

АКАДЕМИЯ НАУК СССР  
ИНСТИТУТ ОКЕАНОЛОГИИ им. П.П. ШИРШОВА

На правах рукописи

ЛУЧИНИН Александр Григорьевич

УДК 535.31:535.36:551.46

ТЕОРИЯ ПЕРЕНОСА ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
ЧЕРЕЗ ВЗВОЛНОВАННУЮ ПОВЕРХНОСТЬ МОРЯ  
В ПРИЛОЖЕНИИ К ПРОБЛЕМАМ  
ДИСТАНЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ И ВИДЕНИЯ

(специальность 11.00.08 - океанология)

А в т о р е ф е р а т  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Москва - 1987

У

Работа выполнена в Институте прикладной физики АН СССР.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор Ю.А.КРАВЦОВ,

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Ю.-А.Р.МУЛЛАМАН,

доктор физико-математических наук, профессор К.Н.ФЕДОРОВ.

Ведущая организация: Институт физики АН БССР.

Защита диссертации состоится "13" 01 1988 г.  
в 17-00 час. на заседании Специализированного Совета  
Д.002.86.01 по защите диссертаций на соискание ученой  
степени доктора наук при Институте океанологии им. П.П.Шир-  
шова АН СССР.

Адрес института

С диссертацией  
океанологии им.

*Авторец*

Ученый секретарь  
Специализированно-  
кандидат географии

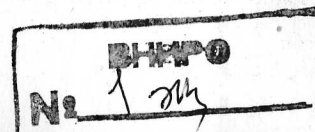
В.П.ФИЛИПОВ

- 3 -

### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Необходимость освоения Мирового океана, включая "умение" регистрировать и правильно интерпретировать происходящие в нем процессы, повлекла за собой развитие дистанционных средств наблюдения. Широкая гамма этих средств соответствует огромному диапазону задач, стоящих перед народным хозяйством любого государства, активно осваивающего материковый шельф Океана или другие его части. Большое место среди этих средств занимают системы подводного видения, используемые при проведении любых подводных работ. Вместе с тем необходимость увеличения оперативности просмотра подводной обстановки, поиск крупных образований на шельфе и ряд других задач потребовали создания систем видения, размещаемых на воздушных носителях (или в космосе) и принципиально работающих через возмущенную границу воздух - вода. Ясно, что в этом случае возмущенная поверхность играет роль маскирующего фактора и поэтому в последние годы корректному учету этого фактора уделяется большое внимание. Без такого учета невозможно правильно прогнозировать параметры систем видения, предназначенных для наблюдения из атмосферы объектов, расположенных под водой, и, более того, проектировать эти системы и оптимальную организацию режимов наблюдения.

Наряду с системами видения, в последние два десятилетия бурно развиваются средства дистанционной оптической диагностики океана и его поверхности. Эти средства должны способствовать решению ряда задач. В этом ряду можно указать на диагностику внутренних волн в океане, исследование различных научных и прикладных задач физики поверхностных волн, определение степени загрязнения поверхности, биопродуктивности



различных районов океана и др. Здесь не ходимо отметить, что системы дистанционной оптической диагностики также имеют дело с взволнованной поверхностью: либо она играет роль объекта исследования, либо является мешающим фактором при извлечении информации из толщи воды. В связи с этим так же, как и для систем видения, здесь необходимо уметь оценивать влияние волнения на параметры систем.

Вместе с тем нет нужды пояснять, что возможности оптимального построения систем видения или диагностики через взволнованную поверхность, а также систем диагностики поверхностного волнения, обусловлены решением общей научной проблемы, которую можно назвать проблемой видения и дистанционной оптической диагностики через взволнованную поверхность (включая дистанционную оптическую диагностику поверхностного волнения). Эта проблема состоит в отыскании количественных связей между характеристиками системы видения или диагностики, параметрами объекта наблюдения, оптическими свойствами воды, характеристиками поверхностного волнения с одной стороны и, с другой стороны, параметрами полезного сигнала, который образуется в результате совокупного действия указанных факторов. Как видно из простого перечисления этих факторов, речь идет о многопараметрической задаче, решение которой позволит связать как динамические, так и статистические свойства сигналов в системах диагностики или видения с "входными" характеристиками систем, свойствами трассы распространения сигнала и объекта наблюдения и, в конечном счете, сформулировать "выходные" характеристики систем такие, как даль-

ность (глубина) видимости, пространственная разрешающая способность, контрастная чувствительность. Наличие таких связей позволит более четко сформулировать возможности упомянутых систем и при их построении с одной стороны не гнаться за "сверхразрешением", достижение которого невозможно из-за физических ограничений, налагаемых свойствами объекта наблюдения, а с другой - дает необходимый инструмент для прогнозной оценки их производительности и для оптимальной организации наблюдений.

Различные аспекты сформулированной выше проблемы уже обсуждались в научной литературе. Достаточно упомянуть для примера ставшие уже классическими работы Кокса и Манка по определению дисперсии уклонов поверхностных волн по распределению яркости солнечной дорожки или пионерскую работу Мулламаа по видимости через взволнованную поверхность. Кроме того, в течение последних двух десятилетий главным образом усилиями советских авторов была сформулирована и практически завершена теория подводного видения. Однако ни эта теория, ни ряд соотношений, полученных ранее для оптики взволнованной поверхности, не могут полностью удовлетворить практические потребности по следующим основным причинам:

1. Теория подводного видения имеет свое применение для расчета именно подводных систем наблюдения. Для видения через взволнованную поверхность она становится неприменимой.
2. Соотношения, полученные в ряде работ для видимости подводных объектов из атмосферы получены без учета влияния процессов многократного рассеяния и поглощения света в воде.
3. Аналогичный недостаток имеют и работы по оптической диагностике поверхностного волнения, поскольку в этом слу-

чае также необходим учет подповерхностного излучения, статистические свойства которого определяются совокупным действием поверхности и процессов рассеяния и поглощения света в воде.

4. Практически не разработана "флуктуационная" часть теории видимости и диагностики через взволнованную поверхность, необходимость которой принципиально обусловлена стохастической природой оптических полей (сигналов), преломленных или отраженных взволнованной поверхностью.

5. Существующие работы в области оптики взволнованной поверхности используют разные и зачастую неадекватные модели поверхностного волнения, затрудняющие или делающие невозможным сопоставление разнородных результатов.

В связи с этими обстоятельствами группой сотрудников ИИФ АН СССР под руководством автора в середине 70-х годов была поставлена и к настоящему времени завершена работа по построению теории видения и оптической диагностики через взволнованную поверхность. При этом в качестве фундамента была использована теория подводного видения, в создании которой принимал участие и автор настоящей работы.

