

На правах рукописи
Кокорулина

КОКОУЛИНА Мария Владимировна

**ОСОБЕННОСТИ НЕЛИНЕЙНЫХ ВОЛНОВЫХ ДВИЖЕНИЙ
В СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ БАССЕЙНАХ**

1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – Владивосток – 2023

Работа выполнена на кафедре «Прикладная математика»
ФГБОУ ВО «Нижегородского государственного технического университета
им. Р.Е. Алексеева» и в лаборатории нелинейной гидрофизики и природных ка-
тастроф ФГБУН Тихоокеанский океанологический институт им В.И. Ильичева
ДВО РАН

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор,
профессор РАН

Куркин Андрей Александрович

Официальные оппоненты: **Булатов Виталий Васильевич**,
доктор физико-математических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник лаборатории меха-
ники сложных жидкостей, ФГБУН «Институт
проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН»
Морозов Евгений Георгиевич,
доктор физико-математических наук,
заведующий лабораторией гидрологических про-
цессов ФГБУН «Институт океанологии им. П.П.
Ширшова РАН»

Ведущая организация: ФГБУН «Институт морской геологии и геофизики
Дальневосточного отделения РАН»

Защита состоится «15» декабря 2023 г. в 13 часов на заседании диссертацион-
ного совета 24.2.345.04 при ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный тех-
нический университет им. Р.Е. Алексеева» по адресу:
603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24, корп. 1, ауд. 1315.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НГТУ им. Р.Е. Алексеева
и по ссылке – [https://www.nntu.ru/frontend/web/ngtu/files/org_structura/
instit_fakul_kaf_shkoly/fsvk/dissertacii/2023/kokoulina_m_v.pdf](https://www.nntu.ru/frontend/web/ngtu/files/org_structura/instit_fakul_kaf_shkoly/fsvk/dissertacii/2023/kokoulina_m_v.pdf)

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

Учёный секретарь
Диссертационного совета,
к.ф.-м.н.

Е.А. Рувинская

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

Как известно, в стратифицированном бассейне возможны волновые движения внутри жидкости, обусловленные вертикальным изменением плотности и течения. Внутренние волны являются важным элементом динамической структуры и экосистем природных водоемов, они могут создавать значительные нагрузки и изгибающие моменты на подводные части гидротехнических сооружений, кроме того, существенно влияют на распределение питательных веществ. Они наблюдаются в океанах и морях практически повсеместно. Основной причиной их существования является нарушение равновесного распределения плотности воды, которое приводит к возникновению волн на границе раздела слоев. Как показывают данные натурных измерений, высокая интенсивность локальной изменчивости структуры вод характерна для шельфовых зон практически всех морей, где энергия мезомасштабных приливных процессов переходит в энергию турбулентного перемешивания. Измерения внутренних волн в России активно ведутся коллективами Института океанологии РАН им. П.П. Ширшова, Тихоокеанского океанологического института ДВО РАН им. В.И. Ильичева, Морского гидрофизического института РАН, Специального конструкторского бюро средств автоматизации морских исследований ДВО РАН и других организаций. Они изучаются в лаборатории; особо отметим эксперименты в Институте прикладной физики РАН, в Институте гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН и в Нижегородском государственном техническом университете им. Р.Е. Алексеева

Одним из механизмов генерации короткопериодных внутренних волн большой амплитуды в океанах и морях является взаимодействие приливных течений с неровностями дна [Vlasenko et al., 2005]. Короткопериодные внутренние волны — это волны с периодами от нескольких минут до нескольких десятков минут и с пространственными масштабами от нескольких сотен метров до нескольких километров. Их структура определяется нелинейными процессами (солитонами, бризерами и волновыми пакетами), которые активно изучаются в механике жидкости и физике. Интенсивные короткопериодные внутренние волны приводят к большой изменчивости гидрологических характеристик и могут оказывать влияние на безопасность и экономическую эффективность работ на шельфе. Для количественных оценок опасных динамических эффектов от короткопериодных внутренних волн и дальнейшего их учета в инженерных изысканиях, связанных со строительством на шельфе, плавучими сооружениями и подводным мореплаванием, необходимо выполнять региональные оценки вероятности появления экстремальных интенсивных внутренних волн на различных временных интервалах. Выполнение таких оценок начато для отдельных акваторий Мирового океана [Свергун и Зимин, 2017; Talipova et al, 2018].

Шельфовая зона морей характеризуется наиболее существенной изменчивостью гидрофизических полей, связанной, в том числе с воздействием интенсивных внутренних волн, трансформирующихся и разрушающихся над континентальным склоном. Большая часть наблюдений нелинейных внутренних волн

также приходится на прибрежные области, и они содержатся в различных источниках. Атлас наблюдений внутренних волн создан и поддерживается в Лаборатории моделирования природных и техногенных катастроф Нижегородского государственного технического университета им Р.Е. Алексеева: https://lfnad.nntu.ru/ru/igwatlas_map/).

Из перечисленного следует актуальность и практическая важность исследования нелинейных внутренних волн в стратифицированных бассейнах.

