

ОТЗЫВ
официального оппонента Суторихина Игоря Анатольевича
на диссертацию **Шибанова Евгения Борисовича**
«Оптические неоднородности морской воды и атмосферы над морем»,
представленную на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук
по специальности 25.00.28 – океанология

Актуальность темы диссертационной работы

Диссертация Е.Б. Шибанова посвящена широкому кругу вопросов оптики морской воды и атмосферы над морем, которые имеют фундаментальное значение и для развития физических представлений о рассматриваемых явлениях, и для развития практических, и прикладных технологий. Они связаны с важнейшими современными задачами исследований в области наук о Земле, в число которых входят:

- проблема атмосферной коррекции спутниковых данных при наличии аэрозоля;
- проблема восстановления гидробиологических характеристик верхнего слоя моря по спектру восходящего излучения;
- проблема молекулярной структуры воды.

Актуальность такой тематики диссертации не оставляет сомнений, поскольку вопросы, касающиеся первых двух проблем, в течение последних десятилетий постоянно обсуждаются и в научных организациях, и в научной литературе. Первая проблема = мониторинг состояния гидробиологических объектов верхнего слоя морей и океанов с помощью регулярно получаемых спутниковых данных оптического диапазона. Ввиду центральной роли воды в функционировании гидробиологических объектов и человека, а также благодаря аномальным и не вполне изученным физическим свойствам воды. Вторая проблема - исследование молекулярной структуры воды, которая в последнее время интенсивно изучается как теоретическими, так и новейшими экспериментальными методами. Соискатель обогатил эти исследования своим подходом, базирующимся на оригинальных оптических измерениях.

Содержание диссертационного исследования

Работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и приложения. Во введении отражена актуальность темы, поставлены цели и задачи исследования, изложены методы исследования, показана научная новизна полученных результатов и их обоснованность и достоверность, отмечена научная значимость работы и возможное практическое использование полученных результатов, отражен личный вклад соискателя.

В первой главе подробно описана конструкция и принципы измерения углового показателя рассеяния морской воды. В разделе приводится усовершенствованная методика обработки данных измерений углового показателя рассеяния в широком интервале длин волн, углов рассеяния $0,5 - 179^\circ$. Методика основана на «теневом» методе измерения углового показателя рассеяния, высказанном д.ф.-м.н Ли М.Е. Практическая его реализация привела к необходимости оценивать влияние паразитной засветки в области малых углов. В разделе показаны систематические погрешности эталонов светорассеяния и предложены способы учета ошибок. Также описан метод калибровки прибора и обработки данных измерений углового показателя рассеяния с учетом многократного рассеяния.

Для объяснения противоречий между классической теорией рассеяния в жидкости и реальными наблюдениями во **второй главе** автор предложил свое, совершенно новое представление об оптических неоднородностях воды (\sim от 10 до 10 000 нм.). Была предложена модель неоднородностей структуры жидкой воды, в результате чего впервые удалось описать спектрально угловую зависимость рассеяния света, наблюдавшуюся в фильтрованной воде. Введено понятие оптической квазичастицы. Оценены параметры функции распределения оптических квазичастиц по размерам. Проведен эксперимент, подтверждающий согласованный характер расположения квазичастиц относительно друг друга. Оценено время релаксации воды к

первоначальному «невозмущенному» состоянию. Сделаны оценки объемной меры подпространства «дефектов» в воде. В заключении раздела сделана попытка учесть эффекты гетерогенности чистой воды при расчете параметров светового поля.

В третьей главе представлена и проанализирована информация о спектрально-угловом показателе рассеяния света в естественных водоемах. Приводятся результаты гидрооптических исследований, выполненных соискателем в различных акваториях Мирового океана в морских экспедициях научно-исследовательских судов Соединенных штатов Америки, Франции, Италии, Польши, Болгарии. Установлены статистические связи величин углового показателя рассеяния света вод Черного моря с интегральным показателем рассеяния. Основной акцент в разделе уделяется новой информации о спектрально-угловых свойствам рассеяния света морской воды в диапазоне $0\text{--}30^\circ$.

В четвертой главе изложены разработанные автором программы и алгоритмы решения классических прямых оптики моря и атмосферы. В численном алгоритме расчета рассеяния света на частицах со сферической симметрией получено дифференциальное уравнение, которое описывает закономерности сходимости рекурсивных численных схем. Показано, что условия сходимости логарифмической производной совпадает с условиями сходимости для функций Рикатти-Бесселя. Во второй части раздела рассматривается классическая задача расчета параметров светового поля в плоско-параллельной среде. Классические численные алгоритмы «сложения» и «удвоения» чувствительны по отношению к относительной погрешности начального приближения для оптически тонкого слоя. Предложено эффективное и более точное начальное приближение для коэффициентов отражения и пропускания оптически тонких слоев. Даны рекомендации для выбора величин оптической толщины начального слоя в зависимости от анизотропии рассеяния. Причем с ростом анизотропии должна уменьшаться начальная оптическая толщина, что является не тривиальным фактом.

В пятой главе приведены результаты измерений оптических характеристик атмосферы на карадагской метеорологической обсерватории. Показаны примеры дневной и спектральной изменчивости аэрозольной оптической толщины над морем. Сделано сравнение результатов береговых атмосферных оптических исследований с данными судовых наблюдений на акватории Черного и Средиземного морей. Выполнен ковариационный анализ большого массива данных АОТ. Проанализированы результаты исследования атмосферного аэрозоля в рамках программы AERONET за 2006 в Севастополе. Показано, что присутствие облачности в течении дня до или после серии измерений сильно сказывается на характере регрессионных зависимостей АОТ на двух длинах волн. В разделе акцентируется внимание на неравновесном характере процессов трансформации аэрозоля. Для иллюстрации приводится качественная физическая модель трансформации аэрозоля над морем и в прибрежной зоне.

