

*На правах рукописи*



ГЛУХОВ ВЛАДИМИР АЛЕКСЕЕВИЧ

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СИГНАЛОВ ОБРАТНОГО  
РАССЕЯНИЯ ПРИ ЛИДАРНОМ ЗОНДИРОВАНИИ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ  
СЛОЕВ МОРСКОЙ ВОДЫ И ДНА

Специальность 1.6.17 — «Океанология»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2024

Работа выполнена в Санкт-Петербургском филиале Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института океанологии им. П. П. Ширшова Российской академии наук

Научный

руководитель:

**Родионов Анатолий Александрович,**

член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, руководитель научного направления фундаментальной и прикладной гидрофизики Санкт-Петербургского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук

Официальные

оппоненты:

**Носов Виктор Николаевич,**

доктор технических наук, заведующий Лабораторией физико-химических процессов и динамики поверхности океана Федерального государственного бюджетного учреждения науки Ордена Ленина и Ордена Октябрьской Революции Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук

**Салюк Павел Анатольевич**

кандидат физико-математических наук, заведующий Лабораторией спутниковой океанологии и лазерного зондирования Федерального государственного бюджетного учреждения науки Тихоокеанского океанологического института им. В. И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук

Ведущая

организация:

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук»

Защита диссертации состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г. в \_\_ час. \_\_ мин. на заседании диссертационного совета 24.1.090.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте океанологии им. П. П. Ширшова Российской академии наук по адресу: 117997, г. Москва, Нахимовский пр., д. 36.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте <http://www.ocean.ru/disser/> Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.090.02,  
кандидат физико-математических наук

Соловьев Дмитрий  
Александрович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время интенсивно развиваются пассивные и активные методы дистанционного зондирования океана. Одним из активных дистанционных методов является метод лидарного зондирования. Морские радиометрические (профилирующие) лидары судового и авиационного базирования, разработка которых ведется начиная с 70-ых годов прошлого века [Kattawar, Plass, 1972; Браво-Животовский и др., 1974; Fredriksson et al., 1978; Hoge et al., 1980; Squire, Krumboltz, 1981; Gordon, 1982], обеспечивают возможность решения ряда океанологических задач. В работах отечественных и зарубежных исследователей показаны возможности применения морских лидаров с борта судна и авианосителя для регистрации гидрооптических характеристик приповерхностного слоя [Gordon, 1982; Goldin et al., 2007; Коханенко и др., 2011; Chen, Delu, 2019; Collister, 2020; Xu et al. 2020], а также структуры их вертикального распределения [Hoge et al., 1980; Vasilkov et al., 2001; Churnside, Donaghay, 2009]. Лидарное зондирование позволяет зарегистрировать динамические процессы, происходящие в приповерхностном слое морской воды и связанные, например, с прохождением внутренних волн [Bukin et al., 1998; Churnside, Ostrovsky, 2005; Churnside et al., 2012; Долин и др., 2012]. Важным разделом применения радиометрических лидаров является лазерная батиметрия. Морские лидары, применяемые для решения этой задачи, сертифицированы как средство измерения и выпускаются малыми сериями. Теоретические и экспериментальные океанологические исследования с использованием радиометрических лидаров активно проводятся в настоящее время. Непрерывно совершенствуется техника лидарного зондирования.

В изучении вопросов лидарного зондирования и его приложений остается ряд нерешенных проблем. Среди них отметим разработку алгоритмов извлечения из параметров лидарных эхо-сигналов информации о гидрооптических характеристиках приповерхностного слоя в широком диапазоне их изменчивости и для разной геометрии зондирования. Для проведения измерений с конкретным типом лидара необходимо установить соотношения, связывающие гидрооптические характеристики приповерхностного слоя и параметры лидарного эхо-сигнала, справедливые в широких пределах. Проведение исследований, направленных на получение таких соотношений, является актуальной задачей.

Возможность применения морских лидаров для регистрации параметров внутренних волн обоснована теоретически [Долин, 2012; Родионов, 2012]. При этом практически не развиты экспериментальные методы их лидарной регистрации в водах с различными типами стратификации гидрооптических и гидрологических характеристик. В частности, для широко распространенной в морях России двухслойной стратификации гидрооптических характеристик

с верхним более мутным слоем отсутствуют методы, позволяющие получить положение по глубине границы между слоями и определить её изменчивость с течением времени под действием внутренних волн. В связи с этим, выявление закономерностей ослабления лидарных эхо-сигналов с глубиной под влиянием внутренних волн в указанных условиях является актуальным.

В научной литературе отсутствует информация об экспериментально подтвержденных количественных оценках предельной глубины зондирования дна в зависимости от протяженности атмосферного участка трассы зондирования при батиметрической съемке с большой высоты. Потребность в таких исследованиях возникает в связи с практической необходимостью проведения авиационной лидарной батиметрической съемки прибрежных акваторий, окруженных горами, в частности, бухт полуострова Камчатка, где безопасная высота полета может составлять 2000–2500 м. Это определяет актуальность исследования зависимости ослабления отраженного от морского дна эхо-сигнала от протяженности атмосферной трассы зондирования.

Таким образом, исследование закономерностей формирования сигналов обратного рассеяния при лидарном зондировании приповерхностного слоя морской воды, характеризующегося различными типами пространственно-временной изменчивости, и при выполнении лидарной батиметрической съемки с большой высоты является актуальной научной задачей.

**Степень разработанности темы исследования.** Натурные исследования с использованием морских радиометрических лидаров ведутся в течении более чем пятидесяти лет. По-видимому, впервые лидарная система была использована для измерения гидрооптических характеристик морской воды во время 5 рейса НИС «Дмитрий Менделеев» в 1970-м г. [Браво-Животовский и др., 1974]. Одни из первых натурных измерений положения морского дна были выполнены в 1977 г. с использованием лидара NASA [Hoge et al., 1980]. С конца 1980-х гг. проводились систематические исследования возможности применения радиометрических лидаров для регистрации профиля морского дна, подповерхностных светорассеивающих слоев, пространственных распределений гидрооптических характеристик, а также косяков пелагических рыб. Исследования с поляризационными лидарами начались в середине 90-ых годов прошлого века – были разработаны лидары «Макрель 1» (ИОА СО РАН) [Penner, Shamanaev, 1993], АПЛ (ИО РАН) [Vasilkov et al., 2001] и FLOE (NOAA) [Churnside et al., 2001]. В последующие годы различными научными группами был разработан ряд авиационных и судовых лидаров, предназначенных для океанологических исследований [Goldin et al., 2007; Степанов и др., 2008; Shamanaev, 2015; Chen, Delu, 2019; Liu et al., 2019; Li et al., 2020; Collister et al., 2020; Churnside et al., 2021].

Возможность дистанционной регистрации гидрооптических характеристик приповерхностного слоя морской воды с использованием радиометрических лидаров показана аналитически путем решения уравнения переноса [Dolina et al., 2007], с использованием результатов расчетов методом Монте-Карло [Gordon, 1982], и экспериментально [Браво-Животовский и др., 1974; Goldin et al., 2007; Коханенко и др., 2011; Collister et al., 2020, Xu et al. 2020]. Важным достоинством лидарной съемки является возможность проведения непрерывных измерений вдоль маршрута движущегося судна или авианосителя. При соответствующей организации лидарной съемки данные измерения позволяют получать площадные распределения гидрооптических характеристик приповерхностной толщи морской воды [Goldin et al., 2007]. В последние годы было создано несколько специализированных лидаров, предназначенных для регистрации гидрооптических характеристик приповерхностного слоя морской воды [Collister et al., 2020; Xu et al. 2020]. Натурные исследования с такими лидарами проведены в ограниченном диапазоне изменения величин гидрооптических характеристик и с использованием конкретной геометрии лидарного зондирования [Коханенко и др., 2011; Collister et al., 2020; Xu et al. 2020]. Результаты этих исследований не позволяют оценить возможности лидаров для регистрации гидрооптических характеристик в широком диапазоне их изменчивости и для различных геометрий зондирования.

