

О Т З Ы В

на автореферат диссертации **Шибанова Евгения Борисовича «Оптические неоднородности морской воды и атмосферы над морем»**, представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 25.00.28 – океанология

Актуальность темы диссертации. Важнейшим параметром, характеризующим процессы светорассеяния в море, является угловой показатель рассеяния света, зависящий от микрофизических характеристик среды и входящий в подынтегральное выражение уравнения переноса излучения. В 2002 г. был создан в отделе оптики моря Морского гидрофизического института (МГИ) новый измеритель углового показателя рассеяния, измеряющий 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. Диссертант прямо говорит об этом, желая обсудить противоречия. Дополнительная информация об оптических свойствах морской воды может быть получена с борта аэрокосмических носителей, которая с применением дистанционных методов исследования цвета моря, стала составной частью гидрооптических задач. Несмотря на 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. Возможно, что основной причиной недостаточной точности алгоритмов атмосферной коррекции является снижение детерминированности поведения системы, находящейся вдали от термодинамического равновесия. **Степень разработанности темы диссертации.** Сейчас основные усилия специалистов по оптике моря направлены на решение сильно упрощенной физической задачи, но в усложненной математической постановке. Оптические неоднородности морской воды традиционно связывают со свойствами локальных объектов, что такой подход к оптике моря не в полной мере учитывает многообразие хаотического поведения сложных нелинейных систем, каковой является морская вода. **Основная цель работы** – исследовать оптические эффекты, обусловленные микро-масштабными неоднородностями морской воды и прилегающей атмосферы в приложении к задачам дистанционного зондирования моря. Для достижения поставленной цели необходимо было решить шесть задач. **Научная новизна полученных результатов.** 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: калибровки измерителя спектрального углового показателя рассеяния света; управления чувствительностью ФЭУ для регистрации сигнала в широком диапазоне; 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°). 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. 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. 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 – измерения 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. 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 (не используется метод Ленца).

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. 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. Соискателем были даны рекомендации, основанные на понимании анизотропной природы светорассеяния в жидкостях. Разработанная в диссертации методика измерений спектрально-углового показателя рассеяния света является существенным шагом в решении проблемы эталонов рассеяния. 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:** для обработки спутниковых измерений коэффициента

яркости, для измерения углового показателя рассеяния, при исследовании оптических свойств Балтийского и Черного морей проводились с зарубежными фирмами. 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. Главным достоинством алгоритмов расчета характеристик рассеянного излучения является высокая точность результатов расчетов. Созданная диссертантом 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. 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. Анализировались данные измерений относительной прозрачности прибора M-83 и данные АОТ сети AERONET. 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. Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается хорошим соответствием результатов аналитических и численных расчетов с результатами многочисленных лабораторных и экспедиционных исследований. **Результаты исследований диссертанта** опубликованы в 14-ти изданиях, содержащихся в наукометрических базах. Предложенная модель оптических неоднородностей устраняет известные проблемы традиционной гидрооптической теории и является логически непротиворечивой. 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, с результатами численного моделирования и с работами других авторов. 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. 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 и данных, собранных глобальной сетью солнечных радиометров – AERONET. 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. Измерения спектрального углового показателя рассеяния несут полезную информацию об особенностях пространственного распределения неоднородностей. **Апробация результатов диссертации.** Результаты работы были представлены и обсуждены на международных и национальных конференциях и семинарах. **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]. **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. **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ в шести разделах. 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.

Неясно, почему в списке литературы у тезисов [32 и 33] не указаны страницы, в пятой главе отсутствует указание, что выводы относятся к ней. Сделанные замечания не умаляют автореферат, изложенный хорошим русским языком.

Считаю, что автореферат «Оптические неоднородности морской воды и атмосферы над морем», представляет законченную работу; сделан на актуальную тему; на высоком теоретическом и экспериментальном уровне; обладает новизной и практической ценностью; результаты имеют убедительную достоверность, автореферат отвечает всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ для защиты на степень доктора физико-математических наук по специальности 25.00.28 – Океанология, а её автор, Шибанов Евгений Борисович, заслуживает присуждения искомой степени.

Старший научный сотрудник,
доктор физико-математических наук,
лаборатории гидрологии и гидрофизики,
Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Лимнологический институт Сибирского отделения Российской академии наук
(ЛИН СО РАН) 664033, г. Иркутск, Улан-Баторская ул., д. 3, а/я 278,
[www:http://lin.irk.ru](http://lin.irk.ru)
ppshest@lin.irk.ru
+7-964 211 11 81

Шерстянкин Павел Павлович

Специальность, по которой защищена диссертация: 25.00.28 – Океанология,
Москва, 117997, Российская Федерация, Нахимовский проспект, 36.

Подпись Шерстянкина Павла Павловича _____ заверяю: _____

21 сентября 2020 г.

Ученый секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Лимнологического института Сибирского отделения Российской академии наук
(ЛИН СО РАН), к.б.н. _____ (Н.В. Максимова)