Целью работы, в которой обобщены результаты исследований, проведенных автором с сотрудниками в 1975-1986г.г., является решение проблемы видения и оптической диагностики через взволнованную поверхность, а именно:

1. Разработка теории переноса оптического излучения через взволнованную поверхность и толщу воды, устанавливающей соответствие между статистически средними и флуктуационными составляющими светового поля с одной стороны и параметрами поверхностного волнения и морской воды с другой.

2. Разработка теории отражения световых полей от взволнованной поверхности и подповерхностной толщи воды, учитывающей поглощение и рассеяние света в воде и его двукратное преломление на взволнованной границе.

3. Теоретическое исследование контрастной чувствительности систем оптической диагностики различного типа, определение ее связи с условиями на поверхности, свойствами морской воды и параметрами системы, включая систему обработки полезного сигнала.

4. Теоретическое и экспериментальное исследование возможности дистанционной оптической диагностики спектра поверхностного волнения.

5. Статистическая формулировка теории видения через взволнованную поверхность, включающая в себя методы расчета разрешающей способности и глубины видимости с учетом шумов фотодетектора и флуктуаций, обусловленных случайной модуляцией фоновых помех поверхностным волнением.

Решение перечисленных задач в совокупности является решением сформулированной выше научной проблемы видения и дистанционной оптической диагностики через взволнованную поверхность, имеющей большое народно-хозяйственное значение.

На защиту выносятся следующие основные положения:

1. Малоугловое приближение уравнения переноса излучения со случайными граничными условиями, определяемыми поверхностными волнами, позволяет установить однозначное соответствие между флуктуационными характеристиками подводного светового поля, поверхностным волнением, первичными гидрооптическими характеристиками и условиями освещения. Вторые статистические

моменты подводной освещенности связаны с двухточечной характеристической функцией и квадратом частотно-контрастной характеристики слоя воды линейным интегральным соотношением. Рассеяние и поглощение света в воде являются существенными факторами при формировании флуктуаций. При некоторых условиях вторые моменты флуктуаций подводной освещенности выражаются непосредственно через пространственно-временной спектр поверхностных волн.

В широком диапазоне глубин и пространственных масштабов можно пренебречь флуктуациями, вызванными разбросом оптических путей фотонов, что позволяет считать поверхность эквивалентным фазовым экраном, характеристики которого определяются спектром уклонов поверхностных волн.

2. Малоугловое приближение уравнения переноса со случайными граничными условиями позволяет рассчитывать статистические характеристики светового поля, отраженного от взволнованной поверхности при ее облучении источниками с различными характеристиками направленности. При квазидиффузном освещении спектральная плотность флуктуаций яркости отраженного поверхностного поля пропорциональна спектру уклонов поверхностного волнения.

3. Оптическая теорема взаимности и квазиднократное малоугловое приближение уравнения переноса излучения позволяют установить соответствие между статистическими характеристиками выходящего из-под поверхности излучения, параметрами поверхностного волнения и первичными оптическими характеристиками воды. При этом средняя величина отраженного толщей воды светового поля выражается через двухточечную характеристическую функцию уклонов поверхностных волн и не равна соответствующей ве-

личине для случая гладкой границы раздела: этот эффект, аналогичный известному ранее эффекту усиления обратного рассеяния на крупномасштабных объемных неоднородностях среды приводит к изменению среднего спектрального (цветового) состава выходящего из-под поверхности излучения по отношению к спектру излучения, выходящего из-под гладкой границы раздела. Вторые моменты флуктуаций яркости выходящего из-под поверхности излучения выражаются через четырехточечную характеристическую функцию уклонов волн и при некоторых условиях линейно связаны с пространственным спектром кривизин поверхности.

4. Соотношение уровней флуктуаций световых полей, отраженных поверхностью и подповерхностной толщей воды, при естественных условиях освещения зависит от пространственного масштаба флуктуаций и диапазона оптического спектра и определяется спектральной избирательностью и рассеивающими свойствами воды.

5. Формула переноса изображения через взволнованную поверхность и толщу воды, полученная на основе оптической теоремы взаимности и малоуглового приближения уравнения переноса излучения со случайными граничными условиями, позволяет рассчитывать средние величины полезного сигнала в изображении под водных объектов при произвольных распределениях их коэффициентов отражения. При угловой расстройке между направлением падающего излучения и направлением приемной диаграммы более  $10^\circ$  и для умеренных глубин эффект усиления обратного рассеяния мал и оптическая передаточная функция системы видения через поверхность может быть представлена в виде произведения независимым образом рассчитанных частотно-контрастных характеристик собственно системы видения, взволнованной поверхности и слоя воды между поверхностью и объектом наблюдения.

Величины искажений, вносимых в среднее изображение слоем воды и взволнованной поверхностью сравнимы между собой и их соотношение зависит от пространственного масштаба изменений отражательных характеристик объекта наблюдения и глубины, на которой он расположен.

6. Дисперсия шумов в изображении представляется в виде суммы двух составляющих, одна из которых определяется вызванным волнением флуктуациями световых полей, попадающих на вход приемного устройства системы наблюдения, а вторая обусловлена дробовыми шумами суммарного тока на фотодетекторе приемной системы. Соотношение этих двух составляющих определяется уровнем освещенности (мощностью источника излучения) и зависит от типа применяемой системы видения и глубины наблюдаемого объекта. Разработанная методика расчета отношения сигнал/шум в изображении позволяет определять предельные глубины видимости и разрешающую способность систем видения через взволнованную поверхность и толщу воды.

7. Точность измерения дисперсии уклонов воды оптическими системами скаттерометрического типа и средней высоты поверхности оптическими альтиметрами определяется стохастической природой полезных сигналов в этих приборах и зависит от числа статистически независимых участков поверхности в элементе разрешения.

8. Разработанная методика расчета точности измерений дисперсии уклонов волн оптическими дистанционными системами позволяет оценить "видимость" внутренних волн в океане по их проявлениям на поверхности: при наблюдении поверхности, свободной от солнечных бликов могут быть "видимы" более сла-

бые внутренние волны, нежели при наблюдении в зоне солнечной дорожки.

9. Разработанная методика спектрального анализа изображений взволнованной поверхности позволяет получать информацию об изменчивости спектра поверхностных волн в реальном времени в широком диапазоне пространственных масштабов; экспериментальные исследования, проведенные с помощью аппаратуры дистанционного спектрального анализа поверхностных волн в реальном времени, дают качественно новые сведения об изменчивости поверхностного волнения в поле внутренних волн и под действием поверхностно-активных веществ.

