

Леонов Станислав Олегович

**ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ  
ДИСТАНЦИОННОЙ РЕГИСТРАЦИИ И ОБРАБОТКИ  
ИНФОРМАЦИИ О ПРОЯВЛЕНИЯХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ  
ИСТОЧНИКОВ**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ,  
управление и обработка информации (промышленность)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**РАБОТА ВЫПОЛНЕНА В ФЕДЕРАЛЬНОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ  
БЮДЖЕТНОМ УЧРЕЖДЕНИИ НАУКИ ОРДЕНА ЛЕНИНА И ОРДЕНА  
ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ ИНСТИТУТ ГЕОХИМИИ И АНАЛИТИЧЕСКОЙ  
ХИМИИ ИМ. В. И. ВЕРНАДСКОГО РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

Научный руководитель: **Носов Виктор Николаевич**, доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Ленина и Ордена Октябрьской Революции Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук, заведующий лабораторией динамики морской поверхности.

Официальные оппоненты: **Репина Ирина Анатольевна**, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук, заведующая лабораторией взаимодействия атмосферы и океана.

**Гольдин Юрий Анатольевич**, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук, ведущий научный сотрудник.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной физики Российской академии наук (ИПФ РАН)

Защита состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 г. в \_\_ час. \_\_ мин. на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 002.017.03 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Вычислительный центр им. А.А. Дородницына Российской академии наук, расположенном по адресу: 119333, г. Москва, ул. Вавилова, д. 40, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Вычислительный центр им. А.А. Дородницына Российской академии наук и на сайте <http://www.ccas.ru>.

Автореферат разослан «    »                    2015г.

Ученый секретарь диссертационного совета по защите докторских  
и кандидатских диссертаций Д 002.017.03  
кандидат физико-математических наук

А.В. Мухин

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

В работе решена задача разработки комплексного подхода к регистрации проявлений гидродинамических источников в морской среде дистанционными оптическими методами и к обработке, полученной с их помощью, информации. С целью создания комплекса оптической аппаратуры для регистрации гидродинамических возмущений от гидродинамических источников проведен анализ и выбор дистанционных оптических методов. Проведены натурные экспериментальные исследования с использованием разработанного комплекса аппаратуры и разработанных алгоритмов обработки информации применительно к регистрации гидродинамических возмущений морской среды. Экспериментально подтверждена возможность повышения эффективности обнаружения гидродинамических возмущений за счет применения комплексного подхода к регистрации и к обработке полученных данных.

### **Актуальность темы**

На сегодняшний день большое внимание уделяется вопросам разработки перспективных систем дистанционного обнаружения гидродинамических источников как естественного, так и искусственного происхождения по вызываемым ими возмущениям морской среды. Гидродинамические возмущения от подводных источников приводят к изменению параметров морской поверхности, приповерхностного слоя морской среды и приподного слоя атмосферы. Такие изменения могут регистрироваться различными дистанционными методами, среди которых важное место занимают оптические методы регистрации проявлений гидродинамических возмущений. Особенностью оптических методов является то, что они позволяют регистрировать проявления гидродинамических источников как на морской поверхности, так и в приповерхностных слоях морской среды и атмосферы. Таким образом, применение дистанционных оптических методов позволяет получить достаточно большой объем информации о гидродинамических источниках в толще морской среды.

Регистрируемые оптическими методами информационные сигналы подвержены влиянию метеорологических и гидрологических условий. При этом гидрометеорологические условия по-разному влияют на эффективность оптических методов. Комплексирование методов регистрации и обработки сигналов, позволит ослабить зависимость от метеорологических и, тем самым, повысить эффективность регистрации гидродинамических возмущений. Также комплексирование позволит повысить эффективность регистрации малоконтрастных проявлений гидродинамических возмущений.

Таким образом, разработка комплексного подхода к дистанционному обнаружению гидродинамических источников по их проявлениям на морской поверхности, приповерхностном слое морской среды и приподном слое атмосферы является актуальной и важной задачей.

### **Цель и задачи исследования**

Целью работы является разработка программно-аппаратного комплекса для исследования возможностей повышения эффективности дистанционной (оптической) регистрации гидродинамических возмущений (ГДВ) за счет применения системного подхода к использованию методов регистрации проявлений ГДВ на морской поверхности, приповерхностном слое морской среды и приподном слое атмосферы.

В соответствии с целью исследования поставлены следующие задачи:

1. систематизация существующих методов дистанционной (оптической) регистрации проявлений ГДВ на морской поверхности, приповерхностном слое морской среды и приводном слое атмосферы;
2. разработка и создание макетов дистанционной оптической аппаратуры для регистрации проявлений ГДВ на морской поверхности, приповерхностном слое морской среды и приводном слое атмосферы;
3. разработка алгоритма предварительной подготовки и последующего комплексирования сигналов, регистрируемых разработанным комплексом оптической аппаратуры с учетом особенности сигнала каждого канала;
4. проведение натуральных экспериментальных исследований возможностей повышения эффективности за счет использования комплексного подхода к регистрации проявлений ГДВ на морской поверхности, приповерхностном слое морской среды и приводном слое атмосферы.

**Научная новизна** состоит в следующем:

1. Для повышения эффективности дистанционной регистрации ГДВ одновременно использованы различные оптические методы, позволяющие регистрировать проявления ГДВ на морской поверхности, приповерхностном слое морской среды и приводном слое атмосферы.
2. Исследован эффект изменения светорассеяния в приводном слое атмосферы при воздействии подводного гидродинамического источника.
3. Предложен комплексный алгоритм обработки с учетом различного характера сигналов, регистрируемых оптическими методами.
4. Проведен натуральный эксперимент, в рамках которого подтверждена возможность повышения эффективности регистрации ГДВ от гидродинамических источников за счет комплексного подхода к использованию дистанционных оптических методов.

#### **Объект исследования**

Объектом исследования является комплексный подход к регистрации проявлений ГДВ на морской поверхности, приповерхностном слое морской среды и приводном слое атмосферы.

#### **Методы исследования**

Методы системно-технического анализа лазерных и оптических приборов, методы проектирования лазерных и оптических систем, методы теории преобразования сигналов, методы системного анализа, методы вычислительной математики, методы теории обработки информации, методы теории управления и принятия решений.

#### **Достоверность и обоснованность**

Разработанный программно-аппаратный комплекс прошел экспериментальную отработку в процессе проведения натуральных исследований по регистрации гидродинамических источников на протяжении 2008 – 2014 гг. на базе 31 Испытательного центра МО РФ.

#### **На защиту выносятся следующие положения**

1. Метод регистрации гидродинамических возмущений по их проявлениям в приводном слое атмосферы.

2. Алгоритм предварительной обработки сигналов, получаемых по различным каналам комплексной оптической системы регистрации проявлений ГДВ на морской поверхности и в приповерхностных слоях морской среды и атмосферы, с целью приведения этой информации к единому информационному параметру.
3. Алгоритм комплексирования информации, полученной по измерительным каналам комплекса оптической аппаратуры, применительно к задаче повышения эффективности регистрации ГДВ от гидродинамических источников.
4. Программные модули, реализующие разработанный алгоритм комплексирования.
5. Экспериментальная апробация предложенных алгоритмов комплексирования и разработанного программного обеспечения.