Цели диссертационной работы

Целью диссертации является исследование особенностей нелинейных волновых движений в стратифицированных бассейнах с учетом реальных гидрологических данных. Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

- Изучить особенности гидрологических процессов в стратифицированных бассейнах, влияющих на характеристики внутренних волн;
- Создать атлас кинематических характеристик внутренних волн в природном бассейне (на примере Японского моря);
- Проанализировать нелинейные волновые процессы в природных водоемах, включая их статистические характеристики.

Научная новизна результатов работы

Научная новизна диссертационной работы определяется полученными оригинальными результатами исследований:

- Выявлена сильная корреляция между скоростью распространения внутренних волн и индексом стратификации, позволяющая выполнять экспресс-оценки скоростей волн без решения краевой задачи Штурма-Лиувилля.
- Показано, что массовая сила плавучести суточного прилива значительно превышает силу полусуточных приливов практически повсеместно в Охотском море. Максимальные значения данной величины характерны для районов с резким уклоном дна.
- На основе имеющихся гидрологических данных рассчитаны и представлены в виде атласа карты кинематических параметров внутренних волн для Японского моря. Они использованы для построения карт возможных типов локализованных нелинейных внутренних волн и предельных амплитуд различных семейств солитонов для этого бассейна. Типичными являются солитоны отрицательной полярности (с понижением пикноклина). «Толстые» солитоны теоретически могут встречаться в прибрежных зонах.
- Исследованы режимы многомодового распространения внутренних волн в природных водоемах. Корреляционный анализ измеренных сигналов позволяет высказать предположение о лучевом характере распространения внутренних волн в таких регионах, траектории лучей рассчитаны для реальных условий с учетом переменной глубины.
- Показано, что распространение внутреннего волнового пакета умеренной амплитуды приводит к значительному увеличению донных скоростей, так что волновой пакет может способствовать взвешиванию осадков и транспорту донных отложений на значительных расстояниях.

- Обработан долговременный ряд профилей температуры длительностью около 210 часов, полученный в шельфовой зоне Японского моря по данным инструментальных наблюдений. В записи идентифицировано более 1000 короткопериодных внутренних волн с высотами 1—10 м при общей глубине в точке измерений 42 м, что указывает на нелинейный характер поля внутренних волн. Оценены вероятности появления интенсивных возмущений.
- Разработана и реализована (https://lmnad.nntu.ru/ru/projects/property_IW/) геоинформационная онлайн-система, которая дает возможность провести анализ кинематических и нелинейных характеристик внутренних волн по гидрологическим данным – наблюдаемым и/или модельным.

Положения, выносимые на защиту

- Сильная корреляция между скоростью распространения внутренних волн и индексом стратификации в природных бассейнах, позволяющая выполнять экспресс-оценки скоростей волн без решения краевой задачи Штурма-Лиувилля.
- Оценки донных скоростей во внутренних волнах, демонстрирующие, что распространение волнового пакета умеренной амплитуды может способствовать взвешиванию осадков и транспорту донных отложений на значительных расстояниях.
- Лучевые картины многомодового распространения внутренних волн в природных водоемах.
- Атлас кинематических и нелинейных параметров внутренних волн для конкретного бассейна (Японского моря). Показано, что типичными являются солитоны отрицательной полярности (с понижением пикноклина). «Толстые» солитоны теоретически могут встречаться только в прибрежной зоне.
- Геоинформационная онлайн-система, позволяющая проанализировать кинематические и нелинейные характеристики внутренних волн по гидрологическим данным – наблюдаемым и/или модельным.

Достоверность результатов

Достоверность полученных результатов обоснована выбором апробированных физических моделей, математической корректностью постановок гидродинамических задач, строгим использованием аналитических и численных методов, сопоставлением с известными результатами в частных случаях.

Практическая значимость результатов работы

Результаты расчетов, полученные в работе, могут использоваться как для экспресс-оценок характеристик внутренних волн, прогноза возможных сценариев их генерации и трансформации, так и для более детального моделирования их распространения. Полученные оценки также могут использоваться для анализа влияния внутренних волн на распространение акустических сигналов в толще вод, перераспределение взвешенных частиц, включая питательные вещества и живые организмы, транспорт донных наносов. Разработанная геоинформационная онлайн-система находится в свободном доступе (https://lmnad.nntu.ru/ru/projects/property_IW/) и необходима многим потребителям, в частности, для предварительных оценок при планировании и проведении численных и натурных экспериментов.

Апробация работы

Основные результаты диссертации представлялись на всероссийских и международных конференциях: XVII Международная конференция «Нелинейные задачи теории гидродинамической устойчивости и турбулентность» НеЗаТеГиУс-18 (Звенигород, 2018), III Всероссийская конференция молодых учёных «Комплексные исследования Мирового океана» (КИМО-2018) (Санкт-Петербург, 2018), 14th International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation, MEDCOAST (Мармарис, 2019), XXI и XXII Международные молодежные научно-технические конференции «Будущее технической науки», (Нижний Новгород, 2022, 2023), XXVIII, XXVII, XXVIII и XXVIII Международные научно-технические конференции «Информационные системы и технологии» (Нижний Новгород, 2019 – 2023), 29 – 33-я Всероссийские научно-практические конференции по графическим информационным технологиям и системам «КОГРАФ» (Нижний Новгород, 2019 – 2023), IV Всероссийская научная конференция с международным участием «Геодинамические процессы и природные катастрофы» (Южно-Сахалинск, 2022), VI Всероссийская конференция с международным участием «Полярная механика» (Нижний Новгород, 2023), Первая Всероссийская школа-семинар НЦФМ «Математическое моделирование на супер-эвм экса- и зеттафлопсной производительности» (Саров, 2023).

