте института http://mhi-ras.ru/thesis_defenses.html.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук

Алексеев Дмитрий Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Оптические методы широко применяются в научных и прикладных исследованиях окружающей среды. Информация об оптических характеристиках морской среды используется в экологических и океанографических моделях, а также для прогноза и контроля экологической ситуации в морской среде. Поскольку результаты расчетов по математическим моделям чувствительны к погрешности входных данных, как к случайным, так и к закономерным ошибкам, обусловленным методикой измерений, упрощениями, положенными в основу теории и особенностями обработки результатов экспериментов, то наличие более полной и точной информации об оптических свойствах среды должно сказаться и на качестве финального продукта.

Одним из важнейших параметров, характеризующих процессы светорассеяния в море, является угловой показатель рассеяния света. Он зависит от микрофизических характеристик среды и входит в подынтегральное выражение уравнения переноса излучения. Его измерения стали востребованы после того, как появилась возможность с высокой точностью решать уравнение переноса излучения в анизотропно-рассеивающих средах. До момента создания в 2002 г. в отделе оптики моря Морского гидрофизического института (МГИ) нового измерителя углового показателя рассеяния (MVSM) не существовало приборов, измеряющих этот параметр в широком угловом и спектральном диапазонах. В ходе совершенствования прибора, его тестирования и калибровки был обнаружен ряд логических противоречий между предсказаниями термодинамической теории и экспериментом. Необъяснимым оказался тот факт, почему неоднородности размером большим, чем поры фильтра остаются в воде после ее фильтрации. Из анализа литературных источников также следует, что проблема получения оптически чистой воды всегда сводилась к устранению пика рассеяния вперед, т.е. в удалении из воды более крупных неоднородностей.

С развитием технологии изготовления гидрооптической аппаратуры, широким распространением численных методов решения прямых оптических задач появилась, наконец, возможность экспериментально проверить разработанную ранее теорию световых полей в море. При сопоставлении данных натурных измерений в чистых океанских водах с модельными расчетами возникает потребность использовать заниженные значения коэффициента поглощения света водой, входящего в выражение для показателя вертикального ослабления света [Morel, et al, 2007], но, с другой стороны, чтобы получить соответствие значений коэффициентов яркости необходимо увеличить показатель обратного рассеяния [Stramski, 1994, Zhang X, 1998]. Поскольку с ростом рассеяния увеличивается показатель вертикального ослабления света, то эти две тенденции взаимоисключающие. Для объяснения обнаруженных противоречий требуется более ясное понимание процессов рассеяния света в жидкости вообще и в воде в частности.

Информация об оптических свойствах морской воды может быть получена с борта аэрокосмических носителей. Коэффициент яркости водной толщи зависит в основном от коэффициентов поглощения и обратного рассеяния. Пользуясь априорной информацией о спектральных свойствах оптически активных примесей в мор-

ской воде, в принципе, можно определить их концентрацию аналитическим методом. Определенные опасения вызывает то обстоятельство, что коэффициенты поглощения света «чистой» воды и примесей получены из экспериментальных результатов по измерению пропускания света через среду.

С применением дистанционных методов исследования цвета моря атмосферная коррекция стала составной частью гидрооптических задач. В прибрежной зоне доля полезного сигнала от моря, как правило, невысока, что предъявляет повышенные требования к точности оценки вклада атмосферы. Данные, собранные глобальной сетью солнечных радиометров (AERONET) [Holben, 1998], позволяют сделать вывод, что функция распределения аэрозольных частиц по размерам всегда бимодальна вследствие фазовых переходов водяного пара и коагуляции частиц. Несмотря на совершенствование аэрозольных моделей, создание глобальной системы наблюдения за оптическими свойствами аэрозоля и заметный прогресс в численных методах решения уравнения переноса излучения, точность стандартных методов атмосферной коррекции, использующих только инфракрасные каналы, недостаточно высока для восстановления цвета моря из космоса [Kopelevich, 2004]. По-видимому, основной причиной недостаточной точности алгоритмов атмосферной коррекции является снижение детерминированности поведения системы, находящейся вдали от термодинамического равновесия.

Степень разработанности темы диссертации. В настоящее время основные усилия специалистов по оптике моря направлены на решение сильно упрощенной физической задачи, но в усложненной математической постановке. К такому роду задач относится разработка алгоритмов расчета рассеяния на несферических частицах и совершенствование численных методов решения трехмерного уравнения переноса для различной геометрии. Оптические неоднородности морской воды традиционно связывают со свойствами локальных объектов. Такой подход к оптике моря не в полной мере учитывает многообразие хаотического поведения сложных нелинейных систем, каковой является морская вода.

Цели и задачи исследования. Основная цель работы — исследовать оптические эффекты, обусловленные микромасштабными неоднородностями морской воды и приземной атмосферы в приложении к задачам дистанционного зондирования моря. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- 1) разработать методику определения показателя рассеяния света в широком угловом и спектральном диапазоне,
- 2) разработать теорию рассеяния света на мелкомасштабных структурных неоднородностях чистой воды и построить модель, объясняющую одновременно высокую анизотропию светорассеяния и высокую прозрачность чистой морской воды,
- 3) выполнить лабораторные эксперименты, подтверждающие теоретические выводы. Получить экспериментальные оценки пространственно-временных характеристик структурных неоднородностей чистой воды,
- 4) получить принципиально новые данные о спектрально-угловом показателе рассеяния света для различных районов Мирового океана,
- 5) создать и обосновать новый метод атмосферной коррекции с использованием коротковолновой области спектра,

б) усовершенствовать методы расчетов параметров световых полей в море и атмосфере в приложении к задачам дистанционного зондирования моря.

Объект исследований – морская вода и методы определения ее оптических свойств. **Предмет исследований** – процессы рассеяния и распространения света в случайно-неоднородных средах с неравновесной статистикой распределения молекул.

Научная новизна полученных результатов. Следующие результаты диссертационной работы, полученные лично соискателем, обладают принципиальной научной новизной и получены впервые:

1) создана и апробирована методика определения рассеивающих свойств морской водой в широком угловом и спектральном интервалах, которая включает в себя:

– методы калибровки измерителя спектрального углового показателя рассеяния света,

– метод управления чувствительностью ФЭУ для регистрации сигнала в широком диапазоне;

– метод оценки оптических характеристик «опорной» жидкости;

– алгоритм обработки данных измерений с учетом многократного рассеяния,

2) в ходе гидрооптических экспедиций измерены величины углового показателя рассеяния света морской водой для Черного, Средиземного, Балтийского моря, Мексиканского залива, для вод Атлантического океана вблизи восточного побережья США. Впервые эти величины получены в спектральном интервале от ближнего УФ до ближнего ИК (380–780 нм), и в широком интервале углов рассеяния (0,5–178°). На основании анализа данных натурных измерений впервые показано, что спектральная зависимость рассеяния света в морской воде в диапазоне углов 15–30° может иметь локальный минимум. Этот результат также подтверждается расчетами по предлагаемой в диссертации модели оптических неоднородностей воды,

3) впервые рассмотрен механизм рассеяния света в жидкости, обусловленный характерным для всех конденсированных систем пространственным согласованием неоднородностей, называемых в физике твердого тела линейными и планарными дефектами. Разработана концепция оптических неоднородностей воды. Базовым элементом системы неоднородностей воды является оптическая квазичастица, рассеивающая свет за счет пространственно-временных корреляций в флуктуациях диэлектрической проницаемости, которые обусловлены дальним порядком межмолекулярного взаимодействия. Предложена простая математическая модель неоднородностей воды, в результате чего впервые удалось теоретически описать спектрально-угловую зависимость рассеяния света, наблюдаемую в «чистой» воде. Оценены параметры модели. Экспериментально подтверждено, что неоднородности, формирующие рассеяние света на малые углы, согласованы так же и друг с другом, то есть имеют нелокальный характер. Для среды с нелокальными неоднородностями предложена полуэмпирическая теория переноса излучения, которая одновременно объясняет высокие значения коэффициента яркости и сверхвысокую прозрачность чистой океанской воды,

4) показано, что высокая корреляция величин аэрозольной оптической толщины (АОТ) на различных длинах волн наблюдается вследствие ограничения – изме-

рения проводятся при отсутствии облаков. Предложен механизм трансформации аэрозоля, объясняющий суть изменчивости его оптических свойств при измерении цвета моря со спутника, что обосновывает необходимость параметризации коэффициента яркости моря в коротковолновой области спектра при проведении процедуры атмосферной коррекции. С этой целью предложена двухпараметрическая модель, описывающая коэффициент яркости моря вне полосы поглощения хлорофилла-а. С использованием этой модели усовершенствован алгоритм атмосферной коррекции в задаче дистанционного зондирования Черного моря в оптическом диапазоне. Алгоритм апробирован на данных измерений оптического сканера SeaWiFS,

5) получили дальнейшее развитие численные алгоритмы решения прямых задач оптики атмосферы и океана, ориентированные на создание мало параметрических моделей оптических характеристик моря и атмосферы. В частности:

- предложен альтернативный способ расчета коэффициентов электромагнитных мод, не использующий метод Ленца. Получены аналитические выражения для начальных индексов и числа итераций при вычислениях функций Бесселя и их логарифмических производных методом обратной рекурсии;

- разработан способ устойчивого численного расчета коэффициента яркости моря и других параметров светового поля в плоско-параллельной среде с сильной анизотропией рассеяния света. Даны рекомендации на величины начальной оптической толщины, используемые при расчетах световых полей в море по численному методу «сложения-удвоения»;

- разработан эффективный алгоритм расчета азимутальной зависимости параметров светового поля, не имеющий осциллирующей ошибки вычислений.

Теоретическое значение работы. Изложенный в диссертации подход к рассеянию света в воде учитывает корпоративный характер взаимодействия молекул в жидкости, вследствие чего в жидкой среде и возникает совокупность неоднородностей пониженной размерности – система дефектов локальной плотности. Оптическая модель неоднородностей воды строится на принципах физики конденсированного состояния вещества и поэтому позволяет по-новому взглянуть на такой сложный объект, как морская вода.

Обнаруженные экспериментальные особенности рассеяния света в «чистой» воде и теоретические оценки показывают, что неоднородности пониженной размерности в макроскопически объемно-однородной жидкости существуют всегда. Принципиальным моментом является наличие согласованной, постоянно изменяющейся, системы неоднородностей воды, которая объясняет такие физические нетривиальные эффекты как высокая скорость распространения малых концентраций в плотной среде и повышенная вероятность образования в воде агрегатов из органических соединений.

Практическое значение полученных результатов. Соискателем были даны рекомендации, основанные на понимании анизотропной природы светорассеяния в жидкостях, учтенные при разработке и изготовлении приборов для измерения индикатрисы рассеяния света водой.

Разработанная в диссертации методика измерений спектрально-углового показателя рассеяния света является существенным шагом в решении проблемы эталонного рассеяния. Уточненные значения спектрально-углового показателя рассеяния

частиц латекса, суспензий Маалокса и опорной фильтрованной воды будут очень полезны при калибровке различных коммерческих приборов, измеряющих рассеяние света в жидкости. Бликовую характеристику измерителей углового показателя рассеяния можно определить с помощью фильтрованной воды или очищенной питьевой воды, не прибегая к дорогостоящему методу очистки и хранения «чистой» воды.