10. Предложенный метод расчета сигнала обратного рассеяния при импульсном лазерном зондировании водной среды через взволнованную поверхность описывает основные свойства этого сигнала - учитывает эффект угления обратного рассеяния на поверхностном волнении и позволяет оценивать его флуктуационную составляющую. Дисперсия флуктуаций сигнала, обратно рассеянного тонким слоем воды зависит от глубины этого слоя и скорости движения лидера над поверхностью - при спутном движении лидера и поверхностных волн возможно увеличение уровня флуктуаций за счет эффекта синхронизма движения лидера и поверхностных волн, ответственных за формирование флуктуаций сигнала с заданной глубины. Флуктуационная компонента сигнала обратного рассеяния лидера может быть использована с одной стороны для измерения спектра поверхностного волнения, а с другой - для измерения частотно-контрастной характеристики слоя воды. В последнем случае поверхностное волнение играет роль оптического эталона, создающего на заданной глубине представительный спектр пространственных распределений освещенности.

Научная новизна работы заключается в том, что это первое комплексное исследование проблемы видения и дистанционной оптической диагностики через взволнованную морскую поверхность в ее современной постановке, в котором впервые:

1) разработана теория переноса оптического излучения через взволнованную поверхность и толщу воды, которая единым образом учитывает фокусирующее действие поверхности, рассеивающие и поглощающие свойства морской воды и которая позволяет рассчитывать флуктуационные характеристики подводного светового поля при известных характеристиках источника излучения, поверхностного волнения и морской воды;

2) определены условия, при которых флуктуационные составляющие подводной освещенности определяются углами поверхностных волн и не зависят от их возвышений;

3) предложена методика расчета статистических характеристик световых полей, отраженных взволнованной поверхностью и толщей воды, с помощью которой получены соотношения для расчета первых двух статистических моментов яркости отраженного светового поля;

4) теоретически предсказан, рассчитан и экспериментально подтвержден эффект усиления обратного рассеяния на поверхностном волнении;

5) теоретически исследовано явление изменения спектрального (цветового) состава отраженного морем излучения, обусловленное селективным по оптическому спектру характером эффекта усиления обратного рассеяния;

6) рассчитаны пространственные спектры флуктуаций яркости отраженного морем излучения и показано, что в оптическом диа-

пазоне длин волн, соответствующих окну прозрачности морской воды, флуктуации с большими пространственными масштабами определяются выходящей из-под поверхности компонентой излучения;

7) построена теория переноса изображения через взволнованную поверхность и толщу воды, единым образом учитывающая искажения изображения в результате случайного преломления на поверхности, рассеяния и поглощения света в воде, и проведено сравнение роли различных факторов, приводящих к размытию изображения;

8) разработана методика расчета отношения сигнал/шум в изображении, учитывающая как "внешние" шумы - флуктуации, обусловленные взволнованной поверхностью, так и "внутренние" - флуктуации фототока, вызванные дробовым эффектом;

9) выполнен расчет уровней фоновых сигналов и их флуктуационных составляющих для систем видения, работающих в условиях естественного (солнечного) освещения и систем, использующих импульсные (лазерные) источники подсветки;

10) определены глубины видимости и разрешающая способность систем видения различного типа при различных условиях наблюдения;

11) найдено наиболее строгое объяснение известного факта улучшения видимости с увеличением высоты наблюдения над поверхностью - этот эффект обусловлен эффективным усреднением флуктуаций светового поля при увеличении элемента разрешения на местности;

12) проведена теоретическая оценка точности измерения некоторых характеристик поверхностного волнения дистанционными методами на ее основе исследована задача обнаружения внутренних волн в океане по их проявлениям на океанической поверхности;

13) теоретически и экспериментально исследована возможность определения пространственного спектра волнения с помощью спектрального анализа изображения взволнованной поверхности;

14) выполнен цикл натурных исследований изменчивости коротковолновой ( $0,1 \text{ м} \div 1 \text{ м}$ ) части спектра поверхностного волнения в поле внутренних волн и в нефтяных slicks и получена качественно новая информация об этом классе явлений;

15) теоретически исследованы свойства сигнала обратного рассеяния при лазерном зондировании через взволнованную поверхность и выполнен анализ эффекта синхронизма, заключающийся в увеличении уровня флуктуаций при спутном (синхронном) движении лидара и поверхностных волн, ответственных за формирование флуктуаций сигнала с заданного горизонта;

16) предложен принципиально новый способ исследования частотно-контрастной характеристики слоя воды, заключающийся в измерении пространственного спектра флуктуаций сигналов обратного рассеяния с различных горизонтов и их взаимной нормировке.

Практическая ценность работы заключается в том, что перечисленные результаты в совокупности представляют собой теоретическое обобщение и решение крупной научной проблемы, имеющей важное народно-хозяйственное значение. Она позволяет исследовать перенос изображения и видимость через взволнованную поверхность в широком диапазоне условий наблюдения и для различных вариантов построения систем видения, а также исследовать возможности систем дистанционной оптической диагностики через взволнованную поверхность и диагностики поверхностного волнения. Их использование при проектировании систем видения и диаг-

ности и при планировании и организации измерений и поиска дает возможность прогнозной оценки их действительных, зависящих от условий наблюдения параметров, и, тем самым, повысить эффективность проведения работ в натуральных условиях.

Личный вклад автора. Все приведенные в диссертации материалы по теории переноса излучения и изображения через взволнованную поверхность и толщу воды получены лично автором или при непосредственном участии и под его научным руководством. Экспериментальные результаты исследований изменчивости спектра поверхностного волнения в поле внутренних волн получены в ходе 26-го рейса НИС "Дмитрий Менделеев" и 3-го рейса НИС "Витязь". В их получении (в части идентификации поверхностных и подповерхностных явлений) принимал участие коллектив исследователей ИФ АН СССР, ИО АН СССР и НИФИ Минвуза РСФСР, состав которого отражен рядом совместных публикаций. В этих исследованиях автор руководил работой отряда дистанционной оптической диагностики поверхностного волнения и принимал непосредственное участие в измерениях, обработке и интерпретации полученных результатов. Материалы кандидатской диссертации автора, защищенной им в феврале 1974 года в настоящую работу не включены.

Апробация работы. Результаты исследований, включенных в диссертацию, отражены в 25 публикациях и докладывались на II Всесоюзном съезде океанологов (Ялта, 1982), на 5, 6, 7 и 9 Пленумах Рабочей группы по оптике океана Комиссии АН СССР по проблемам Мирового океана (Светлогорск, 1978; Баку, 1979; Таллин, 1980; Батуми, 1984), в школе по гидрофизическим исследованиям (Солнечногорск, 1986), на семинарах Лаборатории прикладной гидрооптики ИО АН СССР и семинарах отделения гидрофизики ИФ АН СССР.