Результаты диссертации неоднократно обсуждались на семинарах в Нижегородском государственном техническом университете им. Р.Е. Алексеева, и в Тихоокеанском океанологическом институте им. В.И. Ильичева ДВО РАН.

Программные комплексы, разработанные с участием автора диссертации, были презентованы на международных выставках и коллектив разработчиков, был награжден тремя золотыми медалями Международного салона изобретений и новых технологий «Новое время» (2020 – 2022 гг.), специальным призом от ассоциации изобретателей Боснии и Герцеговины (2020 г.), а также золотой медалью Московского международного салона изобретений и инновационных технологий «Архимед» (2023 г.).

Полученные результаты использованы в российских исследовательских проектах, выполняемых при участии автора диссертации:

- Грант Министерства науки и высшего образования РФ, Соглашение № 075-15-2022-1127 «Нелинейная гидрофизика с приложениями к природным катастрофам Дальневосточного региона».
- Гранты Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ РФ (НШ-6637.2016.5 «Волны большой амплитуды в прибрежной зоне», НШ-2685.2018.5 «Нелинейные процессы в прибрежной зоне: теоретические модели, численное моделирование и методы измерения», НШ-2485.2020.5 «Нелинейная динамика морских волн в прибрежной зоне: от натурных измерений до полномасштабного моделирования»; НШ-70.2022.1.5 «Нелинейные гидрофизические процессы прибрежной зоны: фундаментальные аспекты, инструментальные наблюдения, вычислительные эксперименты и практические приложения»).

- Научно-исследовательские работы в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (задания № FSWE-2020-0007 «Волновой климат стратифицированного морского шельфа: нелинейные динамические процессы и их влияние на прибрежную зону и гидротехнические сооружения»; задание № FSWE-2023-0004 «Нелинейная волновая динамика прибрежной зоны в условиях меняющегося климата и антропогенного воздействия»).
- Стипендия Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам СП-692.2021.5 «Океанографическая геоинформационная онлайн система для расчета и анализа дисперсионных, кинематических, нелинейных, силовых и транспортных характеристик внутренних волн в Мировом океане».

Публикации

По теме диссертации опубликовано 40 печатных работ, включая 9 статей в изданиях, рекомендованных ВАК и/или входящих в международные базы цитирования WoS и/или Scopus, 19 статей в трудах всероссийских конференций, 12 авторских свидетельств и тезисы докладов на международных и всероссийских конференциях.

В совместных работах научному руководителю д.ф.-м.н., проф., проф. РАН Куркину А.А. принадлежит постановки задач и выбор методов исследований. Автор диссертации выполнила большинство численных расчётов и принимала непосредственное участие в обсуждении и интерпретации полученных результатов. В работе [К1] автору принадлежит разработка и реализация численного алгоритма разложения волнового поля на модовые функции. Доц. О.Е. Куркиной в работах принадлежат реализация некоторых численных алгоритмов, интерпретация полученных результатов. В численных расчетах (вейвлет анализ, статистический анализ) и интерпретации полученных результатов в работах [К2, К5, К6, К19] принимала участие к.ф.-м.н. Рувинская Е.А. В работах [К8, К27, К28] д.ф.-м.н. Пелиновский Е.Н. и д.ф.-м.н. Талипова Т.Г. участвовали в обсуждении и интерпретации полученных результатов. В работе [К18] автору принадлежат результаты расчета транспортных свойств внутренних волн по результатам численного моделирования. В работах [К19, К21] магистранту Кузнецовой Л.Ю. принадлежат реализация некоторых численных алгоритмов и интерфейса программного комплекса.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и четырех приложений. Общий объем диссертации – 125 страниц, включая 82 рисунка и 3 таблицы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы ее цели, научная новизна и основные положения, выносимые на защиту, практическая значимость результатов работы, апробация, список публикаций по теме диссертации.

В **главе 1** дан обзор различных моделей внутренних волн, которые используются в диссертации для решения конкретных задач, связанных с нелинейными волновыми процессами в реальных природных водоемах. В п. 1.2 обсуждаются

некоторые важные моменты линейной теории внутренних волн, в частности, модовая структура внутренних волн, дисперсионное соотношение с учетом вращения Земли и без. «Полная» краевая задача Штурма-Лиувилля, которая следует из исходных линейных уравнений гидродинамики на вращающейся плоскости [Миропольский, 1981] имеет вид:

$$\frac{d^2\Phi}{dz^2} + \frac{N^2(z) - \omega^2}{\omega^2 - f_{in}^2} k^2 \Phi = 0, \quad (1)$$

$$\Phi(0) = \Phi(D) = 0,$$

где z – вертикальная координата, направленная вниз, $z = 0$ – невозмущенная поверхность моря; D – полная глубина бассейна; $\Phi(z)$ – модальная функция, описывающая вертикальную структуру у внутренней волны; k – волновое число; ω – частота внутренних волн, g – ускорение свободного падения, $\rho(z)$ – вертикальный профиль плотности морской воды, $f_{in} = 2\Omega \sin \varphi$ – инерционная частота (Ω – частота вращения Земли, соответствующая периоду 24 ч, φ – географическая широта точки наблюдений), $N(z) = \sqrt{\frac{g}{\rho(z)} \frac{d\rho(z)}{dz}}$ – частота Вэйсяля-Брента (плавучести).