### **Практическая ценность**

В процессе выполнения диссертационного исследования был разработан экспериментальный судовой макет оптической аппаратуры для комплексной дистанционной регистрации ГДВ от гидродинамических источников. На отдельные узлы макета оптической аппаратуры был получен патент. Были разработаны алгоритмы комплексирования, созданы программные модули, реализующие разработанные алгоритмы комплексирования, для обработки и анализа регистрируемой информации. Разработанный макет прошел проверку в натуральных условиях при проведении экспериментальных исследований с борта научно-исследовательского судна в акватории Черного моря.

Этот макет может быть в дальнейшем использован для проведения масштабных целевых экспериментов по набору статистической информации о возможностях повышения эффективности регистрации ГДВ при использовании комплексного подхода в широком диапазоне гидрометеоусловий, а также исследований эффективности отдельных каналов комплекса. Получение такой статистической информации имеет большую практическую ценность для проведения различных научных исследований, так и для создания новых систем в интересах военной промышленности.

### **Публикации**

Основные результаты исследования отражены в 16 публикациях автора, объемом 2,8 п.л., список которых приводиться в конце автореферата, в том числе 4 статьи, объемом 0,8 п.л., в изданиях, рекомендованных ВАК. Результаты в совместных работах принадлежат авторам в равных долях.

### **Апробация работы**

Основные положения исследований докладывались и обсуждались на научных семинарах и конференциях МГТУ им. Н. Э. Баумана, на Четвертой межведомственной конференции. «Проявление глубинных процессов на морской поверхности» Нижний Новгород, Young Optical Scientist Conference, на международной научно-технической конференции «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации» и на всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики», а также на международной конференции «International OSA Network conference IONS-NA-3», Стэнфордский университет, США.

## **Личный вклад автора**

Представленные на защиту результаты диссертации получены автором самостоятельно в процессе научной деятельности. Результаты, опубликованные совместно с другими авторами, принадлежат соавторам в равных долях.

## **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитируемой литературы из 91 наименований. Общий объем работы составляет 160 страниц печатного текста, включающих 88 рисунков.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во «**Введении**» обоснован предмет исследования и актуальность работ выбранного направления. Сформулированы цель работы и положения, выносимые на защиту, показана научная новизна и практическая значимость полученных данных. Приведена апробация полученных результатов и дано краткое содержание работы по разделам.

В первой главе «**Анализ воздействий ГДВ на параметры морской среды, методов оптической регистрации, алгоритмов обработки и методов комплексирования информационных сигналов**» проведен обзор литературы по вопросу применения оптических методов регистрации параметров морской поверхности, приповерхностного слоя морской среды и приподного слоя атмосферы. На основе проведенного анализа проведена систематизация оптических методов регистрации проявлений ГДВ и осуществлен выбор оптимальных методов, также рассмотрены возможные алгоритмы обработки сигналов, регистрируемых при использовании выбранных методов. В первой главе проведен анализ существующих методов комплексирования информации и возможностей их использования для решения поставленной в настоящей работе задачи повышения эффективности регистрации ГДВ.

Регистрация проявлений ГДВ на морской поверхности возможна благодаря механизмам каскадной передачи возмущений из толщи на морскую поверхность, в результате которых меняются параметры морских волн [1].

В результате анализа различных методов для регистрации параметров морской поверхности был выбран метод сканирования узким лазерным лучом [2]. Данный метод основан на активном зондировании узким лазерным пучком морской поверхности. С использованием выбранного метода могут регистрироваться такие параметры волнения как вероятностные распределения радиусов кривизны морской поверхности, пространственных масштабов волн, а при сканировании зондируемой поверхности под разными углами и уклонов морской поверхности. Кроме того, при сканировании светового пучка по различным азимутальным направлениям можно получать азимутальные зависимости указанных параметров. Данный метод является оптимальным с точки зрения получения большого набора информации об изменениях параметров морской поверхности при воздействии ГДВ.

Для обработки информации со сканирующего лазерного локатора использованы статистические методы. Воздействие ГДВ на морскую поверхность может существенно изменять статистические распределения параметров морских волн, регистрируемых методом лазерного сканирования.

Регистрация ГДВ в приповерхностном слое морской среды возможна вследствие эффекта взаимодействия дневного света, проникающего в толщу вод, с растворенными и взвешенными в ней веществами, которые обуславливают «собственный» цвет моря. Основными факторами, формирующими цвет вод морей, являются фитопланктон,

неорганическая взвесь и растворенный органический материал. Причем, изменения цвета, в основном, связаны с изменениями концентрации или циклом жизнедеятельности фитопланктона. Основным показателем процесса жизнедеятельности фитопланктона является хлорофилл «а», который существенно влияет на спектральную яркость поверхностного слоя океана вследствие селективного поглощения солнечного света. При воздействии ГДВ происходит перераспределение концентрации приповерхностного фитопланктона. В основе измерения индекса цвета моря лежит измерение яркости приповерхностного слоя морской среды на двух длинах волн оптического излучения. Данный метод получил название метода двухканальной фотометрии и был выбран для регистрации параметров приповерхностного слоя морской среды. Он имеет высокую чувствительность к изменениям концентрации фитопланктона, вызванных воздействием ГДВ, а также простое схемотехническое исполнение, что делает его оптимальным для решения поставленных задач. Возможности регистрации ГДВ методом двухканальной фотометрии были подтверждены в работе [3], где регистрировалось распределение индекса цвета моря по глубине.

Для обработки информации, получаемой посредством устройства, построенного на основе выбранного метода, также используется статистическая обработка. В результате такой обработки можно выявить изменение в частоте вариаций концентрации, связанных с воздействием ГДВ и проявляющихся в изменении статистики спектральных составляющих регистрируемого электрического сигнала.

Методы регистрации параметров приводного аэрозоля относятся к классу активных измерительных систем. Регистрация проявлений ГДВ в приводном слое атмосферы возможна из-за эффектов рассеяния оптического излучения на частичках аэрозолей. Изменение параметров оптического излучения может проявляться в изменении амплитуды, фазы и степени поляризации и появлении дополнительных флуктуаций в сигнале. ГДВ воздействуют на растворенные в морской среде пузырьки воздуха, которые, двигаясь к поверхности, приносят дополнительные частички аэрозоля в приводный слой атмосферы [4].

Для регистрации проявлений ГДВ в приводном слое атмосферы был выбран метод регистрации интенсивности обратно упруго рассеянного излучения от аэрозоля, возможности которого были подтверждены в работах [5-7]. Данный метод имеет высокую чувствительность к изменениям концентрации аэрозоля, что позволяет осуществлять оптимальную регистрацию проявлений ГДВ.

Для обработки информации, получаемой посредством устройства, построенного на основе выбранного метода, также как и в предыдущих двух методах применяется статистическая обработка.

Проведенный анализ методов комплексирования показал, что они нашли широкое применение для решения задач навигации и управления подвижными объектами, где информация о координатах и параметрах движения измеряется с помощью различных типов датчиков. Смысл комплексирования [8,9] состоит в том, чтобы оптимальным образом использовать информацию об одних и тех же физических величинах или явлениях, полученную посредством использования различных датчиков, спектры помех которых находятся в различных частотных областях.

