

На правах рукописи

Родионов Максим Анатольевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ЛИДАРНОЙ ДИАГНОСТИКИ  
ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ НА ОСНОВЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ И  
ГИДРООПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ В СЕВЕРНЫХ МОРЯХ РОССИИ**

Специальность 25.00.28 – Океанология

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург - 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН (Санкт-Петербургский филиал)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
Левин Иосиф Маркович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор

Яковлев Виктор Александрович,  
НПК "ГОИ им. С.И. Вавилова"

доктор технических наук, профессор,  
Алешин Игорь Владимирович,  
Санкт-Петербургский государственный  
морской технический университет

Ведущая организация: Институт прикладной физики РАН (ИПФ  
РАН), Нижний Новгород

Защита состоится «24» мая 2012 года в 15 часов 30 минут на заседании совета Д 212.197.02 по защите докторских и кандидатских диссертации при Российском государственном гидрометеорологическом университете по адресу: 195196, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский проспект, д. 98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного гидрометеорологического университета.

Автореферат разослан « 22 » апреля 2012 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета,

кандидат географических наук



профессор В.Н. Воробьев

## **Общая характеристика работы**

### **Актуальность темы**

Важной задачей современной океанологии является изучение гидрофизических процессов, протекающих в толще океана и оказывающих существенное влияние на морскую деятельность человека. Освоение Мирового океана невозможно без учета динамики и стратификации вод, генерации и распространения внутренних волн, образования турбулентности и тонкой структуры. Результаты гидрофизических исследований являются основой при освоении природных ресурсов, ведении промышленного рыболовства, решении экологических и оборонных задач. Это обуславливает актуальность разработки эффективных методов и средств измерения и контроля гидрофизических характеристик морской среды.

Задача регистрации гидрофизических процессов в обширных акваториях океана размером в несколько десятков или сотен километров должна решаться с использованием современных высокотехнологичных измерительных средств, а также с применением методов физико-математического анализа данных измерений.

В настоящее время для изучения гидрофизических процессов применяются, как правило, контактные измерительные средства. Наряду с достоинствами, они имеют ряд недостатков, основным из которых является необходимость размещения чувствительного элемента датчика в измеряемом слое, что обуславливает технические сложности и большие временные и финансовые затраты на проведение исследований. Вследствие этого активно разрабатываются дистанционные методы изучения процессов и явлений в морской среде, в том числе внутренних волн, играющих важную роль в формировании обменных процессов в океане. Одним из перспективных методов является лидарное зондирование морской среды.

В основе лидарного зондирования лежит излучение лазерного импульса заданной частоты и длительности и получение сигнала обратного рассеяния с различных глубин. Лидарная система состоит из источника подсветки (лазера) и приемника, включающего объектив и фотодетектор.

Внутренние волны и другие гидрофизические возмущения могут наблюдаться с помощью лидаров благодаря тому, что под их влиянием неоднородности распределения гидрооптических характеристик трансформируются в пространстве и во времени.

Технические средства для лидарного зондирования разрабатываются, начиная с 60-х годов прошлого века. Проведенные эксперименты подтвердили возможность дистанционной регистрации гидрофизических процессов, в частности, внутренних волн. Основные результаты в этой области получены в Институте прикладной физики РАН, Институте Океанологии им. П.П. Ширшова РАН, ГОИ им. С.И. Вавилова и др. Значительный вклад в эту область гидрооптики внесли И.В. Алёшин, Д.М. Браво-Животовский, В.И. Буренков, Ю.А. Гольдин, Л.С. Долин, Л.С. Долина, О.В. Копелевич, И.М. Левин, А.Г. Лучинин, В.Н. Пелевин, В.А. Савельев, В.В. Фадеев, К.С. Шифрин, В.А. Яковлев и многие другие.

Вместе с тем, в научной литературе недостаточно информации о результатах совместных натуральных измерений гидрооптических и гидрофизических параметров морской среды и моделях, позволяющих физически интерпретировать результаты лидарного зондирования, а также проводить оценки эффективности лидарного наблюдения гидрофизических процессов в конкретных акваториях.

Поэтому в диссертации была поставлена **цель** провести широкомасштабные натурные измерения гидрофизических и гидрооптических характеристик в Баренцевом, Белом и Карских морях, исследовать их взаимосвязи и оценить возможности наблюдения гидрофизических процессов лидарными методами путем численного моделирования лидарного сигнала в поле внутренних волн (лидарных изображений внутренних волн) по данным натуральных измерений.

В ходе работы были решены следующие **задачи**:

- Разработка прибора для измерения показателя ослабления света в морской среде и методики его калибровки.

- Проведение натуральных экспериментов по измерению гидрооптических и гидрологических характеристик в Баренцевом, Белом и Карском морях и исследование взаимосвязи между показателем ослабления света морской воды и гидрологическими параметрами.
- Разработка метода и алгоритма моделирования лидарных изображений внутренних волн на основе гидрооптических и гидрологических измерений.
- Численное моделирование лидарных изображений внутренних волн в различных акваториях северных морей на основе полученных данных натуральных измерений гидрологических и гидрооптических характеристик.
- Проведение оценки возможности наблюдения внутренних волн лидарным методом.

**Научная новизна** исследования определяется тем, что в его рамках впервые проведены широкомасштабные совместные натурные измерения гидрофизических и гидрооптических характеристик в Баренцевом, Белом и Карских морях и проделан анализ их взаимосвязи. На основе полученных экспериментальных данных проведено моделирование лидарных изображений внутренних волн и дана оценка возможности наблюдения внутренних волн лидаром с заданными техническими характеристиками в акваториях Баренцева, Белого и Карского морей. Проведенные исследования являются основой для дальнейшего развития лидарного зондирования как эффективного инструмента дистанционного исследования гидрофизических процессов в толще морской среды.

**Практическая значимость** результатов работы определяется возможностью их использования при проектировании лидарных систем, устанавливаемых на авиационных и корабельных носителях и предназначенных для решения задач изучения и освоения Мирового океана. Особая актуальность решения задачи моделирования лидарных изображений для интерпретации данных лидарного зондирования определяется тем, что применение лидарных систем, установленных на авиа- и спутниковых носителях, значительно повышает производительность обследования акваторий, а значит приводит к

существенной экономии топлива и других ресурсов по сравнению с судовыми наблюдениями.

**На защиту выносятся следующие положения:**

- Метод калибровки прибора для измерения показателя ослабления света морской среды.
- Статистические оценки взаимосвязи распределения плотности и показателя ослабления света морской среды по глубине на основе проведенных широкомасштабных натурных измерений в северных морях России.
- Метод, алгоритм и результаты моделирования лидарных изображений внутренних волн с оценкой возможности их наблюдения лидарным методом на основе данных натурных гидрооптических и гидрологических измерений.

**Апробация работы и публикации.** Результаты исследований, отраженных в диссертации, опубликованы в 4 статьях и 7 докладах на одной всероссийской и 6 международных конференциях: IX Международная конференция «Прикладная оптика-2010» (Санкт-Петербург); IV, V и VI Международные конференции «Current Problems in Optics of Natural Waters» (Санкт-Петербург, 2007, 2009 и 2011); VIII, IX и X Международные конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» (Санкт-Петербург, 2006, 2008 и 2010).

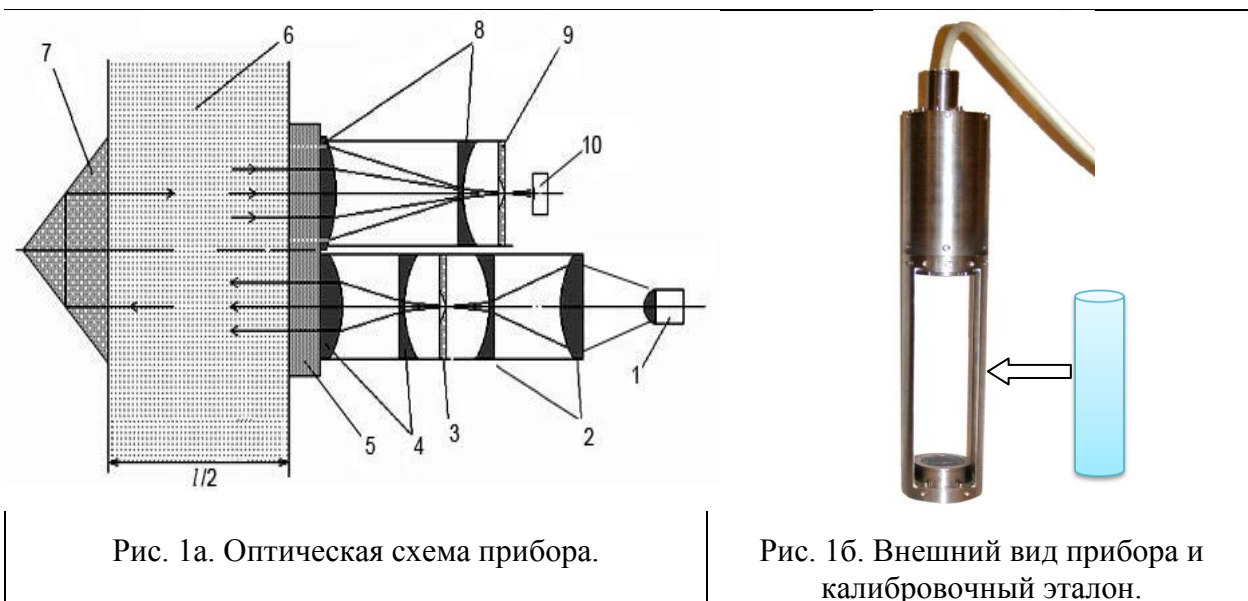
**Личный вклад автора.** В основу работы положены результаты экспедиционных морских исследований, которые проводились в Баренцевом, Белом и Карских морях при личном участии автора. Разработка приведенных в диссертации методов, алгоритмов, компьютерных программ для решения прикладных задач, а также проведение всех натурных экспериментов осуществлялись лично автором. В разработке и проектировании прибора для измерения показателя принимали участие И.М. Левин и О.Н. Французов. В экспериментах принимал участие О.Н. Французов. В разработке методики расчетов корреляций между гидрооптическими и гидрологическими параметрами участвовала И.С. Долина.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Работа изложена на 100 страницах, включает 30 рисунков, 3 таблицы и список литературы из 53 наименований.