Радиометрические лидары дают возможность зарегистрировать вертикальный профиль гидрооптических характеристик [Goldin et al., 2007]. Во многих случаях параметры стратификации гидрооптических характеристик хорошо коррелируют с параметрами стратификации гидрофизических характеристик. В частности, слой повышенного градиента изменения показателя ослабления или слой повышенного светорассеяния бывают приурочены к положению пикноклина [Левин, 2007; Родионов и др., 2012]. В этом случае данные лидарного зондирования позволяют оценить глубину залегания пикноклина, а при соответствующей организации процесса лидарной съемки – регистрировать внутренние волны и определять их характеристики.

Расчет лидарных изображений внутренних волн в работах [Долин и др., 2012; Долина, Долин, 2017] показал принципиальную возможность их регистрации с использованием морских лидаров при различных типах стратификации гидрооптических характеристик. Первые экспериментальные исследования возможности регистрации внутренних волн с помощью лазерного зондирования были выполнены с борта судна в конце 70-ых годов прошлого века [Walker et al., 1982]. Регистрация интегральных характеристик эхо-сигналов при проведении зондирования с высокой частотой в течении длительного интервала времени позволила зарегистрировать периодические структуры, обусловленные внутренними волнами [Bukin et al., 1998]. С использованием авиационного лидара современной конструкции в условиях наличия

подповерхностного слоя повышенного светорассеяния внутренние волны были зафиксированы в заливе Аляска [Churnside, Ostrovsky, 2005] и вблизи тихоокеанского побережья штата Вашингтон [Churnside et al., 2012].

Для двухслойной стратификации гидрооптических характеристик с верхним более мутным слоем возможность лидарной регистрации внутренних волн экспериментально не исследовалась. Для таких условий отсутствуют методы, позволяющие из параметров лидарных эхо-сигналов извлечь информацию о характеристиках квазипериодических процессов, обусловленных внутренними волнами. Вместе с тем, данные контактных наблюдений свидетельствуют о том, что такая стратификация наиболее распространена в прибрежных акваториях морей России в местах активной генерации внутренних волн [Химченко, Серебряный, 2018; Зимин, Свергун, 2018; Свергун, Зимин, 2020].

Интенсивно развивается техника и методика проведения лидарной батиметрической съемки. Известен ряд зарубежных лидарных батиметрических систем, например, более ранние – SHOALS [Guenther et al., 2000; Irish et al., 2000], современные – RIEGL VQ-880-G [Riegl ..., 2016], CZMIL SuperNova [Mandlbürger, 2022], Leica HawkEye 4X [Mandlbürger, 2022]. Развитие получили комбинированные топо-батиметрические системы, устанавливаемые, в частности, на беспилотные летательные аппараты [Slocum et al., 2019]. Такие системы обеспечивают возможность одновременного проведения батиметрической и топографической съемок и позволяют зарегистрировать точное положение береговой линии. Наличие стандартизированной техники и методик обработки данных позволяют проводить исследования по расширению возможностей лазерной батиметрии с использованием серийных приборов, например, по идентификации типа морского дна (песчаное, каменистое) по данным лидарной съемки [Collin et al., 2008; Tulldahl, Wikström, 2012]. В батиметрических лидарах глубина зондирования и пространственное разрешение по вертикали и горизонтали зависят как от характеристик самого лидара, так и гидрооптических характеристик исследуемых акваторий. В прибрежных районах Атлантического и Тихого океанов вблизи побережья США батиметрические лидары показали высокую эффективность, что связано, в том числе, с относительно высокой прозрачностью зондируемых вод.

В батиметрических лидарах высота полета фиксирована, так как она определяет часть метрологических характеристик. Обычно это высоты 200–400 м. Но для прибрежных морских акваторий со сложным рельефом, например, фьордов и бухт, окруженных горами, для обеспечения безопасности полетов требуется существенное увеличение высоты. Использование существующих батиметрических лидарных систем с больших высот не гарантирует достижения заявленных производителем глубин зондирования. В связи с этим важно выполнить исследования влияния протяженности атмосферного участка трассы зондирования на возможность проведения

батиметрической съемки с большой высоты и разработать технические требования для таких лидаров.

**Цель работы:** На основе теоретического анализа, проведения натуральных экспериментов и математической обработки экспериментальных данных исследовать закономерности формирования сигналов обратного рассеяния при лидарном зондировании приповерхностных слоев морской воды, характеризующихся различными типами пространственно-временной изменчивости, и при выполнении лидарной батиметрической съемки.

**Задачи, решаемые для достижения поставленной цели:**

1. Исследовать связь параметров лидарных эхо-сигналов, регистрируемых в заданной геометрии зондирования, и гидрооптических характеристик приповерхностного слоя морской воды и установить статистические соотношения, позволяющие проводить дистанционную оценку гидрооптических характеристик по данным лидарного зондирования.

2. Выявить закономерности ослабления лидарного эхо-сигнала с глубиной, вызванные влиянием реальных параметров двухслойной стратификации гидрооптических характеристик приповерхностного слоя, и оценить по данным лидарного зондирования характеристики пространственно-временных изменений этой стратификации, обусловленных внутренними волнами.

3. Выполнить натурные исследования зависимости ослабления отраженного от морского дна эхо-сигнала от протяженности атмосферной трассы зондирования и с использованием полученных данных оценить энергетические характеристики авиационного лидара, требуемые для локации дна до высоты 2500 м.

**Методология и методы исследования.** В основе исследования лежит теоретическая модель и физико-математические методы расчета характеристик лидарных эхо-сигналов. Экспериментальные работы проводились по разработанным соискателем программам и методикам и включают регистрацию и анализ амплитуды и формы спада лидарного эхо-сигнала, зарегистрированного с использованием морских лидаров судового и авиационного базирования. Массив данных лидарного зондирования обрабатывался с использованием разработанного математического метода аппроксимаций, являющегося продолжением метода базового сигнала [Goldin et al., 2007; Churnside, Donaghay, 2009], а также с использованием спектральных методов, в частности, вейвлет-анализа. Лидарная съемка сопровождалась сопутствующими измерениями гидрооптических и гидрологических характеристик приповерхностного слоя, зарегистрированных контактными сертифицированными погружными приборами. Сопоставление полученных данных позволило получить регрессионные соотношения, связывающие гидрооптические характеристики с параметрами лидарных эхо-сигналов. Для анализа данных батиметрической лидарной съемки использовался общепринятый метод

определения положения дна по времени прихода отраженного от дна эхо-сигнала [Philpot, 2019]. Натурные исследования проводились в прибрежных районах Черного и Карского морей, а также в Авачинском заливе полуострова Камчатка.

### **Научная новизна исследования.**

Научная новизна полученных в диссертации результатов может быть сформулирована в виде следующих положений:

1. Впервые установлено, что показатель ослабления лидарного эхо-сигнала  $\alpha$ , зарегистрированный с использованием морского лидара с относительно узким углом поля зрения приемной оптической системы в геометрии судового зондирования, линейно связан с рядом гидрооптических характеристик – показателем ослабления света  $c$  и показателем диффузного ослабления света  $K_d$ . Линейная регрессия охватывает широкий диапазон изменчивости  $c$  от  $0,2 \text{ м}^{-1}$  до  $1,1 \text{ м}^{-1}$  при изменении значений вероятности выживания фотона  $\omega_0$  в диапазоне от  $0,4$  до  $0,8$ .

2. Впервые на базе экспериментальных данных показано, что в случае двухслойной стратификации гидрооптических характеристик аппроксимационный и спектральный анализ формы спада кросс-поляризованной компоненты лидарного эхо-сигнала позволяют зарегистрировать квазипериодические процессы в области пикноклина, обусловленные внутренними волнами, и оценить их характеристики – период и амплитуду.

3. При проведении батиметрической съемки впервые получена экспериментальная зависимость амплитуды эхо-сигнала, отраженного от дна, от протяженности атмосферного участка трассы зондирования, которая позволила выполнить оценки требуемых энергетических параметров авиационного лидара для проведения батиметрической съемки с безопасной высоты полета до  $2500 \text{ м}$ .

