



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева
Сибирского отделения
Российской академии наук
(ИОА СО РАН)

пл. Академика Зуева, д.1, г. Томск, 634055
тел.: (3822) 492-738, факс: (3822) 492-086
e-mail: contact@iao.ru, www.iao.ru
ОКПО 03534050, ОГРН 1027000880268
ИНН/КПП 7021000893/701701001

№15305 -

на № от

УТВЕРЖДАЮ:

И.о. директора Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН,
доктор физико-математических наук

 Колосов В.В.

«10» сентября 2020 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН

на диссертационную работу

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

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Морской гидрофизический институт РАН» (ФГБУН «Морской гидрофизический институт РАН»).

Актуальность темы работы. Диссертация Е.Б. Шибанова посвящена решению актуальной задачи современной оптической океанографии - разработке принципиально новой теории рассеяния и переноса светового излучения в море и атмосфере в приложении к проблемам восстановления концентраций важнейших биологических примесей в водной среде по данным о цвете поверхности моря. Это имеет большое значение для решения многих природоохранных задач, поскольку полученные в диссертационной работе результаты могут служить основой для создания системы экспрессного биофизического мониторинга водных экосистем.

Представленная для обсуждения диссертационная работа Шибанова Е.Б. является естественным подведением итогов многолетней деятельности автора в отделе оптики моря

Морского гидрофизического института. Основные рецензируемые публикации относятся к периоду 1993-2020 гг. Автор систематизировал и обобщил обширный объем гидрооптической информации, полученной им в различных акваториях Мирового океана в морских экспедициях научно-исследовательских судов Украины, Соединенных Штатов Америки, Франции, Турции, Польши, Болгарии и других стран. Благодаря столь широкой географии исследованных акваторий ему удалось охватить исследованиями практически весь набор разнообразных оптических свойств вод Мирового океана – от предельно прозрачных вод Саргассова моря и моря Леванта до весьма мутных и сильно различающихся по своим оптическим свойствам прибрежных вод Мексиканского залива, Балтийского моря и северо-западной части Черного моря. Кроме того, получение уникальных экспериментальных данных для диссертационной работы Шибанову Е.Б. способствовала его многоплановая исследовательская деятельность в рамках множества престижных международных исследовательских грантов. Все эти исследования в сумме оказались весьма успешными и привели к выявлению ряда новых, ранее не исследованных, свойств спектрального рассеяния света в воде.

Структура и содержание работы. Диссертация состоит из введения, шести разделов, заключения, списка литературы и приложения. Полный объем диссертации составляет 305 страниц, включая 7 таблиц и 75 рисунков. 8 страниц приходится на приложение, в которое включено еще 2 рисунка. Список литературы содержит 264 ссылки.

Примененная в лабораторных экспериментах и морских экспедициях методика измерений спектральных свойств рассеяния света в воде подробно проанализирована Шибановым Е.Б. в **первом разделе**. В нем рассмотрены методические проблемы измерений углового показателя рассеяния света морской водой, описаны новые принципы измерений индикатрисы в широком диапазоне углов рассеяния морских вод с использованием теневого метода в области малых углов, исследованы основные погрешности измерений. Важным вкладом Шибанова Е.Б. в практику гидрооптических измерений является предложенная им оригинальная методика определения рассеивающего объема и расчета абсолютной величины углового показателя рассеяния и проведенный учет эффектов многократного рассеяния, а также приведенный подраздел, посвященный калибровке измерителя углового показателя рассеяния.

В первом разделе автором показано, что рассеяние света на малых углах в фильтрованной и очищенной от примесей воде отличается от расчетов по теории Ми для частиц размером, меньшим пор фильтра, на 4-5 порядков и имеет сильную спектральную зависимость. Для объяснения оптического эффекта высокой анизотропии рассеяния света в воде, не содержащей взвешенных частиц, а также для установления соответствия оптических «констант» чистой воды и данных измерений световых полей в сверхчистых водах Мирового

океана автором **во втором разделе** выдвигается предположение о специфическом, «кластерном» характере распределения групп молекул в водной среде. Предлагаемая модель отражает основную суть межмолекулярного взаимодействия молекул в жидкости – его корпоративный характер и рассматривает оптические неоднородности в воде как двухмерный рисунок, контрастность которого зависит от концентрации примесей. В приближении Релея-Ганса-Дебая получены аналитические выражения для спектрально-углового показателя рассеяния света «чистой» водой, которые позволили с высокой точностью описать экспериментально наблюдаемые результаты. Экспериментально показано, что неоднородности воды имеют не только локальный, но и глобальный характер. В разделе также дано качественное объяснение эффектов переноса излучения в «чистой» воде, основанное на явлении пространственной дисперсии диэлектрической проницаемости среды и предложена полуэмпирическая теория распространения излучения в средах с нелокальными неоднородностями.