Ряд результатов автора (формула переноса изображения через взволнованную поверхность и толщю воды, мет. дика и результаты исследований спектра волнения в реальном времени) включены в монографии: "Оптика океана" под ред. А.С.Монина и К.С.Шифрина, А.С.Монина и В.П.Куликовского "Явления на поверхности океана" и А.П.Иванова, Э.П.Зеге и И.Д.Кацева "Перенос изображения в рассеивающей среде.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитированной литературы. Всего в диссертации 208 страниц текста и 67 рисунков. Список литературы содержит 193 наименования (из них 48 иностранных). Отдельно приведен список работ, в которых опубликованы материалы диссертации (25 наименований). Каждая глава, за исключением четвертой, начинается с раздела "Литературная справка", в котором приводится краткий обзор литературы по вопросам, относящимся к материалу данной главы.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

##### ГЛАВА I ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПЕРЕНОСА ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ ВЗВОЛНОВАННУЮ ПОВЕРХНОСТЬ И ТОЛЩУ ВОДЫ

Решение любых прикладных задач оптики взволнованной поверхности естественным образом связано с решением задачи о распространении в воде излучения, преломленного взволнованной поверхностью и, в более узком смысле, с умением рассчитывать величину и спектр обусловленных волнением флуктуаций поля. При этом априорно ясна (и она подтверждается большим числом экспериментальных работ, проведенных рядом советских и зарубежных авторов) необходимость учета эффектов многократного рас-

сеяния и поглощения света в воде. Эти эффекты играют существенную роль в формировании подводного светового поля и его флуктуационной составляющей. Между тем до последнего времени существовал определенный разрыв между описанием обусловленных волнением флуктуаций и теорией распространения световых полей в воде. Поэтому первая глава диссертации посвящена формулировке аппарата, который бы единым образом описывал эффекты, обусловленные случайным преломлением на взволнованной границе и многократным рассеянием и поглощением света в воде. Такой аппарат в равной мере необходим и для описания отражения световых полей от толщи моря (этим вопросам посвящена вторая глава).

В маломугловом приближении процедура расчета подводных световых полей, которая бы учитывала перечисленные выше факторы и позволяла бы находить характеристики этих полей при известных характеристиках источника излучения (расположенных над взволнованной границей раздела), параметрах волнения и первичных гидрооптических характеристиках, сводится к следующему. Световое поле от источника с произвольными пространственно-угловыми характеристиками пересчитывается на взволнованную поверхность. В каждой точке (элементе) поверхности, заданной координатой  $\vec{r}$ , в соответствии с локальным в данный момент времени  $t$  значением возвышения поверхности  $\xi(\vec{r}, t)$  и ее уклона  $\vec{\eta}(\vec{r}, t)$  в приближении касательной плоскости находится поле непосредственно под поверхностью. Затем (в маломугловом приближении) определяется "случайная" функция Грина уравнения переноса излучения, которая определяет характеристики поля от случайного элементарного источника на поверхности, и производится суммирование по всем таким источникам. Полученная таким образом функциональная связь между случайными реализа-

циями поля и поверхностного волнения, включающая в себя характеристики источников излучения и первичные гидрооптические характеристики, позволяет рассчитывать необходимые статистические характеристики поля, естественным образом связанные со статистическими характеристиками волнения и функциями, описывающими эффекты многократного рассеяния и поглощения света в воде. В качестве примера приведем здесь несколько формул для статистических характеристик подводного светового поля, наглядно иллюстрирующих получаемые связи. В частности, в диапазоне глубин  $L \gg \xi$  и при высоте расположения  $z \gg \xi$  точечного мононаправленного источника мощностью  $P_0$  с координатами  $\vec{r}_0$  и направлением  $\vec{n}_0$ , создаваемая им статистически средняя освещенность  $\bar{E}_{TM}$  описывается формулой:

$$\bar{E}_{TM} = \frac{P_0 T}{(2\pi)^2} \iint_{-\infty}^{\infty} \Phi(k, L) \cdot \Theta_1(qL\vec{k}) \cdot \exp\{i\vec{k}(\vec{r} - \vec{r}_0 - \vec{n}_0(z + L/m))\} d\vec{k},$$

где  $T$  - коэффициент пропускания поверхности,  $m$  - коэффициент преломления воды,  $\Phi$  - фурье-спектр распределения освещенности в поперечном сечении первоначально узкого, невозмущенного волнением пучка,  $\Theta_1$  - одноточечная характеристическая функция уклонов поверхности,  $q = \frac{m-1}{m}$ . Эта формула демонстрирует насколько сильно размывается узкий пучок за счет преломления на случайной границе и рассеяния в воде. Из нее между прочим следует, что фурье-спектр поперечного распределения освещенности представляется в виде произведения фактора среды  $\Phi$  и характеристической функции уклонов поверхности  $\Theta_1$  и, в известном смысле, поверхность и среду мож-

но отождествить с двумя последовательными оптическими фильтрами, пропускающими лишь низкие пространственные частоты в поперечном распределении светового поля.

Более сложные соотношения имеют место для вторых статистических моментов подводных световых полей. Например, в тех же приближениях, что и выше, для спектральной плотности флуктуаций подводной освещенности при освещении поверхности потоком параллельных лучей имеем:

$$G_E(\vec{k}, \omega, L) = \frac{E_0^2 T^2}{(2\pi)^3} \Phi^2(k, L) \cdot \iint_{-\infty}^{\infty} [\Theta_2(qL\vec{k}, qL\vec{k}', \vec{r}, \tau) - 1] \exp\{i\omega\tau + i\vec{k}\vec{r}\} d\vec{r} d\tau,$$

где  $\Theta_2$  - двухточечная характеристическая функция уклонов. Из этой формулы при  $(kLq\sigma_n)^2 \ll 1$  (где  $\sigma_n^2$  - дисперсия уклонов) следует:

$$G_E = E_0^2 T^2 q^2 L^2 k^4 G_\xi(\vec{k}, \omega) \cdot \Phi^2(k, L),$$

где  $G_\xi$  - спектр возвышения.

Другими словами, в длинноволновом приближении спектр флуктуаций подводной освещенности пропорционален спектру кривизн поверхности и квадрату фактора среды. Аналогичным образом могут быть рассчитаны и другие характеристики подводных световых полей, в том числе при конечных пространственно-угловых размерах источников излучения.

В этой же главе приводится описание используемых далее форм фактора среды  $\Phi$ , которые основаны на разработанных Л.С. Долиным различных вариантах малоуглового приближения. Здесь же дается методика адаптации спектра волнения, задаваемого фор-

мулой Пирсона-Московица, с тем чтобы этим спектром можно было бы воспользоваться для вычисления корреляционных функций уклонов. Эта методика заключается в домножении спектра Пирсона-Московица на обрезную функцию в виде функции Гаусса, параметр которой  $\lambda$ , зависящий от скорости ветра, выбирается таким образом, чтобы энергонесущая часть волнения не изменялась, а дисперсия уклонов, вычисленная с помощью модифицированного таким образом спектра, соответствовала бы наблюдательным данным Кокса и Манка. Основываясь далее на конкретных видах функции  $\Phi$  и модифицированном спектре волнения, для некоторых значений первичных гидрооптических характеристик и скоростей приводного ветра рассчитаны спектры подводной освещенности и ее коэффициенты вариаций при солнечном освещении поверхности. Результаты расчетов наглядно показывают роль того или иного фактора в формировании флуктуационной составляющей подводного светового поля.