### **Теоретическая значимость исследования**

1. Полученные в результате лидарной съемки данные о параметрах лидарных эхо-сигналов и их связи с данными одновременных сопутствующих измерений гидрооптических и гидрологических характеристик позволяют уточнить и верифицировать аналитические и численные модели расчета сигналов обратного рассеяния.

2. Выявленные особенности формы спада лидарного эхо-сигнала подтверждают теоретические представления об их формировании и позволяют уточнить процедуру расчета лидарных изображений внутренних волн для реально наблюдаемых двухслойных стратификаций гидрооптических характеристик.

3. Вид зависимостей амплитуды лидарного эхо-сигнала от морского дна от протяженности атмосферного участка трассы зондирования, полученных экспериментально, уточняет результаты аналитических расчетов для конкретных акваторий.



### **Практическая значимость исследования**

1. Использование полученных регрессионных соотношений, связывающих показатель ослабления лидарного эхо-сигнала  $\alpha$  с показателями ослабления света морской водой  $c$  и диффузного ослабления света  $K_d$ , при судовой лидарной съемке обеспечивает возможность дистанционной регистрации гидрооптических характеристик приповерхностного слоя, меняющихся в широких пределах. При этом контроль однородности исследуемого слоя осуществляется дистанционно путем анализа формы спада лидарного эхо-сигнала.

2. Разработанный на основе проведенных исследований метод лидарной регистрации внутренних волн позволяет применять его не только при измерениях на станциях, но и на ходу судна. Этот метод может быть применен к данным авиационного лидарного зондирования, что позволит в случае соответствующей организации процесса лидарной съемки зарегистрировать объемную картину пространственного распределения гидрооптических характеристик приповерхностного слоя, не искаженную временной изменчивостью, и оценить физические характеристики квазипериодических процессов, протекающих в этом слое.

3. Полученные оценки технических характеристик морского батиметрического лидара в зависимости от высоты зондирования и глубины морского дна позволяют повысить эффективность применения морских лидаров в прибрежных морских акваториях, окруженных высокими горами, и являются реализуемыми с учетом современного уровня техники при разработке батиметрических лидаров нового поколения.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Показатель ослабления лидарного эхо-сигнала  $\alpha$ , формирующегося при рассеянии назад в относительно узком угле в однородном по вертикали приповерхностном слое, линейно связан с гидрооптическими характеристиками – показателем ослабления света  $c$  и показателем диффузного ослабления света  $K_d$ . Линейная регрессия охватывает широкий диапазон изменчивости  $c$  от  $0,2 \text{ м}^{-1}$  до  $1,1 \text{ м}^{-1}$  при изменении значений вероятности выживания фотона  $\omega_0$  в диапазоне от 0,4 до 0,8.

2. Двухслойная стратификация гидрооптических характеристик обуславливает различные особенности формы спада лидарного эхо-сигнала в области границы между слоями. Влияние этой границы более контрастно проявляется в форме спада кросс-поляризованной компоненты. Использование набора функций аппроксимации, функциональный вид которых следует из лидарного уравнения, для разных участков спада эхо-сигнала позволяет определить положение границы между слоями. Совместное применение аппроксимационного и спектрального анализа формы эхо-сигнала дает возможность выявить квазипериодические процессы в области пикноклина, обусловленные внутренними волнами, а также оценить их характеристики – период и амплитуду.

3. При увеличении атмосферного участка трассы зондирования  $H$  при батиметрической съемке затухание эхо-сигнала, обусловленное геометрическим фактором, соответствует зависимости  $H^m$ . В случае френелевского отражения от поверхности воды  $m = 2$ , что соответствует значению, принятому в лидарном уравнении. Значение  $m$  зависит от гидрооптических характеристик и глубины дна. С увеличением глубины дна показатель степени  $m$  уменьшается. В Бечевинской бухте при глубине дна  $z_b = 10$  м зафиксировано значение  $m = 1,3$ , а при  $z_b = 15$  м – 1,1.

**Степень достоверности научных результатов** определяется теоретической основой методов лидарного зондирования, проведением экспериментальных работ по апробированным методикам, соответствием измеряемых характеристик данным, полученным с использованием современных сертифицированных приборов для контактных измерений, широко использующихся на практике, а также достаточным объемом полученных экспериментальных данных, позволивших провести их надежную статистическую обработку.

**Личный вклад автора** заключался в участии в постановке задач исследования и их реализации, в постановке и проведении экспериментов. Автором лично проводилась обработка и анализ натурных данных лидарного зондирования и сопутствующих измерений, комплексный анализ разнородных данных, а также исследование процессов, формирующих изменчивость лидарных эхо-сигналов при регистрации гидрооптических характеристик приповерхностного слоя, внутренних волн и морского дна.

**Апробация диссертационной работы.** Основные результаты диссертации были представлены на заседании Ученого совета СПбФ ИО РАН 16.01.2024 г., на заседании Ученого совета Физического направления ИО РАН 19.01.2024 г. и докладывались на Всероссийской молодежной научной конференции «Комплексные исследования морей России: оперативная океанография и экспедиционные исследования (КИМР-2016)», МГИ РАН (г. Севастополь, 2016 г.), Всероссийской молодежной научной конференции «Комплексные исследования мирового океана (КИМО)», ИО РАН (г. Москва, 2017 г.), СПбГУ (г. Санкт-Петербург, 2018 г., 2023 г.), АО ИО РАН (г. Калининград, 2020 г.), Всероссийской конференции с международным участием «Современные проблемы оптики естественных вод», СПбФ ИО РАН (Санкт-Петербург, 2017 г., 2019 г., 2021 г., 2023 г.), Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики», (г. Санкт-Петербург, 2016 г., 2022 г.) и на XXVIII Международном симпозиуме «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы», ИОА СО РАН (г. Томск, 2022 г.).

**Публикации по теме диссертации.** Основные положения диссертации представлены в 19 публикациях, из них 7 статей в журналах, включенных в список ВАК, и 12 тезисов и материалов докладов на всероссийских и международных конференциях.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения. Работа изложена на 115 страницах текста, содержит 54 рисунка и 6 таблиц. Список литературы насчитывает 114 наименования.

### **Благодарности**

Автор выражает свою признательность научному руководителю Родионову Анатолию Александровичу, чл.-корр. РАН, д.т.н., за внимательное руководство работой и помощь на всех этапах выполнения диссертации, Гольдину Юрию Анатольевичу, к.ф.-м.н., за помощь при выполнении исследований, вошедших в диссертацию, идеи и оригинальные подходы к получению и обработке экспериментальных данных, Сясько Владимиру Александровичу, д.т.н., за ценные советы при написании диссертации. Автор благодарит к.т.н. Гуреева Б. А., Венцкута Ю. И., к.т.н. Ляшенко А. И., Глитко О. В., к.ф.-м.н. Родионова М. А. и к.т.н. Сбитного М. Л. за помощь в проведении экспериментальных исследований. Автор выражает благодарность коллективу Лаборатории оптики океана ИО РАН, в особенности к.ф.-м.н. Глуховцу Д.И. и Артемьеву В.А., за научное сотрудничество и помощь в проведении сопутствующих контактных измерений. Отдельная благодарность моей семье, в особенности моей жене Юлии, за поддержку на всех этапах выполнения исследований и написания диссертации.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** представлены обоснование актуальности и степень разработанности темы исследования, цель исследования, поставленные задачи, методология и методы исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, защищаемые положения, степень достоверности полученных результатов, личный вклад автора, апробация результатов исследования и список опубликованных диссертантом работ.