В третьем разделе представлена и проанализирована информация о спектрально-угловом показателе рассеяния света в естественных водоемах. В нем приведены и проанализированы результаты измерений углового показателя рассеяния в эксперименте NuCODE-2000 на шельфе Атлантики у восточного побережья США. Затем рассмотрена, полученная впервые Шибановым Е.Б. сложная спектральная зависимость углового показателя рассеяния света морской воды в диапазоне $0 - 30^\circ$, которую невозможно объяснить с помощью простых моделей.

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.

На основе анализа данных было показано, что величина асимметрии индикатрисы рассеяния возрастает с увеличением прозрачности воды. Его характерный диапазон изменения составляет 50–130 единиц. При этом асимметрия индикатрисы в длинноволновой области спектра примерно на 10–20% выше, чем в коротковолновой области. Однако в области малых углов рассеяния т.е. $0,5-5^\circ$ наблюдается обратная закономерность, при которой пик рассеяния вперед становится более крутым с уменьшением длины волны. По этой причине показатель степени, характеризующий спектральные свойства углового показателя рассеяния света, имеет локальный минимум в окрестности 20° .

В четвертом разделе 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 совпадают 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 пятом разделе приведены результаты измерений оптических характеристик атмосферы на карадагской метеорологической обсерватории. Показаны примеры дневной спектральной изменчивости аэрозольной оптической толщины над морем. Сделано сравнение результатов береговых атмосферных оптических исследований с данными судовых наблюдений на акваториях Черного и Средиземного морей. Выполнен ковариационный анализ массива данных (аэрозольной оптической толщине) АОТ. Проанализированы результаты исследования атмосферного аэрозоля в рамках программы AERONET за 2006г. в Севастополе. Показано, что присутствие облачности в течение дня до или после серии измерений заметно 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.

Шестой раздел посвящен задаче восстановления коэффициента яркости моря при измерениях со спутника. Предложен 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 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. Спектральный закон поглощения характеризуется заниженным значением показателя экспоненты α . Оценка коэффициента яркости в коротковолновой области спектра производится по двум измерениям в «зеленой» области спектра. Построены примеры карт распределения хлорофилла в исследуемом районе Южного берега Крыма,

полученные с использованием коррекции. Восстановленные величины концентраций в прибрежных водах соответствуют данным прямых биологических измерений.

Предложен метод минимизации функционала, позволяющий учесть модельные погрешности. 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 Заключение приводятся основные результаты и выводы.

Обоснованность и достоверность результатов

Обоснованность научных положений диссертации, достоверность полученных результатов и выводов базируется на основе точных решений основных уравнений оптики, большом объеме экспериментальных данных, соответствии их теоретическим расчетам и совпадением с данными независимых методов. В процессе выполнения диссертационной работы автор лично принимал участие в проведении большого объема натурных экспедиционных исследований во многих акваториях Мирового океана.

Исследования по теме диссертации достаточно полно отражены в научной литературе и прошли всестороннюю апробацию на престижных научных конференциях.

По теме диссертации опубликовано 33 научные работы, 26 из них удовлетворяют требования ВАК. Результаты исследований автора опубликованы в 14-ти изданиях, содержащихся в наукометрических базах.

Практическая значимость полученных результатов

Достоинством работы является полнота физической постановки задачи и рациональное сочетание экспериментальных методов исследований с их всесторонним и глубоким теоретическим обоснованием, а также нацеленность на получение практических результатов с выявлением новых возможностей привлечения этих научных данных к проблеме повышения точности биооптической интерпретации данных глобальных цветковых съемок поверхностных вод со спутников.