Заключительный раздел главы посвящен обсуждению относительной роли флуктуаций, вызванных связанным с волнением разбросом оптических путей фотонов. Показано, что этот эффект заметен в относительно замутненных водах при больших скоростях ветра и значительных глубинах. В большинстве практически интересных для прикладных задач интервалах изменения параметров им можно пренебречь и учитывать лишь один механизм образования флуктуаций - фокусировку света поверхностными волнами. При этом взволнованная поверхность заменяется эквивалентным фазовым экраном, характеристики которого определяются уклонами поверхностных волн.

## ГЛАВА 2. ОТРАЖЕНИЕ СВЕТОВЫХ ПОЛЕЙ ОТ ВЗВОЛНОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ И ТОЛЩИ ВОДЫ

В известном смысле эта глава является аналогом первой главы, но в усложненной постановке. При расчете отраженных полей необходимо учитывать: а) отражение падающего поля непосредственно от взволнованной границы; б) его преломление на поверхности; в) распространение случайно преломленного поля в поглощающей и рассеивающей среде; г) обратное рассеяние поля, падающего на слой воды; д) распространение с учетом поглощения и рассеяния обратно рассеянного поля в направлении к границе раздела; е) его преломление на случайной границе; ж) распространение случайно преломленного поля от границы раздела к приемнику излучения. С учетом этих факторов во второй главе формулируются и решаются задачи об отражении от океана трех компонент излучения, а именно: бликовой, т.е. отраженной непосредственно от границы, компоненты от направленного источника излучения; бликовой компоненты от слабонаправленного источника и подповерхностной компоненты, обусловленной обратным рассеянием в толще воды проникшего под поверхность излучения.

В первых разделах этой главы исследуются свойства бликовых компонент излучения. Выведены соотношения, связывающие статистически средние уровни бликовых компонент с характеристиками направленности источника излучения и функцией распределения уклонов. Получены выражения для спектральной плотности и дисперсии флуктуаций бликовой компоненты. Особое внимание уделяется свойствам бликовых компонент от слабонаправленных источников. Причиной этому служат широкие возможности использования этой компоненты для диагностики поверхности. Показано,

что статистически средняя величина этой компоненты содержит информацию о дисперсии уклонов поверхности, спектральная плотность флуктуаций яркости в линейном приближении пропорциональна спектру уклонов поверхностного волнения.

Здесь приводится общее соотношение (являющееся одним из следствий оптической теоремы взаимности), позволяющее связать излучение, отраженное подповерхностной толщей воды, с характеристиками подводной освещенности. Это соотношение, справедливое для случайных реализаций полей, дает возможность исследовать практически все необходимые их свойства. Из него, в частности, следует априорно несомненный факт, заключающийся в том, что статистически средняя величина поля, отраженного от толщи воды, не равна соответствующей величине в случае гладкой границы. Речь идет о естественном поверхностном аналоге предсказанного и описанного Виноградовым А.Г., Кравцовым Ю.А. и Татарским В.И. (1973) эффекте усиления обратного рассеяния, обусловленного тем обстоятельством, что при втором (возвратном) преломлении света поверхностью он может проходить участки, коррелирующие с участками первого (прямого) преломления. С учетом этого эффекта средняя по ансамблю реализаций поверхности мощность отраженного толщей воды поля при солнечном освещении определяется формулой:

$$\bar{P} = \frac{E_0 \Sigma \Omega T^2 \sigma_{\pi}}{2 (2\pi)^3 m^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi^2(k, L) \cdot \Theta_2(-qL\vec{k}, qL\vec{k}, \vec{p}) \exp \left\{ -i\vec{k} \left( \vec{p} + \frac{\Delta \vec{h} L}{m} \right) \right\} d\vec{k} d\vec{p} dL,$$

где  $\Sigma$  и  $\Omega$  характеристики приемника излучения,  $\sigma_{\pi}$  -

коэффициент рассеяния назад морской воды,  $\Delta \vec{h}$  - вектор, описывающий разность углов между падающим излучением и ориентацией приемной диаграммы.

Важно подчеркнуть, что коэффициент усиления обратного рассеяния, задаваемый формулой

$$N = \bar{P}/P^0 - 1,$$

где  $P^0$  - величина мощности, определяемая для гладкой границы, является функцией оптической длины волны, коль скоро от нее зависят первичные гидросоптические характеристики. Такая зависимость, как следствие, приводит к тому, что волнение влияет на среднестатистический спектральный состав отраженного толщей воды излучения. Отметим также, что, как показывают расчеты, качественно совпадающие с простыми физическими соображениями, усиление обратного рассеяния максимально на краях окна прозрачности морской воды и минимально в его центре (для синего-зеленого диапазона длин волн), где минимален коэффициент ослабления воды.

В последующих разделах главы исследованы спектры флуктуаций отраженного морем излучения в зоне, свободной от солнечных бликов. При наблюдении в надир этот спектр является суммой трех слагаемых:

- спектра флуктуаций отраженного поверхностью рассеянного света неба

$$G_1 = (2R\Sigma\Omega)^2 \cdot (\nabla I \vec{k})^2 G_F(\vec{k}),$$

где  $R$  - коэффициент отражения от поверхности,

$\nabla I$  - градиент яркости неба в зеркальной точке.

- спектра флуктуаций излучения отраженного поверхностью

$$G_2 = \left( \frac{E_0 \Sigma \Omega T^2 \sigma_{\text{г}} q}{4\pi m^2} \right)^2 (M_S^2 + M_C^2) K^4 G_F(\vec{k})$$

и взаимного спектра

$$G_3 = \frac{R E_0 \Sigma \Omega T^2 \sigma_{\text{г}} q}{2\pi m^2} M_S (\nabla I \vec{k}) K^2 G_F(\vec{k})$$

$$\text{где } M_{\{S\}} = \int_0^L \Phi^2(k, L) \frac{\sin(\frac{\Delta \vec{n} \vec{k} L}{m})}{m} dL$$

Как показывают расчеты, соотношение между этими слагаемыми зависит как от оптической длины волны, так и от пространственного масштаба флуктуаций. В частности, в сине-зеленом диапазоне оптического спектра флуктуации с масштабами несколько метров определяются выходящей из-под поверхности компонентой излучения. Аналогичное явление имеет место и при наклонном наблюдении поверхности той лишь разницей, что роль поверхностной компоненты несколько возрастает за счет "включения" дополнительного механизма образования флуктуаций - модуляции волнением коэффициента отражения поверхности.