### Краткое содержание диссертации

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы диссертации, определена цель и решаемые задачи, отмечена научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** описан разработанный прибор для измерения показателя ослабления воды и метод его калибровки с помощью специально разработанного калибровочного устройства [1]. Оптическая схема прибора и его внешний вид приведены на рисунках 1а и 1б.



Световой поток от источника света (1) после прохождения конденсора (2), диафрагмы (3), двухлинзового объектива (4) через защитное стекло (5) выходит в воду (6) в виде параллельного пучка. Пучок преломляется в призме (7) и попадает на приемный объектив (8), фокусирующий его в точечную диафрагму (9), непосредственно за которой располагается фотоприемник (10). Расстояние между защитным стеклом и призмой равно 250 мм; общая оптическая база прибора  $l = 500$  мм.

Прибор был построен по стандартной схеме сравнения двух сигналов – опорного  $I_0$ , и рабочего  $I$ . Главным источником погрешности таких приборов является смещение светового пятна в диафрагме приемника при получении опорного сигнала. Чтобы минимизировать эту погрешность, был предложен оригинальный метод получения опорного сигнала и калибровки прибора.

Был изготовлен калибровочный эталон – цилиндр из оптического стекла с измеренным с высокой точностью пропусканием ( $T_y = 0.9046$ ), который при калибровке устанавливается в прибор с зазором между защитными стеклами около 1 мм. Прибор помещается в дистиллированную воду и измеряется опорный сигнал  $I_0$ . В этом случае опорный и рабочий (измеряемый в исследуемой воде без цилиндра) сигналы могут быть выражены соотношениями (1) и (2):

$$I_0 = A(1 - R_2)^8 T_y^2 \quad (1), \quad I = A(1 - R_2)^4 \exp(-cl) \quad (2),$$

где  $A$  – постоянный коэффициент,  $R_2$  – коэффициент френелевского отражения на границе вода-стекло,  $c$  – показатель ослабления света воды,  $l$  – база прибора. Из (1) и (2) можно выразить показатель ослабления:

$$c = -l^{-1} \ln \left( \frac{I}{I_0} T_y^2 (1 - R_2)^4 \right) = -l^{-1} \ln \left( 0.8054 \frac{I}{I_0} \right) \quad (3).$$

Преимущество данного способа получения опорного сигнала состоит в том, что в нем использован известный метод иммерсии (помещение воды между стеклами), позволяющий существенно уменьшить изменение хода лучей в оптическом приборе, связанное с дисперсией света на защитных стеклах. В результате световое пятно в плоскости диафрагмы при наблюдении с цилиндром и без него практически не смещается, что обеспечивает минимизацию погрешности, обусловленной преломлением света. Измерение величины  $I_0$  (с цилиндром) периодически повторяется для проверки стабильности показаний прибора.

Реальная точность прибора определялась многократным измерением сигналов  $I$  и  $I_0$  (при этом калибровочный цилиндр каждый раз устанавливался



заново и поворачивался на  $180^\circ$ ) в водах различной мутности, которая менялась за счет изменения в среде как поглощения (добавлением нигрозина), так и рассеяния (добавлением молока). Суммарная абсолютная ошибка в измерении показателя ослабления вычислялась как среднеквадратичное отклонение от среднего с добавлением систематической ошибки, определяемой неточным знанием показателя преломления воды  $n_w$ , и, следовательно, коэффициента отражения  $R_2 = (n - 1)^2 / (n + 1)^2$ , где  $n = n_{ст} / n_w$ ,  $n_{ст}$  – показатель преломления стекла К8 (предполагалось, что  $n_w$  лежит в пределах 1.33 – 1.34). Оказалось, что реальная максимальная ошибка составляет  $\Delta c = 0.03 \text{ м}^{-1}$ .

**Вторая глава** посвящена описанию методик и результатов натуральных измерений глубинных профилей гидрологических и гидрооптических характеристик морской воды в акваториях Баренцева, Белого и Карского морей.

Показатель ослабления света измерялся описанным выше прибором. Для измерения гидрологических характеристик (температуры, электропроводности, давления) вод использовались аттестованные приборы как отечественного (Олд-1 «НПО Марс»), так и зарубежного (Seabird, FSI) производства.

Всего с 2006 по 2011 годы в 10 экспедициях с участием автора было выполнено более 400 измерений гидрологических и гидрооптических характеристик в Баренцевом, Белом и Карских морях (рис. 2) [2, 3, 4].

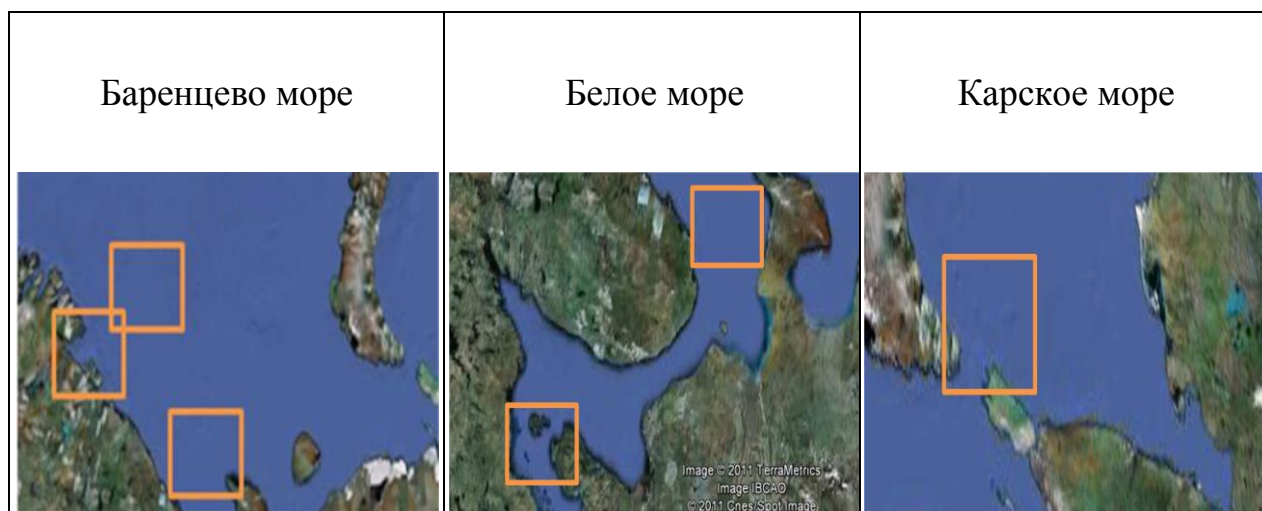


Рис. 2. Районы проведения натуральных измерений.

В исследуемых районах выполнялась как площадная съемка, так и сканирования в одной точке продолжительностью более суток. Площадная съемка в прибрежных районах Баренцева моря (Рис. 3а, 3б) показала сильную пространственную изменчивость гидрооптических и гидрологических характеристик.

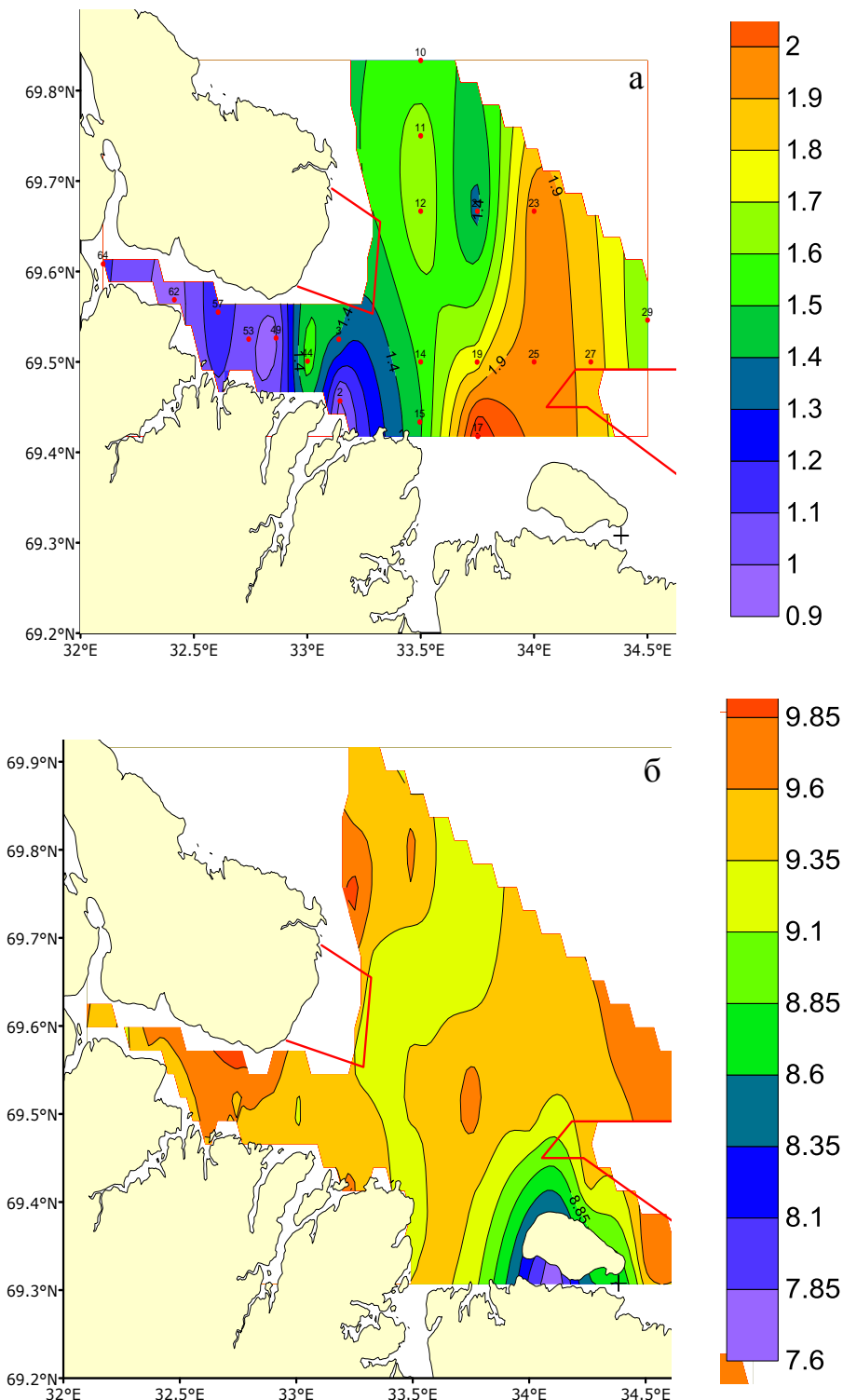


Рис. 3(а, б). Изменчивость гидрооптических и гидрологических характеристик в прибрежных районах Баренцева моря на глубине 10 метров (а – показатель ослабления ( $m^{-1}$ ), б – температура в градусах Цельсия). Измерения проводились в 18 рейсе НИС «Профессор Бойко» с 10 по 13 августа 2011 г.