Комплексирование может применяться и в гидрофизических исследованиях. Благодаря различным физическим принципам, положенным в основу работы измерителей, ошибки (погрешности) этих измерителей имеют разную зависимость от метеоусловий. Такое различие ошибок позволяет синтезировать систему, которая будет работать с минимальным снижением эффективности регистрации в широком диапазоне метеоусловий.

Для комплексирования в случае регистрации ГДВ оптическими методами выбрана схема фильтрации [8], так как она обладает симметрией в обработке поступающей информации и все измерители в ней как бы «равноправны». Схема фильтрации для  $n$  каналов приведена на рисунке 1.1.

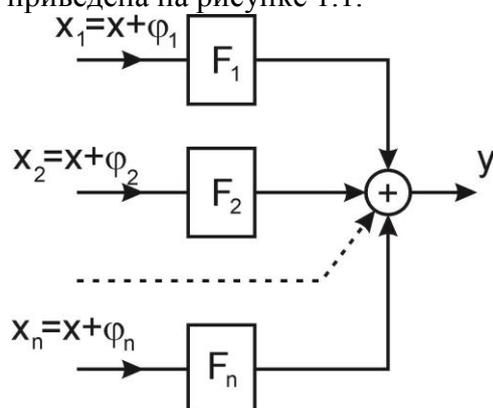


Рисунок 1.1 – Схема фильтрации

Результаты измерений  $n$  сигналов, содержащих измеряемую величину  $x$ , и ошибки (помехи)  $\varphi_1, \varphi_2$  и  $\varphi_n$ , после прохождения  $n$  фильтров  $F_1, F_2$  и  $F_n$  суммируются. В результате выходной сигнал имеет вид:

$$y = \left[ \sum_{i=1}^n F_i \right] \cdot x(t) + \sum_{i=1}^n F_i \cdot \varphi_i(t)$$

Алгоритм фильтрации по физической трактовке заключается в том, что информация об измеряемом параметре формируется за счет комбинирования отдельных элементов информации с соответствующего канала измерения, для которого зависимость от данных метеоусловий наименьшая.

Обобщенную схему комплексирования различных методов измерений одного гидрофизического явления на основе метода фильтрации можно представить в виде (рис. 1.2).

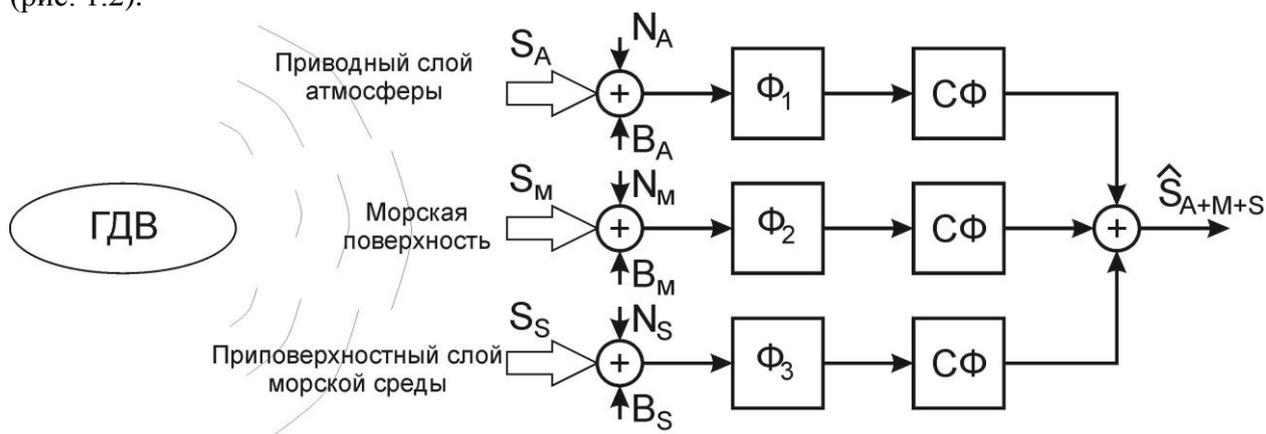


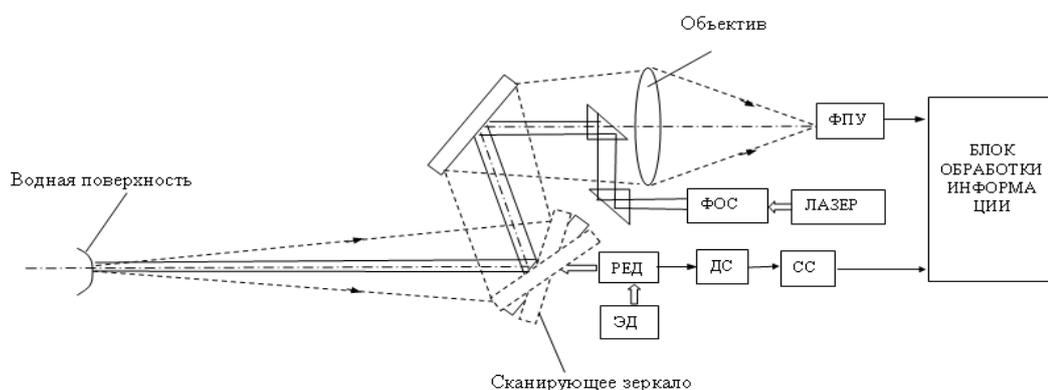
Рисунок 1.2 – Схема комплексирования трех различных методов измерения

Данная схема представляет собой обобщенный алгоритм комплексирования различных дистанционных оптических методов регистрации проявлений ГДВ от гидродинамических источников. Как можем видеть, информация  $S_M, S_S, S_A$  от одного ГДВ, распространяясь по трем информационным трактам, складываются с различными помехами  $N_A, N_M, N_S$  и фоновыми составляющими  $B_A, B_M, B_S$ , которые отличаются

для каждого канала и могут быть отфильтрованы специальными фильтрами  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$ ,  $\Phi_3$  и согласующим фильтром  $C\Phi$ . В результате применения комплексного подхода к регистрации формируется обобщенная оценочная функция  $S_{A+M+S}$ , посредством сложения которая впоследствии анализируется с целью выявления ГДВ.

**Вторая глава «Разработка комплекса оптических методов и математической модели обработки регистрируемой информации»** посвящена разработке макетов дистанционной оптической аппаратуры на основе выбранных методов и алгоритмов предварительной подготовки исходных информационных сигналов с целью выделения их информативных признаков, а также алгоритмам построения комплексной функции на основе полученных информативных признаков каждого канала.

На основе выбранных методов дистанционной оптической регистрации проявлений ГДВ от гидродинамических источников, при непосредственном участии автора были разработаны и созданы макеты регистрирующей аппаратуры. Оптическая схема разработанного макета лазерного сканирующего локатора представлена на рис. 2.1.

