

## ОТЗЫВ

официального оппонента Карабашева Генрика Сергеевича, доктора физико-математических наук, главного научного сотрудника Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт океанологии Российской академии наук (ИО РАН) на диссертационную работу Шибанова Евгения Борисовича «Оптические характеристики неоднородностей морской воды и атмосферы над морем», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 25.00.28 - океанология

Евгений Борисович Шибанов представил к защите диссертационную работу, цель которой состоит в исследовании оптических эффектов, обусловленных микромасштабными неоднородностями морской воды и приводной атмосферы в приложении к задачам дистанционного зондирования моря. Соискатель сформулировал шесть задач, решение которых необходимо для достижения указанной цели. Формулировки цели и задач диссертации однозначно свидетельствуют о ее высокой актуальности, поскольку их успешное решение позволит заполнить ряд пробелов в представлениях о закономерностях распространения света в природных водных бассейнах и предложить новые подходы к реализации диагностического потенциала эффектов взаимодействия света с водной средой.

Сочетая теоретические исследования с экспериментальными, автор уделял должное внимание вопросам метрологического обеспечения созданной им аппаратуры до уровня, который позволил включиться в равноправное научное сотрудничество и выполнить совместные исследования с отечественными и зарубежными коллегами. Такая открытость, служит надежным свидетельством значимости и достоверности результатов рецензируемой работы.

**Научная новизна** работы состоит в следующем. Автор **обобщил и систематизировал** большой объем оригинальных гидрооптических данных, собранных им в ходе многочисленных экспедиций на исследовательских судах в различных регионах Мирового океана, что обеспечило полноту первичной информации о природных явлениях, рассматриваемых в диссертации; соискатель **разработал, создал и активно использовал** аппаратурно-методический комплекс вместе с надлежащим программным обеспечением для лабораторных экспериментов и натурных наблюдений. Как результат, соискателю удалось обнаружить ряда неизвестных ранее явлений и предложить их истолкование. В частности, он **показал несостоятельность представлений о** флуктуационных неоднородностях чистой

беспримесной воды как единственной причине рассеяния света предельно чистыми водами океана.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и приложения. Объем диссертации 305 страниц текста, 77 рисунков и 7 таблиц.

**Введение** открывается доказательством актуальности темы диссертации в связи с трудностями при реализации и истолковании результатов дистанционного зондирования океана. Затем освещается недостаточность разработанности темы диссертации предшественниками соискателя, четко формулируются основная цель вместе с шестью задачами исследования и приводятся определения объекта и предмета исследований. Научная новизна полученных результатов представлена в виде 5 пунктов с подпунктами на стр. 9-11 диссертации. Практическое значение полученных результатов (стр. 12- 13) и методы исследования (стр. 13-14) представлены с полнотой, соответствующей заявленным целям диссертации. Далее приведены положения, выносимые на защиту (пять пунктов касательно методов, алгоритмов, моделей и новой информации о природных явлениях, релевантных для темы диссертации) и обосновывается достаточность степени достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных соискателем. Апробация результатов диссертации происходила с 2003 г. по 2018 г. на 13 международных и отечественных научных мероприятиях. Выборка публикаций по теме диссертации включает 33 научные работы, из них 18 – в периодических научных журналах, входящих в перечень ВАК. Личный вклад автора в публикациях с соавторами представлен в специальном перечне.

**Первая глава** посвящена методике измерений индикатрисы и показателя рассеяния света морской водой. Автор приводит определение индикатрисы рассеяния как функции, форма которой зависит от длины волны света и угла рассеяния, приводит сведения об аппаратуре промышленного изготовления, пригодной для измерения индикатрис в морской среде, и описывает трудности определения индикатрис в широком диапазоне углов, что необходимо для достоверного определения размерного состава частиц по форме индикатрисы. Далее автор описывает разработанный и построенный им измеритель рассеяния в широком диапазоне углов, уделяя особое внимание вопросам минимизации погрешностей измерений. Созданный соискателем нефелометр отличается выдающимися метрологическим характеристиками, что позволяет применять его для изучения закономерностей рассеяния света и решения обратных задач в предельно прозрачных водах открытого океана равно как и в предельно мутных водах прибрежной зоны.

**Во второй главе** автор декларирует недостаточность термодинамического подхода к светорассеянию в чистой природной воде, свободной от частиц взвеси, и настаивает на существовании неоднородностей иной природы в виде двумерного подпространства дефектов воды, на котором и происходит рассеяние света. Подтверждением тому служат опубликованные результаты экспериментов соискателя, в ходе которых смешение вод разной плотности, свободных от взвешенных частиц, приводило к кратному усилению и последующей релаксации интенсивности светорассеяния. В этой главе предложены система уравнений и ее решение, свидетельствующее, в частности, о том, что “в чистой морской воде ... можно наблюдать значения вертикального ослабления света заметно меньшие ранее предсказанных величин”. Реальность расхождений между данными наблюдений и общепринятыми воззрениями иллюстрирует график на рис. 2.1, где сравнивается спектр коэффициента яркости, зарегистрированный в Саргассовом море как регионе предельно “чистых” вод, со спектрами, рассчитанными с использованием некоторых приближений. Материалы второй главы дают убедительные доказательства зрелости соискателя как ученого.