В пределе $\omega \ll N$, когда волны особенно нелинейны, уравнение (1) упрощается

$$\frac{d^2\Phi}{dz^2} + \frac{N^2(z)}{c^2} \Phi = 0, \quad (2)$$

где

$$c^2 = \frac{\omega^2 - f_{in}^2}{k^2}. \quad (3)$$

В приближении очень длинных волн дисперсионное соотношение приобретает вид:

$$\omega^2 = c^2 k^2 + f_{in}^2. \quad (4)$$

При $k = 0$ получаем предельную частоту $\omega = f_{in}$. Фазовая скорость длинных внутренних волн в этом случае

$$c_{ph} = \frac{\omega}{k} = \sqrt{c^2 k + \frac{f_{in}^2}{k^2}} = \frac{\omega}{\sqrt{\omega^2 - f_{in}^2}} c, \quad (5)$$

а групповая скорость

$$c_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{c}{\sqrt{c^2 k^2 + f_{in}^2}}. \quad (6)$$

Таким образом, для вращающегося и не вращающегося бассейна задачи на собственные значения, а также сами значения идентичны (в приближении длинных волн), но дисперсионные соотношения, фазовые и групповые скорости внутренних волн различны.

Параграф 1.3 посвящен слабонелинейной теории внутренних волн, основанной на уравнении Гарднера, в частности, расчетам параметров модели. В первом порядке малости эволюционное уравнение для смещения изоциклы в максимуме моды это известное уравнение Кортевега – де Вриза

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + c \frac{\partial \eta}{\partial x} + \alpha \eta \frac{\partial \eta}{\partial x} + \beta \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} = 0 \quad (7)$$

с коэффициентами нелинейности, α , и дисперсии, β , выраженными в квадратурах от модовой функции и ее производных:

$$\alpha = \left(\frac{3}{2} \right) \frac{\int_0^D (c-U)^2 (d\Phi/dz)^3 dz}{\int_0^D (c-U)(d\Phi/dz)^2 dz}; \quad \beta = \left(\frac{1}{2} \right) \frac{\int_0^D (c-U)^2 \Phi^2 dz}{\int_0^D (c-U)(d\Phi/dz)^2 dz}. \quad (8)$$

При учете следующего порядка малости мы получаем уравнение Гарднера.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + (c + \alpha \eta + \alpha_1 \eta^2) \frac{\partial \eta}{\partial x} + \beta \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} = 0. \quad (9)$$

Здесь коэффициент кубической нелинейности, α_1 , выражается через модовую функцию и нелинейную поправку второго порядка к ней, $F(z)$, которая является решением граничной задачи:

$$\frac{d^2 F}{dz^2} + \frac{N^2}{c^2} F = -\frac{\alpha}{c} \frac{d^2 \Phi}{dz^2} + \frac{3}{2} \frac{d}{dz} \left[\left(\frac{d\Phi}{dz} \right)^2 \right], \quad (10)$$

$$F(0) = F(D) = 0; \quad F(z_{\max}) = 0, \quad (11)$$

$$\alpha_1 = \frac{1}{2P} \int_0^D dz \left\{ 9c \frac{dF}{dz} \left(\frac{d\Phi}{dz} \right)^2 - 6c \left(\frac{d\Phi}{dz} \right)^4 + 5\alpha \left(\frac{d\Phi}{dz} \right)^3 - 4\alpha \frac{dF}{dz} \frac{d\Phi}{dz} - \frac{\alpha^2}{c} \left(\frac{d\Phi}{dz} \right)^2 \right\}, \quad (12)$$

$$P = \int_0^D \left(\frac{d\Phi}{dz} \right)^2 dz.$$

В рамках уравнения Гарднера с отрицательной кубической нелинейностью солитоны имеют полярность, совпадающую по знаку с коэффициентом квадратичной нелинейности и ограничены по амплитуде амплитудой предельного или толстого солитона

$$a_{\text{lim}} = -\alpha/\alpha_1. \quad (13)$$

В случае положительной кубической нелинейности могут существовать солитоны обеих полярностей, только солитоны с амплитудой, противоположной знаку квадратичной нелинейности, не могут иметь амплитуду меньше амплитуды алгебраического солитона

$$a_{\text{alg}} = -2\alpha/\alpha_1. \quad (14)$$

С учетом силы Кориолиса уравнение (9) трансформируется в уравнение Гарднера-Островского

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + (c + \alpha \eta + \alpha_1 \eta^2) \frac{\partial \eta}{\partial x} + \beta \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} = \frac{f_{in}}{2c} \int \eta dx. \quad (15)$$