Суточные станции в Белом море (Рис. 4) позволили выявить сильную временную изменчивость гидрологических и гидрооптических параметров на протяжении приливного цикла [2].

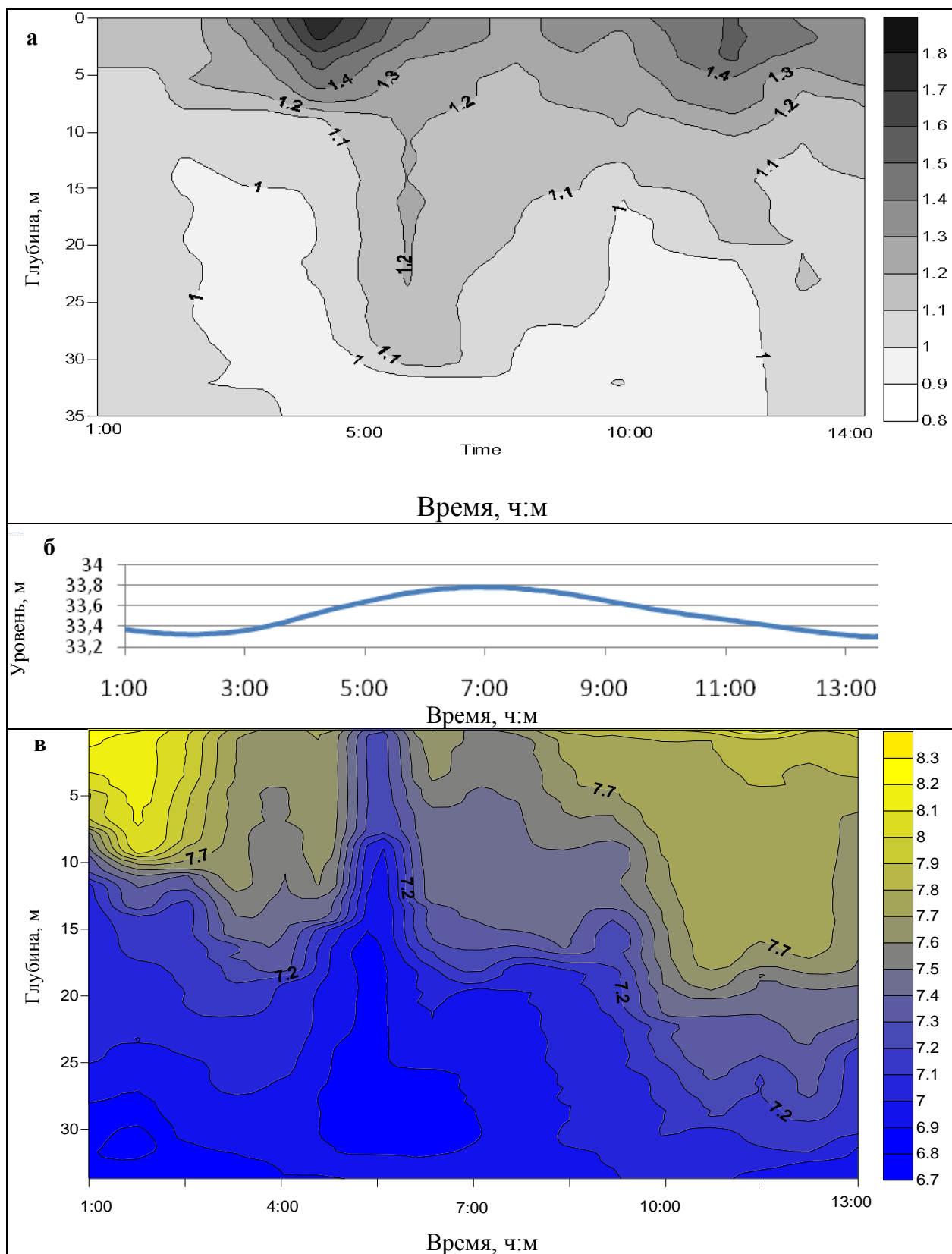


Рис. 4 (а, б, в). Изменчивость гидрооптических и гидрологических характеристик среды в ходе приливного цикла (а - показатель ослабления ( $\text{м}^{-1}$ ), б - колебания уровня поверхности моря относительно дна (м), в - температура в градусах Цельсия). Измерения проводились с НИС «Эколог» каждые полчаса с 1:00 до 14:00 часов 17 июля 2008 года.

В Карском море и проливе Карские ворота наблюдались ярко выраженные слои разной прозрачности. Примеры таких измерений приведены на рисунке 5.

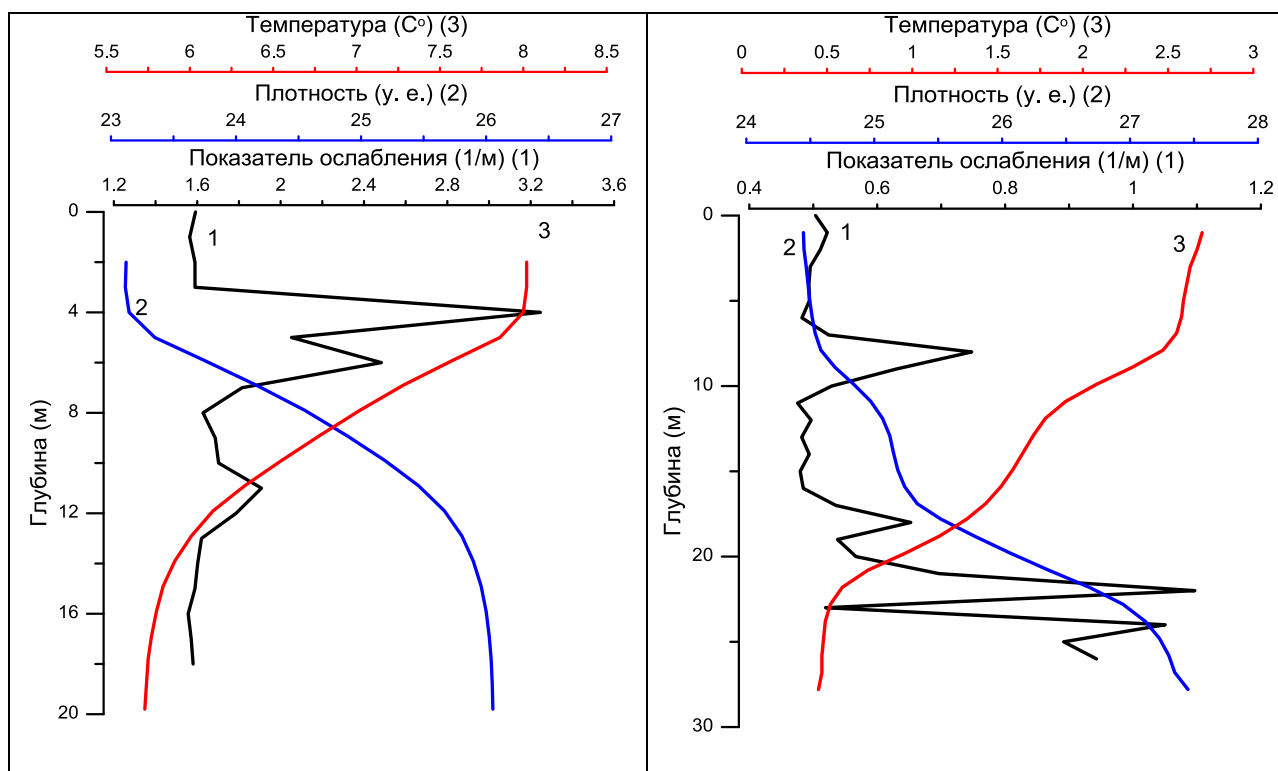


Рис. 5. Примеры полученных вертикальных распределений гидрооптических и гидрологических характеристик среды в ходе 13 рейса НИС «Профессор Бойко» в августе 2010 г. в Карском море.

Как показали натурные измерения, оптическая и гидрологическая стратификация вод и их комбинации были достаточно разнообразны. Так, в открытой части Баренцева моря наблюдался выраженный пикноклин и скачок показателя ослабления. В Белом море наблюдались как полностью перемешанные воды, так и ситуации со слоями скачков, в том числе связанные с действием приливов. В Карском море и проливе Карские ворота при наличии пикноклина в распределении показателя ослабления часто присутствовали отдельные слоистые структуры.

В **третьей главе** представлены результаты исследований корреляций между гидрологическими и гидрооптическими параметрами среды в Белом, Баренцевом и Карских морях.

Распределения по глубине  $z$  (вертикальные профили) гидрооптических и гидрологических характеристик (температуры, солености, плотности), вообще говоря, являются зависимыми, поскольку светорассеивающие свойства морской воды определяются, в основном, взвешенными органическими и минеральными

веществами, а распределение взвеси по вертикали тесно связано с плотностью воды. Задача о возможной связи параметров профилей показателя ослабления и гидрологических характеристик морской воды рассматривалась во многих работах (см., например, [5-7]), и все же единого мнения о закономерностях такой связи до сих пор нет. В работах [5, 6] изучалась корреляционная связь между показателем ослабления света и градиентом плотности. Коэффициент корреляции достигал 0.8 для районов с неглубоким залеганием скачка плотности (20 – 50 м) и уменьшался с его заглублением. В работе [7] рассчитывались коэффициенты корреляции непосредственно между профилями показателя ослабления и плотности воды. Авторами этой работы сделан вывод об отсутствии однозначной корреляционной связи показателя ослабления с гидрологическими параметрами. В то же время в [7] выделены случаи, когда такая корреляция наблюдалась (ст. 839, 851, сентябрь 1997 г., 11 рейс НИС «Академик Сергей Вавилов»). Это случаи вод с ярко выраженной температурной стратификацией, когда показатель ослабления в верхнем квазиоднородном слое изменяется слабо, ниже пикноклина он резко уменьшается, и далее его значения опять практически не меняются. Следовательно, это случаи вод с сильной стратификацией показателя ослабления и плотности.