Результаты и выводы диссертации использовались:

- 1) для обработки спутниковых измерений коэффициента яркости в рамках совместных проектов НАН Украины и Космического Агентства Франции в 2004 г.,
- 2) для совершенствования методов измерения углового показателя рассеяния в рамках международных проектов с фирмой «АМРАС» (США) в 2003–2005 гг., 2005–2007 гг. и с фирмой “Interspectrum”, Эстония, 2011–2013 гг.,
- 3) при исследовании оптических свойств Балтийского и Черного морей в рамках соглашения о научном сотрудничестве между Польской академией наук и НАН Украины в 2006–2007 гг.,
- 4) при изучении гидрофизических процессов в Черном море и Балтийском море в рамках совместных проектов НАН Украины и Космического Агентства Франции в 2002–2004 гг. и проекта НАТО ESP.EAP.SFPP 982678 в 2009–2012 гг.

Измерения спектрального углового показателя рассеяния несут полезную информацию об особенностях пространственного распределения неоднородностей. Эти измерения помогут отличить рассеяние на изолированных (реальных) частицах от рассеяния на пространственно коррелированных неоднородностях, что, в свою очередь, позволит избежать грубых артефактов при интерпретации экспериментальных данных.

В настоящее время оптические методы также применяются и для изучения особенностей структуры воды на масштабах, много больших расстояния между молекулами. Учет поправки к величине рассеяния света в опорной жидкости может улучшить результаты исследования структуры воды и повысить их достоверность.

Предложенные в диссертационной работе способы параметризации коэффициента яркости моря в коротковолновой области видимого диапазона позволяют построить алгоритм атмосферной коррекции, с помощью которого удастся восстановить спектральный коэффициент яркости, близкий к реальному коэффициенту. Это, в свою очередь, повышает адекватность оценки биооптического состояния вод Черного моря. При этом значительно снижается количество потерянных данных, обусловленных нестандартными атмосферными условиями и засветкой от берега.

Главным достоинством авторских алгоритмов расчета характеристик рассеянного излучения является высокая точность результатов расчетов. Поэтому эти численные алгоритмы могут использоваться для построения электронных таблиц при решении обратных задач. Созданная автором программа расчета рассеяния и поглощения на сферических частицах применялась в оптической лаборатории Stennis Space Center, США, для расчетов рассеяния света на крупных частицах и в институте океанологии им П.П. Ширшова, Москва, Россия, для расчетов рассеяния атмосферного аэрозоля.

Методы исследования. В диссертации использовались теоретические, экспериментальные методы исследования и методы численного моделирования. Компьютерные коды написаны на языках: Си, Паскаль, Ассемблер.

Использовались следующие аналитические методы: методы интегрирования дифференциального и матричного исчисления, метод функций Грина, метод вариации постоянной. В теории переноса применялся метод последовательных кратностей рассеяния. Из статистических методов использовался корреляционный анализ и метод главных компонент.

Были созданы собственные алгоритмы расчета переноса излучения, основанные на численных методах “сложения-удвоения” и матричного оператора. Интегрирование проводилось по квадратурным формулам Гаусса. Обратные матрицы находились методом LU-разложения и методом квадратного корня – для симметричных диагонально-преобладающих матриц. Метод кусочно-кубической интерполяции применялся для пересчета параметров светового поля из дискретного пространства. В программах и алгоритмах расчета рассеяния и поглощения на сферических частицах применялись методы расчетов сферических функций Бесселя по схемам прямой и обратной рекурсии.

Спектральные измерения углового показателя рассеяния были приняты в качестве основного метода исследования оптических неоднородностей воды. Эти измерения проводились не только в видимом диапазоне, но и в ближней ультрафиолетовой области на длине волны 380 нм и в ближней инфракрасной (ИК) области, на длине волны 780 нм. Для исследования биооптического состояния морской воды использовались измерения коэффициента яркости с непрерывным сканированием по длинам волн. Концентрации оптически активных примесей восстанавливались методом нелинейной оптимизации. Анализировались данные измерений относительной прозрачности прибора М-83 и данные АОТ сети AERONET [Holben, 1998]. Для построения карт распределения хлорофилла использовались результаты обработки Level I, Level II данных оптического сканера SeaWiFS..

Положения, выносимые на защиту:

- 1) методика определения спектрально-углового показателя рассеяния света в воде в широком интервале углов и длин волн,
- 2) модель рассеяния света «чистой» водой,
- 3) новая информация о спектральных характеристиках рассеяния света морской водой в малых углах и ее теоретическое объяснение,
- 4) алгоритмы расчета индикатрис рассеяния света и параметров световых полей в море и атмосфере,
- 5) метод атмосферной коррекции с использованием коротковолновой области спектра для задач дистанционного зондирования цвета моря.

Степень достоверности результатов диссертации. Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается хорошим соответствием результатов аналитических и численных расчетов с результатами многочисленных лабораторных и экспедиционных исследований. Результаты исследований автора опубликованы в 14-ти изданиях, содержащихся в наукометрических базах.

Предложенная модель оптических неоднородностей устраняет известные проблемы традиционной гидрооптической теории и является логически непротиворечи-

вой. Изложенный в работе теоретический подход описывает дополнительное рассеяние света, которое объясняется малыми поправками к случайно-однородному расположению молекул в среде и поэтому этот подход не противоречит известным классическим формулам теории термодинамических флуктуаций.

Выводы о наличии пространственно-согласованных неоднородностей в воде получены в результате анализа экспериментальных данных прибора, который прошел тестирование в ведущих лабораториях мира и заслужил высокую оценку среди специалистов по измерению рассеяния света в воде. Эти выводы согласуются с тенденцией развития современной науки [Третьяков, 2003, Kob, 1997, Nelson, 1983], с результатами численного моделирования [Errington, 2002, Malenkov, 2003] и с работами других авторов [Сыроешкин, 2006, Гончарук, 2010]. Расчеты по модели неоднородностей воды хорошо описывают приведенные в работе результаты измерений углового показателя рассеяния света в воде, которые, в свою очередь, согласуются с экспериментальными результатами других исследователей, полученными за всю историю измерений рассеяния света в воде, начиная с классической работы Рамана [Raman, 1922]. Вывод о наличии согласованной системы неоднородностей в воде косвенно подтверждается результатами оптических измерений в особо чистых водах Мирового океана, а именно, сверхвысокой прозрачностью воды и существенным превышением коэффициента яркости над его теоретическими оценками.

Выводы об оптических свойствах атмосферного аэрозоля получены на основе анализа данных хорошо известного за рубежом и ранее широко используемого в СССР фотометра М-83 [Гущин, 1988] и данных, собранных глобальной сетью солнечных радиометров – AERONET [Holben, 1998]. Фотометрические данные статистически хорошо обеспечены.

Теоретические результаты работы получены в рамках проверенных и общепринятых методов теоретической физики, электродинамики, радиофизики, статистической физики. Часть этих результатов в виде алгоритмов и компьютерных кодов на данный момент апробирована в оптических моделях атмосферы и моря в ведущих зарубежных институтах. Достоверность выводов и рекомендаций, полученных в результате расчетов по моделям, подтверждается совпадением с известными точными решениями, опубликованными табличными значениями и результатами расчетов по другим программам и алгоритмам.

Апробация результатов диссертации. Результаты работы были представлены и обсуждены на следующих международных и национальных конференциях и семинарах: Международная конференция «Оптика естественных вод», Санкт-Петербург, 2003 г.; Международная научная конференция «Современное состояние экосистем Черного и Азовского морей», (Крым, Донузлав, 2005); Международный научно-технический семинар «Системы контроля окружающей среды», Севастополь, 2005; IV Международная конференция «Современные проблемы оптики естественных вод», Нижний Новгород, 2007; Всеукраинская конференция «Аэрокосмические наблюдения в интересах стабильного развития и безопасности», Киев, 2008.; 12-я Международная конференция «Математические методы в электромагнитной теории», Одесса, 2008; V Международная конференция «Современные проблемы оптики естественных вод», Санкт-Петербург, 2009; Международная конференция «Функционирование и эволюция экосистем Азово-Черноморского бассейна в условиях глобального изменения климата»,

Севастополь – п. Кацивели, 2010.; V Международная конференция «Современные проблемы в оптике естественных вод», Санкт-Петербург, 2011; V Международная конференция «Современные проблемы в оптике естественных вод», Санкт-Петербург, 2013; V Международная конференция «Современные проблемы в оптике естественных вод», Санкт-Петербург, 2015; XXII Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы», Томск, 2016; XXIII Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы», Иркутск, 2017.; XXIV Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы», Томск, 2018.

Публикации по теме диссертации. По теме диссертации опубликовано 33 научные работы. Из них: статей в периодических научных журналах – 18 [1–18]; статей в сборниках научных трудов – 8 [19–26]; тезисов в трудах научных конференций – 7 [27–33].

Требованиям ВАК при МИНОБРНАУКИ Российской Федерации удовлетворяют 26 [1–26] работ в рецензируемых российских, украинских и международных научных изданиях. В их числе 14 [1–14] работ в журналах, входящих в международные наукометрические базы Web of Science [1, 4–7, 11, 13–14] и Scopus [1–13], 1 [18] работа в рецензируемом научном издании, входящем в перечень изданий ВАК при МИНОБРНАУКИ Российской Федерации, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора наук, и 11 [15–17, 19–26] работ в изданиях, соответствующих п. 10 Постановления Правительства Российской Федерации от 30 июля 2014 г. № 723 «Об особенностях присуждения ученых степеней и присвоения ученых званий лицам, признанным гражданами Российской Федерации в связи с принятием в Российскую Федерацию Республики Крым и образованием в составе Российской Федерации новых субъектов – Республики Крым и города федерального значения Севастополя».

Личный вклад автора. Автором сформулированы основные научные положения и выводы, которые вошли в диссертацию. Теоретические разработки, и выдвинутые в диссертации гипотезы, принадлежат соискателю. Из списка публикаций работы [3, 9, 16, 17, 24–26, 28, 29, 32, 33] были выполнены без соавторов. Используемые в диссертации материалы по светорассеянию воды были получены лично автором в ходе лабораторных и натурных экспериментов на океанографических платформах Черного и Адриатического морей, и в экспедициях на научно-исследовательских судах.

Структура диссертации. Работа состоит из введения, шести разделов, заключения, списка литературы и приложения. Полный объем диссертации составляет 305 страниц, из них 8 страниц приходится на приложение. Список литературы содержит 264 ссылки и занимает 28 страниц. В диссертацию включено 7 таблиц, 75 рисунков и 2 рисунка в приложении.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность сотруднику отдела Оптики и биофизики моря МГИ к.ф.-м.н. В.И. Маньковскому за ценные советы и замечания и помощь в представлении результатов исследований, а также сотрудникам института Контроля Окружающей Среды, Объединенного Исследовательского Центра при Европейской Комиссии, г. Испра, Италия, Дж. Зиборди и Ж-Ф. Бертону за поддержку высказанных научных идей и помощь в организации оптических экспе-

риментов. Хотелось также отметить всех соавторов работ, сотрудничество с которыми было очень полезным и интересным.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** (20 с.) к диссертационной работе раскрыта актуальность темы, сформулирована цель, перечислены задачи и методы исследования, определена научная новизна, показаны степень достоверности и практическое значение полученных результатов, приведены научные положения, выносимые на защиту, обозначен личный вклад соискателя, указаны конференции и семинары, где были представлены результаты работы.