На основе анализа расчетных спектров яркости восходящего излучения с использованием экспериментальных данных по поглощению и рассеянию чистой морской воды выявлены основные противоречия между классической теорией распространения света в море и реальными наблюдениями.

С целью преодоления этих противоречий в работе предложено новое представление об абсолютно чистой воде. Это особое состояние рассеивающей среды, связанное не только с неоднородностями из-за флуктуаций молекул, но и с неоднородностями, вызванными

согласованным поведением молекул в чистой воде без примесей. Дано логико-теоретическое обоснование этому на основе анализа физического принципа неравновесной статистики, а также исследовано влияние пространственных корреляций положений частиц на угловой показатель рассеяния. Соискателем были даны рекомендации, основанные на понимании анизотропной природы светорассеяния в жидкостях, учтенные при разработке и изготовлении приборов для измерения индикатрисы рассеяния света водой.

Рекомендации по использованию результатов диссертации.

Полученные результаты целесообразно использовать в организациях, занимающихся проблемами оптики океана, распространения оптического излучения в морях и атмосфере, дистанционного и контактного определения характеристик и состава морских вод. Кроме того результаты работы весьма полезны для природоохранных и биоресурсных служб.

Однако диссертационная работа не свободна от **недостатков**. Отметим следующие:

1. В диссертации использованы понятия «чистая вода», «реальная природная чистая вода», «эталонная вода», однако не дано конкретного определения этим типам вод.

2. Предложенная «кластерная» модель молекулярного рассеяния воды объясняет ряд оптических явлений, но основана на гипотезе и желательна более глубокая экспериментальная проработка. Также, автору следовало бы отметить в работе, что гипотеза неоднородной, молекулярно-кластерной структуры жидкой воды, в целом, уже обсуждалась в научной литературе для объяснения ее отдельных необычных свойств (см., например, обзор в *New Scientist*, 6 Feb., 2010 или *Chemical Physics Letters* 460 (2008) 387–400).

3. В работе обосновано применение для мониторинга воды (чистоты) измерителя углового показателя рассеяния, а не детекторов показателя ослабления или показателя полного рассеяния. Однако его использование в практической работе нуждается в решении вопроса, связанного с влиянием заметного уменьшения её прозрачности, что не выполнено.

4. Относительно вывода, что высокая корреляция АОТ на разных длинах волн обусловлена малой относительной влажностью (стр. 221, 229), отметим, что влажность является не основным, а одним из дополнительных факторов, влияющих на корреляцию.

Высокая корреляция АОТ на разных длинах волн определяется закономерностями ослабления излучения. Каждая частица аэрозоля и их совокупность приводят к ослаблению излучения на всех длинах волн, в соответствии с величиной фактора ослабления излучения, зависящего от относительного размера частиц ($2\pi r/\lambda$).

5. Кроме относительной влажности, на АОТ влияет множество других факторов (скорость ветра, увлажненность подстилающей поверхности, инсоляция, стратификация атмосферы), но основным является синоптический: смена воздушных масс и барических объектов. Однако эти факторы в работе не рассматриваются и не учитываются – всё сводится к простой модели влияния относительной влажности на размер частиц.

Отмеченные недостатки не умаляют полученные в диссертации результаты и выводы и не влияют на общую положительную оценку работы.

Заключение

Диссертационная работа Е.Б. Шибанова является законченной научно-квалификационной работой, в которой выполнены исследования, имеющие важное научное и прикладное значение, связанные с разработкой и совершенствованием оптических методов дистанционного исследования океанической среды и воздушной над океаном.

Диссертация по содержанию и оформлению удовлетворяет действующим требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного 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.

Отзыв подготовлен на основании заключения совместного семинара Отделения лазерного зондирования и Отделения радиационных составляющих климата Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН» от 09 сентября 2020 года, протокол № 7.

Председатель семинара, главный научный сотрудник,
д.ф.-м.н., 01.04.05 «Оптика»

Г.Г. Матвиенко

Секретарь семинара,
к.ф.-м.н., 01.04.05 «Оптика»

О.В. Харченко

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева» Сибирского отделения Российской академии наук, 634055, Россия, г. Томск, площадь Академика Зуева, 1, тел: (3822) 492-738, факс: (3822) 492-086, e-mail: contact@iao.ru, сайт: www.iao.ru