В параграфе 1.4 дано описание полных по нелинейности моделей генерации и динамики внутренних волн в стратифицированном бассейне. Полная система уравнений гидродинамики невязкой несжимаемой стратифицированной жидкости (уравнений Эйлера) в приближении Буссинеска с учетом влияния баротропного прилива имеет вид:

$$\vec{V}_t + (\vec{V}\nabla)\vec{V} - f\vec{V} \times \vec{k} = -\nabla P - \vec{k}\rho g, \quad (16)$$

$$\rho_t + \vec{V}\nabla\rho = 0, \quad (17)$$

$$\nabla\vec{V} = 0, \quad (18)$$

$$\rho = \frac{\rho_f - \rho_0}{\rho_0}, \quad (19)$$

где $\vec{V}(u, v, w)$ – вектор скорости, ∇ – оператор трехмерного векторного градиента, нижний индекс t обозначает производную по времени, ρ_f – плотность морской воды, ρ_0 – постоянная характерная плотность (возникает в силу предположения, что плотность воды в исследуемом бассейне меняется незначительно, т.е. в силу приближения Буссинеска: $\rho_f(z) = \rho_0(1 + \rho(z))$, $\rho(z)$ – безразмерная величина (аномалия плотности), g – гравитационное ускорение, f_{in} – параметр Кориолиса, \vec{i} и \vec{k} – единичные орты по осям x и z . Волны распространяются в направлении x , ось y перпендикулярна движению волны, а z – вертикальная координата.

Параграф 1.5 посвящен описанию исходных данных, которые применяются для моделирования. В работе использовались данные температуры и солёности из международного гидрологического атласа World Ocean Atlas 2018 (WOA18) [Boyer et al., 2018], данные GEBCO (<https://www.gebco.net>) – общедоступного цифрового атласа батиметрии Мирового океана, а также данные горизонтального потока воды для компонент прилива из расчетов по приливной модели TPXO 8 (A TOPEX/Poseidon Global Tidal Model), основанной на данных спутниковой альтиметрии [Egbert and Erofeeva, 2002].

В параграфе 1.6 приводится созданная с участием автора геоинформационная система по анализу внутренних волн. Разработанная геоинформационная онлайн-система, дает возможность провести анализ дисперсионных зависимостей, модового состава, фазовой и групповой скорости внутренних волн, их нелинейных характеристик по имеющимся данным натурных наблюдений гидрологии и волн в океанах и морях. Основным интерфейсом океанографической геоинформационной онлайн-системы является интерактивная карта. Проект размещен в открытом доступе на сайте Лаборатории моделирования природных и техногенных катастроф НГТУ им. Р.Е. Алексеева

В заключение (**п. 1.7**) приведены полученные в **главе 1** результаты.

В **главе 2** изучены особенности гидрологических процессов в стратифицированных бассейнах, влияющих на характеристики внутренних волн.

В п. 2.2 обсуждается географическое распределение и сезонное изменение индекса стратификации плотности на примере вод Охотского моря. В работе использовалась следующая формулировка: [см. напр. Ladd and Stabeno, 2012]

$$I = -\frac{1}{D} \int_{-D}^0 (\rho - \langle \rho \rangle) g z dz, \quad \langle \rho \rangle = \frac{1}{D} \int_{-D}^0 \rho dz. \quad (20)$$

Здесь $\rho(z)$ – плотность морской воды, g – ускорение силы тяжести, D – толщина столба воды (глубина моря). На рис. 1 приведены гистограммы распределения значений I для летнего и зимнего сезона. Значения этой величины в рассматриваемой акватории лежат в диапазоне от 0 до 3300 Дж/м³. Максимальные значения I в периоды тепловых экстремумов довольно близки и составляют 3132 Дж/м³ в зимний период и 3339 Дж/м³ в летний, средние соответственно равны 288 Дж/м³ и 345 Дж/м³. Из сравнения гистограмм распределения значений индекса стратификации видна разница между сезонами, летом индекс стратификации практически всюду более выражена, чем в зимний период.

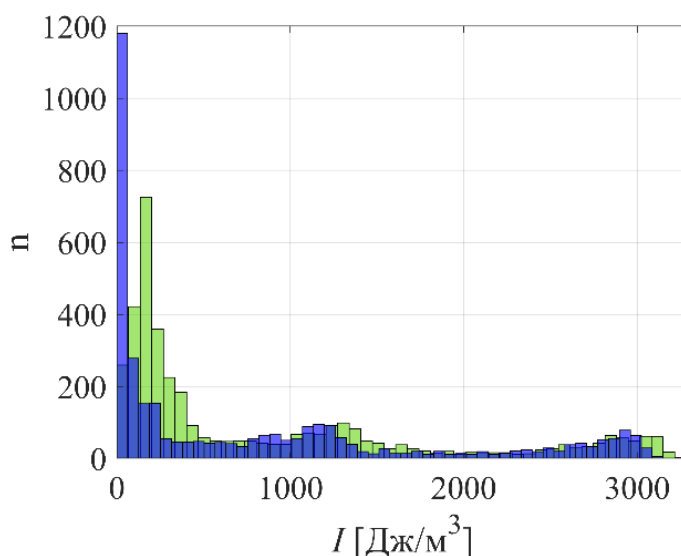


Рис. 1. Гистограммы распределений значений индекса стратификации I в Охотском море по данным WOA18, зеленый цвет – лето, синий – зима.