Первый раздел (39 с.) посвящен разработке аппаратуры и методики измерений спектрально-углового показателя рассеяния света морской водой. В нем подробно проанализирована примененная в лабораторных экспериментах и морских экспедициях методика измерений спектральных свойств рассеяния света в воде. Рассмотрены методические проблемы измерений углового показателя рассеяния света морской водой, описаны новые принципы измерений индикатрисы рассеяния света в широком диапазоне углов рассеяния, основанные на использовании вращающейся перископической призмы специальной формы, помещенной с измерительную камеру и сканирующую угловую зависимость рассеянного света [Lee, Lewis, 2003]. В разделе исследованы основные погрешности нового метода измерений, предложена методика определения рассеивающего объема и расчета абсолютной величины углового показателя рассеяния с учетом эффектов многократного рассеяния, описана калибровка измерителя углового показателя рассеяния света.

В **подразделе 1.1** дан краткий обзор полевых измерителей показателя рассеяния света в воде, перечислены принципы измерений характеристик однократного рассеяния света морской водой, вытекающие из ее оптических свойств.

В **подразделе 1.2** рассматриваются основные погрешности измерения углового показателя рассеяния света в воде. Акцентируется внимание на высоких значениях паразитной засветки от дифракции Френеля на выходной апертуре источника.

В **подразделе 1.3** анализируется угловая структура паразитной засветки при теневом методе измерений индикатрис в малых углах в новой его модификации.

Предположение о слабой зависимости блика от длины волны для углов $\theta > 1^\circ$ позволяет оценить угловой показатель рассеяния без использования воды высокой степени очистки. Как видно из Рисунка 1, начиная с угла 3° , измеренный показатель рассеяния закономерно меняется с длиной волны. Известно, что зависимость интенсивности дифрагированного света от длины волны наблюдается в пределах первого лепестка (при ширине пучка около 2 мм в диапазоне углов от 0 до $0,2^\circ$). На больших углах интенсивность не зависит от длины волны, поскольку осцилляции дифракционной кривой сглаживаются вследствие конечного углового и спектрального разрешения. В угловом интервале от $0,75^\circ$ до $2,75^\circ$ суммарный сигнал слабо меняется с длиной волны. Из этих соображений следует, что в интервале углов $0-3^\circ$ в опорной воде преобладает блик, но при $\theta > 3^\circ$ велика доля полезного сигнала.

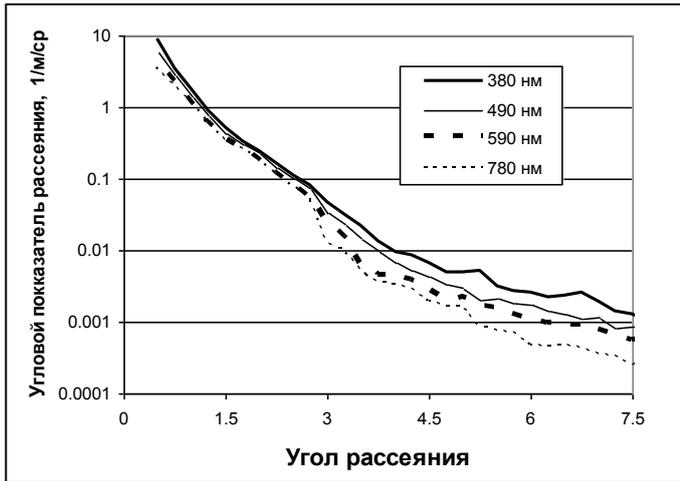


Рисунок 1 – Результаты определения углового показателя рассеяния света в «чистой» воде без учета бликовой составляющей

интегрального показателя рассеяния b будет плохо обусловлена. Для того чтобы гарантировать стабильность решения обратной задачи, значения b должны быть меньше значений b в экстремуме функции

$$b \cdot (l_0 + r) \cdot \exp(-b \cdot (l_0 + r)),$$

где l_0 – расстояние от источника до центра вращения;

r – радиус вращения приемного окна призмы.

Предлагается способ учета эффектов многократного рассеяния, основанный на аналитической оценке вклада двукратного рассеяния. Чтобы оценить долю рассеяния 3-ей и большей кратности интенсивность двукратно рассеянного света следует умножить на коэффициент $\exp[k \cdot b(l_0 + r)]$, где $k \approx 0,6$. В результате получим следующее выражение

$$I(\theta) = E_0 \beta(\theta) \frac{V(\theta)}{S} (1 + b(l_0 + r) \cdot H(\theta) \cdot \exp[0,6 \cdot b(l_0 + r)]) \exp[-(a + b)(l_0 + r)], \quad (1)$$

где E_0 – световая энергия, поступающая в измерительную камеру;

$\beta(\theta)$ – угловой показатель рассеяния;

$V(\theta)$ – рассеивающий объем;

S – площадь поперечного сечения луча;

$H(\theta)$ – эмпирическая функция, которая в области углов 30–150° задается аналитически;

a – показатель поглощения света.

Функция $H(\theta)$ оценивается следующим образом. Предположим, что интегральный показатель рассеяния b линейно зависит от концентрации непоглощающей свет

В подразделе 1.4 приводится методика расчета абсолютной величины углового показателя рассеяния света. Рассчитываются, входящие в формулы однократного приближения, геометрические характеристики прибора, такие как: рассеивающий объем и средняя длина пути фотона в среде.

В следующем подразделе предлагается метод учета многократного рассеяния света в измерительном приборе. Принципиально эффекты многократного рассеяния могут быть учтены в рамках строгой теории. Но результаты обработки являются решением некоторой обратной задачи, которая для достаточно высоких значений интегрального показателя рассеяния b будет плохо обусловлена. Для того чтобы гарантировать стабильность решения обратной задачи, значения b должны быть меньше значений b в экстремуме функции

примеси. Тогда отношение интенсивностей для различных концентраций, исходя из (1), будет равно

$$\frac{b_2}{b_1} \cdot \frac{1 + b_2(l_0 + r)H(\theta) \exp[0.6 \cdot b_2(l_0 + r)]}{1 + b_1(l_0 + r)H(\theta) \exp[0.6 \cdot b_1(l_0 + r)]} \quad (2)$$

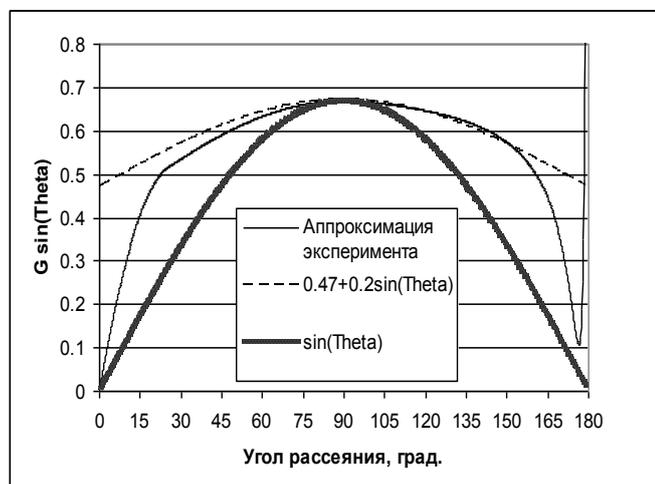


Рисунок 2 – Угловая зависимость функции $H(\theta) = G \cdot \sin(\theta)$, иллюстрирующая влияние многократного рассеяния

использовалась два водных раствора суспензии Маалокса. Концентрация суспензии в первом растворе была такой, что показатели ослабления направленного света в коротковолновой и в ближней ИК области принимали значения $c(412) = 2,49 \text{ м}^{-1}$ и $c(715) = 1,02 \text{ м}^{-1}$. Концентрация суспензии во втором была в 8 раз меньшей.

В подразделе 1.6 рассматриваются методы калибровки измерителей рассеяния света водой, в том числе и с помощью микрочастиц Латекса разного размера. Предложен способ определения зависимости светочувствительности ФЭУ от напряжения. Показано, что калибровка по сигналу рассеяния света на суспензии монодисперсной взвеси может давать заметные методические погрешности.

В заключение раздела 1 приводятся выводы.

1) Разработанный при непосредственном участии автора измеритель углового показателя рассеяния позволяет измерять рассеивающие свойства морской воды в широком угловом ($0,5\text{--}178^\circ$) и в спектральном интервале (380–780 нм). Прибор может использоваться для измерения углового показателя рассеяния света водой в интервале полных показателей рассеяния от 0,01 до $7,5 \text{ м}^{-1}$, включая прибрежные воды с высокими показателями поглощения света, теоретически вплоть до 100 м^{-1} .

2) Предложен способ учета бликовой составляющей методом экстраполяции сигнала из области отсутствия блика в область малых углов.

3) Предложен и реализован метод калибровки измерителя углового показателя рассеяния света, основанный на свойстве линейности ФЭУ.

4) В ходе тестирования и калибровки прибора было установлено, что:

Запишем алгоритм определения углового показателя рассеяния в виде системы уравнений, заменив $l_0 + r$ средним расстоянием $\langle l \rangle$

$$\begin{cases} I_0 = E_0 \exp[-(a + b) \langle l \rangle], \\ \beta(\theta) = \frac{I(\theta)/I_0/V(\theta)}{1 + b \langle l \rangle H(\theta) \exp[0.6 \cdot b \langle l \rangle]}, \\ b = 2\pi \int_0^\pi \beta(\theta) \sin \theta \cdot d\theta. \end{cases} \quad (3)$$

Система (3) решается численно – итерацией величины показателя рассеяния. Для эмпирической оценки функции $H(\theta)$ в области малых и больших углов

– существует закономерное отклонение реального рассеяния света на частицах латекса от теоретически предсказанных его значений;

– рассеяние света на малых углах в «чистой» воде отличается от молекулярного рассеяния на 4–5 порядков, имеет фоновый характер и сильную спектральную зависимость.

С целью разрешения кажущихся противоречий между результатами реальных наблюдений и выводами классической теорией рассеяния света в море, во **втором разделе** (51 с.) предлагается новое представление о чистой воде. Выдвигается гипотеза о существовании глобальной системы неоднородностей, пронизывающих весь объем воды. Дано логико-теоретическое обоснование гипотезы на основе анализа физических принципов статистической неравновесности жидкой воды. Исследовано влияние пространственных корреляций положений частиц на угловой показатель рассеяния в предположении об особом, специфическом характере распределения частиц взвеси (или иных неоднородностей) в водной среде. Произведен учет согласованного пространственного распределения оптических неоднородностей в воде в случае, когда двумерное подпространство разбивает среду на локально однородные области – оптические квазичастицы или кластеры.

В **подразделе 2.1** дается краткий обзор работ по структуре воды. Далее приводятся ссылки на экспериментальные факты, свидетельствующие о значительно более высоких значениях альбедо и более высокой прозрачности особо чистых океанских вод, по сравнению с ожидаемыми величинами. Суть проблемы состоит в том, что для объяснения высокой прозрачности надо удалить из морской воды все мыслимые и немыслимые компоненты. А чтобы объяснить двукратное увеличение отражательной способности надо добавить заметное количество рассеивающих центров.