Для оценки межполевых корреляций были отобраны реализации со слоем скачка плотности и проведена аппроксимация профилей показателя ослабления и плотности аналитической функцией вида гиперболического тангенса [3, 8, 9]:

$$\begin{aligned} \sigma(z) &= \sigma_0 + \alpha_\sigma th(\beta_\sigma(z - h_\sigma)) , \\ c(z) &= c_0 - \alpha_c th(\beta_c(z - h_c)) \end{aligned} \quad (4)$$

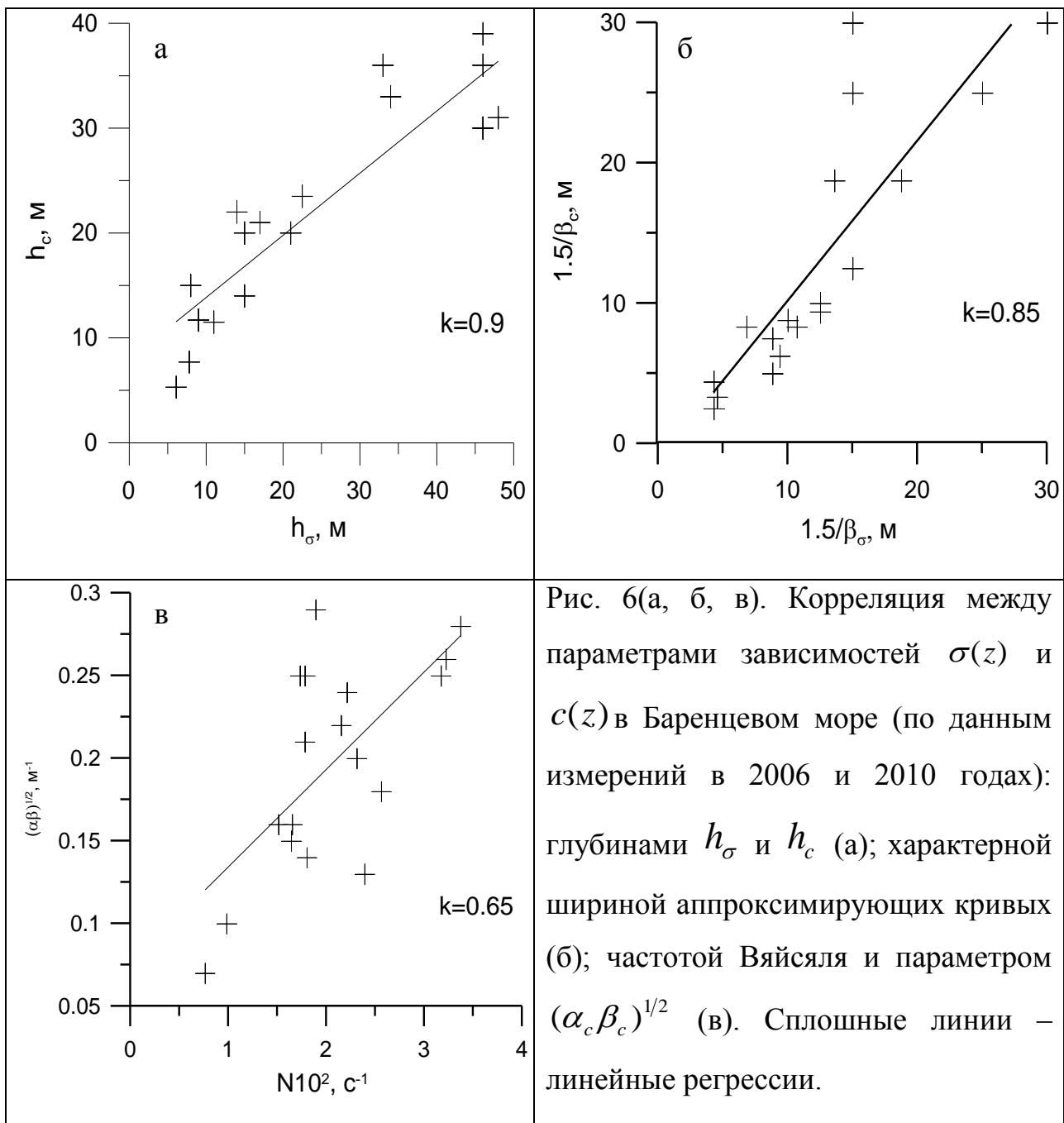
Коэффициенты корреляции определялись между параметрами этих функций:

- 1) глубиной залегания скачка плотности и скачка показателя ослабления

$$h_\sigma \text{ и } h_c;$$

2) характерной толщиной скачка плотности  $l_\sigma$  и скачка показателя ослабления  $l_c$  аппроксимирующих кривых, которая определялась по уровню  $thx = 0.9$ , что соответствует формулам  $l_\sigma = 1.5/\beta_\sigma$ ,  $l_c = 1.5/\beta_c$ ;

3) максимальным значением частоты плавучести  $N = \sqrt{(g/\rho)(d\rho/dz)}$  и величиной, характеризующей градиент показателя ослабления  $(\alpha_c \beta_c)^{1/2}$ . Примеры представлены на рис. 6, там же приведены значения коэффициентов корреляции [8, 9].



Как видно из рисунков при наличии ярко выраженного пикноклина существует высокая корреляция между параметрами вертикальных распределений показателя ослабления света и плотности воды. Наличие такой корреляции позволяет использовать результаты лидарных измерений профиля показателя ослабления для определения характеристик плотностной стратификации и создает предпосылки для дистанционного определения параметров пикноклина с помощью лидара в районах с ярко выраженным пикноклином и скачком показателя ослабления.

В **четвертой главе** представлены результаты моделирования лидарных изображений внутренних волн на основе данных натурных измерений гидрооптических и гидрофизических параметров в Баренцевом, Белом и Карском морях. Лидарным изображением называют эхо-сигнал  $P(r, z_t)$  как функцию горизонтальных координат лидара  $r$  и глубины  $z_t = vt/2$ , с которой приходит сигнал [10-12]. При фиксированном положении лидара он формирует одномерное изображение водной среды  $P(z_t)$ , которое несет определенную информацию о вертикальной неоднородности распределения первичных гидрооптических характеристик (ПГХ). При горизонтальном перемещении лидара в направлении  $x$  и фиксированной ориентации его оптической оси формируется двумерное изображение  $P(x, z_t)$ , позволяющее рассчитывать горизонтальную изменчивость профилей ПГХ.

В отсутствии гидрофизических возмущений и при постоянстве ПГХ на фиксированной глубине функция  $P(x, z_t)$  на данной глубине  $z_t$  – константа. Внутренние волны (ВВ) и другие гидрофизические возмущения могут наблюдаться лидаром благодаря тому, что под их влиянием вертикальные неоднородности ПГХ трансформируются в горизонтальные. Ясно, что если бы стратификация ПГХ отсутствовала, вертикальное смещение жидкости не привело бы к изменению сигнала при движении лидара, и ВВ были бы не видны. Если  $\sigma^*(z)$  – исходное (не возмущенное внутренней волной) вертикальное распределение некоторой ПГХ (например, показателя обратного рассеяния  $b_b(z)$ ), а  $\zeta(x, z, t)$  – поле вертикального смещения жидкости, то

пространственное распределение этого параметра в поле ВВ будет иметь вид [10]:

$$\sigma'^*(\vec{r}, z, t) \approx \sigma^*[z - \zeta(\vec{r}, z, t)], \quad (5)$$

то есть воздействие ВВ на распределение  $\sigma^*$  проявляется в «искривлении» изолиний этого распределения, а искривление изолиний ПГХ, в свою очередь, проявляется в лидарном изображении – мощности эхо-сигнала. Таким образом, чтобы восстановить поле внутренних волн  $\zeta$ , надо из лидарного сигнала  $P$  найти распределение некоторой ПГХ  $\sigma'^*(z)$ , а затем решить уравнение (5) относительно  $\zeta$ . Однако для решения этой обратной задачи необходимо сначала решить прямую задачу: моделирование лидарных изображений ВВ по заданным распределениям ПГХ и функции  $\zeta(x, z, t)$ . Эта прямая задача и решалась в данной работе по результатам измерений гидрооптических и гидрофизических параметров в Баренцевом, Белом и Карском морях. При этом для расчета мощности эхо-сигнала, приходящего из водного слоя использовалась формула, полученная Л.С. Долиным с учетом поля внутренних волн  $\zeta(x, z, t)$  [11,13]:

$$P(x, z_t) = (vW\pi r_2^2 \vartheta_2^2 / 4) b'_b(x, z_t) F(x, z_t), \quad z_t = vt/2;$$

$$F(x, z_t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty k \cdot \exp[-S(z_t) \cdot k^2 - 2\tau'(x, z_t)] + 2 \int_0^{z_t} \frac{b'_1(x, z_t - z)}{(1 + k^2 z^2 \langle \gamma^2 \rangle / 2)^{1/2}} dz dk; \quad (6)$$

$$S(z_t) = \frac{1}{4} [r_1^2 + r_2^2 + (\vartheta_1^2 + \vartheta_2^2) z_t^2], \quad \tau'(x, z_t) = \int_0^{z_t} c'(x, z) dz,$$

где  $v$  – скорость света в воде (м/с);  $W$  – энергия зондирующего импульса (Дж);  $r_1, r_2$  – радиусы пучка и входного зрачка приемника (м);  $2\vartheta_1, 2\vartheta_2$  – апертурные углы источника и приемника (рад.);

$$\begin{aligned} c'(x, z, t) &\approx c[z - \zeta(\vec{r}, z, t)]; \\ b'_b(x, z, t) &\approx b_b[z - \zeta(\vec{r}, z, t)]; \\ b'_1(x, z, t) &\approx b_1[z - \zeta(\vec{r}, z, t)]; \\ \langle \gamma^2 \rangle'(x, z, t) &\approx \langle \gamma^2 \rangle [z - \zeta(\vec{r}, z, t)], \end{aligned} \quad (7)$$



где  $b_1 = b - 2b_b$  – показатель «малоуглового» рассеяния ( $m^{-1}$ ),  $b$  – показатель рассеяния,  $\langle \gamma^2 \rangle$  – дисперсия индикатрисы малоуглового рассеяния света. Формулы (7) следуют из (5).