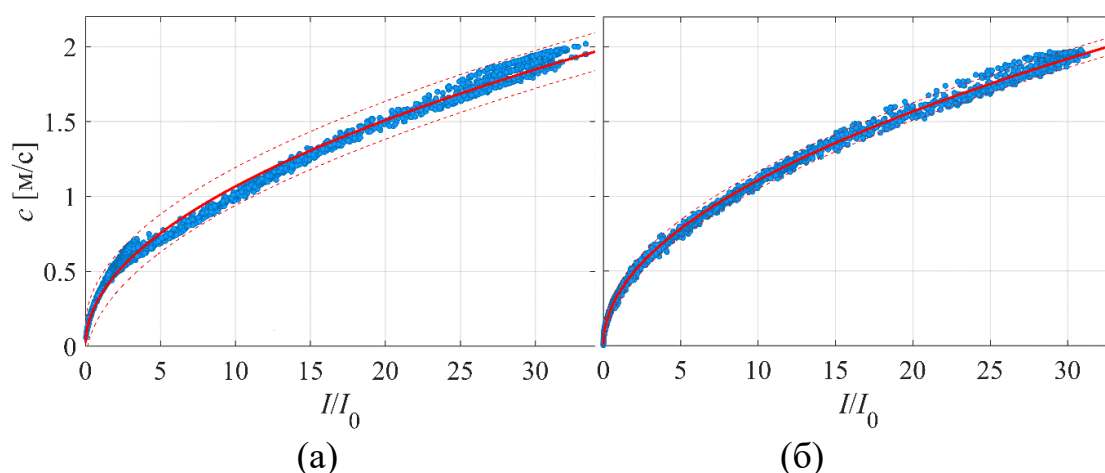


Рис. 2. Зависимость фазовой скорости c от индекса стратификации I/I_0 летом (а) и зимой (б). Красная сплошная линия – аппроксимация функцией $c = a(I/I_0)^{1/2}$, красным пунктиром показаны границы 99% доверительного интервала.

Параметризация фазовой скорости длинных внутренних волн с использованием индекса стратификации в Охотском море осуществляется с помощью

функции $c = a(I/I_0)^{1/2}$, где $I_0 = 100$ Дж/м³, $a = 0.3374 \pm 0.0011$ м/с для лета и $a = 0.3505 \pm 0.0006$ м/с с 99% доверительным интервалом, показана на рис. 2. Полученная аппроксимирующая функция очень точно описывает исходные точки (коэффициент достоверности $R^2 > 0.99$ как для летнего сезона, так и для зимнего) и может быть использована для упрощенных, быстрых оценок значений фазовой скорости длинных внутренних волн без численного решения дифференциальных уравнений вида (2).

В параграфе 2.3 описано географическое и сезонное распределение приливных сил, необходимое для анализа процессов возбуждения внутренних волн. Генерация внутренних приливов тесно связано с действием массовой силы плавучести, возникающей при обтекании неровностей дна баротропным приливом. Для расчета массовой силы плавучести мы используем формулу [Baines, 1982]:

$$F = -\frac{\vec{Q}\nabla D}{\omega D^2} \int_{-D}^0 z N^2(z) dz, \quad (22)$$

где \vec{Q} – максимальный горизонтальный поток воды (расход) для соответствующей приливной компоненты, D – как и ранее, локальная глубина моря, ∇D – градиент дна, рассчитанный на основе данных из атласа GEBCO, ω – соответствующая приливная частота.

Рассчитанные пространственные распределения величины F по формуле (22) в Охотском море характеризуются средними значениями порядка 0.02 м²/с² для приливной составляющей M_2 и 0.07 м²/с² для приливной составляющей K_1 (см., табл. 1). Однако медиана F намного ниже среднего значения, около 0.005 – 0.006 м²/с² для M_2 и 0.01 м²/с² для K_1 , что указывает на сильную положительную асимметрию распределений. До 80% значений F меньше среднего для всех приливных компонент и сезонов. С точки зрения суммарной силы, менее 16% площади вносят вклад в более чем 63% общего баротропного приливного воздействия для компоненты K_1 . В районе исследований полусуточная массовая сила плавучести значительно меньше, чем для суточных приливов.

Таблица 1.
Характеристики пространственного распределения массовой силы плавучести для различных приливных компонент для летнего и зимнего сезонов

		F_{\max} [м ² /с ²]	F_{mean} [м ² /с ²]	F_{median} [м ² /с ²]	% точек, где $F < F_{\text{mean}}$	% суммарной силы, обеспеченной значениями $F > 0.1$ м ² /с ²	% точек, где $F > 0.1$ м ² /с ²
K ₁	Лето	8.18	0.08	0.015	82.8	63.7	15.8
	Зима	8.08	0.07	0.011	83.2	61.8	14.5
O ₁	Лето	7.43	0.06	0.011	83.4	60.2	13.7
	Зима	6.40	0.06	0.009	84.2	53.3	7.2
M ₂	Лето	1.70	0.02	0.007	78.9	38.8	3.5
	Зима	2.33	0.02	0.005	81.7	39.9	3.7

Географическое распределение величины F показывает усиленное воздействие бароклинного прилива в районах с резкими изменениями рельефа дна, таких как шельф, подводные каньоны и хребты. На рис. 3 показано пространственное распределение F , рассчитанное по формуле (22), для Охотского моря для приливной компоненты K_1 .