В **подразделе 2.2** приводятся аргументы, основанные на физических соображениях, указывающие на существование в жидкости на временном интервале несколько пикосекунд необъемных неоднородностей сравнимых с длиной световой волны. Обосновывается постулат о статистически неравновесном распределении молекул в жидкости. Вводится понятие собственных оптических неоднородностей жидкости как совокупности границ между локально упорядоченными группами молекул. Проводится оценка сверху масштаба оптических неоднородностей, дающая значение 3 мм. В терминах механики сплошной среды собственные оптические неоднородности жидкости интерпретируются как результат обратного каскада тепловой энергии.

В **подразделе 2.3** выводятся математические формулы, учитывающие вероятность согласованного распределения частиц и неоднородностей самой воды в пространстве. Постулируется, что в жидкости существует подпространство пониженной размерности, в котором молекулы и мелкие частицы распределены по статистическому закону Пуассона. Вводится понятие оптической «квазичастицы» (кластера), как части объема среды, окруженного свободными молекулами воды и мелкими частицами. Рассмотрены особенности рассеяния света на квазичастицах. В аналитических выражениях для интенсивности рассеяния входят форм-фактор и сумма амплитуд рассеяния. Поэтому вклад слагаемого, обусловленного согласованным распределением частиц с узкой функцией распределения по размерам, зависит от квад-

рата математического ожидания нахождения частицы на поверхности кластера воды. При этом эффект будет максимальным при рассеянии света на малые углы.

Проведены оценки отношения интенсивности рассеяния света на пространственно согласованных частицах к классическому рассеянию на частицах. Показано на примере распределения Юнге в диапазоне радиусов частиц от 0,01 до r_{\max} , что с увеличением дисперсии размеров доля классического слагаемого резко увеличивается. На Рисунке 3 построены графики отношений квадрата суммы амплитуд рассеяния света полидисперсной взвесью сферических частиц к сумме интенсивностей. За единицу принято отношение этих величин для частиц размером много меньшим

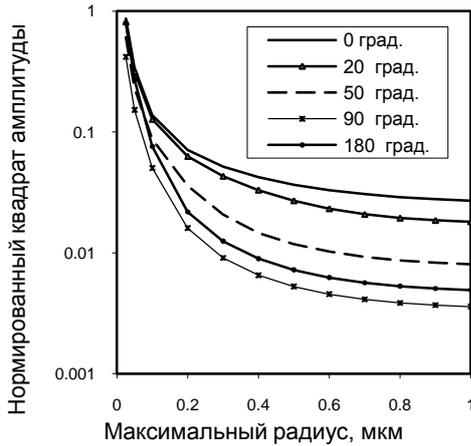


Рисунок 3 – Отношение квадрата суммы амплитуд рассеяния частиц полидисперсной взвеси к сумме их интенсивностей рассеяния на длине волны 0,443 мкм, рассчитанное для частиц с показателем преломления $n=1,17$ в зависимости от максимального радиуса функции распределения Юнге ($\gamma = 4$)

длины волны. Из Рисунка 3 видно, что оптический эффект от коррелированного расположения частиц резко уменьшается с ростом параметра r_{\max} , что является следствием сложения амплитуд с различными фазами. Данный пример можно рассматривать в качестве обоснования применимости классических формул гидрооптики для морской воды, содержащей частицы полидисперсной взвеси.

В подразделе приводятся, также, аналитические выражения, описывающие рассеяние света на квазичастицах сферической формы. Показано, что модель полых сфер в целом удовлетворительно описывает спектрально-угловые характеристики рассеяния света в очищенной фильтрованной воде, измеренные в ходе тестирования и калибровки MVSM. Спектральный закон рассеяния, предсказываемый моделью, близок к спектральному ходу рассеяния мелких частиц в модели двухкомпонентной взвеси [Копелевич, 1983] Вместе с тем, модель полых сфер заметно недооценивает анизотропию рассеяния света водой.

Вывод формул в подразделе 2.4 учитывает согласованность пространственного распределения оптических неоднородностей в воде. Рассмотрена модель, когда двумерное подпространство разбивает среду на локально однородные области – кластеры. Хотя положения «кластеров» относительно друг друга независимы, но они, заполняя весь объем среды, не могут пересекаться.

В приближении Релея–Ганса амплитуда рассеяния света на структурированной частице на расстоянии r равна

$$\begin{pmatrix} E_{\parallel}^s \\ E_{\perp}^s \end{pmatrix} = -\frac{ik^3}{2\pi} \sum_j (m_j - 1) v_j f_j(\theta) \frac{e^{ikr}}{-ikr} \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{\parallel} \\ E_{\perp} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где k – волновое число;

$m_j, \nu_j, f_j(\theta)$ – относительный показатель преломления, объем и форм-фактор j -той фракции.

Поскольку вся среда состоит из «кластеров», то показатель преломления внутри «кластера» и показатель преломления его оболочки отличаются от среднего показателя преломления среды. Пусть ν – объемная доля сферических дефектов, зависящая от их толщины z и от функции распределения «кластеров» по размерам $\partial N/\partial r$. Использовалась логарифмически нормальная функция распределения с одним переменным параметром $\ln \sigma$, описывающим дисперсию распределения. Так как дефект принадлежит одновременно двум «кластерам», то объем дефектов будет в два раза меньшим произведения общей площади сфер на толщину z , т.е.

$$\nu \cong \frac{1}{2} \frac{\int_0^\infty z(r) \frac{\partial N}{\partial r} r^2 dr}{\int_0^\infty \frac{\partial N}{\partial r} \frac{r^3}{3} dr} = \frac{z}{2} \frac{\int_0^\infty \frac{\partial N}{\partial r} r^2 dr}{\int_0^\infty \frac{\partial N}{\partial r} \frac{r^3}{3} dr} = \frac{3z}{2r_{\text{eq}}}.$$

Если радиус кластера, сопоставим с размером молекулы, то разбиение на кластеры теряет смысл и $\lim_{r \rightarrow 0} z(r) = 0$. Неравенство $\lambda \gg r_1 \gg r_{\text{mod}}$ ограничивает значение нижнего предела интегрирования r_1 . Тогда очевидно, что неопределенность в выборе r_1 повлияет на модельный показатель рассеяния как малая поправка, пропорциональная молекулярному рассеянию. При условии малости $|m-1|$ и линейности диэлектрической проницаемости смеси при малых концентрациях примеси, заполняющей дефекты, относительный показатель преломления внутри шара будет равен $m^* = 1 - \nu(m-1)$. Пользуясь формулой (4), получим выражение для показателя рассеяния неполяризованного света на случайно распределенных кластерах, заполняющих весь объем

$$\beta_s(\theta, \lambda) = \frac{32\pi^4 (1 + \cos^2 \theta) (m-1)^2 z^{-2}}{\lambda^4} \int_{r_1}^\infty \frac{\partial N}{\partial r} \left[f_2 r^2 - f_3 \frac{r^3}{2r_{\text{eq}}} \right]^2 dr, \quad (5)$$

где f_2 – форм-фактор поллой сферы;

f_3 – форм-фактор шара.

Из выражения (5) видно, что структурные особенности среды влияют на угловую зависимость и абсолютные величины показателя рассеяния, а показатель преломления m – только на абсолютные величины показателя рассеяния.

В более простой модели изолированных кластеров, с равными и близкими к единице показателями преломления, величина рассеяния будет инвариантна относи-

тельно $C(m-1)^2$, где C – концентрация локальных кластеров. Поэтому спектральный угловой показатель рассеяния совокупности локальных кластеров $\beta_v(\theta, \lambda)$ будет пропорционален величине

$$\beta_v(\theta, \lambda) \sim \frac{1 + \cos^2 \theta}{\lambda^4} \int_{r_1}^{\infty} \frac{\partial N}{\partial r} f_3^2 r^6 dr. \quad (6)$$

Отличие от традиционной модели двухкомпонентной взвеси состоит в том, что:

- 1) индикатриса рассеяния в воде будет сильно вытянутой вперед независимо от наличия крупных частиц,
- 2) формула (5) предполагает одновременное суммирование амплитуд объемной и поверхностной моды,
- 3) исходя из свойства форм фактора ($f(0) \equiv 1$), при $\theta \rightarrow 0$, селективность рассеяния увеличивается и становится пропорциональной λ^{-4} ,
- 4) степень поляризации определяется реально присутствующими в воде частицами и размерами собственных неоднородностей среды.

В **подразделе 2.5** описан эксперимент, проведенный в оптической лаборатории JRC (Испра, Италия), по измерению спектрального углового показателя рассеяния чистой воды при ее смешении с малыми объемами такой же воды, но другой плотности по причине иной температуры или солености. Идея эксперимента заключалась в том, что если скорость объемной диффузии меньше скорости распространения примеси в пространстве структурных дефектов, то показатель преломления дефектов изменится на величину порядка $3 \cdot 10^{-3}$ и двумерный рисунок станет более четким. В качестве исходной использовалась пресная вода, приготовленная на системе MilliQ с концентрацией ионов менее 10^{-11} моль/л. Эта, так называемая высокоомная вода, была пропущена через фильтр с диаметром пор 0,2 мкм. В исходную воду объемом 4 л и температурой 23°C добавлялись примерно 20 мл (0,5–0,6 %) воды с другой плотностью, а именно: пресная вода при температурах 2,5°C и 64°C, морская вода при температурах 3,5°C, 23°C, 35°C и 60°C также пропущенные через фильтр диаметром пор 0,2 мкм. Исследуемый образец перед заполнением измерительной камеры прибора предварительно перемешивался в течение 1–2 мин. Вода поступала в прибор через пластиковую трубку длиной 5 м и внутренним диаметром 7 мм. За временной интервал около 2 мин прибор заполнялся водой. Измерения проводились спустя 1–2,5 мин последовательно в 4-х спектральных интервалах 625, 490, 412, 380 нм с разрешением ± 5 нм. Время сканирования по углам в одном спектральном интервале составляло примерно 1 мин. Для каждого образца измерения продолжались в течение 10–15 мин (3–4 серии измерений).

Было обнаружено сильное увеличение рассеяния света в диапазоне углов 0–90° во всех образцах воды. Интенсивность рассеяния на длине волны 380 нм, усредненная на интервале углов 15–40°, в момент времени спустя 4–6 мин после смешивания увеличивалась от 1,8 до 4,5 раз. Коэффициент, описывающий экспоненциальное уменьшение рассеяния (величина, обратная времени релаксации), оказался равным $0,105 \text{ мин}^{-1}$ при объемной концентрации 0,5% и $0,08 \text{ мин}^{-1}$ при объемной концентрации морской воды 1,25%. В случае добавления в пресную воду морской воды в ко-

личестве 5% от всего объема на протяжении 15 мин величина показателя рассеяния изменялась без заметного временного тренда.