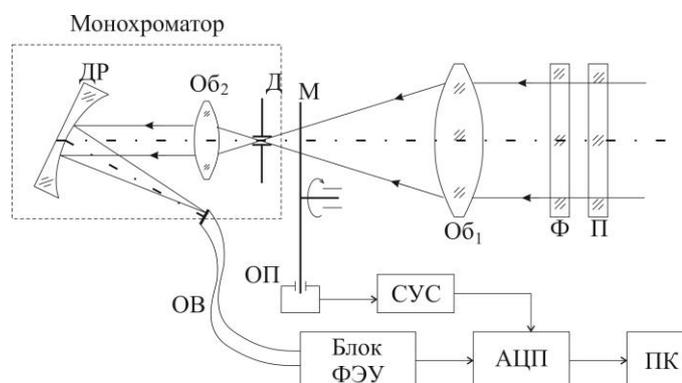


ФОС – формирующая оптическая система, ЭД – электродвигатель, РЕД – редуктор, ФПУ – фотоприемное устройство, ДС – датчик синхронизации, СС – система синхронизации

Рисунок 2.1 – Схема лазерного локатора

В состав лазерного локатора входят два канала: лазерный излучающий канал и приемный оптико-электронный канал с системой вторичной обработки информации.

Функциональная схема разработанного двухканального фотометра представлена на рис. 2.2.

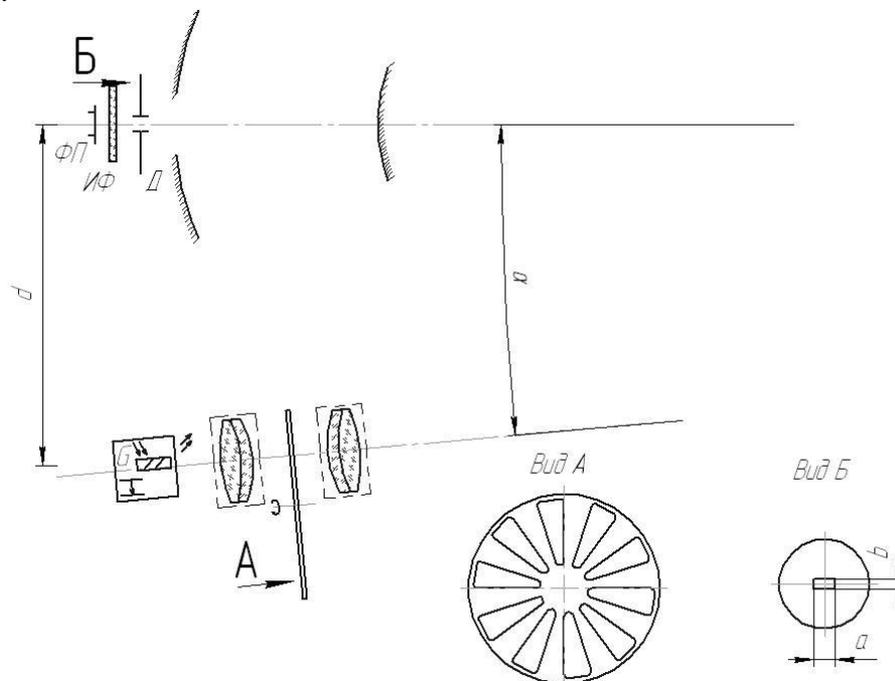


П – поляризатор, Ф- фильтр, Об – объектив, М – модулятор, Д – диафрагма, ДР – дифракционная решетка, ОВ – оптическое волокно, ФЭУ – фотоэлектронный умножитель, ОП – оптопара, СУС – согласующий усилитель.

Рисунок 2.2 – Функциональная схема двухканального фотометра яркости моря

В состав двухканального фотометра яркости моря входит приемная оптическая система, состоящая из объектива, модулятора и монохроматора, который выделяет из регистрируемого оптического излучения две узкие длины волны, а также двухканальный фотоприемный блок.

Оптическая схема разработанного аэрозольного лидара представлена на рисунке 2.3.



Д – диафрагма, ИФ – интерференционный фильтр, ФП – фотоприемник

Рисунок 2.3 – Оптическая схема аэрозольного лидара

В состав аэрозольного лидара входят два канала, канал подсвета, состоящий из лазерного источника и системы модуляции лазерного излучения, и приемного канала на основе зеркального объектива и фотоприемного модуля.

Для выделения набора информационных параметров из сигналов каждого канала измерения был разработан специальный алгоритм. Данный алгоритм основан на формировании статистики основных параметров сигналов, что позволяет свести различные по механизму формирования сигналы к одному пространству признаков. Для каждого информационного сигнала из него выделяются основные параметры, характеризующие его изменение под воздействием ГДВ. Таким образом, имеется исходный цифровой сигнал вида:

$$U_i(t_i) = \int_{-\infty}^{+\infty} U(t) \cdot \delta(t - t_i) dt, \quad (1)$$

где  $i$  – номер отсчета.

Для каждого информационного канала системы осуществляется предварительная обработка сигнала с целью выделения необходимой информационной составляющей.

$$V_i(t_i) = InF \{U_i(t_i)\}, \quad (2)$$

где  $InF\{\}$  – оператор, реализующий алгоритм выделения информационной составляющей из исходного сигнала. Далее осуществляется формирование гистограммного распределения информационного параметра за заданное время наблюдения:

$$C_q^k(\Delta_q^k) = P\left\{\left|V_i(t_i) - p_q^k\right| < \frac{1}{2}\Delta_q^k\right\}, \quad (3)$$

где  $P\{\}$  - оператор формирования гистограммы,  $p_q^k$  - среднее значение информативного параметра  $q$ -го канала гистограммы,  $k$  - индекс текущего номера отдельной гистограммы, полученной для выбранной части последовательности исходного цифрового сигнала,  $\Delta_q^k$  - ширина каналов гистограммы.

Таких распределений формируется  $M$  и далее для каждого отдельного распределения вычисляются статистические параметры, например:

среднее значение

$$\overline{p^k} = \frac{\sum_{i=0}^M p_i C_i^k(\Delta_i^k)}{\sum_{i=0}^M C_i^k(\Delta_i^k)}; \quad (4)$$

выборочная дисперсия

$$s_k^2 = \frac{\sum_{i=0}^M (p_i - \overline{p^k})^2 C_i^k(\Delta_i^k)}{\sum_{i=0}^M C_i^k(\Delta_i^k)}; \quad (5)$$

В результате получаем набор признаков изменчивости зарегистрированного сигнала в виде:

$$\vec{\Theta} = (\overline{p^k}, s_k^2; t_k), \quad (6)$$

Такой набор вычисляется для каждого канала измерений.

До проведения комплексирования необходимо все информационные параметры нормировать, для этого используется следующий алгоритм. Для каждого полученного набора признаков (5) осуществляется процедура нормировки.

$$\Theta_j^i = \frac{\Theta_j^i - \Theta^{\min}}{\Theta^{\max} - \Theta^{\min}}, \quad (7)$$

где  $i$  - индекс канала,  $j$  - индекс текущего элемента в канале.

В результате набор признаков изменчивости каждого канала измерений становится нормирован.