**В третьей главе** представлены результаты измерений показателя рассеяния морской воды в диапазонах углов  $0.5^\circ - 178^\circ$  и длин волн от 380 до 780 нм, выполненных в Черном, Средиземном и Балтийском морях и Мексиканском заливе. Новые результаты характеризуют оптические свойства вод океана самой различной прозрачности, кроме акваторий с предельно высокой прозрачностью вод, и дают представление о пределах изменчивости параметра асимметрии индикатрисы рассеяния (от 50 до 130), росте этого параметра на 10-20% в длинноволновой области спектра относительно коротковолновой, а также об уменьшении вытянутости индикатрисы с ростом длины волны излучения на малых углах ( $0.5^\circ - 5^\circ$ ). Показано, что интервал углов от  $2^\circ$  до  $5^\circ$  оптimalен для определения общего показателя рассеяния нефелометрическим методом. Выявлена статистическая зависимость между селективностью спектра общего рассеяния и вероятностью рассеяния назад. По мнению соискателя, такая зависимость косвенно подтверждает вклад мелких частиц в рассеяние вперед, поскольку они усиливают неоднородность структуры воды как таковой. Обнаружена неустойчивость углового показателя рассеяния воды относительно малых возмущений. Поэтому важно сохранять постоянство методики измерений ради сопоставимости получаемых данных и повышения их качества.

**Четвертая глава** посвящена совершенствованию стандартных методов расчета рассеяния света в водной среде и в атмосфере. Тематика главы может показаться не вполне

соответствующей научному содержанию диссертации, однако наличие такой главы представляется оправданным в силу радикальных изменений взглядов на механизмы рассеяния света в океане и атмосфере, реальность которых обосновывается соискателем.

**В пятой главе** исследуется изменчивость оптических свойств аэрозоля над морем. Знание закономерностей такой изменчивости необходимо для успеха оптического дистанционного зондирования океана из космоса, поскольку вклад аэрозольной составляющей в сигнал орбитального фотометра существенно превышает вклад солнечной радиации, обратно-рассеянной водной толщой в атмосферу. Соискатель обращает внимание на коррелированность спектрально-различных АОТ вследствие ограничения на отсутствие облачности в период наблюдений, роль субмикронной фракции в аэрозольном ослаблении света, влияние бимодальности размерного спектра частиц в атмосфере.

**Шестая глава** нацелена на усовершенствование дистанционных методов определения оптически активных веществ в верхнем слое моря (в первую очередь хлорофилла как пигмента, присущему любым растениям). Автор предлагает ряд процедур, компенсирующих недостаточность стандартных приемов коррекции спектральных коэффициентов яркости для достоверного определения концентрации хлорофилла в приповерхностном слое водного бассейна. Указанные процедуры были применены к двум SeaWiFS-изображениям акватории Черного моря южнее Севастополя (данные уровня L2).

Обработанные изображения отличались от исходных меньшим размахом оценок концентрации хлорофилла и более однородным его распределением по сравнению с исходным снимком. Первое указывает на успешность процедур, учитывая известную склонность стандартного SeaWiFS-алгоритма определения хлорофилла завышать его концентрацию. Однако повышенная неоднородность исходного изображения представляется более естественной, так как снимки покрывают зону Основного Черноморского течения (ОЧТ), присутствие которого нередко прослеживается на спутниковых изображениях моря в виде струе- и вихре-подобных структур.

**В заключении** дана сводка основных научных результатов диссертационной работы. Наиболее значимыми среди них представляются следующие.

1. Реализован, апробирован и внедрен метод определения показателя рассеяния света морской водой в широком спектральном (380 – 780 нм) и угловом ( $0.5^\circ$  –  $178^\circ$ ) интервалах.
2. Результаты исследований углового показателя рассеяния света морской водой в вышназванных интервалах длин волн и углов, полученные в Черном, Средиземном и

Балтийском море и в Мексиканском заливе. Впервые показано, что в природных водах практически всегда наблюдается локальный минимум спектральной селективности рассеяния в области передних углов  $20^\circ - 30^\circ$ .

**3.** Измерения показателя рассеяния света показали:

- несмотря на разнообразие природных вод, угловая структура их функции рассеяния меняется мало; основное отличие индикаторов рассеяния света состоит в степени ее вытянутости; параметр асимметрии индикаторы рассеяния света на частицах взвеси изменялся в диапазоне от 50 до 130;
- асимметрия индикаторы в длинноволновой области спектра примерно на 10 – 20% выше, чем в области коротких волн;
- на малых углах рассеяния  $0.5^\circ - 5^\circ$  наблюдается обратная картина: рост вытянутости пика рассеяния с уменьшением длины волны;
- коэффициент корреляции общего показателя рассеяния с угловым показателем рассеяния в диапазоне углов  $2^\circ - 5^\circ$  составляет 98%.

**4.** Установлено, что причиной высокой анизотропии рассеяния света в беспримесной воде может быть 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.