На Рисунке 4 приведены экспериментальные кривые углового показателя рассеяния на длине волны 490 нм. Из рисунка видно, что эффект имеет ярко выраженный мультипликативный характер по крайней мере до 70° . В процедуре аппроксимации показателей рассеяния формулами (5) и (6) варьировались параметры $\ln \sigma$, а параметр $\overline{z|m-1|}$ находился методом наименьших квадратов. Параметры модели для показателя рассеяния опорной воды принимали значения: $\overline{z|m-1|} = 4,42 \cdot 10^{-3} \text{ \AA}$, $\nu \cdot |m-1| = 1,65 \cdot 10^{-5}$, $\ln \sigma = 1,267$, а для модели изолированных кластеров $\ln \sigma = 1,3$.

На Рисунке 5 сравниваются спектральные особенности модельных и экспериментальных показателей рассеяния. Как видно из рисунка, наличие локального минимума показателя степени в экспериментальных данных подтверждается модельными расчетами, что является нетривиальным фактом, поскольку ни одна из современных моделей не в состоянии воспроизвести данный локальный минимум. В частности, модель двухкомпонентной взвеси всегда предсказывает монотонный рост $\gamma(\theta)$.



Рисунок 4 – Изменчивость углового показателя рассеяния в чистой пресной воде на 490 нм при добавлении 0,5% примесной жидкости

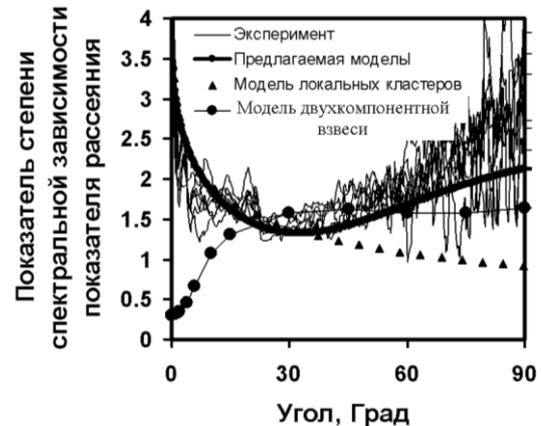


Рисунок 5 – Сопоставление экспериментального и модельного показателя степени спектральной зависимости углового показателя рассеяния света

В подразделе 2.6 обсуждается вопрос, к каким явлениям может привести наличие глобальной системы неоднородностей в среде. Главным следствием нелокальности флуктуаций есть согласование электромагнитного поля со структурой неоднородностей среды, известное как эффект пространственной дисперсии. В литературе по взаимодействию электромагнитного излучения со средой указывается, что пространственная дисперсия влияет на поглощение света. Качественно происходит следующее: то излучение, которое не согласовано с неоднородностями среды, распространяется в соответствии с классическими законами рассеяния и поглощения для случайно-однородной среды. И, напротив, если ввести аналоги коэффициентов

рассеяния и поглощения света для пространственно согласованного излучения, то такие «константы» будут заметно отличаться от классических констант. Если эффект пространственной дисперсии имеет место в случае чистых вод Мирового океана, то тогда уменьшение эффективного поглощения приведет к уменьшению коэффициента вертикального ослабления, что соответствует экспериментальным данным [Morel A. et al., 2007]. По этой же причине, коэффициент яркости моря увеличится, а его форма будет соответствовать расчетам переноса излучения с константами поглощения света чистой водой по Смитсу-Бейкеру [Smith, Baker, 1981]. Автор предпринял попытки аналитически учесть влияние нелокальных неоднородности среды при расчете переноса светового излучения в морской воде. Для получения предварительных оценок эффектов пространственной дисперсии предлагается полуэмпирическая теория переноса излучения.

Выводы к разделу 2.

1) Расчеты по теории рассеяния света, основанной на принципе термодинамического равновесия, не согласуются с экспериментально наблюдаемыми оптическими свойствами чистых природных вод. В качестве альтернативы предложена модель, рассматривающая собственные оптические неоднородности воды как двухмерный рисунок, контрастность которого зависит от концентрации примесей. Результаты расчетов по модели хорошо соответствуют экспериментальным данным углового показателя рассеяния для фильтрованной пресной воды (с размерами пор фильтра менее 0,2 мкм) в интервале углов от 3° до 177° .

2) Добавление в фильтрованную воду малого количества «чистой» воды другой плотности, в пропорции 1 к 200, приводит к сильному увеличению рассеяния света в широком интервале углов. При разной температуре и солености добавленной жидкости коэффициент усиления рассеяния варьируется от 1,8 до 4 раз. Время релаксации оптического сигнала составляет около 10 мин, но зависит от количества добавленной примеси. Угловые зависимости показателей рассеяния «чистой» воды и «чистой» воды с добавлением небольшого количества такой же воды, но с другой плотностью качественно совпадают, что свидетельствует о близости структурных особенностей сред в обоих случаях. Эффект увеличения рассеяния может быть дополнительным фактором, повышающим наблюдаемые из космоса контрасты морской поверхности в зонах гидрологических фронтов и апвеллинга.

3) В результате оценок параметров модели получено, что количество молекул, которые находятся в дефектах и обмениваются энергией в основном между собой, составляет примерно 1%. Вид функции распределения неоднородностей по размерам свидетельствует о том, что увеличение рассеяния во всем диапазоне углов при смешивании вод не может объясняться гидродинамической турбулентностью.

4) Несмотря на простоту изложенной модели неоднородностей в воде, строгая теория рассеяния и распространения света в воде существенно усложняется. Предложена полуэмпирическая теория переноса излучения в структурированной среде. Выведена соответствующая система уравнений, которая допускает точное численное решение. Для аналитических оценок выписаны формулы в двухпоточковом приближении.

5) Представление о воде как о среде, собственные неоднородности которой пространственно согласованы, позволяет объяснить:

- наличие пика и высокую анизотропию рассеяния света в чистых водах;
- 2-х–3-х кратное превышение коэффициента яркости в чистых водах Мирового океана над его теоретическими оценками;
- способность проникновения светового излучения на большие, по сравнению с предсказанными значениями, глубины.

Третий раздел (28 с.) посвящен результатам измерений спектрального углового показателя рассеяния морской воды. В нем приводятся результаты гидрооптических исследований, выполненных соискателем в различных акваториях Мирового океана в морских экспедициях научно-исследовательских судов Соединенных штатов Америки, Франции, Италии, Польши, Болгарии. Благодаря столь обширной географии исследованных акваторий удалось охватить исследованиями практически весь набор разнообразных оптических свойств вод Мирового океана – от прозрачных вод Тирренского моря до весьма мутных прибрежных вод Мексиканского залива, Балтийского моря и северо-западной части Черного моря. В начале раздела (**подраздел 3.1**) дается краткий обзор экспериментальных данных о светорассеянии морской водой. Перечисляются обнаруженные ранее характерные особенности однократно рассеянного света.

В **подразделе 3.2** приводятся результаты измерений углового показателя рассеяния, полученные в эксперименте NuCODE-2000 на шельфе Атлантики восточного побережья США. Иллюстрируется влияние мелких частиц и клеток фитопланктона на индикатрису рассеяния. Показано, каким образом изменяется регистрируемый сигнал в процессе проточной промывки прибора.

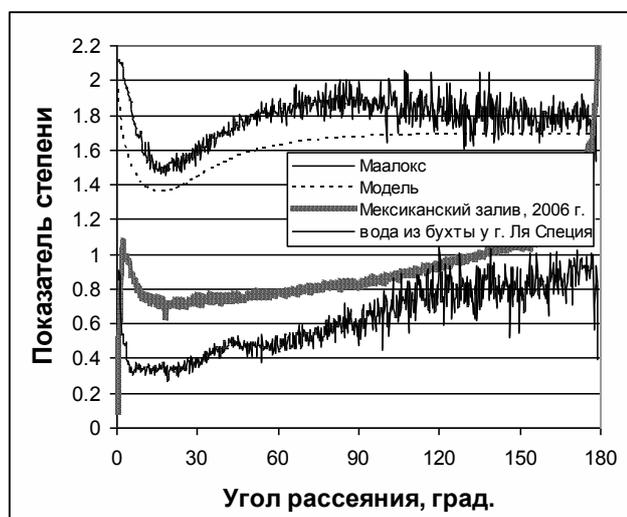


Рисунок 6 – Сравнение показателей степени $\gamma(\theta)$, полученных в лабораторных и натуральных экспериментах

Более четко минимум $\gamma(\theta)$ проявляется в экспериментах с водными растворами суспензии Маалокса. Как видно из Рисунка 6, несмотря на существенные отличия по абсолютным величинам, все три кривые имеют одинаковую тенденцию изменения в зависимости от угла. Исключение составляет область самых малых углов, где рассеивающие свойства морской воды определяются в основном рассеянием на клетках фитопланктона, с размерами, превышающими длину волны. Сме-

В **подразделе 3.3** рассматриваются спектрально-угловые свойства рассеяния света морской водой. Спектральные свойства углового показателя рассеяния $\beta_p(\lambda, \theta)$ характеризовались величиной $\gamma(\theta)$, которая есть результат его аппроксимации степенной зависимостью $\beta_p(\lambda_0, \theta)(\lambda/\lambda_0)^{-\gamma(\theta)}$. Графики функции $\gamma(\theta)$ построены для вод Мексиканского залива, Средиземного, Балтийского и Черного моря. Обсуждается, ранее не наблюдаемый в натуральных экспериментах, локальный минимум селективности рассеяния света примерно в окрестности 20° , который невозможно объяснить с помощью про-

щение минимума может объясняться изменением вклада частиц различных фракций в угловой показатель рассеяния. Для иллюстрации возможности подгонки формы зависимости показателя степени к экспериментальной кривой на рисунке пунктирной линией показаны результаты расчетов по простой модели. Показатель рассеяния представляется в виде линейной комбинации трех составляющих:

- 1) модельной угловой функции,
- 2) угловой зависимости, характерной для морской индикатрисы рассеяния, по величине обратно пропорциональной длине волны,
- 3) слабо зависящей от угла функции пропорциональной $\lambda^{-1.7}$.

В подразделе 3.4 анализируется связь углового показателя рассеяния света водами Черного моря с интегральными характеристиками. Приведены коэффициенты уравнения регрессии, связывающие величины полного показателя рассеяния со значениями $\beta_p(\lambda, 4^\circ)$. На экспериментальных данных показано, что для открытой части Черного моря угол $\theta_{50\%}$ соответствующий телесному углу, в котором сосредоточена половина рассеянного потока, монотонно растет с длиной волны и принимает значения в диапазоне примерно от $3,2^\circ$ на 380 нм до $4,5^\circ$ на 780 нм. Это означает, что пик индикатрисы в «синей» области более острый.

Основные результаты третьего раздела.

1) Получен обширный экспериментальный материал по данным спектрального углового показателя рассеяния света в морской воде. Эти величины измерялись в диапазоне углов $0,5\text{--}178^\circ$ в спектральном интервале 380–780 нм в водах Черного, Средиземного, Балтийского моря и Мексиканского залива.

2) Несмотря на внешнее сходство графиков функций рассеяния в логарифмическом масштабе отметим следующие закономерности:

- параметр асимметрии индикатрисы рассеяния, характеризующий общую ее вытянутость, возрастает при увеличении прозрачности воды. Характерный диапазон параметра асимметрии 50–130;
- асимметрия индикатрисы в длинноволновой области спектра примерно на 10–20% выше, чем в коротковолновой области;
- в области малых углов рассеяния $0,5\text{--}5^\circ$ наблюдается обратная закономерность, при которой острота пика рассеяния растет с уменьшением длины волны.