В **первой главе** кратко изложены основные существующие методы лидарного зондирования и их применение для решения океанологических задач. Основное внимание уделено работам, выполненным в последние годы. В **разделе 1.1** рассматривается метод лидарного зондирования морских акваторий с борта судна и авианосителя. В **разделе 1.2** представлен общий состав и обоснование конструкций морского лидара, выполнен обзор технических характеристик современных морских радиометрических лидаров судового и авиационного базирования. Приведены сводные таблицы технических характеристик ряда наиболее интересных радиометрических и батиметрических лидаров. В **разделе 1.3** представлены результаты использования лидаров для определения гидрооптических характеристик приповерхностного слоя морской воды, в том числе с использованием

поляризационных лидаров. **Раздел 1.4** посвящен обзору результатов теоретических и экспериментальных исследований по наблюдению внутренних волн с использованием лидаров в водах с различными типами стратификации гидрооптических характеристик. В **разделе 1.5** рассмотрены основные направления исследований с использованием батиметрических лидаров. Выполненный обзор показывает, что исследование закономерностей формирования сигналов обратного рассеяния при лидарном зондировании приповерхностного слоя морской воды, характеризующегося различными типами пространственно-временной изменчивости, и при выполнении лидарной батиметрической съемки с большой высоты является актуальной научной задачей.

Во **второй главе** представлено исследование эмпирических связей параметров лидарных эхо-сигналов с гидрооптическими характеристиками приповерхностного слоя морской воды.

**Раздел 2.1** посвящен описанию используемой аппаратуры, методики измерений и условий проведения натурных исследований. В исследовании использовался судовой поляризационный лидар ПЛД-1 (разработка ИО РАН), для которого в лабораторных и натурных условиях были получены оценки разрешающей способности и точности на примере определения положения погруженных объектов вблизи морской поверхности и дна. Исследование связей параметров лидарных эхо-сигналов и гидрооптических характеристик приповерхностного слоя выполнено в западной части Карского моря. Лидарная съемка сопровождалась комплексом синхронных сопутствующих контактных измерений гидрофизических и гидрооптических характеристик приповерхностного слоя морской воды.

В **разделе 2.2** описана методика обработки данных лидарного зондирования с целью исследования связей параметров лидарных эхо-сигналов и гидрооптических характеристик приповерхностного слоя. Зависимость мощности эхо-сигнала  $P$  от времени  $t$  описывается лидарным уравнением, которое с учетом влияния многократного рассеяния имеет вид:

$$P\left(t = \frac{2Z}{c_w}\right) = \frac{c_w W_0 A T_0 (1-r)^2}{2(nH + Z)^2} \beta'(\pi, Z) \exp\left[-2\int_0^Z \alpha(Z') dZ'\right], \quad (1)$$

где  $Z$  и  $H$  – протяженности подводного и надводного участков трассы зондирования,  $c_w$  – скорость света в морской воде,  $n$  – показатель преломления морской воды,  $W_0$  – энергия зондирующего импульса,  $A$  – площадь приемной апертуры,  $T_0$  – пропускание приемной системы,  $r \approx 0,02$  – коэффициент отражения Френеля для границы раздела воздух–морская вода,  $\alpha(Z)$  – показатель ослабления лидарного эхо-сигнала,  $\beta'(\pi, Z)$  – эффективное значение показателя направленного рассеяния  $\beta(\theta, Z)$  при значении угла рассеяния  $\theta=180^\circ$ . Истинная глубина  $z$  может быть пересчитана из  $Z$  с учетом угла зондирования  $\varphi$ . Момент времени  $t$  отсчитывается от момента пересечения зондирующим импульсом поверхности воды.

В общем случае  $\alpha(Z)$  зависит от глубины. В дальнейшем рассматривается случай однородных по глубине вод, когда  $\int_0^Z \alpha(Z') dZ'$  может быть заменен постоянной величиной  $\alpha$ .

Измерения вертикального распределения показателя ослабления на станциях в поверхностном слое вод, выполненные с использованием прозрачномера, в большинстве случаев оправдывают такую замену. Для определения показателя ослабления лидарного эхо-сигнала  $\alpha$  использовался подход, основанный на применении аппроксимаций спада эхо-сигнала функцией вида (1). При определении  $\alpha$  использовался участок спада эхо-сигнала, соответствующий диапазону глубин от 4 до 8 м. При обработке данных лидарной съемки значение  $\alpha$  определялось для каждого зарегистрированного эхо-сигнала.

В разделе 2.3 получены регрессионные соотношения между гидрооптическими характеристиками и показателем ослабления лидарного эхо-сигнала. На рисунке 1а представлена диаграмма соответствия значений  $\alpha$  и значений показателя ослабления света морской водой  $c$ , измеренных прозрачномером на этих станциях. Для каждого значения  $\alpha$  на рисунке показано стандартное отклонение измеряемой величины. Диапазон изменения  $c$  составил от  $0,2 \text{ м}^{-1}$  до  $1,1 \text{ м}^{-1}$ , при этом вероятность выживания фотона  $\omega_0$  изменялась в пределах от 0,38 до 0,84. Рисунок 1а демонстрирует наличие линейной связи между  $\alpha$  и  $c$  в указанном интервале изменения показателя ослабления.

На рисунке 1б представлена диаграмма соответствия значений  $\alpha$  и значений показателя диффузного ослабления света  $K_d$ . Значения  $K_{d,изм*}$  (отмечены черным цветом) были получены на станциях, выполняемых в светлое время суток с помощью гиперспектрального радиометра Ramses (Trios, Германия) и приведены к условиям освещенности, соответствующим случаю только направленного излучения солнца, находящегося в зените. Для ряда станций с использованием данных измерений гидрооптических характеристик были рассчитаны  $K_{d,p}$  (отмечены красным цветом). Пунктирной линией обозначена биссектриса, соответствующая ситуации, при которой  $\alpha = K_{d,p}$ .

На основе полученных результатов построены уравнения линейных регрессий, позволяющих по известным значениям показателя ослабления лидарного эхо-сигнала  $\alpha$  оценивать значения  $c$  и  $K_d$ . Уравнение линейной регрессии для показателя ослабления света морской водой, определенное по данным лидарного зондирования, имеет вид

$$c_L = 7,10 \cdot \alpha - 0,81, \quad (2)$$

где  $c_L$  – показатель ослабления света, рассчитанный по данным лидарного зондирования. Коэффициент детерминации этой линейной регрессии составил  $R^2 = 0,95$ . Точность определения коэффициентов регрессии методом наименьших квадратов составляет  $7,10 \pm 0,37$

и  $0,81 \text{ м}^{-1} \pm 0,07 \text{ м}^{-1}$ . Относительная погрешность измерения показателя ослабления  $s$  лидарным методом составляет 10%. Полученная регрессионная связь  $\alpha$  и  $s$  справедлива для технических характеристик лидара ПЛД-1 и конкретной геометрии зондирования.

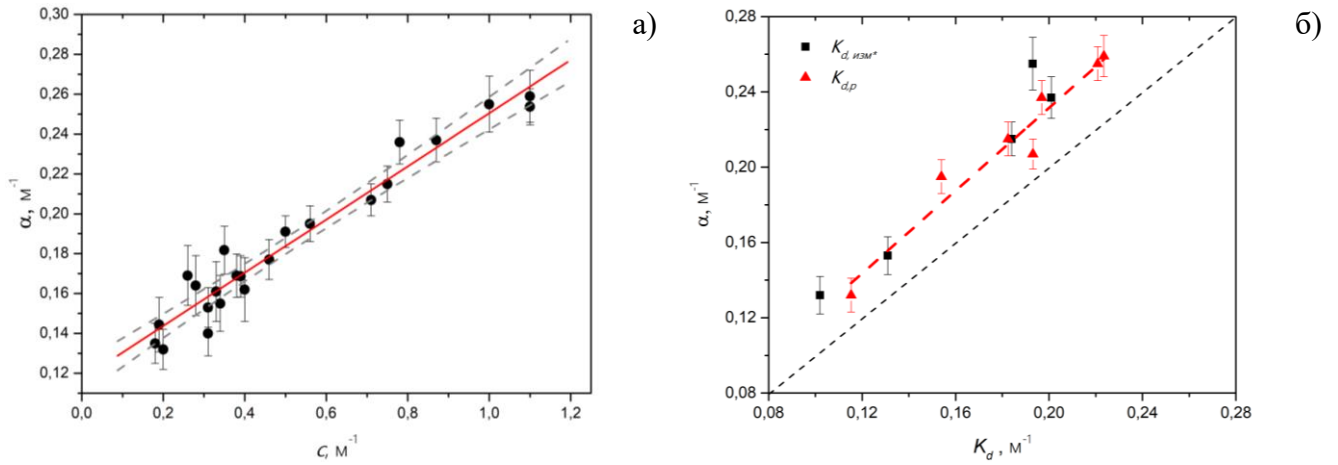


Рисунок 1 – Диаграмма соответствия значений  $\alpha$  в слое 4–8 м и значений  $s$ , измеренных прозрачномером ПУМ-200 на этих станциях (а), а также значений  $K_{d,изм*}$  и  $K_{d,p}$  (б)