### ГЛАВА 3. ТЕОРИЯ ПЕРЕНОСА ИЗОБРАЖЕНИЯ ЧЕРЕЗ ВЗВОЛНОВАННУЮ ПОВЕРХНОСТЬ И ТОЛЩУ ВОДЫ. УСРЕДНЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМ ВИДЕНИЯ.

Глава посвящена статистической формулировке теории переноса изображения и выводу основных соотношений этой теории, связывающих среднестатистические характеристики систем видения (коэффициент передачи и оптическую передаточную функцию) с отражающими свойствами объекта наблюдения, гидрооптическими характеристиками и характеристиками взволнованной поверхности. Первый раздел этой главы посвящен изложению проблемы видения через взволнованную поверхность в ее современной постановке.

Получены выражения для случайных реализаций сигналов в системах видения различного типа, и из них, в качестве частного случая, получены выражения, справедливые для гладкой границы раздела. Показано, что формулировка теории видения через гладкую границу раздела совпадает с формулировкой теории подводного видения и их единственное отличие заключается в необходимости пересчета эффективных источников излучения на границу раздела воздух - вода. Исследована зависимость коэффициента передачи энергии на трассе: источник излучения - взволнованная граница - вода - объект наблюдения - вода - взволнованная граница - приемник. Показано, что в общем случае эта величина отличается от коэффициента передачи при гладкой границе. Это отличие максимально для глубины предметной плоскости, совпадающей с глубиной максимальной фокусировки, и обусловлено описанным во второй главе эффектом усиления обратного рассеяния. Здесь же приводится экспериментальное подтверждение этого эффекта, полученное в лабораторных условиях.

Получено выражение для оптической передаточной функции систем видения через взволнованную границу. Показано, что в результате влияния эффекта усиления обратного рассеяния эта функция не является чисто действительной и в общем случае не сводится к частотно-контрастной характеристике. Выполнены оценки вклада эффекта усиления, показавшие, что в практически интересном диапазоне глубин, вне зоны фокусировки этим эффектом можно пренебречь без особого ущерба для точности. В пренебрежении этим эффектом оптическая передаточная функция становится чисто действительной и имеет вид:

$$K(\vec{h}) = F_n(\vec{h}, \vec{h}(z + 4/m)) \cdot \Phi(h, L) \cdot Q_2(0, q, L, \vec{h}),$$

т.е.представляется в виде произведения частотно-контрастных характеристик собственно оптической системы  $\bar{\epsilon}_n$ , слоя воды  $\Phi(h, L)$  и поверхности  $\Theta_2(o, q, L, \vec{h}) = \Theta_2(q, L, \vec{h})$ .

Выполнена сравнительная оценка влияния волнения и толщины воды на ухудшения контраста при наблюдении тест-объекта в виде синусоидальной миры. Показано, что ухудшение контраста может быть обусловлено обоими факторами, превалирующая роль того или иного фактора зависит от степени волнения и величины рассеяния в воде и может меняться с глубиной и пространственным периодом миры.

#### ГЛАВА 4. ТЕОРИЯ ПЕРЕНОСА ИЗОБРАЖЕНИЯ ЧЕРЕЗ ВЗВОЛНОВАННУЮ ПОВЕРХНОСТЬ И ТОЛЩУ ВОДЫ. ФЛУКТУАЦИОННЫЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ.

Эта глава является логическим продолжением второй и третьей глав. Материалы второй главы привлекаются для расчета флуктуационных составляющих фоновых сигналов, образующих фоновую помеху в изображении. Эти флуктуации наряду с дробовым шумом определяют в конечном счете предельные глубины видимости и разрешающую способность. Поэтому первые разделы главы посвящены методике и результатам расчета этих двух помеховых компонент. Далее излагается методика расчета отношения сигнал/шум в изображении через взволнованную поверхность. Приведены характерные оценки этой величины для систем видения при естественном солнечном освещении, использующих различные участки спектра солнечного излучения. Показано, что максимальное отношение сигнал/шум реализуется в спектральном диапазоне, соответствующем окну прозрачности морской воды. Из других резуль-

татов этого раздела особо следует выделить полученное расчетным путем увеличение (в некоторых пределах) отношения сигнал/шум с ростом высоты наблюдения, что обусловлено эффективным усреднением флуктуационной составляющей изображения за счет увеличения элемента разрешения на местности и является одним из объяснений известного факта улучшения видимости дна с ростом высоты наблюдения над поверхностью.

В этой же главе приведены примеры расчета отношения сигнал/шум для систем видения, использующих в качестве источников подсветки импульсные лазеры. Показано, что известная для подводного видения эквивалентность (с точки зрения отношения сигнал/шум) двух типов систем - с узким подсветом и широкоугольным приемом и широким подсветом и многоэлементным приемом, нарушается при наблюдении через взволнованную поверхность. В этом случае система с широким подсветом и многоэлементным приемом имеет заметные преимущества за счет лучшего усреднения флуктуаций, обусловленных волнением.

На основе результатов по расчету отношения сигнал/шум, приведенных в данной главе для систем видения различного типа при различных условиях наблюдения и различных способах формирования изображения, оценены предельные глубины видимости для объектов, имеющих различные пространственные масштабы распределения коэффициентов отражения.

## ГЛАВА 5. ОПТИЧЕСКАЯ ДИСТАНЦИОННАЯ ДИАГНОСТИКА ПОВЕРХНОСТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

В главе описана методика оценки точности для некоторых систем оптической дистанционной диагностики. В частности, исследована погрешность измерения дисперсии уклонов волн оптическими скаттерометрами, вызванная стохастическим характером полезного сигнала. Показано, что стандартное отклонение (коэффициент вариаций) полезного сигнала в этом случае описывается простой формулой, справедливой для биномиальных распределений, в которую входит число некоррелированных участков поверхности в элементе разрешения и вероятность попадания блика в фотоприемник. Формула для отношения сигнал/шум в скаттерометре без учета дробовых шумов имеет вид:

$$S = \left( \frac{\beta_0^2}{2\sigma_n^2} \cdot \frac{2\ell^2}{\rho_0^2} \right)^{1/2},$$

где  $\beta_0$  - ширина диаграммы направленности скаттерометра,  
 $\ell$  - линейный размер элемента разрешения на местности,  
зависящий от выбранного масштаба усреднения,  
 $\rho_0$  - радиус корреляции волнения.

Из этой формулы следует, что максимальное отношение сигнал/шум получается в том случае, когда усреднение согласовано с шириной диаграммы направленности. Другими словами, необходимо, чтобы диаграмма направленности была максимально широка, т.е. соответствовала бы пределу, допускаемому масштабами исследуемого явления и высотой съемки.

Аналогичным образом исследована точность определения средней высоты морской поверхности с помощью оптического альтиметра, работающего по сигналу, отраженному поверхностью. Показано,

что относительная точность альтиметров (ошибка в определении высоты, отнесенная к среднеквадратичной высоте волн) всегда хуже точности определения дисперсии уклонов волн, что обусловлено конечной корреляцией между уклонами и возвышениями.