3) Показатель степени, характеризующий спектральные свойства углового показателя рассеяния света, имеет сложную угловую зависимость. Характерной его особенностью является наличие локального минимума в диапазоне от 20 до 30° .

4) Оптимальный угол для определения общего показателя рассеяния нефелометрическим методом приходится на диапазон углов $2\text{--}5^\circ$. Для Черного моря получены уравнения регрессии, связывающие величины полного показателя рассеяния со значениями углового показателя рассеяния на 4° . Коэффициенты уравнений зависят от длины световой волны и прозрачности воды.

При проведении измерений рассеивающих свойств морской воды было обнаружено, что рассеяние воды неустойчиво относительно малых возмущений. Поэтому для сопоставимости данных измерений и повышения их качества необходимо придерживаться постоянной методики измерений.

Четвертый раздел (54 с.) посвящен разработке алгоритмов решения прямых задач гидрооптики с целью их дальнейшего применения в решении обратных задачах дистанционного зондирования цвета моря. Поэтому основное внимание в нем уделяется малопараметрическим алгоритмам, обладающим высокой точностью расчета оптических характеристик в системе океан-атмосфера. В **первом подразделе** подробно изложены разработанные автором стабильные алгоритмы расчета рассеяния света на частицах со сферической симметрией. Показано, что для определения свойства сходимости рекуррентных соотношений, включая рекурсию логарифмической производной, может использоваться следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{\partial^2 z}{\partial n^2} = \left(\frac{2n+1}{x} - 2 \right) \cdot z = \omega^2(n) \cdot z,$$

где z – сферическая функция Бесселя;

n – ее порядок;

x – комплексный аргумент.

В частности, из анализа решения дифференциального уравнения следует, что число итераций n_{it} в методе обратной рекурсии ограничено сверху выражением

$$n_{it}(m) = \frac{-\ln(\varepsilon)}{\sqrt{8} \operatorname{Re} \sqrt{\frac{1}{m_r - i \cdot k} - 1}},$$

где ε – компьютерная погрешность представления иррационального числа;

$m = m_r - i \cdot k$ – комплексный показатель преломления.

Для устранения неопределенности деления ноль на ноль в формулах расчета рассеяния света на частице с тонкой оболочкой было предложено представить функции Бесселя в виде

$$\begin{aligned} \psi_n(x) &= \alpha_n(x) \cos x + \beta_n(x) \sin x; \\ \chi_n(x) &= -\alpha_n(x) \sin x + \beta_n(x) \cos x, \end{aligned}$$

где коэффициенты $\alpha_n(x)$, $\beta_n(x)$ вычисляются по тем же рекуррентным соотношениям. Метод применим для поглощающей оболочки.

В **подразделе 4.2** приведен численный метод решения уравнения переноса излучения в атмосфере и океане, разработанный на основе принципа взаимодействия плоскопараллельных слоев. Метод предназначен для расчета световых полей вне зон сингулярности, т.е. вне зоны солнечного блика, вдали от направлений распространения луча и направления строгого обратного рассеяния на 180° . В методе используется дискретное Фурье-разложение по азимуту $R = F^{-1} \cdot S \cdot F$, которое приводит матрицу S к диагональному виду, где F – матрица, столбцы которой составлены из собственных функций матрицы S , т.е. значений синусов и косинусов на выбран-

ной азимутальной сетке. При этом матрица R диагональная, с элементами, равными собственным значениям.

Предложено численное, более точное, начальное приближение для коэффициентов отражения и пропускания оптически тонкого слоя. Окончательно начальное приближение записывается в виде

$$R(\mu_0, \mu) = \omega \cdot R_1^*(\mu_0, \mu) + \omega^2 \cdot R_2^*(\mu_0, \mu) + \omega^3 \frac{\delta\Psi(\mu_0) \cdot \delta\Psi(\mu)}{F},$$

$$T(\mu_0, \mu) = \omega \cdot T_1^*(\mu_0, \mu) + \omega^2 \cdot T_2^*(\mu_0, \mu) + \omega^3 \frac{\delta\Psi(\mu_0) \cdot \delta\Psi(\mu)}{F}.$$

где $\delta\Psi(\mu_0)$ – дефицит потока, определяемый численным интегрированием;

ω – вероятность выживания фотона;

R^*, T^* – коэффициенты отражения и пропускания в приближении одно и двукратного рассеяния при $\omega = 1$.

Выводы к разделу 4.

1) Усовершенствованы классические программы и алгоритмы расчета рассеяния света на сферических частицах, позволяющие расширить диапазон их применимости.

2) Выведено дифференциальное уравнение, которое описывает свойства сходимости вычислений функций Бесселя полуцелого порядка методами прямой и обратной рекурсии. В результате анализа решений этого уравнения было получено:

– аналитическое выражение, определяющее необходимое число итераций для определения функций Бесселя и их производных методом обратной рекурсии, в которое входит компьютерная погрешность представления иррационального числа. Это позволит оперативно переопределить параметры численного алгоритма в случае принципиального изменения внутреннего устройства процессора;

– разработан критерий сходимости процедур прямой и обратной рекурсии для функций Бесселя.

3) Выведены новые формулы для расчета рассеяния света на частице с оболочкой, устраняющие неопределенность деления ноль на ноль при малой толщине оболочки.

4) Изложенный численный метод позволяет с высокой точностью рассчитать коэффициенты отражений плоско-параллельной среды для любых принципиально возможных индикатрис рассеяния. Он не имеет проблем, связанных с сингулярностью граничных условий. Быстродействие метода превышает быстродействие классического метода сложения.

5) Численное решение, в отличие от классического метода сложения, не имеет характерной осциллирующей по азимуту ошибки и поэтому алгоритм может использоваться для создания электронных таблиц при решении задачи атмосферной коррекции. Время расчета линейно растет от числа азимутальных точек.

6) Начальная оптическая толщина для расчета коэффициентов отражения и пропускания элементарного слоя зависит от степени вытянутости индикатрисы и вероятности выживания фотона. Особо следует подчеркнуть, что чем больше анизотропия рассеяния, тем выше погрешность, а значит и меньше должна быть началь-

ная оптическая толщина. Для атмосферных задач Ленобль [Ленобль Ж., 1990] рекомендует значение начальной оптической толщины $\tau_0 < 10^{-6}$ в случае приближения однократного рассеяния. В методе автора для морских индикатрис рассеяния можно использовать значение $\tau_0 \sim 2,4 \cdot 10^{-4}$, в то время как тестирование приближения однократного рассеяния показывает, что $\tau_0 \sim 1,5 \cdot 10^{-8}$.

В **пятом разделе** (32 с.) диссертации обобщены результаты исследований соискателя по учету закономерностей оптических свойств атмосферного аэрозоля в задаче дистанционного зондирования цвета моря. Во вступительной части, в **подразделе 5.1**, обсуждается специфика задачи атмосферной коррекции. Перечисляются преимущества и недостатки статистических и теоретических моделей аэрозоля. Выдвигаются требования, предъявляемые к аэрозольным моделям.

Результаты наблюдений на Карадагской геофизической обсерватории за спектральной прозрачностью атмосферы в 5 спектральных каналах (347, 368, 530, 574, 638 нм) за период с 1989 по 1996 г. анализируются в **подразделе 5.2**. Использовалась независимая методика обработки первичных данных, основанная на предположении о стабильности характеристик фотометра в интервалах между метрологическими поверками прибора. В ходе калибровки по методу Бугера выяснилось, что постоянство прозрачности атмосферы в течении дня на одной длине волны не гарантирует стабильности оптических свойств аэрозоля в другом спектральном интервале. За каждый год были рассчитаны средние АОТ, собственные векторы и собственные значения матрицы ковариации. Спектральный ход средней АОТ оказался близок к спектру первого собственного вектора, который объяснял около 98% изменчивости.

В **подразделе 5.3** сравниваются результаты береговых атмосферных оптических исследований с данными судовых наблюдений на акватории Черного и Средиземного морей. Анализ показал, что аэрозоль над Черным морем и в прибрежной зоне в районе Карадага незначительно отличаются по спектральным свойствам и по статистическим характеристикам. Также как и на Карадаге, основная изменчивость аэрозольного рассеяния над внутренними морями обусловлена изменением концентрации аэрозоля.

В **подразделе 5.4** решалась обратная задача оценки параметров функции распределения аэрозольных частиц по размерам по первому собственному вектору в предположении сферичности и однородности частиц. В период с 1990 по 1992 гг. для модели водяных растворов положение максимума функции логарифмически нормального распределения приходилось на интервал 0,13–0,14 мкм. Над Эгейским морем модальный радиус функции распределения был равен 0,18 мкм.

В **подразделе 5.5** сопоставляются данные Карадагской обсерватории с результатами, полученными в г. Севастополе с помощью солнечного фотометра SE-318. Несмотря на более широкий спектральный диапазон прибора SE-318 (340–1020 нм), статистические свойства АОТ в Севастополе и на Карадаге оказались схожими, а первый собственный вектор объяснял около 94% изменчивости АОТ в 2006–2007 гг. Анализировалось влияние предоблачной и после облачной ситуации на эволюцию спектрального хода АОТ. Показано, что тогда уравнения регрессии будут существ-

венно отличаться друг от друга и от уравнения регрессии, построенного для безоблачного дня.

В подразделе 5.6 акцентируется внимание на неравновесном характере процессов трансформации аэрозоля. На рисунке 7 построены функции равновесного радиуса солевой капли $r(\eta)$ в зависимости от относительной влажности η для трех различных значений радиусов сухого ядра NaCl.

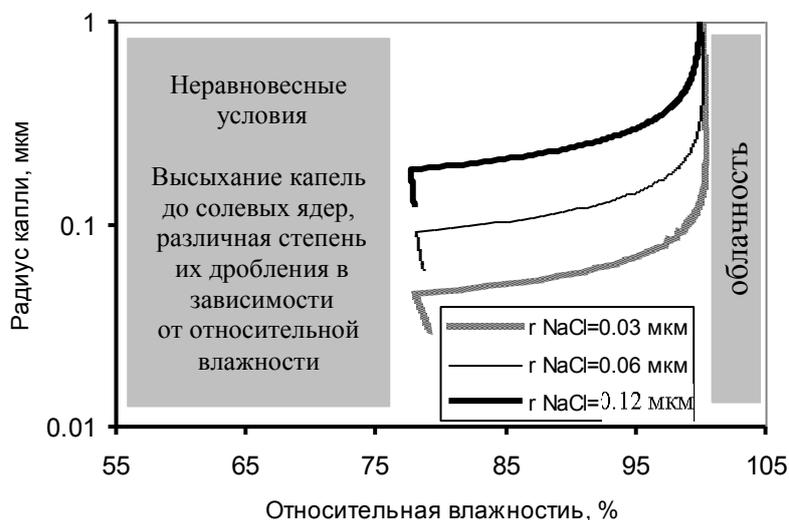


Рисунок 7 – Размер капли солевого раствора в зависимости от относительной влажности при разных размерах сухого солевого остатка

В сильно неравновесных условиях – при малых значениях относительной влажности, вместо одного ядра образуется множество мелких. Отсутствие облаков подразумевает низкие значения относительной влажности у поверхности. Таким образом, бимодальное распределение может образовываться в атмосфере и при условии наличия только растворимой аэрозольной фракции.