Уравнение линейной регрессии для показателя диффузного ослабления света, определенное по данным лидарного зондирования, имеет вид

$$K_{d,L} = 0,86 \cdot \alpha + 0,02, \quad (3)$$

где  $K_{d,L}$  – показатель диффузного ослабления, рассчитанный по данным лидарного зондирования. Коэффициент детерминации этой линейной регрессии составил  $R^2 = 0,95$ . Точность определения коэффициентов регрессии методом наименьших квадратов составляет  $0,86 \pm 0,09$  и  $0,02 \text{ м}^{-1} \pm 0,01 \text{ м}^{-1}$ . Полученная регрессионная связь  $\alpha$  и  $K_{d,p}$  справедлива для диапазона значений  $K_{d,p}$  от  $0,11 \text{ м}^{-1}$  до  $0,23 \text{ м}^{-1}$  и использованной в данном эксперименте геометрии зондирования. Относительная погрешность измерения показателя диффузного ослабления  $K_d$  лидарным методом составляет 10%.

**Раздел 2.4** посвящен использованию полученных регрессионных соотношений для дистанционной оценки гидрооптических характеристик приповерхностного слоя вод западной части Карского моря. Пример применения регрессионных соотношений для оценки пространственного распределения показателя ослабления  $s$  на разрезе показан на рисунке 2. Разрез выполнен вблизи ямальского шельфа и характеризуется наличием фронтальных зон.

Сопоставление пространственных распределений показателя ослабления  $s_L$ , полученного лидарным методом, и показателя ослабления  $s_f$ , полученного с помощью проточного измерительного комплекса ИО РАН, показаны на рисунке 2а. Соответствующие распределения солёности  $S$ , температуры  $T$  и интенсивности флуоресценции ОРОВ  $I_{CDOM}$  показаны на рисунке 2б. Красные треугольники на рисунке 2а обозначают значения  $s$ , зарегистрированные

прозрачномером на станциях в слоях 2–3 м и 4–8 м. Значения  $c_L$  и  $c_{ft}$  достаточно близки на протяжении всего разреза. Некоторые несовпадения значений  $c_L$  и  $c_{ft}$  могут быть связаны с наличием стратификации, которая контролировалась только на станциях в начале и конце выполнения разреза. Распределение показателя ослабления, полученное с использованием лидарной съемки, хорошо отражает положение фронтов. Наличие этих фронтов подтверждается на распределениях солёности, температуры и интенсивности флуоресценции ОРОВ. На разрезе зарегистрирована отрицательная корреляция распределения солёности и интенсивности флуоресценции ОРОВ. Наличие такой корреляции может объясняться влиянием стока рек Обь и Енисей [Glukhovets D.I., Goldin Y.A., 2020].

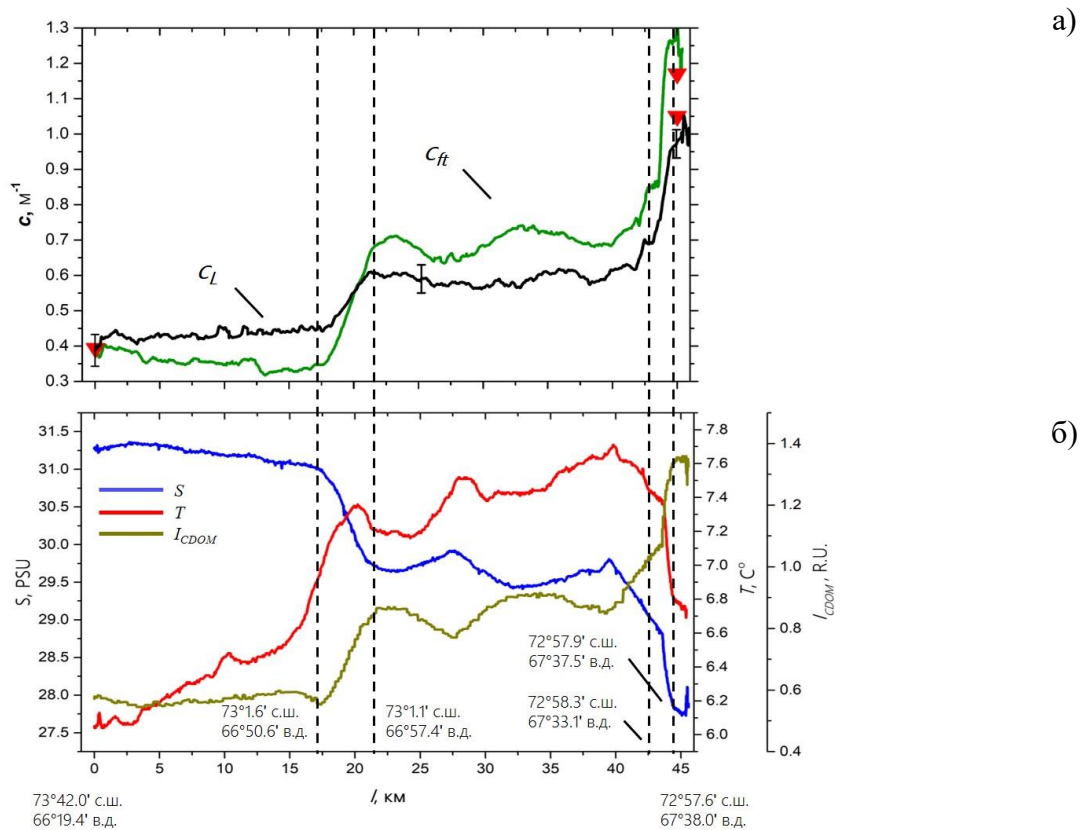


Рисунок 2 – Распределение гидрооптических и гидрологических характеристик на разрезе между станциями 7458 и 7459 по данным лидарной съемки и проточного измерительного комплекса: а) распределения  $c_L$  и  $c_{ft}$ , б) распределения  $S$ ,  $T$ ,  $I_{CDOM}$ .

В главе 3 представлено исследование закономерностей формирования лидарных эхосигналов под влиянием внутренних волн в водах с двухслойной стратификацией гидрооптических характеристик.

Раздел 3.1 посвящен описанию используемой аппаратуры, методики измерений и условий проведения натурных исследований. Экспериментальные исследования проводились в прибрежных районах Черного моря. Лидарное зондирование с использованием лидара ПЛД-1

проводилось в дрейфе и на малом ходу судна при скорости порядка 4 узлов и сопровождалось синхронными контактными измерениями гидрофизических и гидрооптических характеристик на станциях.

В разделе 3.2 выявлены особенности формы спада лидарного эхо-сигнала при двухслойной стратификации гидрооптических характеристик. В разделе 3.2.1 проведены аналитические расчёты лидарных эхо-сигналов, формирующихся при зондировании толщи воды с двухслойной стратификацией гидрооптических характеристик. Результаты расчетов показали, что на границе между слоями вид временной зависимости интенсивности эхо-сигнала резко меняется. Это выражается в изменении крутизны спада. Положение области его изменения соответствует положению границы между слоями. Результаты расчетов также показывают, что для кросс-поляризованной компоненты эхо-сигнала положение границы между слоями проявляется значительно ярче, чем для случая ко-поляризации.