Из формулы (6) видно, что мощность эхо-сигнала зависит от параметров лидара: энергии импульса, апертуры, углов излучения и приема и нескольких гидрооптических характеристик: показателей ослабления, рассеяния и обратного рассеяния и дисперсии индикатрисы рассеяния света морской воды.

Однако, как показано в работе Левина и Копелевича [14], на длине волн 550 нм, все эти ПГХ могут быть выражены через показатель ослабления  $c$  по формулам:

$$\begin{aligned} b &= 0.944c - 0.048, & b_b &= 0.018c, \\ \langle \gamma^2 \rangle &= 0.021 + 0.7656b_b / b \end{aligned} \quad (8)$$

Они справедливы в диапазоне  $c = 0.3 - 2.5 m^{-1}$ , т.е. в пределах изменения прозрачностей в северных морях.

Для описания поля внутренних волн (ВВ), так же как и в [10-12], использовалась модель Грена, в соответствии с которой структура 1-й моды ВВ характеризуется функцией:

$$\zeta(x, z, t) = \zeta \left[ \operatorname{sech}^{kd} \left( \frac{z-h}{d} \right) - \operatorname{sech}^{kd} \left( \frac{z+h}{d} \right) \right] \sin(\omega t - kx), \quad (9)$$

с двумя параметрами плотностной стратификации, один из которых ( $d$ ) характеризует толщину пикноклина, а другой ( $h$ ) – глубину его залегания;  $\zeta$  – амплитуда первой моды (в случае синусоидальной волны  $\zeta = \text{const}$ ; при цуговом строении волн  $\zeta$  меняется от 0 до максимального значения; в работе принято  $\zeta = \zeta_0 \sin \varphi(x, t)$ ;  $\varphi \in (0, \pi)$ ,  $\omega$  – частота ВВ,  $\lambda = 2\pi/k$  – длина ВВ. Расчеты проводились для  $\omega = 0.6 N_0$ , где  $N_0$  – максимальное значение частоты Вэйселя  $N = \sqrt{(g/\rho)(d\rho/dz)}$ ,  $\rho$  – плотность воды,  $\zeta_0 = 2$  м. Волновое число  $k = 2\pi/\lambda$  определялось из дисперсионного соотношения  $\omega/N_0 = kd / \sqrt{(kd+m-1)(kd+m)}$ , ( $m$  – номер моды), период волны  $T = 2\pi/\omega$ . Структура алгоритма моделирования

лидарного изображения поля ВВ с заданной амплитудой показана на рис. 7 [15].

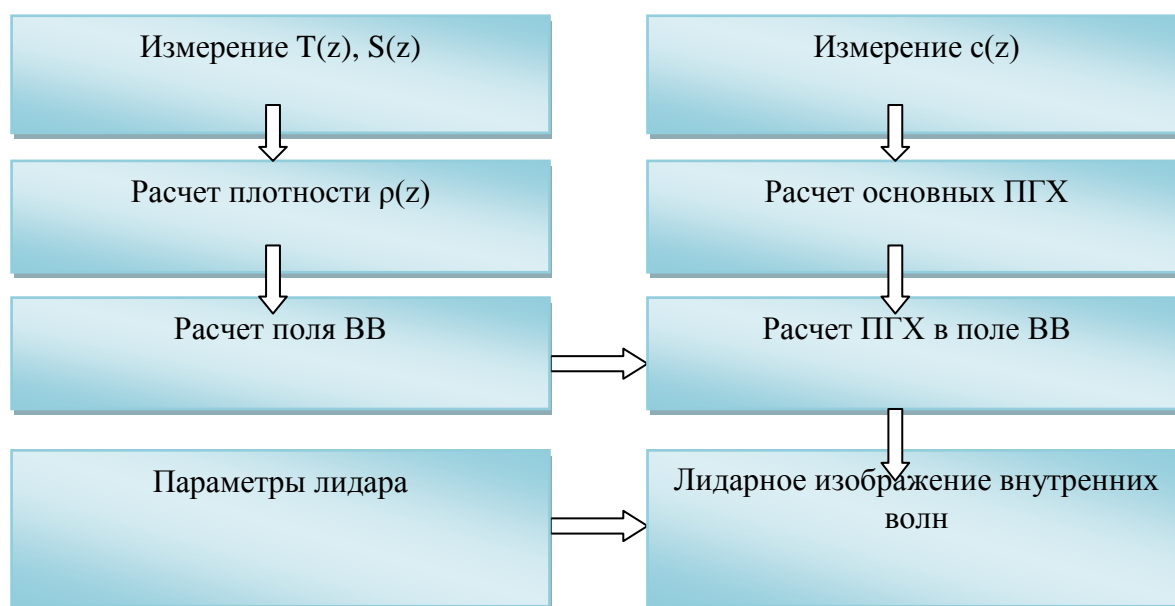


Рис. 7. Схема алгоритма моделирования лидарных изображений внутренних волн.

Исходными данными для моделирования служат профили показателя ослабления света  $c(z)$ , температуры  $T(z)$  и электропроводности  $S(z)$  воды; амплитуда и номер моды ВВ; параметры лидара ( $W$  – энергия зондирующего импульса (Дж);  $r_1, r_2$  – радиусы пучка и входного зрачка приемника (м);  $2\vartheta_1, 2\vartheta_2$  – апертурные углы источника и приемника (рад)). Расчеты проводились для параметров, соответствующих реальному лидару, имеющемуся в лаборатории оптики Института океанологии РАН:  $W = 0.4 \text{ Дж}$ ,  $r_2 = 0.1 \text{ м}$ ,  $\vartheta_2 = 0.035$  (2 град.),  $r_1 = 0.005 \text{ м}$ ,  $\vartheta_1 = 0.003$ . Предполагалось, что лидар перемещается в направлении волнового вектора (ось  $x$ ) со скоростью, существенно превышающей скорость распространения ВВ, так что структура изображения определяется распределением  $\zeta$  при  $t=0$ .

Структура лидарного изображения ВВ определяется возмущениями, вносимыми ВВ в пространственное распределение ПГХ, которое зависит как от невозмущенных профилей ПГХ, так и от поля вертикальных смещений жидкости в ВВ. Поэтому алгоритм моделирования включает гидрооптическую и гидродинамическую часть.

Гидродинамическая часть алгоритма включает расчет глубинного профиля плотности воды  $\rho(z)$  по измеренным профилям температуры и электропроводности, определение параметров пикноклина (глубина пикноклина  $h$  и его толщина  $d$ ), профиля частоты Вяйсяля  $N(z)$  и, после задания амплитуды, частоты и номера моды ВВ, расчет поля вертикальных смещений жидкости  $\zeta(x, z, t)$ .

Гидрооптическая часть алгоритма предусматривает: определение показателей полного  $b$ , обратного  $b_b$  и малоуглового  $b_1$  рассеяния и дисперсии индикатрисы малоуглового рассеяния  $\langle \gamma^2 \rangle$  по измеренным профилям  $c(z)$  с помощью корреляционных связей между различными ПГХ (формулы (8)); расчет пространственного распределения ПГХ в поле ВВ по формулам (7) в предположении о малости амплитуды ВВ по сравнению с вертикальным масштабом неоднородности поля  $\zeta(x, z, t)$ ; расчет лидарного изображения ВВ по формуле (6).

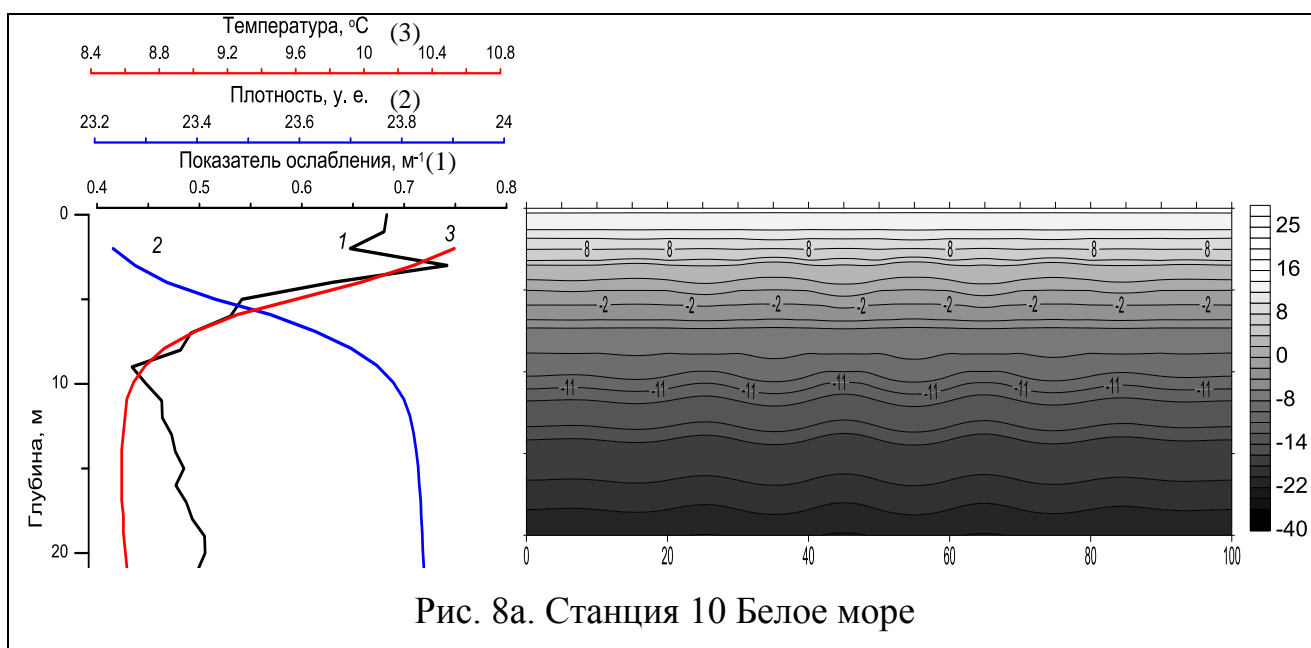
Алгоритм реализован в виде компьютерной программы в среде MATHCAD. Время счета отдельной реализации сигнала обратного рассеяния в зависимости от требуемой дискретизации по глубине и максимального значения глубины в конкретных расчетах составляло от нескольких минут до одного часа.