На основании исследований спектральной прозрачности атмосферы делаются следующие выводы:

1) высокая корреляция АОТ на двух различных длинах волн объясняется отсутствием условий для образования облачности,

2) основная изменчивость АОТ над Черным морем объясняется концентрацией аэрозольных частиц субмикронной фракции (0,1–0,5 мкм) с узким распределением по размерам (от 0,04 до 1 мкм),

3) главными факторами, влияющими на оптические свойства аэрозоля, следует считать атмосферные характеристики, такие как, высота слоя инверсии, профили относительной влажности и температуры,

4) для параметризации оптических свойств аэрозоля требуется по крайней мере одна степень свободы. Иными словами, число моделей с фиксированными параметрами функции распределения частиц по размерам не ограничено.

Последний **шестой раздел** (36 с.) посвящен усовершенствованию дистанционных методов восстановления спектрального коэффициента яркости Черного моря. Во вступительной части (**подраздел 6.1**) освещается проблема диагностики биооп-

тического состояния моря как с помощью дистанционных, так и контактных методов.

В **подразделе 6.2** представлены характерные спектры коэффициента яркости Черного моря. Показана статистическая взаимосвязь между обратным рассеянием и показателем поглощения неживой органикой. Проиллюстрированы изменения спектрального коэффициента яркости с увеличением прозрачности воды. Приводятся характерные ошибки восстановления спектральных кривых коэффициентов яркости Черного моря со спутника. Рассматривался способ параметризации, основанный на предположении о постоянстве коэффициента яркости на концах видимого диапазона. В результате удалось повысить устойчивость решения обратной задачи биооптики моря, увеличить корреляцию между восстановленными и измеренными концентрациями хлорофилла при обработке данных измерений с платформы.

Для решения обратной задачи биооптики моря аналитическим методом необходима малопараметрическая модель коэффициента яркости. Формулы модели и их обоснование дано в **подразделе 6.3**.

В **подразделе 6.4** предлагается метод минимизации функционала, позволяющий учесть модельные погрешности. Весь спектральный диапазон разбивается на три участка, в каждом из которых устанавливается свой набор главных и второстепенных параметров. При составлении системы уравнений частные производные берутся только по главным параметрам диапазона. Этот метод физически более корректен, чем стандартный метод наименьших квадратов и может использоваться в любой области науки о Земле. Благодаря новому методу оптимизации повышается точность определения биологических параметров и стабилизируется решение обратной задачи.

В **подразделе 6.5** уточнялась формула зависимости коэффициента яркости моря от показателей рассеяния и поглощения света морской водой. Использовались экспериментальные данные об индикатрисе рассеяния черноморской воды. С помощью расчетов по численному методу, изложенному в подразделе 4.2, было показано, что при стандартной геометрии наблюдений предпочтительно использовать не величину обратного рассеяния b_b , а величину углового показателя рассеяния света β на 140° . В результате коэффициент пропорциональности становится менее чувствительным к форме индикатрисы рассеяния, а коэффициента яркости при диффузном освещении поверхности моря определяется формулой

$$\rho \approx 0,93 \cdot \beta(140^\circ) / a.$$

Алгоритм атмосферной коррекции с использованием данных LEVEL-2 описан в **подразделе 6.6**. Расчеты показали, что применение условия «постоянства» для вод с концентрацией хлорофилла, менее $0,3 \text{ мг/м}^3$ приводило к его отрицательным значениям. Поэтому для оценки вклада атмосферы в «синей» области спектра предложена двухпараметрическая модель, описывающая спектральный коэффициент яркости вне основной полосы поглощения хлорофилла. В качестве параметров модели использовался показатель обратного рассеяния взвешенных частиц и показатель поглощения неживой органики. Спектральный закон поглощения характеризовался заниженным значением показателя экспоненты $\alpha = 0,015 \text{ нм}^{-1}$. Оценка коэффициен-

та яркости в коротковолновой области спектра производится по двум измерениям в середине видимого диапазона. Построены примеры карт распределения хлорофилла в исследуемом районе Южного берега Крыма, полученные с использованием коррекции. Показано, что восстановленные величины концентраций в прибрежных водах соответствуют данным прямых биологических измерений.

Вид функции интерполяции или, иными словами, характерная форма спектральной погрешности стандартной атмосферной коррекции определялся методом главных компонент с привлечением данных Level-1. С ростом вклада атмосферы форма первого собственного вектора меняется, при этом сглаживается максимум на 555 нм и происходит рост значений в коротковолновой области. Такая форма соответствует коэффициенту яркости атмосферы и объясняется, в основном, рассеянием на атмосферном аэрозоле, при этом первый собственный вектор описывает 65–85% изменчивости. Для случая максимального вклада атмосферы его можно рассматривать как ошибку определения свойств аэрозоля из-за несоответствия используемой для коррекции модели реальным свойствам аэрозоля. Предлагается удобное аналитическое выражение, с высокой точностью аппроксимирующее первый собственный вектор: $C(\lambda) = a/\lambda^2 + b$. Первое слагаемое с физической точки зрения можно интерпретировать как влияние субмикронной фракции атмосферного аэрозоля. Тогда второе слагаемое будет учитывать слабоселективный закон рассеяния на крупной фракции аэрозольных частиц.

Выводы к разделу 6.

1) Метод, основанный на параметризации коэффициента яркости в коротковолновой области спектра, повышает устойчивость решения обратной задачи биооптики моря.

2) Параметризация коэффициента яркости в «синей» области константой дает адекватные результаты для прибрежных вод, если увеличение показателя рассеяния назад сопровождается увеличением поглощения в коротковолновой области спектра.

3) Для адекватной оценки яркости моря в коротковолновой области спектра предложена двухпараметрическая модель коэффициента яркости. В качестве параметров модели используются показатель обратного рассеяния взвешенных частиц и показатель поглощения неживой органики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Совершенствование аппаратуры и разработка новых методов исследования моря влечет за собой повышение точности и адекватности физико-математических моделей. В диссертационной работе предлагается новый подход к описанию физических процессов и явлений, определяющих распространение света в море, и имеющих важное прикладное значение, в частности для определения цвета моря с помощью дистанционного зондирования. Для этого выдвинута гипотеза о наличии нелокальных неоднородностей в морской воде, влияющих на ее оптические свойства и перенос в ней электромагнитного излучения.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1) реализован и апробирован метод определения показателя рассеяния света морской водой в широком спектральном (380–780 нм) и угловом (0,5–178°) интервалах,

2) в диссертации впервые приведены результаты натуральных экспериментальных исследований углового показателя рассеяния света морской водой в широком спектральном интервале 380–780 нм и в диапазоне углов 0,5–178°. Впервые показано, что в естественных водах практически всегда наблюдается локальный минимум спектральной селективности рассеяния в области углов 20–30°,

3) показано, что причиной высокой анизотропии рассеяния света в воде, очищенной от примесей, может являться пространственное согласование неоднородностей самой воды. Возможный механизм возникновения пространственно-согласованных неоднородностей состоит в передаче энергии от малых масштабов ($\sim 3 \cdot 10^{-10}$ м) к большим ($\sim 10^{-5}$ м) при стремлении молекул к случайному распределению. Появление источника энергии внутри жидкой среды обусловлено асимметрией межмолекулярного потенциала взаимодействия. Передача энергии молекул осуществляется посредством собственных гиперзвуковых колебаний среды, а ее диссипация приводит к появлению неоднородностей, сравнимых с длиной световой волны,

4) предложена модель неоднородностей локальной плотности жидкой воды. Выполнены лабораторные эксперименты, подтверждающие правомерность теоретических предположений. На основе сопоставления модельных расчетов и экспериментальных данных были оценены параметры функции распределения оптических квазичастиц по размерам,

5) экспериментально доказано, что при смешивании вод с различной температурой или соленостью в пропорциях 1:20–1:200 рассеяние света увеличивается во всем диапазоне углов. Оценено время релаксации величины показателя рассеяния к первоначальным значениям. Сделаны оценки объемной меры подпространства «дефектов» в воде,

6) выдвинуто предположение, что несоответствие параметров светового поля в сверхчистых водах Мирового океана и оптических «констант» чистой воды обусловлено гетерогенностью среды. Предложена полуэмпирическая теория переноса излучения в таких средах и получено решение системы уравнений в двухпоточковом приближении,

7) продемонстрировано, что высокие значения коэффициентов корреляции между АОТ на разных длинах волн обусловлены ограничением на отсутствие облачности в момент измерений. Показано, что субмикронная фракция аэрозольных частиц объясняет от 94% (Севастополь, 2006–2007 гг.) до 98% (Карадаг, 1991 г.) изменчивости АОТ в видимом диапазоне,

8) сделан вывод о неустойчивости значений микрофизических характеристик аэрозоля. Этим обосновывается необходимость параметризации восходящего из моря излучения в коротковолновой области спектра при проведении процедуры атмосферной коррекции. Предложено два способа параметризации коэффициента яркости Черного моря. Реализован алгоритм дополнительной атмосферной коррекции данных LEVEL-2,

9) усовершенствованы методы расчетов характеристик отраженного оптического излучения в море и в атмосфере:

– предложен новый более стабильный и эффективный способ расчета рассеяния света на сферических частицах;

– разработан способ повышения устойчивости расчета параметров световых полей в плоско-параллельной среде с сильной анизотропией рассеяния света;

– разработан эффективный алгоритм расчета азимутальной зависимости параметров светового поля, не имеющий осциллирующей по азимуту ошибки вычислений. В результате чего заметно уменьшена погрешность расчета рассеянной радиации вне области сингулярности индикатрисы рассеяния и отражения света от водной поверхности.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых журналах

1. The particulate backscattering ratio at LEO 15 and its use to study particle composition and distribution / E. Boss, W.S. Pegau, M. Lee, M. Twardowski, **E. Shybanov**, G. Korotaev, F. Baratange // *Journal of Geophysical Research – Oceans.* – 2004. – Volume 109, Issue C1. – C01014, doi: 10.1029/2002JC001514.

2. International Subsatellite Experiment on the Oceanographic Platform (Katsiveli, Crimea) / G.K. Korotaev, G.A. Khomenko, M. Shami, G.P. Berseneva, O.V. Martynov, M.E. Lee, **E.B. Shibanov**, T. Ya. Churilova, A.S. Kuznetsov, A. K. Kuklin // *Physical Oceanography.* – 2004. – Volume 14, Issue 3. – P. 150–160. doi: 10.1023/B:POCE.0000048897.71456.44. (Перевод из: Коротаев Г.К. Международный подспутниковый эксперимент на океанографической платформе (пос. Кацивели) / Г.К. Коротаев, Г.А. Хоменко, М. Шами, Г.П. Берсенева, О.В. Мартынов, М.Е. Ли, Е.Б. Шибанов, Т.Я. Чурилова, А.С. Кузнецов, А.К. Куклин // *Морской гидрофизический журнал.* – 2004. – №3. – С. 28–38.).