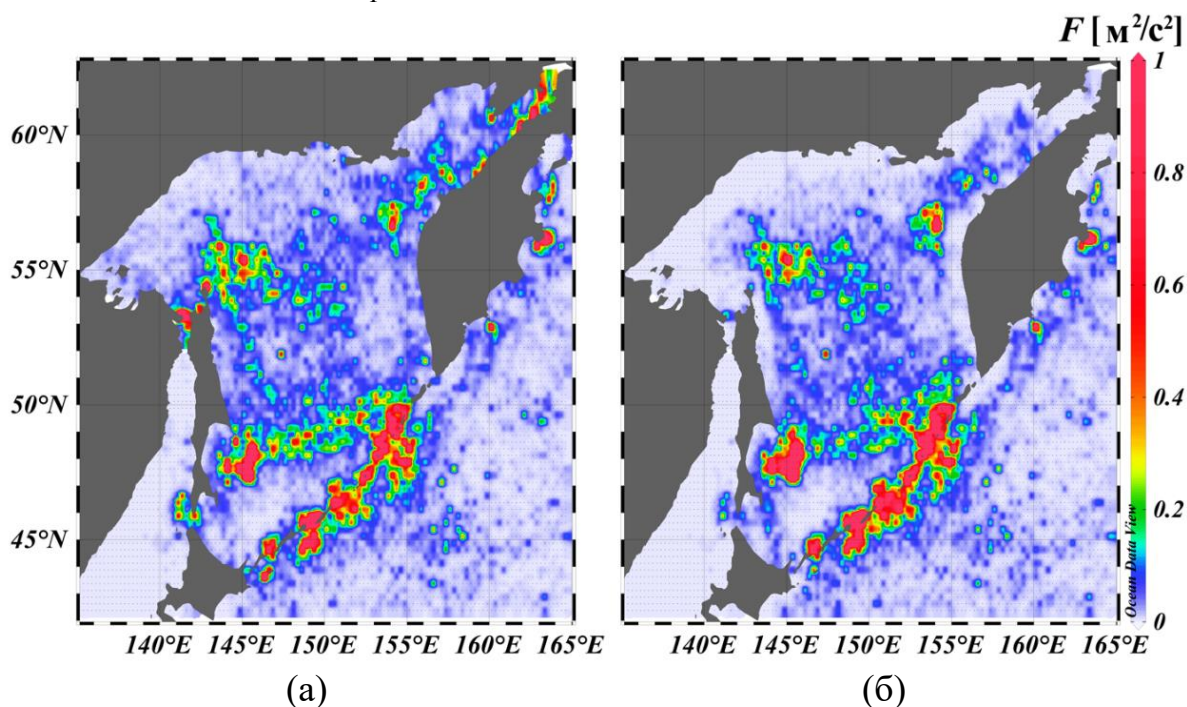


Рис. 3. Рассчитанные карты массовой силы плавучести для суточной (K_1) компоненты прилива (а) для летнего и (б) зимнего сезонов.

В параграфе 2.4 приведены результаты исследований **главы 2**.

В **главе 3** изучены особенности плотностной стратификации на примере Японского моря, как фона для развития процессов, связанных с внутренними волнами. В параграфе 3.2. рассчитаны и представлены в виде атласа карты плотностной стратификации и кинематических параметров внутренних волн. Наиболее сильная вертикальная стратификация плотности вод ожидаемо наблюдается летом и осенью. Соответственно, и кинематические параметры внутренних волн наиболее значительны в летне-осенний период. Показано, что такие линейные параметры, как скорость (рис. 4) распространения длинных внутренних волн и коэффициент дисперсии, для которых в Мировом океане сильна зависимость от батиметрии, имеют существенный разброс значений на одних и тех же глубинах и сильнее зависят от сезона.

Карты распределения возможных типов уединенных волн (солитонов) (рис. 5) представлены в параграфе 3.3. Из рис. 6 видно, что и зимой, и летом на основной части моря, согласно расчетам, должны преобладать солитоны из «голубого» квадранта, то есть солитоны уравнения Гарднера с положительным кубическим и отрицательным квадратичным параметрами нелинейности. На самом деле, поскольку коэффициент кубической нелинейности в центральной части моря достаточно мал, особенно зимой, это должны быть практически солитоны уравнения Кортевега – де Вриза отрицательной полярности.

В параграфе 3.4 приведены результаты исследований **главы 3**.