Были проведены расчеты для 30 станций в Белом, Баренцевом и Карском морях, на которых измерялись профили температуры, солености и показателя ослабления.

Ниже на рисунках 8а-ж приведены примеры результатов моделирования лидарных изображений внутренних волн в виде линий уровня величины  $L(x, z) = 10 \log P(x, z)$  ( $P$  – мощность эхо-сигнала в ваттах) (справа), а также исходные данные – профили условной плотности воды, показателя ослабления света и температуры (слева) – для типичных станций в Белом, Баренцевом и Карском морях [15]. Параметры модели Грена для указанных станций приведены в таблице 1.

Таблица 1  
 Параметры модели Грена для выбранных станций

Станция No., год	$h$ , м <i>глубина пикноклина</i>	$d$ , м <i>толщина пикноклина</i>	$\omega/N_0$
10 Белое море 2010	9	6	0.8
15 Белое море 2010	5	6	0.8
49 Баренцево море 2009	7	6	0.8
1 Баренцево море 2006	40	10	0.87
60 Карское море 2010	20	10	0.87
68 Карское море 2010	11	8	0.84



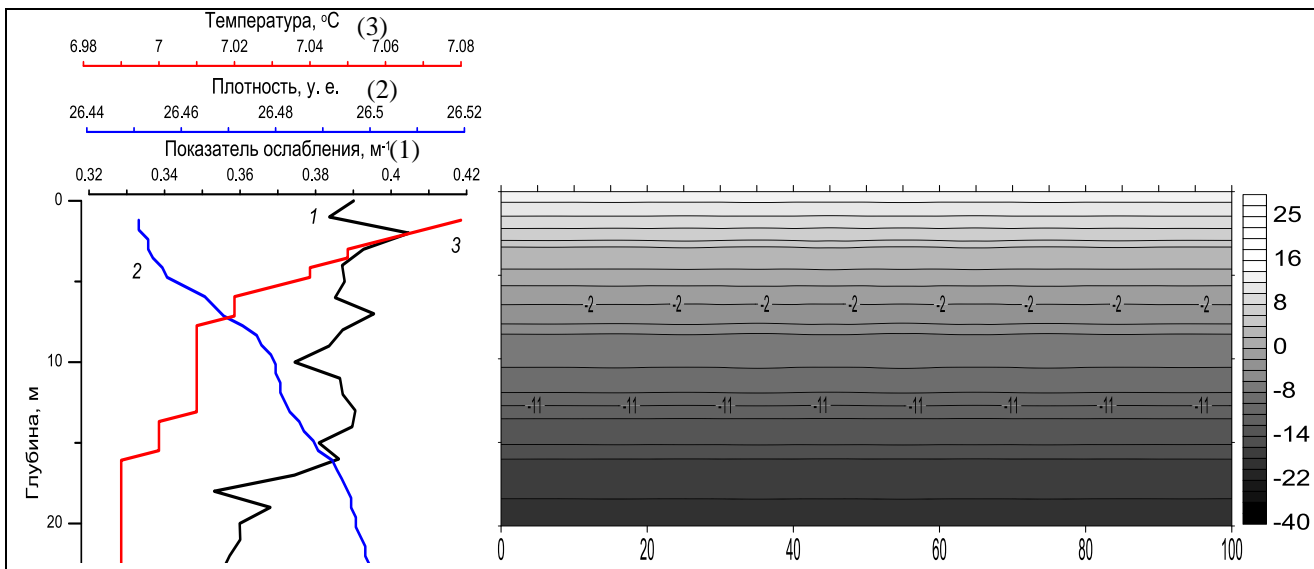


Рис. 8б. Станция 15 Белое море

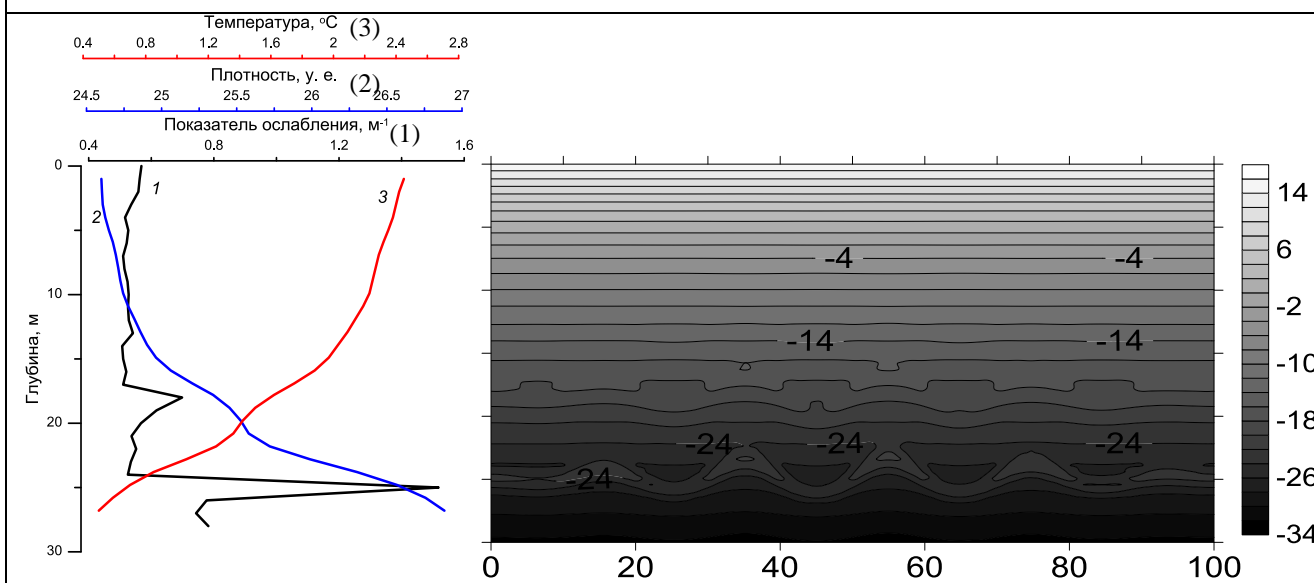


Рис. 8в. Станция 60 Карское море 2010

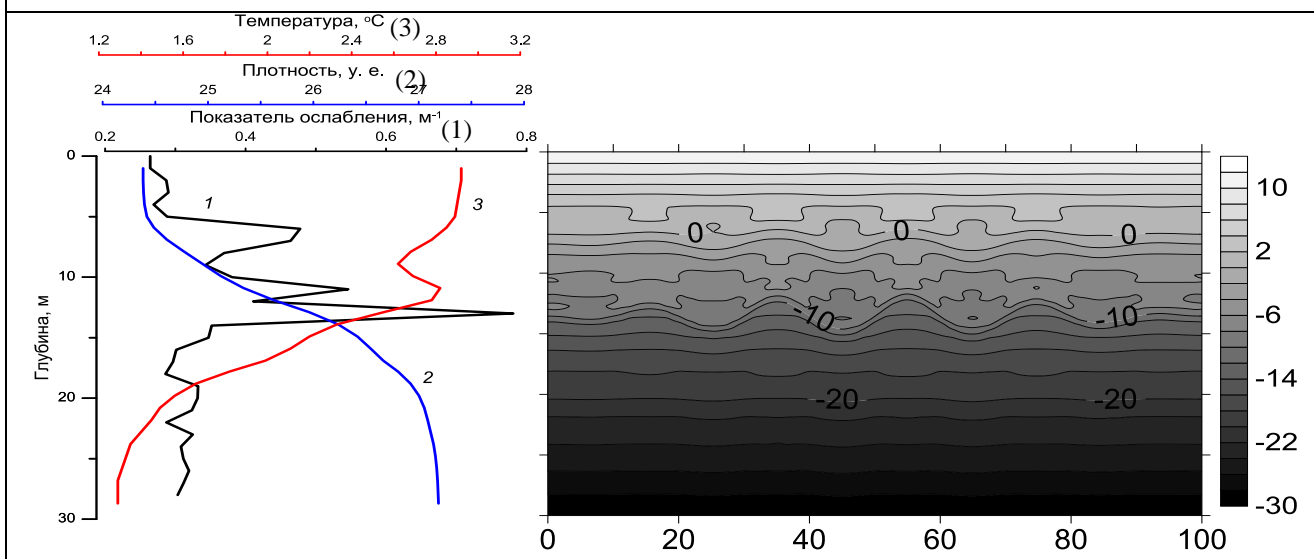


Рис. 8г. Станция 68 Карское море

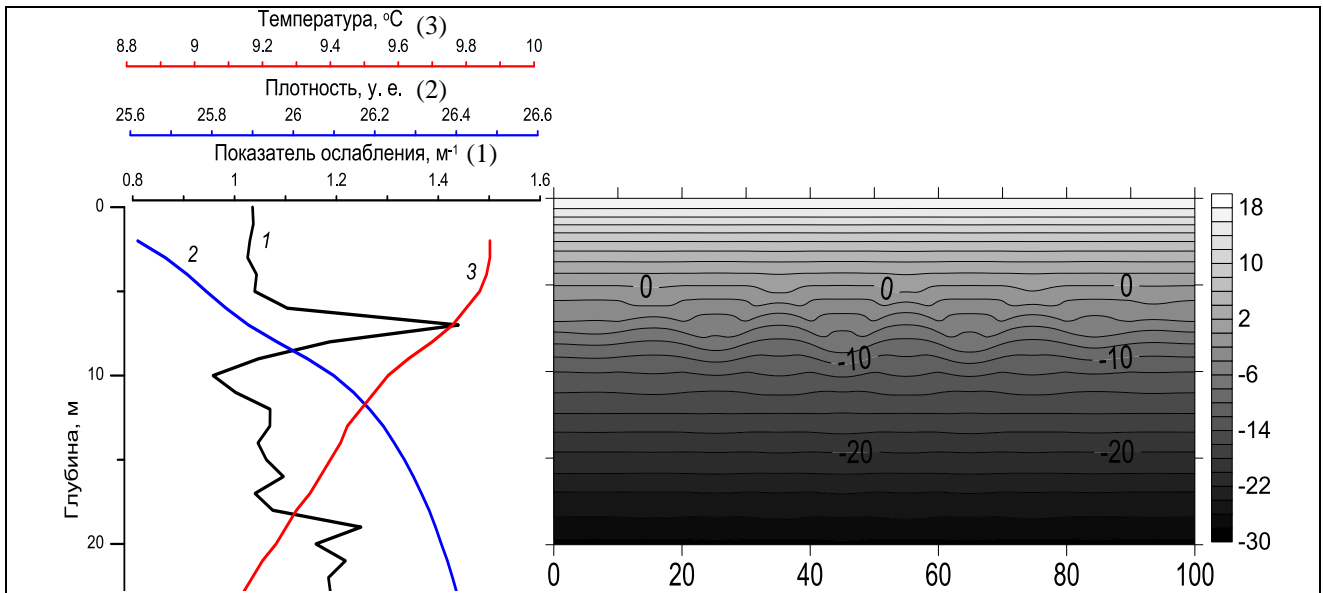


Рис. 8д. Станция 49 Баренцево море

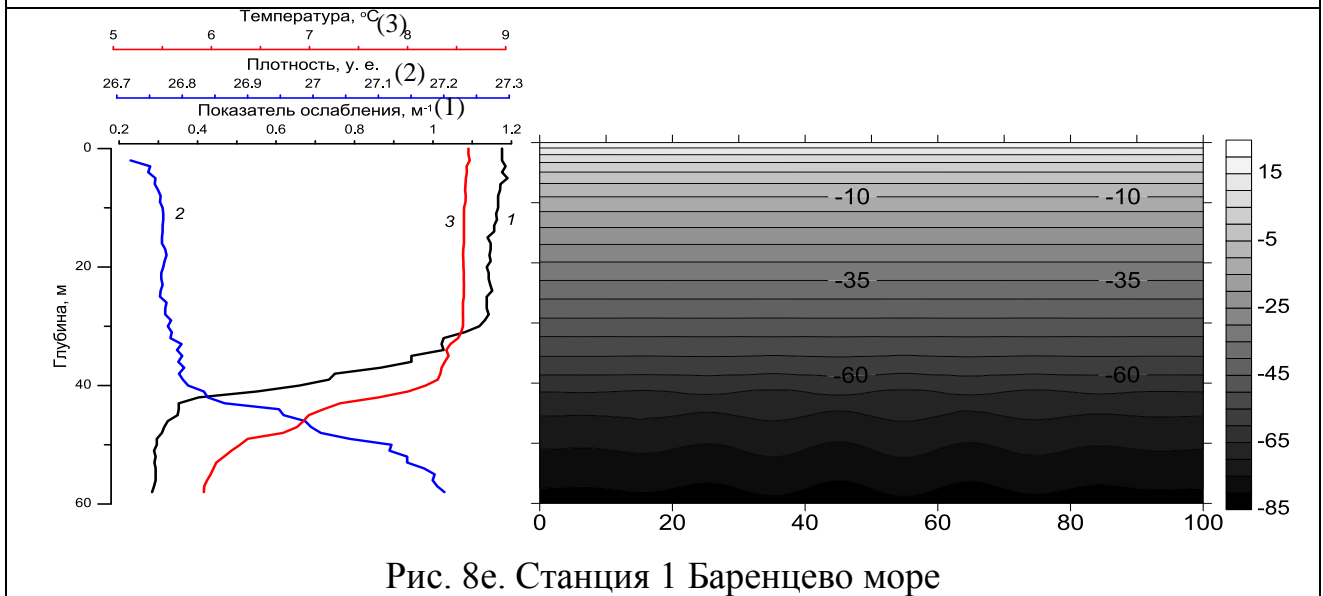


Рис. 8е. Станция 1 Баренцево море

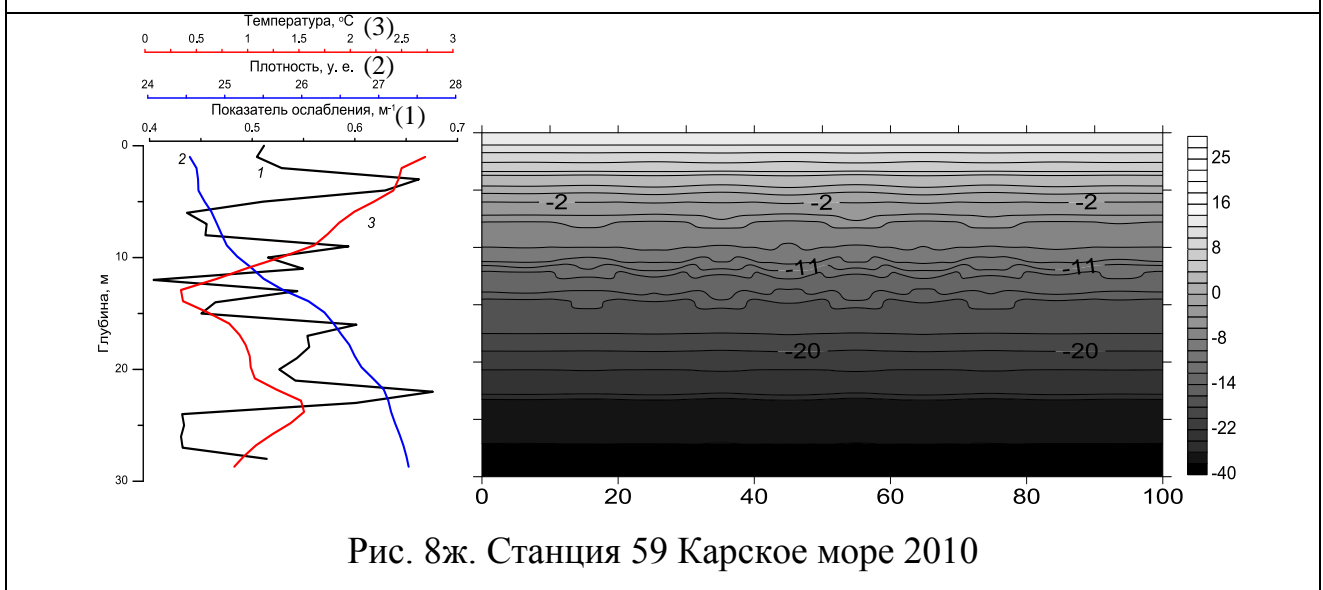


Рис. 8ж. Станция 59 Карское море 2010

Рис. 8 . Профили плотности, температуры, показателя ослабления (слева) и соответствующие им результаты расчета лидарных изображений внутренних волн в виде линий уровня величины  $L(x, z) = 10 \log P(x, z)$  (справа).

По результатам проведенных расчетов можно выделить несколько типовых случаев:

1. Распределение плотности имеет ярко выраженный скачок, а показатель ослабления слабо меняется от поверхности до дна. Такая ситуация приведена на рис. 8б (станция 15 в Белом море – показатель ослабления меняется от  $0.4 \text{ м}^{-1}$  у поверхности до  $0.36 \text{ м}^{-1}$  у дна). В этом случае внутренние волны не проявляются в сигнале обратного рассеяния или проявляются очень слабо.

2. Распределения плотности и показателя ослабления имеют ярко выраженные скачки. Такая ситуация приведена на рис. 8а, 8е (станция 10 в Белом море и 1 в Баренцевом). В этом случае внутренние волны проявляются в виде периодических колебаний в слое скачка, и колебаний в противофазе ниже слоя скачка.