Шестая глава посвящена задаче восстановления коэффициента яркости моря со спутника. Для 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. На основе этой модели стало возможным дать оценку величины коэффициента яркости в «синей» области спектра, а следовательно улучшить метод атмосферной коррекции в задаче дистанционного зондирования Черного моря в оптическом диапазоне. Алгоритм апробирован на данных измерений оптического сканера SeaWiFS.

Для решения обратной задачи определения концентрации хлорофилла предложен метод минимизации функционала, позволяющий учесть модельные погрешности. Благодаря новому методу оптимизации повышается точность определения биологических параметров и стабилизируется решение обратной задачи.

В заключении диссертации приводятся основные результаты и выводы.

Основные результаты диссертационной работы и их новизна

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 натурных 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 диссиpация 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 двухпотоковом 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.

Степень обоснованности научных положений и достоверность полученных результатов

Работа включает и экспериментальные, и теоретические исследования. 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 авторитетных зарубежных институтах. Экспериментальные результаты получены с помощью оригинальных приборов, разработанных в отделе оптики моря МГИ с участием автора. Приборы прошли тестирование в ведущих отечественных и зарубежных организациях. Выводы автора, касающиеся рассеивающих свойств воды, согласуются с представлениями о структуре воды, развитыми в других областях науки. Все это позволяет рассматривать данную работу, как вполне обоснованную, а к ее результатам относиться, как к достоверным.

Результаты работы были представлены и обсуждены на международных и национальных конференциях и семинарах: По теме диссертации опубликовано 33 научные работы, 26 из них удовлетворяют требования ВАК Результаты исследований автора опубликованы в 14-ти изданиях, содержащихся в научометрических базах Scopus и WoS.

Ценность для науки и практики результатов диссертации

Теория рассеяния Рэлея-Смолуховского-Эйнштейна, исторически была принята в качестве первого приближения в оптике моря и атмосферы. Неудивительно, что она и модели для восстановления биооптических характеристик моря, построенные на ее основе, упрощенно описывают реальность и нуждаются в улучшении. Это подтверждается неослабеваемым интересом к этим вопросам, свидетелями которого мы являемся в последние десятилетия. Нестационарность и пространственная неоднородность геофизических процессов в атмосфере и океане отражаются в ходе микрофизических процессов. Как показано соискателем, оптические характеристики атмосферы и моря в реальных условиях чувствительны к термодинамическому состоянию среды, а именно к степени ее неравновесности. Соискатель последовательно рассмотрел наиболее важные микрофизические неравновесные процессы, учел их влияние, и предложил соответствующие коррекции оптических моделей атмосферы и верхнего слоя моря. Необходимо отметить, что такой учет потребовал выхода за пределы «классической оптики моря», основанной на равновесной статистике, рассмотрения дефектов структуры воды, введения «оптических квазичастиц», т.е. использования кардинально новых физических представлений для данного предмета. В этом, на мой взгляд, состоит основное научное значение этой диссертации.

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

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

Замечания по диссертации:

1. Остался не исследованным вопрос, до каких глубин верхнего слоя морской воды эффективно восстановление гидробиологических характеристик по спектру восходящего излучения?
2. В главе 2 параграфе 2.6 «Учет пространственной дисперсии диэлектрической проницаемости при расчете переноса излучения в морской воде» следовало бы упомянуть эффект, известный как **разветвленный поток света**. В неупорядоченной среде возможен эффект распространения световых волн вдоль отдельных каналов, расходящихся и ветвящихся за счет дифракции и образования каустик. В оптике разветвленный поток (branch flow) был обнаружен и исследован в 2002 в ФИАНе (А.В. Старцев, Ю.Ю. Стойлов. КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, 2003, 2004).
3. В третьей главе на Стр. 124-125 приведена простая модель рассеяния света на квазичастицах. По этой модели индикаторика рассеяния света будет зависеть от концентрации примесей, в отличие от результатов расчета по более сложной модели, предложенной в предыдущей главе.
4. Во второй главе в четвертом параграфе, посвященном методу «сложения» слоев, логично было привести модель поверхностного волнения.

Отмеченные замечания не снижают научной значимости докторской диссертации Шибанова Е.Б.

Заключительная оценка

Диссертация Шибанова Е.Б. является законченной научно-квалификационной работой, в которой выполнены исследования, имеющие важное научное и прикладное значение, связанные с разработкой оптических методов изучения и мониторинга Мирового океана, прибрежных и внутренних морей.

Диссертация по содержанию и оформлению удовлетворяет действующим требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 года № 842. В диссертации имеются необходимые ссылки на авторов и источники заимствованных материалов, в том числе – на научные работы соискателя. Автореферат диссертации в достаточной мере отражает ее содержание и удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении ученых степеней».

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 25.00.28 – «океанология» и удовлетворяет требованиям действующего «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, Шибанов Евгений Борисович, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук.

Официальный оппонент доктор физико-математических наук по специальности 01.04.05-оптика, профессор, главный научный сотрудник Лаборатории гидрологии и геоинформатики Федерального госбюджетного учреждения науки Института водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук Суторихин Игорь Анатольевич

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук (ФГБУН ИВЭП СО РАН): 656038. Алтайский край. г. Барнаул, ул. Молодежная, 1,

телефон: (3852) 66-64-60

факс: (3852) 24-03-96

адрес электронной почты: sia@iwep.ru

" 31 " августа 2020 г.

Подпись И.А. Суторихина удостовер

Главный специалист ИВЭП СО РАН



М.В. Михайлова