Раздел 3.2.2 посвящен применению аппроксимирующих функций лидарного эхо-сигнала для определения положения границы между слоями, различающимися по гидрооптическим характеристикам. Для количественной оценки формы спада эхо-сигнала используется аналитическая функция аппроксимации, вид которой следует из лидарного уравнения (1). Показано, что оптимальным для описания всей кривой затухания лидарного эхо-сигнала является использование нескольких аппроксимирующих функций. Точки пересечения аппроксимационных кривых для соседних участков спада эхо-сигнала являются характерными точками и соответствуют положению границ между квазиоднородными слоями. Это подтверждается сопоставлением с данными контактных измерений и с результатами аналитических расчетов. Использование аппроксимирующих функций позволяет получить информацию о вертикальных смещениях положения границы между слоями, соответствующей положению пикноклина. Данные лидарной съемки дают возможность оценить период, амплитуду, количество колебаний в цуге и время регистрации квазипериодических структур.

Раздел 3.2.3 посвящен применению вейвлет-анализа для оценки временной изменчивости амплитуд эхо-сигналов с фиксированной глубины, несущих информацию о значении показателя обратного рассеяния. В этом случае анализ данных лидарного зондирования представляет собой задачу поиска квазипериодических изменений амплитуды эхо-сигнала на заданных горизонтах. Методика вейвлет-анализа временных выборок значений амплитуд лидарных эхо-сигналов с фиксированной глубины разработана на основе методики анализа временных рядов данных термодинамики [Жегулин, 2016]. Обработка выборок амплитуд лидарных эхо-сигналов на заданной глубине с использованием вейвлет-анализа полностью автоматизирована. Программная реализация обработки с использованием вейвлет-анализа выполнена в пакете программ MATLAB 2021b с применением встроенных функций Signal Processing Toolbox и Wavelet Toolbox.



В разделе 3.3 представлена разработка метода лидарной регистрации внутренних волн в водах с двухслойной стратификацией гидрооптических характеристик и результаты его применения в натуральных условиях. Суть метода заключается в комплексной оценке пространственно-временной изменчивости формы спада лидарного эхо-сигнала с использованием функций аппроксимации и вейвлет-анализа. На первом этапе проводится быстрая автоматизированная обработка данных лидарной съемки с использованием методики вейвлет-анализа. Детальная обработка с использованием функций аппроксимации проводится только для тех участков съемки, на которых выявлены квазипериодические процессы. Такой подход позволяет относительно быстро получить наиболее полную информацию.

Пример результатов обработки данных лидарной съемки показан на рисунках 3–4. На рисунке 3 приведен результат обработки галса с использованием функций аппроксимаций. На нижней границе выделяются четыре колебания, на верхней границе – только два наиболее интенсивных. Максимальная амплитуда на верхней границе составляет 0,6 м, а на нижней – порядка 1 м. Средний период колебаний составляет 7 мин. Результат вейвлет-анализа выборок амплитуд лидарных эхо-сигналов, полученных с глубины 18 м, представлен на рисунке 4. Наиболее интенсивные колебания зарегистрированы в первой половине галса, что соответствует результату, полученному с использованием метода аппроксимаций.

Результаты, полученные с использованием вейвлет-анализа, а именно период и локализация квазипериодических структур на галсе, хорошо согласуются между собой и с результатом, полученным с использованием функций аппроксимаций. Некоторые расхождения в положении и периодах выделенных колебаний обусловлены нестрогой периодичностью и малым количеством периодов, затрудняющих спектральный анализ.

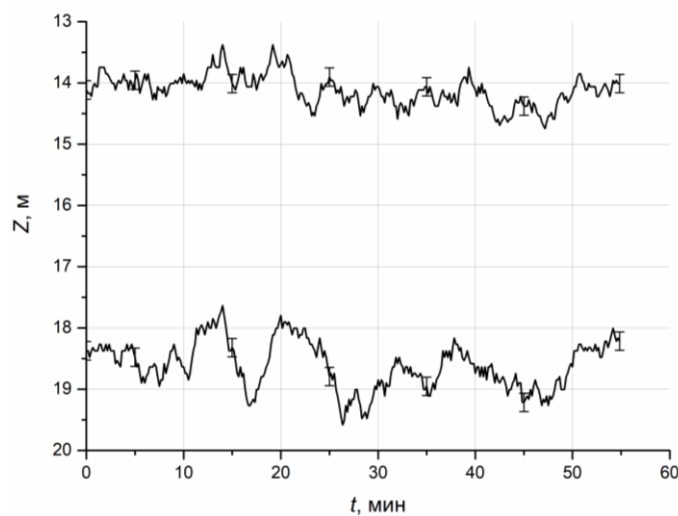


Рисунок 3 – Положение верхней и нижней границ исследуемого слоя, полученные в результате обработки данных лидарной съемки с использованием аппроксимирующих функций

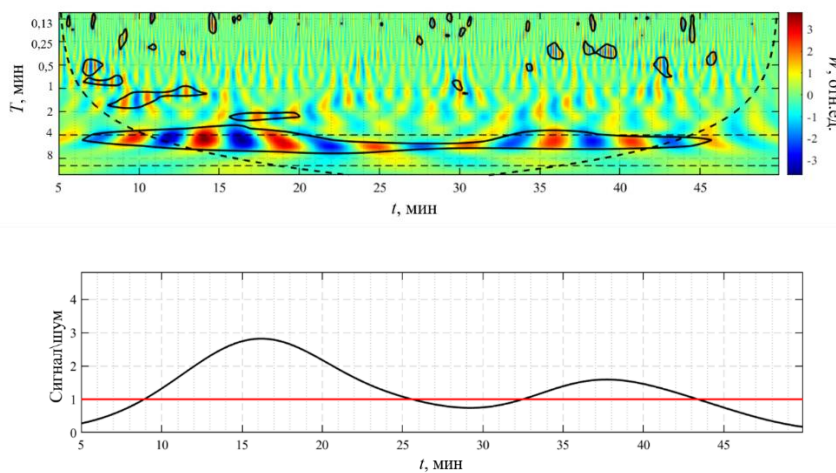


Рисунок 4 – Результат обработки амплитуд лидарных эхо-сигналов с фиксированной глубины 18 м с помощью вейвлет-анализа: а) амплитуды коэффициентов вейвлет-преобразования, б) усредненная по временным масштабам мощность вейвлет-спектра, нормированная на 95-й % уровень значимости по отношению к фоновому красному шуму

**Глава 4** посвящена экспериментальным исследованиям зависимости ослабления отраженных от дна эхо-сигналов от протяженности трассы зондирования и применению полученной зависимости для оценки требуемых энергетических характеристик батиметрического лидара при съемке с большой высоты.

**Раздел 4.1** посвящен описанию используемой аппаратуры, методики измерений и условий проведения натурных исследований. Экспериментальные исследования проводились в августе 2018 г. в районе Бечевинской бухты Авачинского залива полуострова Камчатка с использованием авиационного поляризационного лидара АПЛ-3. В авиационном лидаре в отличие от судового лидара ПЛД-1 используется более мощный лазер для компенсации вклада затухания сигнала на протяженном атмосферном участке трассы зондирования. Погрешность определения глубины дна определяется длительностью фронта импульсной характеристики лидара и составляет величину не более 0,3 м.

**Раздел 4.2** посвящен методике обработки данных лидарной батиметрической съемки. Обработка данных производилась с использованием стандартной для лидарной батиметрической съемки методики [Wang, Philpot, 2007].