3. **Shibanov E.B.** Numerical method for the solution of the equation of radiation transfer. Reflection and transmission coefficients for an optically thin plane-parallel layer / E.B. Shibanov // *Physical Oceanography.* – 2005. – V. 15, Issue 3. – P. 192–202. doi: 10.1007/s11110-005-0041-2. (Перевод из: Шибанов Е.Б. Численный метод решения уравнения переноса излучения. Коэффициенты отражения и пропускания оптически тонкого плоскопараллельного слоя / Е.Б. Шибанов // *Морской гидрофизический журнал.* – 2005. – №3. – С. 62–72.).

4. Optical properties of the particles in the Crimea coastal waters (Black Sea) / M. Chami, **E.B. Shybanov**, T.Y. Churilova, G.A. Khomenko, M.E. Lee, O.V. Martynov, G.P. Berseneva, G.K. Korotaev // *Journal of Geophysical Research – Oceans.* – 2005. – Volume 110, Issue C11. – C11020. doi: 10.1029/2005JC003008.

5. Spectral variation of the volume scattering function measured over the full range of scattering angles in a coastal environment / M. Chami, **E.B. Shybanov**, G.A. Khomenko,

M.E. Lee, O.V. Martynov, G.K. Korotaev // *Applied Optics*. – 2006. – Volume 45, Issue 15. – P. 3605–3619. doi: 10.1364/AO.45.003605.

6. Measurements of Scattering Function of Sea Water in Southern Baltic / W. Freda, T. Króll, O.V. Martynov, **E.B. Shybanov**, R. Hapter // *European Physical Journal: Special Topics*. – 2007. – Volume 144, Issue 1. – P. 147–154. doi: 10.1140/epjst/e2007-00119-6.

7. Measurements and Modeling of the Volume Scattering Function in the Coastal Northern Adriatic Sea / J-F. Berthon, **E. Shybanov**, M. Lee, G. Zibordi // *Applied Optics*. – 2007. – Volume 46, Issue 22. – P. 5189–5203. doi: 10.1364/AO.46.005189.

8. **Shibanov E.B.** Retrieving of the biooptical characteristics of Black-Sea waters under the conditions of constant reflectance at a wavelength of 400 nm / E.B. Shibanov, E.N. Korchemkina, // *Physical Oceanography*. – 2008. – Volume 18, Issue 1. – P. 25–37. doi: 10.1007/s11110-008-9007-5. (Перевод из: Шибанов Е.Б. Восстановление биооптических характеристик вод Черного моря при условии постоянства коэффициента яркости на длине волны 400 нм / Е.Б. Шибанов, Е.Н. Корчемкина // *Морской гидрофизический журнал*. – 2008. – №1. – С. 38–50.).

9. **Shybanov E.B.** Effect of finely divided admixtures on the scattering of light in “pure” filtered water / E.B. Shybanov // *Physical Oceanography*. – 2008. – Volume 18, Issue 2. – P. 86–95. doi: 10.1007/s11110-008-9012-8. (Перевод из: Шибанов Е.Б. Влияние мелкодисперсной примеси на рассеяние света в «чистой» фильтрованной воде / Е.Б. Шибанов // *Морской гидрофизический журнал*. – 2008. – №2. – С. 46–56.).

10. Optical characteristics of coastal waters and atmosphere near the south coast of the Crimea at the end of summer 2008 / V.I. Man'kovskii, G.A. Tolkachenko, **E.B. Shibanov**, O.V. Martynov, E.N. Korchemkina, D.V. Yakovleva, I.A. Kalinskii // *Physical Oceanography*. – 2010. – Volume 20, Issue 3. – P. 207–230. doi: 10.1007/s11110-010-9079-x. (Перевод из: Маньковский В.И. Оптические характеристики прибрежных вод и атмосферы в районе Южного берега Крыма в конце летнего сезона 2008 года/ В.И. Маньковский, Г.А. Толкаченко, Е.Б. Шибанов, О.В. Мартынов, Е.Н. Корчемкина, Д.В. Яковлева, И.А. Калинин // *Морской гидрофизический журнал*. – 2010. – №3. – С. 52–74.).

11. Hypothesis of the spatial adjustment of optical inhomogeneities of water and its confirmation through experiments on measurements of light scattering / **E.B. Shybanov**, J.F. Berthon, M.E. Lee, G. Zibordi // *JETP Letters*. – 2010. – Volume 92, Issue 10. – P. 671 – 675. doi: 10.1134/S0021364010220078.

12. Intensification of light scattering as a result of mixing of pure waters with different densities / **E.B. Shybanov**, J.F. Berthon, M.E. Lee, G. Zibordi // *Physical Oceanography*. – 2011. – Volume 21, Issue 4. – P. 254–260. doi: 10.1007/s11110-011-9120-8. (Перевод из: Шибанов Е.Б. Увеличение рассеяния света при смешивании чистых вод различной плотности / Е.Б. Шибанов, Ж.-Ф. Бертон, М.Е. Ли, Дж. Зиборди // *Морской гидрофизический журнал*. – 2011. – №4. – С. 36–42).

13. Regression of in-water radiometric profile data / D. D'Alimonte, **E.B. Shybanov**, G. Zibordi, T. Kajiyama // *Optics Express*. – 2013. – Volume 21, Issue 23. – P. 27707–27733. doi: 10.1364/OE.21.027707.

14. Determination of the Concentration of Seawater Components Based on Upwelling Radiation Spectrum / M.E. Lee, **E.B. Shybanov**, E.N. Korchemkina, O.V. Martynov

// *Physical Oceanography*. – 2015. – Issue 6. – P. 15–30. doi: 10.22449/1573-160X-2015-6-15-30. (Перевод из: Ли М.Е. Определение концентрации примесей в морской воде по спектру яркости восходящего излучения / М.Е. Ли, Е.Б. Шибанов, Е.Н. Корчемкина, О.В. Мартынов // *Морской гидрофизический журнал*. – 2015. – №6. – С. 17–33.).

15. Ли М.Е. Спектральная прозрачность атмосферы над Черным морем / М.Е. Ли, **Е.Б. Шибанов**, В.Г. Любарцев // *Морской гидрофизический журнал*. – 2000. – № 4. – С. 46–68.

16. **Шибанов Е.Б.** Численный метод решения уравнения переноса излучения. Основные принципы и формулы / Е.Б. Шибанов // *Морской гидрофизический журнал*. – 2005. – №2. – С. 37–45.

17. **Шибанов Е.Б.** Стабильный и быстрый способ вычисления функций Бесселя в задаче расчета рассеяния света на частицах со сферической симметрией / Е.Б. Шибанов // *Морской гидрофизический журнал*. – 2007. - № 2. – С. 71–80.

18. Корчемкина Е.Н. Усовершенствование методики атмосферной коррекции для дистанционных исследований прибрежных вод Черного моря / Е.Н. Корчемкина, **Е.Б. Шибанов**, М.Е. Ли // *Исследование Земли из космоса*. – 2009. – №6. – С. 24 – 30.

Статьи в рецензируемых сборниках научных трудов

19. Ли М.Е. Новые принципы измерения индикатрисы рассеяния в широком диапазоне углов / М.Е. Ли, О.В. Мартынов, **Е.Б. Шибанов** // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. – 2003. – Вып. 8. – С. 194–211.

20. Ли М.Е. Некоторые результаты измерения индикатрисы рассеяния в широком диапазоне углов в искусственных средах и природных водах / М.Е. Ли, О.В. Мартынов, **Е.Б. Шибанов** // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. – 2003. – Вып. 9. – С. 216–225.

21. **Шибанов Е.Б.** Региональный аналитический алгоритм восстановления первичных гидрооптических характеристик морской воды по данным коэффициента яркости / Е.Б. Шибанов, Е.Н. Корчёмкина // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. – 2007. – Вып. 15. – С. 397–404.

22. Корчёмкина Е.Н. Региональный аналитический алгоритм восстановления первичных гидрооптических характеристик морской воды по данным коэффициента яркости / Е.Н. Корчёмкина, **Е.Б. Шибанов** // *Радиофизика и электроника*. – 2008. – Т. 13. – № 2. – С. 256–262.

23. Домнич М.Н., **Шибанов Е.Б.** Исследование атмосферного аэрозоля в прибрежной зоне Черного моря по результатам наземных измерений 1989–1990 и 2006–2007 гг. // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. – 2008. – Вып. 17. – С. 298–302.

24. **Шибанов Е.Б.** Влияние структурных неоднородностей воды на рассеяние света / Е.Б. Шибанов // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – 2009. – Вып. 20. – С. 139–144.

25. **Шибанов Е.Б.** Учет структурной неоднородности воды при расчете световых полей в море / Е.Б. Шибанов // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – 2010. – Вып. 21. – С. 188–196.

26. **Шибанов Е.Б.** Влияние статистически неравновесных процессов на оптические свойства аэрозоля над морем / Е.Б. Шибанов // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа – 2010. – Вып. 23. – С. 70–74.

Статьи в сборниках трудов и материалов конференций

27. **Shybanov E.B.** Distinctive features of light scattering in pure waters / E.B. Shybanov, M.E. Lee // Current Problems in Optics of Natural Waters: International Conference, Sept. 8–12, 2003: proceedings. – Saint-Petersburg, 2003. – P. 297–301.

28. **Shybanov E.B.** Physical reason for existence of fractal structures in water / E.B. Shybanov // Current problems in optics of natural waters: International Conference, Sept. 11–15, 2007: proceedings. – Nizhny Novgorod, 2007. – P. 41–45.

29. **Shybanov E.B.** Light scattering on the spherical particles with a thin light absorbing film / E.B. Shybanov // Current problems in optics of natural waters: International Conference, Sept. 6–9, 2011: proceedings. – Saint-Petersburg, 2009. – P. 103–106.

30. **Shybanov E.B.** Light scattering properties of seawater in the central and north-west part of the Black sea / E.B. Shybanov, M. E. Lee // Current problems in optics of natural waters: International Conference, Sept.10–14, 2013: proceedings. – Saint-Petersburg, 2013. – P. 31–35.

31. Ли М.Е. Совершенствование методов измерения спектрально-углового показателя рассеяния света морской водой / М.Е. Ли, О.В. Мартынов, **Е.Б. Шибанов** // Современные проблемы оптики естественных сред (ONW–2015): сб. тр. 8 науч. конф. – Санкт-Петербург. – 2015. – С. 262–267.

32. **Shybanov E.B.** Light fields in the clear natural water as an evidence of own water heterogeneity / E.B. Shybanov // Proc. SPIE 10035, 22nd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 100352A (November 29, 2016); doi:10.1117/12.2249351.

33. **Shybanov E.B.** Physical model of optical inhomogeneities of water / E.B. Shybanov // Proc. SPIE 10466, 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 1046647 (November 30, 2017); doi:10.1117/12.2288279.

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук
Шибанова Евгения Борисовича

Подписано к печати 23.06.2020 г.
Объем 2 п. л.

Заказ 27

Формат бумаги 60×84 1/16
Тираж 100 экз.

Напечатано в ООО «Колорит»
299011, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
ОГРН 1159204018940 от 07.05.2015
Тел.:(8692) 54-31-46
colorit.ooo2016@yandex.ru