Формирование оценочной функции осуществляется следующим образом:

$$f_{\Theta_\Sigma}(t) = \sum_{i=1}^N M_i \Theta_i(t), \quad (8)$$

где  $M_i$  - весовые функции, учитывающие влияние гидрометеорологических факторов на  $i$ -ый канал измерения,  $\Theta_i$  - информационные признаки каждого канала.

На основе полученной оценки определяются области, где присутствуют гидродинамические возмущения.

$$\left|f_{\Theta_\Sigma}(t)^{ГДИ} - f_{\Theta_\Sigma}(t)^{фон}\right| \geq \delta_{отк}, \quad (8)$$

В выражение (8) знак неравенства определяется исходя из того какой информационный признак сигналов используется для построения комплексной оценки.

В третьей главе «Использование разработанного комплексного подхода в натуральных экспериментальных исследованиях» представлены результаты проведенного натурального эксперимента по регистрации проявлений ГДВ в трех средах при различных метеоусловиях. Первым этапом экспериментальных исследований являлись лабораторные испытания созданного макета комплексной аппаратуры. В рамках лабораторных испытаний для экспериментальных макетов, входящих в комплекс измерительной аппаратуры, были проведены калибровки и предварительные натурные эксперименты по регистрации искусственно созданных ГДВ, где определялись возможности созданных макетов аппаратуры фиксировать изменения параметров регистрируемых сред, при наличии искусственных ГДВ.

В результате пробных натурных экспериментов по регистрации поверхностного следа надводных судов с использованием макета сканирующего лазерного локатора были измерены гистограммы распределений информативных параметров. На рис. 3.1 представлен полученный в эксперименте массив гистограмм амплитуд регистрируемых макетом сканирующего лазерного локатора сигналов. Справа приведена фотография волны от надводного судна, слева результат обработки регистрируемых сигналов. Ось ординат представляет ось времени.

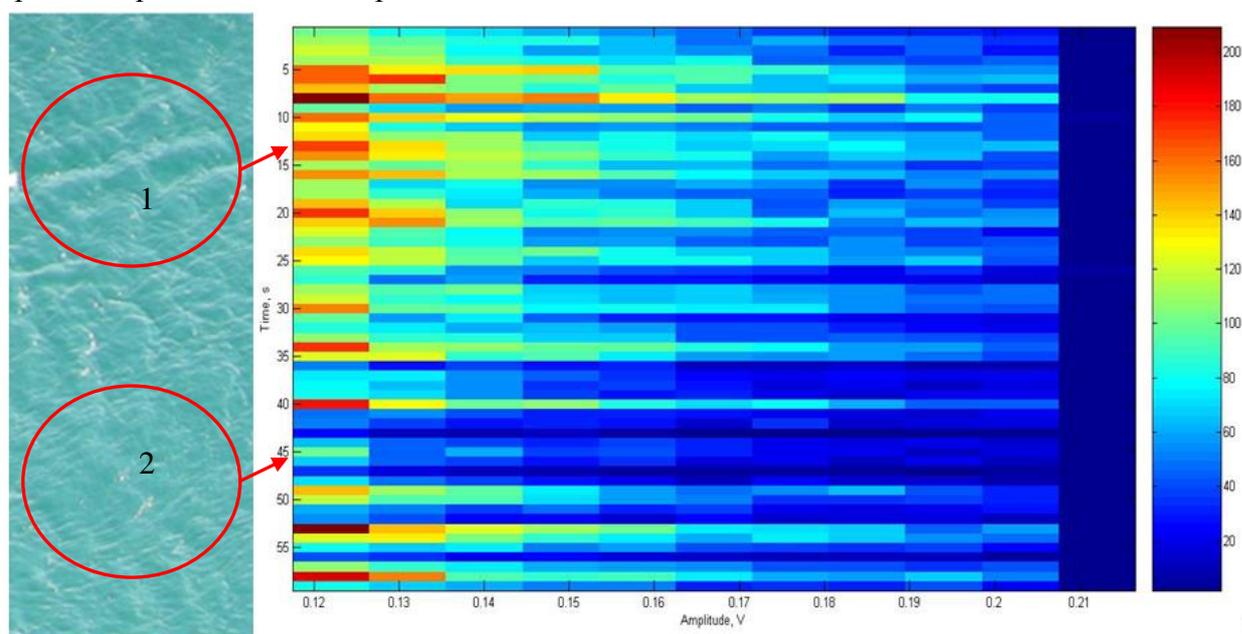


Рисунок 3.1 – Результаты обработки данных, полученных при проведении пробной регистрации ГДВ

Как видно, в области (1), где присутствует расходящаяся волна от судна, распределение информационного параметра меняется, что проявляется в увеличении количества амплитуд информационного параметра.

В целом, в результате проведенных калибровок были определены характеристические кривые макета лазерного локатора и подтверждена работоспособность макета сканирующего лазерного локатора для регистрации изменений параметров морской поверхности, происходящих под воздействием ГДВ.

Для макета двухканального спектрофотометра в фоновых условиях проводились исследования изменчивости величины его выходных сигналов при длительной записи в реальных условиях и при воздействии искусственного ГДВ. Для этого макет спектрофотометра устанавливался так, что его оптическая ось направлялась на морскую поверхность под углом  $53^\circ$  по отношению к вертикали и в течение 18 мин велась непрерывная регистрация. Временная развертка зарегистрированного сигнала каждого

канала двухканального фотометра и величины отношения этих каналов представлена на рисунке 3.2.

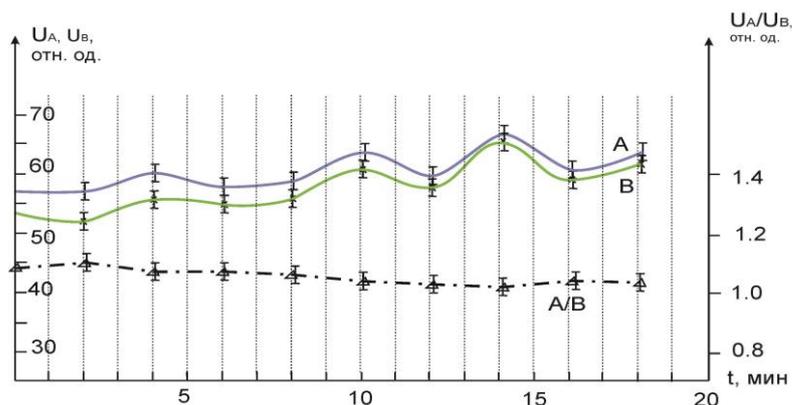
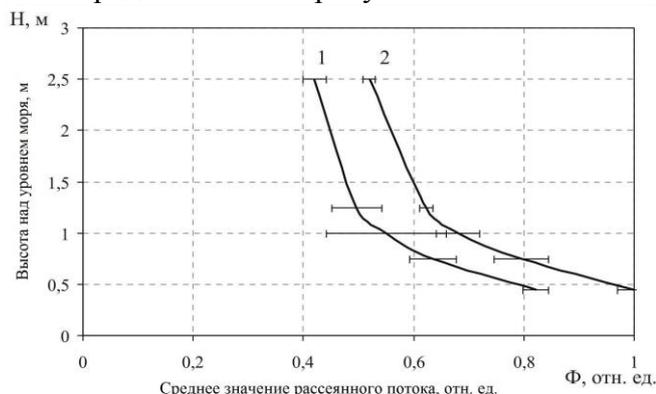


Рисунок 3.2 – Временная развертка сигналов, зарегистрированных двухканальным фотометром.