В этой же главе теоретически и экспериментально исследуется проблема оптической диагностики внутренних волн по их проявлениям на поверхности. Формулируются механизмы, которые могут приводить к визуализации внутренних волн на поверхности, и анализируются основные из них. Здесь исследованы различные аспекты "наблюдаемости" внутренних волн в зоне солнечной дорожки и при квазидиффузном освещении. Рассчитаны величины орбитальных скоростей во внутренней волне, при которых она становится наблюдаемой за счет различных механизмов.

Большое внимание уделено проблеме диагностики поверхностных волн. Интерес к этой проблеме обусловлен, с одной стороны, возможностью эффективной диагностики внутренних волн по их воздействию на различные участки спектра поверхностного волнения и, с другой стороны, необходимостью изучения собственно поверхностного волнения. Здесь на основе результатов второй главы формулируются условия, при которых можно образовать сигнал, величина которого пропорциональна спектральной плотности волнения. Описана инструментальная реализация метода оценки пространственного спектра волнения в реальном времени. Приведены некоторые результаты исследований изменчивости спектра поверхностного волнения в поле внутренних волн и в нефтяных сликах, демонстрирующие эффективность метода.

В заключительном разделе главы теоретически исследованы свойства сигнала обратного рассеяния при импульсном (лазерном)

зондировании слоя воды через взволнованную поверхность. Оценивается дисперсия флуктуаций этого сигнала с учетом эффектов синхронизма при движении лидара относительно поверхностных волн и обсуждаются возможности лидара для обнаружения внутренних волн. Исследованы информационные свойства флуктуационной составляющей сигнала обратного рассеяния лидара, которая может быть использована для исследования пространственного спектра поверхностного волнения и для неконтактного измерения частотно-пространственной характеристики слоя воды.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В Заключении сформулированы основные результаты работы и даны рекомендации по направлениям дальнейших исследований по проблеме.

Основные результаты работы следующие:

1. Разработана теория переноса оптического излучения через взволнованную поверхность и толщу воды, позволяющая рассчитывать средние и флуктуационные характеристики подводного светового поля при известных источниках излучения, спектре поверхностного волнения и первичных гидрооптических характеристиках.

2. На основе теории переноса излучения через взволнованную поверхность и толщу воды и оптической теоремы взаимности разработана теория отражения светового поля от приповерхностной толщи воды и взволнованной поверхности и получены соотношения, связывающие средние и флуктуационные характеристики отраженных световых полей с рассеивающими и поглощающими свойствами воды и характеристиками поверхностного волнения.

3. Теоретически исследован и экспериментально в модельных условиях подтвержден эффект усиления обратного рассеяния на поверхностном волнении. Показано, что этот эффект приводит к изменению среднестатистического спектрального (цветового) состава отраженного морем излучения, учет которого необходим при интерпретации спектров отраженного морем излучения.

4. Предложена методика расчета пространственных спектров флуктуаций отраженного морем излучения и показано, что в диапазоне оптических длин волн, соответствующих окну прозрачности морской воды, спектр флуктуаций с масштабами порядка нескольких метров определяется в основном выходящей из-под поверхности компонентой излучения, что существенно для правильной интерпретации аэрофотографий морской поверхности.

5. Построена теория переноса изображения через взволнованную поверхность и толщу воды устанавливающая связь между статистически средними характеристиками изображения подводного объекта наблюдения и его отражательными характеристиками при произвольных параметрах источника излучения, приемника, взволнованной поверхности и толщи воды.

6. Разработана методика расчета отношения сигнал/шум в изображении подводного объекта при его наблюдении через взволнованную поверхность, учитывающая как "внешние" шумы - флуктуации, обусловленные взволнованной поверхностью, так и "внутренние" - флуктуации фототока, вызванные дробовым эффектом.

7. Определены основные характеристики систем видения, работающих в условиях естественного (солнечного) освещения и использующих импульсный (лазерный) источник подсветки.

8. Найдено наиболее строгое объяснение известного факта улучшения видимости с увеличением высоты наблюдения над поверх-

ностью и дана количественная оценка этого явления, обусловленного эффективным усреднением флуктуаций светового поля при увеличении элемента разрешения на местности.

9. Теоретически определены предельные точности измерений некоторых характеристик поверхностного волнения дистанционными оптическими методами и на этой основе исследована задача обнаружения внутренних волн в океане по их проявлениям на взволнованной поверхности.

10. Теоретически и экспериментально исследованы возможности определения пространственного спектра поверхностных волн с помощью спектрального анализа изображения взволнованной поверхности в реальном масштабе времени. Выполнен цикл натурных исследований изменчивости короткомащштабной (0,05 м - 1 м) части спектра поверхностного волнения в поле внутренних волн и в нефтяных slicks и получена качественно новая информация об этом классе явлений.

11. Проведен анализ свойств сигнала обратного рассеяния при лазерном зондировании через взволнованную поверхность и исследован эффект синхронизма, заключающийся в увеличении уровня флуктуаций сигнала при спутном (синхронном) движении лидара и поверхностных волн, ответственных за формирование флуктуаций с заданного горизонта.

12. Предложен принципиально новый способ исследования частоты-контрастной характеристики слоя воды, заключающийся в измерении пространственного спектра флуктуаций сигналов обратного рассеяния, создаваемых поверхностным волнением на различных горизонтах и их взаимной нормировке, благодаря которой результат измерений не зависит от спектра поверхностного волнения.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Лучинин А.Г. Влияние ветрового волнения на характеристики светового поля, обратно рассеянного дном и толщей воды //Изв. АН СССР. Сер. Физика атмосферы и океана. - 1979. - Т.16, №7. - С.770-775.
2. Лучинин А.Г. О точности измерения параметров морской поверхности оптическими скаттерометрами и альтиметрами //Изв. АН СССР. Сер. Физика атмосферы и океана. - 1980. - Т.16, №5. - С.305-312.
3. Лучинин А.Г., Титов В.И. О возможности дистанционной оптической регистрации параметров внутренних волн по их проявлениям на океанической поверхности //Изв. АН СССР. Сер. Физика атмосферы и океана. - 1980. - Т.16, №12. - С.1284-1290.
4. Долин Л.С., Левин И.М., Лучинин А.Г. Перенос изображения через гладкую границу океан - атмосфера //Оптика океана и атмосферы/Ред. Т.К.Исмаилов, К.С.Шифрин. - Баку: Элм. 1981г. - С.165-169.
5. Лучинин А.Г., Пелинговский Е.Н., Титов В.И. О возможных механизмах образования изображения внутренних волн при их наблюдении из атмосферы //Оптика океана и атмосферы/Ред. Т.К.Исмаилов, К.С.Шифрин. - Баку: Элм. 1981г. - С.117-122.
6. Лучинин А.Г. Некоторые закономерности формирования изображения шельфа при его наблюдении через взволнованную поверхность моря //Изв. АН СССР. Сер. Физика атмосферы и океана. - 1981. - Т.17, №7. - С.732-736.
7. Лучинин А.Г. О некоторых свойствах оптической передаточной функции взволнованной морской поверхности //Изв. АН СССР. Сер. Физика атмосферы и океана. - 1982. - Т.18, №3. - С.330-333.