В **разделе 4.3** представлены результаты исследования зависимости ослабления отраженных от дна эхо-сигналов при зондировании с большой высоты. На рисунке 5 приведены графики зависимости амплитуды эхо-сигнала для случая френелевского отражения от

поверхности воды  $P_F$ , максимума от верхних слоев воды  $P_{max}$ , а также значения амплитуды эхо-сигнала от дна  $P_b$  для глубин 8 м, 12 м и 15 м, в зависимости от высоты полета  $H$ . Для кросс-поляризованной компоненты максимум  $P_{max}$  формируется на глубине около 3 м. С увеличением глубины зондирования показатель степени в геометрическом факторе в лидарном уравнении (1) не является константой и с глубиной уменьшается по абсолютному значению. Это связано с тем, что с ростом глубины дна увеличиваются радиус площадки  $R_b$ , через которую отраженное от дна излучение выходит в атмосферу. При относительно узком фиксированном угле поля зрения приемной оптической системы подъем высоты приводит к увеличению радиуса площадки на поверхности воды  $R$ , с которой приемник собирает рассеянное назад излучение. С увеличением глубины дна  $R_b$  достаточно быстро увеличивается и превосходит  $R$ , что определяет уменьшение показателя степени в геометрическом факторе.

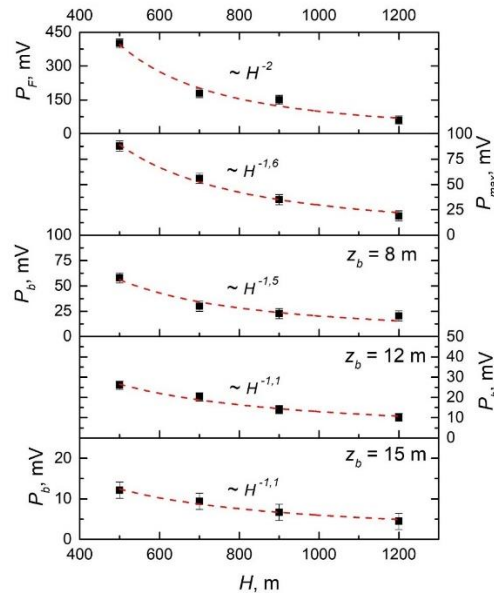


Рисунок 5 – Значения амплитуды эхо-сигнала для случая френелевского отражения от поверхности воды  $P_F$ , максимума от верхних слоев воды  $P_{max}$ , а также значения  $P_b$  для глубин 8 м, 12 м и 15 м

**Раздел 4.4** посвящен оценке требуемых характеристик батиметрического лидара для зондирования с большой высоты. Полученные экспериментальные данные позволяют выполнить оценки зависимости величины отраженного от дна эхо-сигнала  $P_b$  от высоты лидара над поверхностью воды  $H$ , а также максимально возможных для батиметрической съёмки (в данных условиях) высот полета. Результаты выполненных оценок справедливы для значений технических характеристик лидара АПЛ-3, а также для значений гидрооптических характеристик воды и коэффициента отражения дна, характерных для акватории Бечевинской бухты. Экспериментальные значения  $P_b$ , зарегистрированные при глубинах дна 10 м, 15 м и 20 м с

разных  $H$ , представлены на рисунке 6. Сплошными линиями на рисунке показаны графики аппроксимирующей функции  $P_b(H)$ , вид которой следует из лидарного уравнения (1):

$$P_b(H) = A \cdot \frac{\exp(-\alpha \cdot c_w t)}{(2n_w H + c_w t)^m}, \quad (4)$$

где  $A$ ,  $\alpha$  – параметры аппроксимации,  $c_w$  – скорость света в воде,  $t$  – время, отсчитываемое от момента пересечения зондирующим импульсом поверхности воды,  $n$  – показатель преломления морской воды,  $m$  – показатель степени затухания эхо-сигнала от дна, зависящий от протяженности трассы зондирования. Для исследуемого диапазона глубин дна показатель степени  $m$  был определен на основе экспериментальных данных.

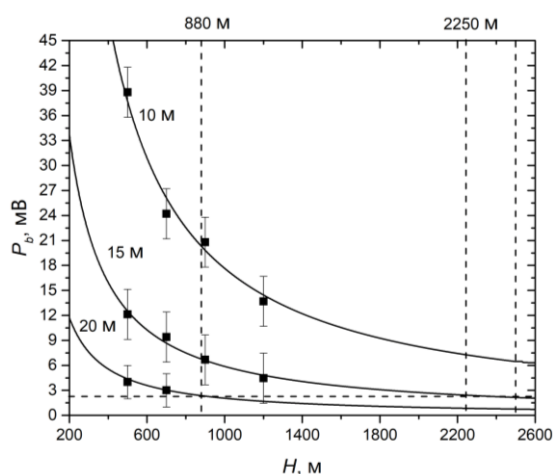


Рисунок 6 – Зависимость  $P_b(H)$  при разных глубинах дна

Параметры функции аппроксимации определены методом наименьших квадратов для экспериментальных значений  $P_b$ , зарегистрированных для глубины 10 м, 15 м и 20 м для разных  $H$ . Использование аппроксимации экспериментальных данных предполагает, что коэффициент отражения дна, а также показатель ослабления света морской водой  $c$  во всех точках зондирования близки между собой. Допустимость этого предположения основана на близости пространственного положения точек зондирования на исследуемых глубинах для всех  $H$ . Пунктирная горизонтальная прямая показывает минимальный уровень регистрируемого сигнала, определяемый уровнем шумов приемо-регистрирующей системы лидара АПЛ-3. Пунктирные вертикальные прямые отмечают максимально возможную высоту полета  $H_m$ , при которой эхо-сигнал от дна на соответствующей глубине  $z_b$  может быть зарегистрирован. Для  $z_b = 10$  м значение  $H_m$  составляет около 2800 м, что превышает безопасную для акватории Бечевинской бухты высоту 2500 м. При увеличении  $z_b$  до 15 м  $H_m$  уменьшается до ~2250 м, а для  $z_b = 20$  м – до значений 880 м.

Приведенные выше оценки справедливы для энергетических характеристик АПЛ-3. Значения максимально допустимой высоты можно менять, варьируя величину параметра  $A$ . В соответствии с лидарным уравнением (1) его величина линейно зависит от энергии зондирующего импульса  $W_0$  при фиксированной длительности зондирующего импульса и площади приемной оптики. Показано, что для регистрации эхо-сигнала от дна при глубине  $z_b = 20$  м с высоты 2500 м энергию зондирующего импульса необходимо увеличить почти в 3 раза до значений около 120 мДж. В то же время при снижении высоты до 200 м  $W_0$  может быть уменьшена в 50 раз для  $z_b = 10$  м ( $W_0 < 1$  мДж) и в 6 раз ( $W_0 < 7,5$  мДж) для  $z_b = 20$  м. Увеличение высоты с 200 м до 2500 м требует для регистрации эхо-сигнала от дна при глубине  $z_b = 20$  м увеличения  $W_0$  почти в 20 раз. Полученные значения  $W_0$ , необходимые для регистрации дна с заданной высоты, соответствуют значениям энергии зондирующего импульса современных батиметрических лидаров. Аналогичного эффекта можно достичь, меняя площадь приемной оптики, чувствительность фотоприемника, а также коэффициент пропускания оптического канала.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе на основе теоретического анализа и полученных автором натуральных данных лидарных измерений исследованы закономерности формирования сигналов обратного рассеяния при лидарном зондировании приповерхностного слоя морской воды, характеризующегося различными типами пространственно-временной изменчивости, и при выполнении лидарной батиметрической съемки. В основу полученных зависимостей легли данные более 400 часов натуральных измерений, проведенных в период с 2015 по 2022 г.г. с использованием морских лидаров ПЛД-1 и АПЛ-3, разработанных и модернизированных в ИО РАН, а также данные синхронных сопутствующих измерений.