Как видим, изменение величины отношения каналов А/В подвержена существенно меньшей изменчивости – порядка 3% по сравнению с величиной изменения каждого отдельного канала А и В, которая составляет около 15%. В качестве источника ГДВ использовалась струя от погружного насоса с расходом  $18 \text{ м}^3/\text{час}$ . При горизонтальном направлении струи, находящейся на глубине 0.2 м, отношение сигналов каналов А и В составляло  $0.98 \pm 0.02$ , а при отсутствии струи  $1.33 \pm 0.06$ . Таким образом, наличие ГДВ от затопленной струи привело к изменению сигнала отношения каналов А и В на 30%. Таким образом естественные флуктуации сигналов каналов А и В не влияют на сигнал отношения. Изменения в сигнале отношения каналов А и В фотометра определяется, в основном, изменением концентрации фитопланктона, что позволяет использовать его в составе оптического комплекса.

Для макета аэрозольного лидара были проведены натурные испытания чувствительности разработанного макета аэрозольного лидара к регистрации проявлений искусственных ГДВ в приводном слое атмосферы. В качестве источника ГДВ использовались три насоса с общей производительностью  $45 \text{ м}^3/\text{час}$ . Выходные сопла насосов располагались горизонтально на глубине 0.5 м от поверхности воды.

В результате экспериментов был получен высотный профиль оптических характеристик приводного слоя атмосферы в условиях наличия ГДВ и их отсутствия. Результаты эксперимента представлены на рисунке 3.3.



1 – в отсутствие гидродинамического воздействия,  
2 – при гидродинамическом воздействии.

Рисунок 3.3 – Усредненные высотные профили величины потока рассеянного лазерного излучения

Полученные результаты показывают, что макет аэрозольного лидара позволяет регистрировать изменения оптических характеристик приводного слоя атмосферы, вызываемые воздействием ГДВ, и может быть использован в составе оптического комплекса.

Далее с борта судна был проведен комплексный эксперимент по регистрации ГДВ, создаваемых движущимся надводным судном, в разных метеоусловиях. Целью работ была апробация применения комплексного подхода для повышения эффективности дистанционной оптической регистрации проявлений ГДВ, создаваемых движущимся надводным судном на морской поверхности, приповерхностном слое морской среды и приводном слое атмосферы в различных гидро-метеоусловиях.

На судне был размещен комплекс разработанной измерительной аппаратуры, состоящий из макетов сканирующего лазерного локатора (поз. 1), двухканального фотометра (поз. 2) и аэрозольного лидара (поз. 3). На рис. 3.5 представлено размещение данного комплекса на борту судна.



Рисунок 3.5 – Вид комплекса измерительной аппаратуры (а – размещение сканирующего локатора, б – размещение фотометра и аэрозольного лидара)

На рисунке 3.6 представлены схемы маневрирования судна в процессе выполнения экспериментов. Как видно, в процессе своего движения осуществляло пересечение собственного отстающего следа. Возраст следа в момент пересечения составлял 40 мин.

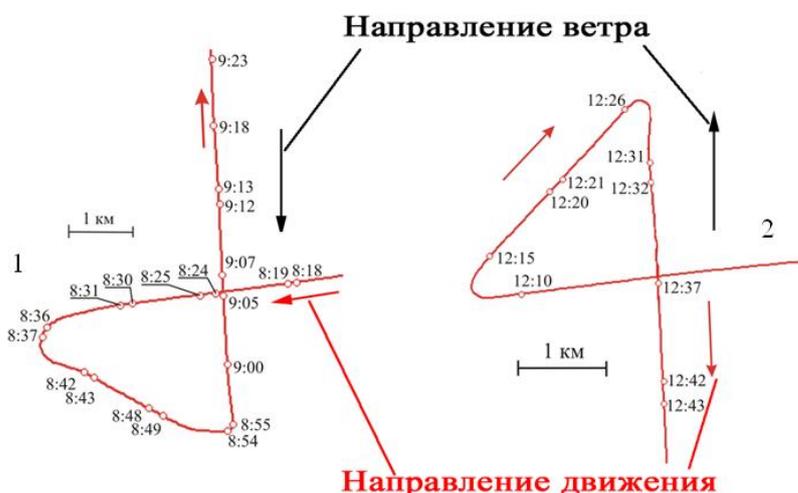


Рисунок 3.6 – Схемы маневрирования судна в процессе выполнения экспериментов

Полученные данные от каждого экспериментального макета, входящего в комплекс регистрирующей аппаратуры, для двух пересечений отстающего следа

надводного судна были обработаны по разработанным алгоритмам. Полученные наборы информативных признаков для сигналов каждого канала комплексной системы приведены на рисунке 3.7.

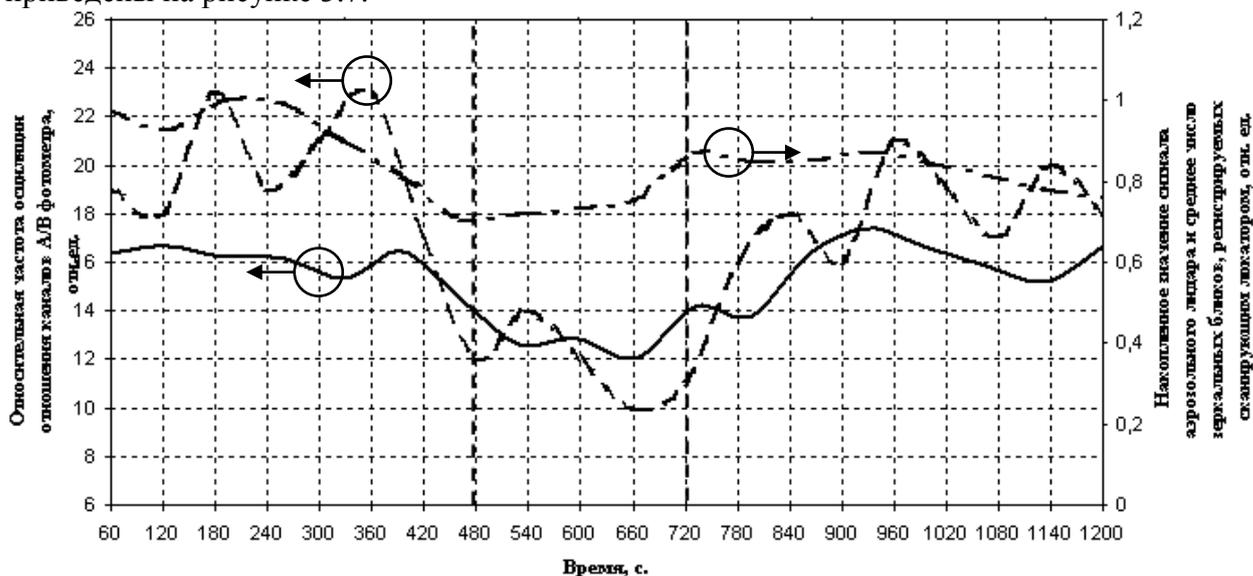


Рисунок 3.7 – Графики временных зависимостей информативных признаков при первом пересечении отстающего следа