**5.** Предложена модель неоднородностей локальной плотности жидкой воды. Для описания отдельных составляющих в общей системе неоднородностей введено понятие оптической квазичастицы. На основе сопоставления модельных расчетов и экспериментальных данных были оценены параметры функции распределения оптических квазичастиц по размерам. Выведены формулы, учитывающие взаимное расположение оптических квазичастиц. Модель оптических неоднородностей воды описывает существование локального минимума функций рассеяния в окрестности  $30^\circ$ . Наличие минимума подтверждается результатами экспериментов по рассеянию света в искусственных одисперсных средах.

**6.** Проведен эксперимент, подтверждающий согласованность расположения квазичастиц относительно друг друга. Оценено время релаксации воды к первоначальному «невозмущенному» состоянию. Сделаны оценки объемной меры подпространства «дефектов» в воде. Экспериментально показано, что эффект увеличения рассеяния света при смешивании вод различной плотности в основном объясняется диффузией примеси по

системе «дефектов» воды на масштабах от 10 до 1000 нм. Специфика механизма диссипации тепловой энергии и диффузии концентрации примесей состоит в существовании неоднородностей воды *a priori*, а не в их возникновении из-за внешних возмущений.

Эти и другие результаты диссертации, позволили соискателю внести весомый вклад в решение таких сложных проблем, как молекулярная структура пресной и морской воды, учет влияние аэрозоля на атмосферную коррекцию данных мультиспектральных сканеров цвета океана и определение биологически-значимых оптических характеристик деятельного слоя океана по спектру обратно-рассеянной солнечной радиации.

Достижения, рекомендации и выводы диссертации представлены с исчерпывающей полнотой в солидном списке работ, опубликованных автором самостоятельно и в соавторстве с отечественными и зарубежными партнерами, в том числе в журналах высшего уровня. Существенно, что большинство коллективных публикаций обнаруживают явные признаки лидерства соискателя в формировании их содержания. По теме диссертации опубликовано 33 работы, из них 26 в рецензируемых российских, украинских и международных научных изданиях в рецензируемых научных журналах из списка, рекомендованного ВАК.

Диссертация полностью отвечает специальности 25.00.28 – Океанология по содержанию, полученным результатам, научной значимости выводов и формальным показателям.

При этом представляются уместными следующие замечания.

1. На рис. 2.1 спектральные коэффициенты яркости теоретически «чистой» морской воды, найденные для разных моделей поглощения света в воде, сравниваются с экспериментальным спектром коэффициента яркости в Саргассовом море как примером спектра предельно «чистой» (беспримесной) природной воды. На самом деле воды этого моря, как и предельно прозрачные воды тропической Пацифики, облашают слабой, но измеримой флуоресценцией, характеристики которой указывают на ее принадлежность окрашенным растворенным органическим веществам (CDOM в обще-принятом обозначении). Флуоресценция без поглощения невозможна. Существенно также, что Саргассово море граничит с акваториями повышенной изменчивости океанологических характеристик (Гольфстрим на западе и т.п.), и частично принадлежит широтам, где развита сезонная изменчивость водной среды. В целом, природные условия в Саргассовом море бывают достаточно разнообразными, чтобы можно было полагаться на минимальность и стабильность характеристик среды, зависящих от жизнедеятельности местной биоты.

2. Определение успешности процедур, компенсирующих влияние ошибок атмосферной коррекции на решение обратных задач, по размаху и смещенности спутниковых оценок хлорофилла до и после коррекции (раздел 6), представляется недостаточно убедительным по сравнению с определением разности коэффициентов яркости по спутнику и контактным данным, поскольку в этом случае не существенны известные трудности пересчета коэффициентов яркости в концентрацию хлорофилла.

В диссертации встречаются опечатки (стр. 138 "Угровой показатель рассеяния"; стр. 199 "С помощью таких метолов..."), терминологические неточности (стр. 238 "Поэто-му под «концентрацией пигментов» будут подразумеваться пигменты фитопланктона и других микроорганизмов" - бактерий ?), спорные высказывания (стр. 241 "Частицы биологического происхождения практически не оказывают влияния на характеристики обратного рассеяния" – а кремниевые и кальцитовые скелеты массовых видов фитопланктона?)

Однако указанные замечания нисколько не уменьшают ценность и высокий научный уровень представленной работы. Диссертация изложена научным языком и хорошо оформлена. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Работа Е.Б. Шибанова отвечает всем требованиям ВАК РФ к докторским диссертациям, а ее автор достоин присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 25.00.28 – океанология.

Официальный оппонент, главный научный сотрудник лаборатории «Оптика океана» ФГБНУ Институт океанологии РАН, доктор физико-математических наук

Генрик Сергеевич Карабашев

26 августа 2020 г. +7(495)422-43-33 e-mail: [genkar@mail.ru](mailto:genkar@mail.ru)

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН», 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36, телефон 8(499)124-59-92. Подпись Г.С. Карабашева удостоверяю

Ученый секретарь ФГБУНИОР



А.С. Фалина