1. Исследована связь между параметрами лидарных эхо-сигналов и гидрооптическими характеристиками приповерхностного слоя. В исследовании использовался судовой поляризационный лидар ПЛД-1, для которого в лабораторных и натуральных условиях были получены оценки разрешающей способности и точности на примере определения положения погруженных объектов вблизи морской поверхности и дна. Для этого лидара в западной части Карского моря получены регрессионные соотношения между показателем ослабления лидарного эхо-сигнала  $\alpha$ , показателями ослабления света морской водой  $s$  и диффузного ослабления света  $K_d$ . Соотношения получены на станциях с однородным распределением гидрооптических характеристик в слое 0–10 м. Лидарные измерения проводились синхронно с измерениями, проводимыми погружными приборами. Регрессионные соотношения построены на основе

данных, полученных на 23 станциях, выполненных в западной части Карского моря, суммарной продолжительностью лидарных измерений около 40 часов при частоте лидарного зондирования 1 Гц. Линейная регрессия охватывает широкий диапазон изменчивости  $c$  от  $0,2 \text{ м}^{-1}$  до  $1,1 \text{ м}^{-1}$  при изменении значений вероятности выживания фотона  $\omega_0$  в диапазоне от 0,4 до 0,8. Линейность регрессий наблюдается во всем исследуемом диапазоне. Показано, что при больших  $c$  многократное рассеяние вносит существенный вклад в формирование лидарного эхо-сигнала.

Использование регрессионных соотношений позволяет проводить лидарную съемку на ходу судна для получения пространственных распределений  $c$  и  $K_d$ . Результаты лидарной съемки, выполненной в Карском море, продемонстрировали хорошее соответствие пространственных распределений гидрооптических характеристик, полученных лидарным методом и с использованием проточного измерительного комплекса. Наблюдается хорошее соответствие вида распределений, совпадение положения особенностей распределений, локальных максимумов, минимумов и фронтальных зон. Данные в эксперименте получены для верхнего однородного слоя, степень однородности которого на ходу судна контролировалась по форме спада лидарного эхо-сигнала.

2. На основе теоретических представлений о лидарных изображениях внутренних волн в случае двухслойной стратификации гидрооптических характеристик выявлены особенности формы лидарного эхо-сигнала, позволяющие при соответствующей обработке определить положение слоя скачка по данным лидарного зондирования. Для оценки пространственно-временной изменчивости формы спада лидарного эхо-сигнала применяются функции аппроксимации, функциональный вид которой следует из лидарного уравнения, а также вейвлет-анализ выборок амплитуд лидарных эхо-сигналов на заданной глубине. Применение функции аппроксимации позволяет наглядно получить картину вертикальных смещений областей с резкими градиентами показателя ослабления, соответствующих границам слоя скачка плотности. Применение вейвлет-анализа позволяет определить период и локализацию квазипериодических процессов. При обработке целесообразно на первом этапе проводить автоматизированную обработку с использованием вейвлет-анализа, а детальную обработку с использованием функций аппроксимаций проводить только для тех участков съемки, на которых выявлены квазипериодические процессы. Такой подход позволяет относительно быстро получить наиболее полную информацию.

На основе полученных результатов разработан метод лидарной регистрации внутренних волн в условиях двухслойной стратификации гидрооптических характеристик. С использованием разработанного метода выполнена комплексная обработка массива данных судовой лидарной съемки прибрежных районов Черного моря. Общий объем обработанных данных составляет около 50 часов при частоте лидарного зондирования 1 Гц. Выявлено три галса общей

продолжительностью около 3 часов, на которых были зарегистрированы квазипериодические процессы. Результаты, полученные с использованием функций аппроксимации и вейвлет-анализа, в целом соответствуют друг другу. Некоторые количественные расхождения обусловлены нестрогой периодичностью исследуемых процессов и малым количеством колебаний в цуге, затрудняющие проведение спектрального анализа. Полученные значения характеристик выявленных квазипериодических процессов – амплитуда и период колебаний, соответствуют результатам контактных измерений, проводимых в районе работ.

3. Возможность проведения лидарной батиметрической съемки с большой высоты исследована на основе натуральных данных, полученных в акватории Бечевинской бухты (Авачинский залив полуострова Камчатка). Бухта со всех сторон окружена сопками высотой около 1 км. Получена экспериментальная зависимость мощности эхо-сигнала, отраженного от дна, от протяженности атмосферного участка трассы зондирования. Зависимость зарегистрирована для глубин от 3 до 21 м и в диапазоне высот от 500 до 1200 м, обеспеченных энергетикой лидара АПЛ-3.

Экспериментальные результаты демонстрируют сложный характер зависимости амплитуды эхо-сигналов для различных глубин морского дна при увеличении высоты полета  $H$ . Для заданной геометрии зондирования ослабление для случая френелевского отражения от поверхности воды с увеличением высоты пропорционально  $H^{-2}$ , что соответствует лидарному уравнению. С увеличением глубины дна показатель степени уменьшается по абсолютной величине. Конкретное значение показателя степени определяется в основном гидрооптическими характеристикам исследуемой акватории. В Бечевинской бухте в условиях эксперимента при глубине дна  $z_b = 10$  м  $m$  принимает значение 1,3, а при  $z_b = 15$  м – 1,1. Это подтверждает теоретические расчеты [Philpot, 2019, с. 103] и объясняется изменением соотношения площадей участков поверхности, через которую рассеянное излучение от толщи воды и дна выходит в атмосферу и с которой приемник собирает рассеянное излучение.

Экстраполяция полученной зависимости позволила выполнить оценку энергетики лидара, требуемой для проведения батиметрической съемки всей акватории Бечевинской бухты на безопасной высоте полета 2500 м. Под энергетикой понимается мощность зондирующего импульса при данной площади входной оптики и чувствительности приемной системы. Оценки показывают сильную зависимость требуемой для батиметрической съемки энергии зондирующего импульса от высоты полета. Проведение батиметрической съемки до глубин ~20 м с безопасной для всей акватории бухты высоты полета 2500 м требует почти трехкратного увеличения энергии зондирующего импульса по сравнению с имеющейся у лидара АПЛ-3. С учетом развития современного уровня техники такие требования являются реализуемыми.

**СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Статьи, опубликованные в изданиях из перечня ВАК:

1. **Глухов, В.А.** Экспериментальная оценка возможностей лидара ПЛД-1 по регистрации гидрооптических неоднородностей в толще морской среды / В.А. Глухов, Ю.А. Гольдин, М.А. Родионов // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. – 2017. – Т. 10. – № 2. – С. 41–48.
2. **Глухов, В.А.** Авиационная лидарная батиметрическая съемка прибрежных акваторий с большой высоты / В.А. Глухов, Ю.А. Гольдин, М.А. Родионов, Б.А. Гуреев, О.В. Глитко // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. – 2019. – Т. 12. – № 4. – С. 85–93.
3. **Глухов, В.А.** Лидарный метод регистрации внутренних волн в водах с двухслойной стратификацией гидрооптических характеристик / В.А. Глухов, Ю.А. Гольдин, М.А. Родионов // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. – 2021. – Т. 14. – № 3. – С. 86–97.
4. **Глухов, В.А.** Комплексная обработка данных лидарной съемки морских акваторий / В.А. Глухов, Ю.А. Гольдин, Г.В. Жегулин, М.А. Родионов // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. – 2022. – Т. 15. – № 3. – С. 27–42.
5. **Глухов, В.А.** Лидарные исследования в первом этапе 89-ого рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» / В.А. Глухов, Ю.А. Гольдин, О.В. Глитко, Е.А. Аглова, Д.И. Глуховец, М.А. Родионов // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. – 2023. – Т. 16. – №4. – С. 107–115.
6. **Glukhov, V. A.** Investigation of the relationship between the parameters of lidar echo signals and hydrooptical characteristics in the western part of the Kara Sea / V. A. Glukhov, Yu. A. Goldin, O. V. Glitko, D. I. Glukhovets, E. A. Aglova, M. A. Rodionov // *Oceanology*. – 2023. – Vol. 63(1). – P. S119–S130.
7. **Глухов, В.А.** Морские радиометрические лидары и их использование для решения океанологических задач / В.А. Глухов, Ю.А. Гольдин // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. – 2024. – Т. 17. – №1. – С. 104-128.

По теме диссертации опубликовано также 12 тезисов докладов на международных и всероссийских конференциях.