Сплошной линией представлена зависимость параметра сигнала лазерного сканирующего локатора, определяемого средним значением числа зеркальных бликов на морской поверхности. Пунктирной линией обозначена временная зависимость параметра сигнала двухканального фотометра в виде среднего периода осцилляций отношения каналов А/В, определяемого частотой изменений приповерхностной концентрации фитопланктона относительно среднего значения. Штрих-пунктирной линией отмечена временная изменчивость параметра сигнала аэрозольного лидара, определяемого изменением концентрации приводного аэрозоля. Данные реализации сигналов приведены за время 20 мин, что, с учетом скорости движения судна, составляет 4,8 км пройденного расстояния. Видно, что для текущих условий сигнал для аэрозольного лидара является малоинформативным, так как его изменения находятся в пределах дисперсии, что накладывает на этот метод ограничения при работе в данных метеоусловиях.

Далее было проведено комплексирование трех отдельных информационных признаков с учетом весовых функций, которые составляют:

$M_1 = 0,5$  – коэффициент комплексирования для сигналов сканирующего локатора.

$M_2 = 0,2$  – коэффициент комплексирования для сигналов аэрозольного лидара.

$M_3 = 0,7$  – коэффициент комплексирования для сигналов двухканального фотометра.

В результате комплексирования получаем единую оценочную функцию (рис. 3.8).

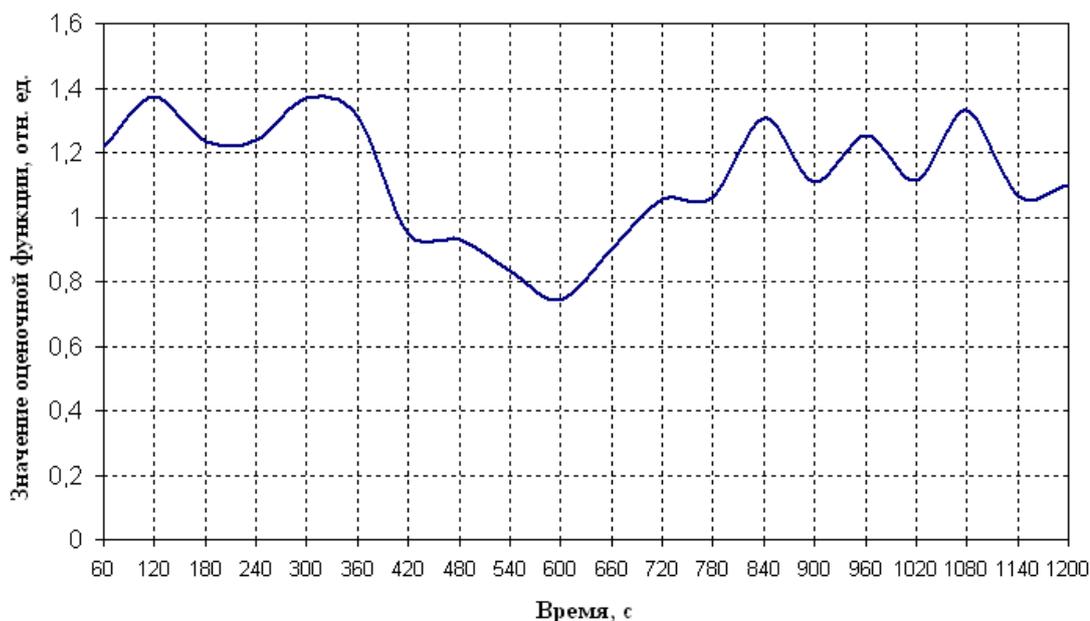


Рисунок 3.8 – Комплексная оценочная функция для первого пересечения отстающего следа

Если в качестве порога выбрать значение на уровне дисперсии полученной комплексной оценки, то, как видно полученная оценочная функция имеет ярко выраженный минимум в области пересечения отстающего следа.

Таким образом, применяя комплексный подход к регистрации ГДВ для данных метеоусловий удается достичь существенного повышения эффективности регистрации поверхностного следа судна. Так, по сравнению с методом регистрации проявлений таких ГДВ в приводном слое атмосферы использование комплекса аппаратуры позволило повысить эффективность регистрации на 25%.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Основные результаты проведенного диссертационного исследования следующие:

1. Разработаны и созданы экспериментальные макеты для регистрации проявлений ГДВ на морской поверхности, приповерхностном слое морской среды и приводном слое атмосферы.
2. Впервые исследован эффект изменения светорассеяния в приводном слое атмосферы, с использованием разработанного комплекса оптической аппаратуры, при воздействии подводного гидродинамического источника.
3. Разработан алгоритм предварительной подготовки сигналов и комплексирования, регистрируемых оптической аппаратурой, который обеспечивает управление параметрами каждого канала комплекса оптической аппаратуры.
4. Экспериментально показана возможность повышения эффективности дистанционной оптической регистрации ГДВ за счет использования комплексного подхода на 20-25% в различных гидро-метеоусловиях по сравнению с эффективностью регистрации только одним из методов.

### Список цитируемой в реферате литературы:

1. А. С. Монин, В. П. Красицкий Явления на поверхности океана Л.: Гидрометеиздат, 375 с., 1985.
2. Носов В.Н., Пашин С.Ю., Горелов А.М., Каледин С.Б., Ильичев А.Т. «Об использовании зеркально-бликовых отражений для дистанционной регистрации

- параметров морского волнения». Материалы третьей Всероссийской конференции «Взаимодействие подводных возмущений с поверхностными волнами (гидродинамическая основа радиотомографии)», Институт проблем механики РАН, Москва, 2004 г., с.10-12
3. И.В. Алешин, С.А. Вицинский, А.Г. Журенков, И.Л. Ловчий, В.Ю. Матвеев, В.А. Яковлев Восстановление интегральных экологических характеристик морской среды по результатам ее многоспектрального оптического зондирования. Оптика атмосферы и океана, 13, №9, 2000г., стр. 842-846.
  4. Баханов В.В., Горячкин Ю.Н., Корчагин Н.Н., Репина И.А. Локальные проявления глубинных процессов на поверхности моря и в приводном слое атмосферы. Докл. РАН, 2007, 414, №1. С. 111–115.
  5. Piskozub J. Study of spatial distribution of marine aerosol over sea coast with a multifrequency lidar system// Proc. SPIE vol. 2471, 1995, p. 387-389.
  6. Zielinski A., Piskozub J., Irczuk M. Lidar studies of marine aerosol in the coastal zone// Proc. SPIE vol. 2471, 1995, p. 428-438.
  7. В. Н. Носов, А. М. Горелов, С. Б. Каледин, В. А. Кузнецов, С. О. Леонов, А. С. Савин «Рассеяние лазерного излучения над морской поверхностью при наличии гидродинамических возмущений в толще водной среды» // Доклады Академии наук, Академиздатцентр "Наука" РАН, т. 433, №1, 2010г., стр. 111 – 112.
  8. Бобнев М.П., Кривицкий Б.Х., Ярлыков М.С. Комплексные системы радиоавтоматики. М. «Сов. Радио», 1968, 232 с.
  9. Толкаченко Г.А., Худяков Ю.А., Комплексование гидрофизических измерительных приборов. – В. кн.: Морские гидрофизические исследования, № 3 (70), Севастополь, МГИ АН УССР, 1975.