8. Лучинин А.Г. О спектре флуктуаций яркости естественного светового поля, выходящего из-под взволнованной морской поверхности //Изв. АН СССР. Сер. Физика атмосферы и океана. - 1982. - Т.18, №5. - С.558-562.
9. Лучинин А.Г., Сергиевская И.А. О флуктуациях светового поля под взволнованной поверхностью моря //Изв. АН СССР. Сер. Физика атмосферы и океана. - 1982. - Т.18, №8. - С.850-858.
10. Браво-Животовский Д.М., Володина Н.И., Гордеев Л.В., Дронов А.М., Жидко Ю.М., Зуйкова Э.М., Лучинин А.Г., Марютин С.А., Мукиншин С.И., Пелиновский Е.Н., Сутин А.М., Титов В.И., Щегольков Ю.Б. Исследования воздействия океанских внутренних волн на поверхностное волнение дистанционными методами //Докл. АН СССР. - 1983. - Т.265, №2. - С.457-460.
11. Вебер В.Л., Долин Л.С., Лучинин А.Г. К теории переноса изображения через взволнованную поверхность //Тез. докл. Второго Всесоюзного съезда океанологов, Севастополь: АН СССР, АН УССР. 1982. - Вып.3, ч.1. - С.47-48.
12. Вебер В.Л., Лучинин А.Г., Сергиевская И.А. К теории флуктуаций подводного светового поля //Тез. докл. Второго Всесоюзного съезда океанологов, Севастополь: АН СССР, АН УССР. 1982. - Вып.3, ч.1. - С.48.
13. Вебер В.Л., Лучинин А.Г. О флуктуациях изображения дна с неоднородным коэффициентом отражения при наблюдении через взволнованную поверхность //Тез. докл. Второго Всесоюзного съезда океанологов, Севастополь: АН СССР, АН УССР. 1982. - Вып.3, ч.1. - С.40.
14. Дорофеев Ю.Б., Лучинин А.Г. О характеристиках светового потока, дважды прошедшего через взволнованную границу раздела двух сред //Оптика моря: Сб./под ред. К.С.Шифрина, - М:

- Наука. 1982. - С.154-158.
15. Вебер В.Л., Лучинин А.Г. О дисперсии флуктуаций изображений при наблюдении через взволнованную морскую поверхность //Изв. АН СССР. Сер. Физика атмосферы и океана. - 1983. - Т.19, №6. - С.632-638.
  16. Лучинин А.Г. Об интерпретации спектров аэрофотографий морской поверхности //Изв. АН СССР. Сер. Физика атмосферы и океана. - 1984. - Т.20, №3. - С.331-334.
  17. Браво-Животовский Д.М., Долин Л.С., Левин И.М., Лучинин А.Г. Теория переноса оптического изображения в воде //Оптика океана. Т.1: Физическая оптика океана. - М: Наука. - 1983. - С.96-112.
  18. Браво-Животовский Д.М., Долин Л.С., Ермаков С.А., Зуйкова Э.М., Лучинин А.Г., Титов В.И. Эффект усиления дециметровых ветровых волн в зоне нефтяного slicka //Докл. АН СССР. - 1984. - Т.276, №5. - С.1243-1246.
  19. Лучинин А.Г. Методика расчета отношения сигнал/шум в изображении дна водоема при его наблюдении через взволнованную поверхность //Оптика моря и атмосферы: Тез. докл. 9-го Пленума Рабочей группы по оптике океана Комиссии АН СССР по проблемам Мирового океана. - Л: АН СССР, АН ГССР, 1984. - С.235.
  20. Лучинин А.Г., Сергиевская И.А. О влиянии поверхностного волнения на среднестатистический спектральный состав выходящего из-под поверхности излучения //Оптика моря и атмосферы: Тез. докл. 9-го Пленума Рабочей группы по оптике океана Комиссии АН СССР по проблемам Мирового океана. - Л: АН СССР, АН ГССР, 1984г. - С.236-237.

21. Лучинин А.Г., Титов В.И. О различных механизмах образования флуктуаций в изображении взволнованной поверхности моря // Оптика океана и атмосферы: Тезисы докладов 9-го Пленума Рабочей группы по оптике океана Комиссии АН СССР по проблемам Мирового океана. - Л: АН СССР, АН ГССР, 1984г. - С.238.
22. Басович А.Я., Баханов В.В., Браво-Животовский Д.М., Долин Л.С., Жидко Д.М., Зайцев А.А., Завольский Н.А., Зуйкова Э.М., Кельбахианс Б.Ф., Лучинин А.Г., Нарожный В.В., Титов В.И., Шмагин А.Б. Воздействие коротких цугов внутренних волн на ветровое волнение // Докл. АН СССР. - 1985. - Т.283, №1. - С.209-212.
23. Зуйкова Э.М., Лучинин А.Г., Титов В.И. Определение характеристик пространственно-временных спектров волнения по оптическому изображению поверхности моря // Изв. АН СССР. Сер. Физика атмосферы и океана. - 1985. - Т.21, №10. - С.1095-1102.
24. Лучинин А.Г. Отношение сигнал/шум в изображении дна водоема при его наблюдении через взволнованную поверхность // Изв. АН СССР. Сер. Физика атмосферы и океана. - 1986. - Т.22, №2. - С.195-201.
25. Лучинин А.Г., Сергиевская И.А. О влиянии волнения на цвет моря // Изв. АН СССР. Сер. Физика атмосферы и океана. - 1986. - Т.22, №7. - С.773-776.

Александр Григорьевич Лучинин

ТЕОРИЯ ПЕРЕНОСА ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
ЧЕРЕЗ ВЗВОЛНОВАННУЮ ПОВЕРХНОСТЬ МОРЯ  
В ПРИЛОЖЕНИИ К ПРОБЛЕМАМ  
ДИСТАНЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ И ВИДЕНИЯ

А в г о р е ф е р а т

---

МЦ 00934. Подписано к печати 20.05.87.  
Формат 60х90 1/16. Бумага книжно-журнальная.  
Усл.печ.л. 2,3. Уч.-изд.л. 1,5. Тираж 100 экз.  
Заказ № 326. Бесплатно

---

Отпечатано на ротационной  
в Институте прикладной физики АН СССР,  
603600, г.Горький, ул.Ульянова, 46