3. Распределение плотности имеет ярко выраженный скачок, а в распределении показателя ослабления имеются отдельные ярко выраженные слои. Такие ситуации приведены на рис. 8в, 8г, 8д, 8ж (станция 49 в Баренцевом море, 59, 60 и 68 в Карском море). В этом случае внутренние волны проявляются в эхо-сигнале наиболее сложным образом: в выделенном слое – в виде периодических структур, над слоем в виде нерегулярных бочкообразных структур, ниже выделенного слоя – в виде периодических структур, колеблющихся в противофазе. Наиболее сложная ситуация наблюдается на рис. 8ж, когда в распределении показателя ослабления имеется множество отдельных ярко выраженных слоев. Внутренние волны проявляются в виде сложных нерегулярных структур.

Проведенные расчеты показывают, что изображения внутренних волн в зависимости от распределения гидрофизических и гидрооптических параметров и их сочетания имеют достаточно сложную и разнообразную структуру. Можно также заключить, что приведенный метод и алгоритм моделирования изображений ВВ являются эффективным средством прогностических оценок возможностей лидарного наблюдения внутренних волн в заданных районах и уточнения механизмов формирования изображений ВВ. Алгоритм и программа

могут также послужить основой для разработки методов восстановления поля ВВ по его лидарному изображению.

В заключительной части четвертой главы описан метод и результаты оценки возможности наблюдения внутренних волн лидаром с заданными техническими характеристиками в различных гидрологических условиях. Приведенные результаты расчета отношения сигнал/шум показали, что в большинстве случаев мощность эхо-сигнала лидара достаточна для уверенной регистрации внутренних волн с амплитудой в единицы метров.

В **Заключении** сформулированы основные результаты, полученные в работе.

### **Основные результаты работы**

1. Разработан прибор для измерения показателя ослабления света морской среды на длине волны 550 нм, который может применяться в прибрежных водах ( $c \geq 0.25$  м). Предложен уникальный метод калибровки разработанного прибора, преимущество которого состоит в том, что он обеспечивает минимизацию погрешности, обусловленной преломлением света. Также данный метод позволяет калибровать или проверять работоспособность прибора как в лабораторных, так и в морских условиях.