**По теме диссертации опубликованы следующие работы**  
**Патент на полезную модель:**

1. Твердотельный лазер среднего ИК-диапазона с накачкой диодной линейкой / С.О. Леонов [и др.]: пат. RU 148558 Рос. Федерация. № 2014126498/28 ; заявл. 30.06.2014; опубл. 10.12.2014, Бюл. № 34.

**Статьи в ведущих рецензируемых журналах и изданиях, входящих в перечень ВАК РФ:**

2. В. Н. Носов, А. М. Горелов, С. Б. Каледин, В. А. Кузнецов, С. О. Леонов, А. С. Савин «Рассеяние лазерного излучения над морской поверхностью при наличии гидродинамических возмущений в толще водной среды» // Доклады Академии наук, Академиздатцентр "Наука" РАН, т. 433, №1, 2010г., стр. 111 – 112.
3. В. Н. Носов, С. Б. Каледин, А. М. Горелов, С. О. Леонов, В. А. Кузнецов, В.И. Погонин, А. С. Савин «Особенности светорассеяния в приводном слое атмосферы над областями долгоживущих гидродинамических возмущений морской среды» // Доклады Академии наук, Академиздатцентр "Наука" РАН, т. 442, №4, 2012г., стр. 549 –550.
4. В.Н. Носов, А.М. Горелов, С.Б. Каледин, А.С.Савин, С.О. Леонов Корреляционно -матричный метод обработки результатов лазерного сканирования морской поверхности//Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. "Приборостроение", 2011г., №3, с. 26 - 33, ISBN 0236-3933

5. Носов В.Н., Горелов А.М., Каледин С.Б., Леонов С.О., Савин А.С., Иванов С.Г. Использование комплексного подхода при оптической дистанционной регистрации структуры гидродинамических возмущений//Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, Сер. «Приборостроение», СП №9 «Современные проблемы оптотехники», 2012г., с. 168-175.

**Статьи в зарубежных изданиях и материалы международных конференций:**

6. Nosov V.N., Gorelov A.M., Kaledin S.B., Kuznetsov V.A., Leonov S.O., Savin A.S. Laser emission scattering over a marine surface during hydrodynamic disturbances within the water mass Doklady Earth Sciences. 2010. T. 433. № 1. С. 920-921.
7. Nosov V.N., Kaledin S.B., Gorelov A.M., Leonov S.O., Kuznetsov V.A., Pogonin V.I., Savin A.S. Light scattering in the atmospheric near-water layer above areas of long-living hydrodynamic disturbances of the marine environment Doklady Earth Sciences. 2012. T. 442. № 2. С. 247-248.
8. V.N. Nosov, A.M. Gorelov, S.B. Kaledin, S.O. Leonov, V.A. Kusnetsov «Optoelectronic device for research dynamics characteristics of smooth-refined structure wave sea surface»// Abstracts to International Young Optical Scientist Conference, Moscow, VMSTU, 2009, p24.
9. С.Г. Иванов, В.Н. Носов, В.И. Погонин, Е.А. Зевакин, А.С. Савин, А.М. Горелов, С.О. Леонов «Применение фотометра яркости для получения информации о наличии гидродинамических возмущений в морской среде»// Актуальные направления развития прикладной математики в энергетике, энергоэффективности и информационно-коммуникационных технологиях/Сборник трудов международной научной конференции, посвященной 180-летию МГТУ им. Н.Э. Баумана – Москва, 2010 г., с – 277 – 281.
10. В.Н. Носов, А.М. Горелов, С.Б. Каледин, В.А. Кузнецов, С.О. Леонов, А.С. Савин «Выделение возмущений морской поверхности при наличии априорной информации об их симметрии»// Актуальные направления развития прикладной математики в энергетике, энергоэффективности и информационно-коммуникационных технологиях/Сборник трудов международной научной конференции, посвященной 180-летию МГТУ им. Н.Э. Баумана – Москва, 2010 г., с – 281 – 284.
11. С.Г. Иванов, В.Н. Носов, В.И. Погонин, С.О. Леонов, В.А. Кузнецов, А.С. Савин, Е.А. Зевакин «Использование двухканального фотометра для регистрации гидродинамических явлений»// Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации: Материалы 4-й Международной научно-технической конференции/ Российской НТОРЭС им. А.С. Попова – Суздаль, Россия: Изд-во ООО «Информпресс-94», 2011 г., с. 96 – 98, ISBN 978-5-905278-04-4
12. А.М. Горелов, Е.А. Зевакин, С.Г. Иванов, С.Б. Каледин, В.А. Кузнецов, С.О. Леонов, В.Н. Носов, В.И. Погонин, А.С. Савин «К вопросу о комплексном подходе к дистанционной регистрации гидродинамических возмущений морской

среды оптическими методами»//Труды XI всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» –СПб.: Наука, 2012, 277 – 280, ISBN 978-5-02-038183-4.

#### **Другие статьи и материалы конференций:**

13. Горелов А.М., Зевакин Е.А., Иванов С.Г., Каледин С.Б., Леонов С.О., Носов В.Н., Савин А.С. О комплексном подходе к дистанционной регистрации гидродинамических возмущений морской среды оптическими методами// Физические основы приборостроения, Т.1, №4, 2012, 58-65.
14. Носов В.Н., Леонов С.О., Горелов А.М., Каледин С.Б., Савин А.С. Обработка данных при комплексном подходе к дистанционной регистрации гидродинамических возмущений морской среды//Инженерный журнал: наука и инновации (электронное издание), МГТУ им. Н.Э. Баумана №2(14), 2013
15. А.М. Горелов, С.Б. Каледин, В.А. Кузнецов, Р.А.Кириллов, С.О. Леонов, В.Н. Носов, И.И. Савельев, В.А. Сверчков «Лабораторная лазерная установка для регистрации аномалий в приводном слое атмосферы, вызванных гидродинамическими возмущениями», труды IX межвузовской научной школы молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине», Москва, 2008г., с. 92-95.
16. В.Н. Носов, А.М. Горелов, С.Б. Каледин, В.А. Кузнецов, С.О. Леонов, А.С.Савин «О лазерной регистрации подводных гидродинамических возмущений по изменению параметров аэрозольного светорассеяния приводного слоя атмосферы»// Проявление глубинных процессов на морской поверхности: Тезисы Четвертой межведомственной конференции. Нижний Новгород, 2009г.
17. В.Н. Носов, А.М. Горелов, С.Б. Каледин, В.А. Кузнецов, С.О. Леонов, А.С.Савин «Лабораторные исследования возможностей растрового метода для изучения динамических характеристик поверхностного ветрового волнения»// Проявление глубинных процессов на морской поверхности: Тезисы Четвертой межведомственной конференции. Нижний Новгород, 2009г.