2. Проведены широкомасштабные совместные измерения гидрооптических и гидрологических характеристик в Баренцевом, Белом и Карском морях и определены корреляционные взаимосвязи между ними. Проведенные расчеты показали, что в случаях наличия пикноклина существует высокая корреляция между параметрами вертикальных распределений показателя ослабления света и плотности воды. Наличие такой корреляции позволяет использовать результаты лидарных измерений профиля показателя ослабления для определения характеристик плотностной стратификации и создает предпосылки для дистанционного определения параметров пикноклина с помощью лидара в районах с ярко выраженным пикноклином и скачком показателя ослабления.

3. На основе проведенных измерений разработан метод, алгоритм и выполнено моделирование лидарных изображений внутренних волн.



Проведенные расчеты показывают, что изображения внутренних волн в зависимости от распределения гидрофизических и гидрооптических параметров и их сочетания имеют достаточно сложную и разнообразную структуру. Полученные лидарные изображения, рассчитанные для характерных распределений плотностной и оптической стратификации Баренцева, Белого и Карского морей, дают представление об отображении полей внутренних волн в эхо-сигнале лидара с заданными техническими характеристиками в указанных районах. Разработанный метод и алгоритм моделирования изображений ВВ являются эффективным средством прогностических оценок возможностей лидарного наблюдения внутренних волн малой амплитуды в заданных районах и уточнения механизмов формирования изображений ВВ. Алгоритм и программа могут также послужить основой для разработки методов восстановления поля ВВ по его лидарному изображению.

Результаты расчета отношения сигнал/шум показали, что в большинстве случаев мощность эхо-сигнала лидара достаточна для уверенной регистрации внутренних волн с амплитудой в единицы метров.

### **Список опубликованных работ по теме диссертации**

#### *Труды конференций*

1. И.М. Левин, Л.С. Долин, О.Н. Французов, М.А. Родионов, В.Ю. Осадчий, Т.М. Радомысльская, Н.Н. Рыбалка. О возможности наблюдения гидрофизических неоднородностей в Баренцевом море лидарным методом. Труды IX Международной конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». Санкт-Петербург, 2008, с. 366-370.

2. O.N. Frantsuzov, I.M. Levin, V.Yu. Osadchy, M.A. Rodionov, V.V. Savchenko, T.M. Radomyslskaya, S.P. Gusarova. A device for simultaneously measuring attenuation coefficient, temperature and salinity: measurements in the Barents and Black Seas. Proceedings of the IV International Conference «Current Problems in Optics of Natural Waters» (ONW'2007), N. Novgorod, 2007, pp. 267-270.

3. A.V. Zimin, A.A. Rodionov, M.A. Rodionov, N.E. Pokrovskaya, O.N. Frantsuzov. Variability of the attenuation coefficient of light during the tidal cycle in the White Sea (according to the research data collected in the expedition to the Zapadnaya Soloveckaya Salma Strait of the Onega Bay, July 2008). Proceedings of the V International Conference «Current Problems in Optics of Natural Waters (ONW'2009)». p.171-172

4. A.V. Zimin, A. A. Rodionov, M.A. Rodionov, O. N. Frantsuzov, V. I. Chernook, Ju. A. Goldin. Spatial variability of the attenuation coefficient of light

according to the aircraft lidar and contact optical measure (analysis of data collected in the Dvina Gulf of the White Sea in July 2008). Proceedings of the V International Conference «Current Problems in Optics of Natural Waters (ONW'2009)». p.246-248

5. I.S. Dolina, O.N. Frantsuzov, I.M. Levin, M.A. Rodionov. Correlations between the attenuation coefficient and the hydrological characteristics in the Barents Sea. Proceedings of the V International Conference «Current Problems in Optics of Natural Waters» (ONW'2009), St. Petersburg, Russia, 2009, pp.189-192.

6. М.А. Родионов. Гидрооптические и гидрофизические параметры в северных морях и возможности лидарной индикации гидродинамических процессов // Труды IX Международной конференции «ПРИКЛАДНАЯ ОПТИКА-2010». Санкт-Петербург. 2010. Том 1. Стр. 291-294.

7. I.S. Dolina, O.N. Frantsuzov, I.M. Levin, M.A. Rodionov. Correlations between depth distributions of water attenuation coefficient and in the Barents and Kara Seas. Proceedings of the VI International Conference «Current Problems in Optics of Natural Waters» (ONW'2011), St. Petersburg, Russia, 2011, pp.99-103.

#### *Статьи в изданиях, входящих в Перечень ВАК*

8. О.Н. Французов, И.М.Левин, Л.С.Долин, М.А. Родионов, В.Ю.Осадчий, В.В. Савченко. Глубинные профили гидрофизических параметров в Баренцовом море применительно к проблеме лидарного зондирования. Сб. «Фундаментальная и прикладная гидрофизика», № 4(6), 2009, с. 16-24.

9. И.С. Долина, М.А. Родионов, И.М. Левин. Восстановление характеристик гидрофизических полей в море из результатов гидрооптических измерений. Морской вестник, № 4, 2010, с.62-64.

10. И.М.Левин, М.А. Родионов, О.Н. Французов. Погружаемый измеритель показателя ослабления света морской водой. Оптический журнал, № 5, 2011.

11. М.А. Родионов. Моделирование лидарных изображений внутренних волн по результатам измерений гидрооптических и гидрофизических параметров в северных морях. Сб. «Фундаментальная и прикладная гидрофизика» № 4(14), 2011, с. 80-88.

12. М.А. Родионов, И.С. Долина, И.М.Левин. Корреляции между вертикальными распределениями показателя ослабления света и плотностью воды в Баренцевом и Карском морях. Сб. «Фундаментальная и прикладная гидрофизика», (В печати).

#### **Цитированная литература**

1. И.М.Левин, М.А. Родионов, О.Н. Французов. Погружаемый измеритель показателя ослабления света морской водой. Оптический журнал, № 5, 2011.

2. A.V. Zimin, A. A. Rodionov, M.A. Rodionov, N. E. Pokrovskaya, O. N. Frantsuzov. Variability of the attenuation coefficient of light during the tidal cycle in the White Sea (according to the research data collected in the expedition to the Zapadnaya Soloveckaya Salma Strait of the Onega Bay, July 2008). Proceedings of the V International Conference «Current Problems in Optics of Natural Waters (ONW'2009)». p.171-172

3. I.S. Dolina, O.N. Frantsuzov, I.M. Levin, M.A. Rodionov. Correlations between depth distributions of water attenuation coefficient and in the Barents and

Kara Seas. Proceedings of the VI International Conference «Current Problems in Optics of Natural Waters» (ONW'2011), St. Petersburg, Russia, 2011, pp.99-103.

4. О.Н. Французов, И.М.Левин, Л.С.Долин, М.А. Родионов, В.Ю.Осадчий, В.В. Савченко. Глубинные профили гидрофизических параметров в Баренцовом море применительно к проблеме лидарного зондирования. Сб. «Фундаментальная и прикладная гидрофизика», № 4(6), 2009, с. 16-24.

5. Г.Г. Неуймин, Н.А. Сорокина. «Статистические связи поля прозрачности в океане с гидрологическими и биологическими характеристиками», Изв. АН СССР, ФАО, т. 15, № 2, стр. 233-236, 1979.

6. Г.Г. Неуймин, Н.А. Сорокина. «О корреляции между вертикальными распределениями оптических и гидрологических характеристик», Океанология, т. 16, № 3, стр. 441-450, 1976.

7. В.А. Матюшенко, Л.Р. Лукин, Г.Д. Хоменко, Л.И. Галеркин. «Показатель ослабления света и его связи с гидрологическими характеристиками и содержанием взвешенного вещества в водах Баренцева моря», Опыт системных океанологических исследований в Арктике. Под ред. А.Л. Лисицына, М.Е. Виноградова, Е.А. Романкевича. М., Научный мир, стр. 432 – 442, 2001

8. I.S. Dolina, O.N. Frantsuzov, I.M. Levin, M.A. Rodionov. Correlations between the attenuation coefficient and the hydrological characteristics in the Barents Sea. Proceedings of the V International Conference «Current Problems in Optics of Natural Waters» (ONW'2009), St. Petersburg, Russia, 2009, pp.189-192.

9. И.С. Долина, М.А. Родионов, И.М. Левин. Восстановление характеристик гидрофизических полей в море из результатов гидрооптических измерений. Морской вестник, № 4, 2010, с.62-64.

10. I.S. Dolina, L.S. Dolin, I.M. Levin, A.A. Rodionov, «Diagnostic abilities of oceanic lidars», Proceedings of the III International Conference «Current Problems in Optics of Natural Waters»(ONW'2005), I. Levin and G. Gilbert, Editors. D.S. Rozhdestvensky Optical Society. St. Petersburg. P. 220-225, 2005

11. I.S. Dolina, L.S. Dolin, I.M. Levin, A.A. Rodionov, V.A. Savel'ev, «Inverse problems of lidar sensing of the ocean», In: «Current research on remote sensing, laser probing and imagery in natural water». SPIE Proceedings. v. 6615. 66150C (10 pages), 2007

12. L.S. Dolin, I.S. Dolina, V.A. Savel'ev, «The model of lidar images of internal waves», Proc. IV Int. Conf. ONW' P. 124 – 128, 2007

13. И.М.Левин, Л.С.Долин, О.Н. Французов, М.А. Родионов, В.Ю.Осадчий, В.В. Савченко Глубинные профили гидрофизических параметров в Баренцовом море применительно к проблеме лидарного зондирования. Сборник научных трудов «Фундаментальная и прикладная гидрофизика», редактор А.А. Родионов, изд. «Наука», С. Петербург, № 4(7), 2009, с. 16 – 24.

14. И. Левин, О. Копелевич, «Корреляционные соотношения между первичными гидрооптическими характеристиками в спектральном диапазоне около 550 нм», Океанология, № 3, стр. 374 – 379, 2007

15. М.А. Родионов Моделирование лидарных изображений внутренних волн по результатам измерений гидрооптических и гидрофизических параметров в северных морях. Сб. «Фундаментальная и прикладная гидрофизика» № 4(14), 2011, с. 80-88.