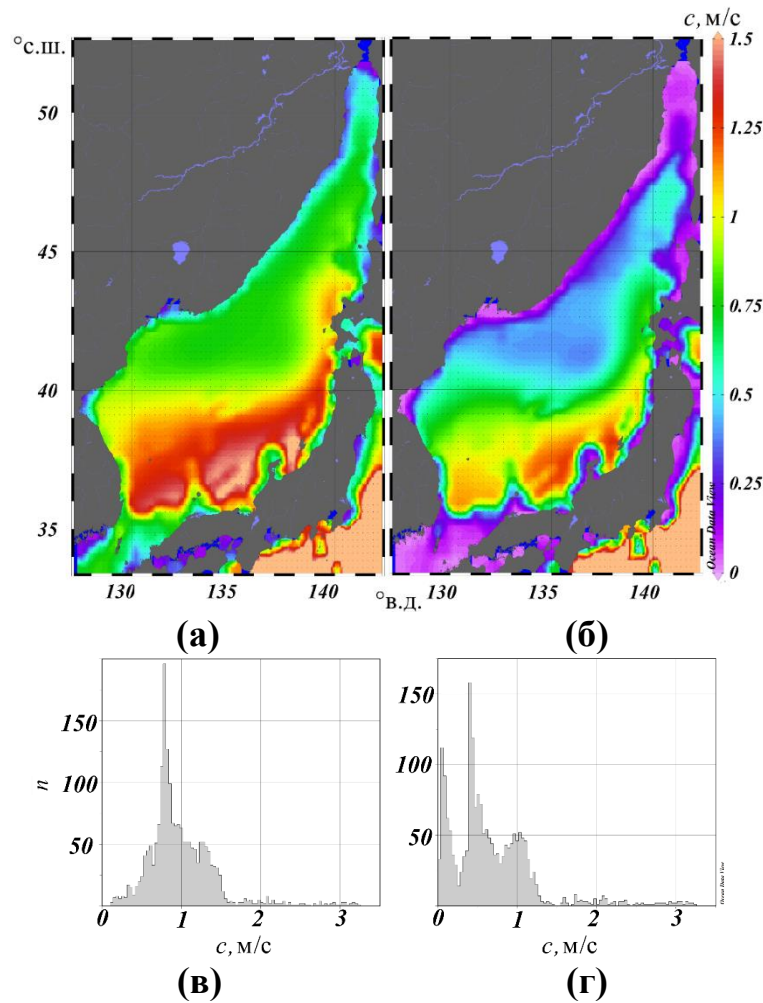


Рис. 4. (а, б) – карта скоростей распространения c [м/с] длинных линейных внутренних волн низшей моды, (в, г) – гистограмма распределения значений c . (слева – лето, справа – зима).

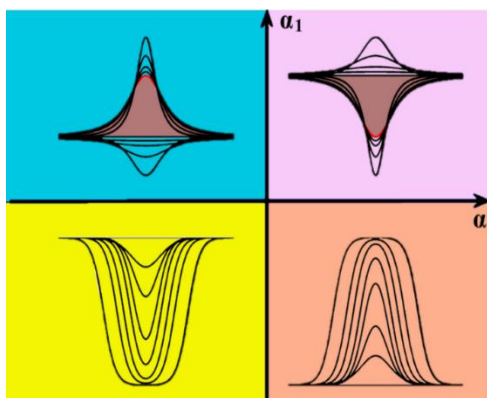


Рис. 5. Возможные типы солитонов на плоскости параметров квадратичной и кубической нелинейности (α , α_1)

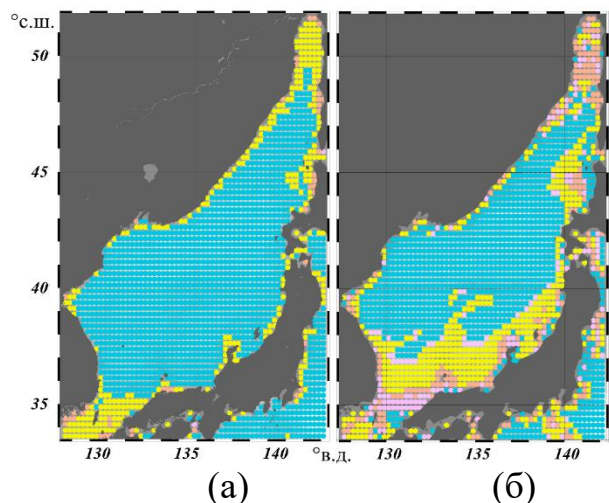


Рис. 6. Географическое распределение по возможным типам солитонов (а – лето, б – зима). Возможные типы обозначены цветом соответственно рис. 5.

Глава 4 показывает, как нелинейная теория внутренних волн и существующие базы данных гидрологии Мирового океана позволяют провести анализ

различных режимов внутренних волн в морях, для объяснения натуральных данных и в прогностических целях.

В параграфе 4.2 приведен анализ натуральных измерений пакетов короткопериодных внутренних гравитационных волн, выполненных ТОИ им. В. И. Ильичёва ДВО РАН в Японском море. Гистограммы повторяемости высот и периодов волн в записи смещения изотермы 4°C показаны на рис. 7 соответственно. Отметим, что высоты всех рассматриваемых волн лежат в диапазоне 0,5–10 м, периоды – в интервале 2–60 мин. Средняя высота волны составляет 1,6 м, среднеквадратическое отклонение высоты 1,12 м; средний период равен 12 мин, среднеквадратическое отклонение 7,4 мин. Оба распределения хорошо аппроксимируются теоретическим логнормальным законом распределения.

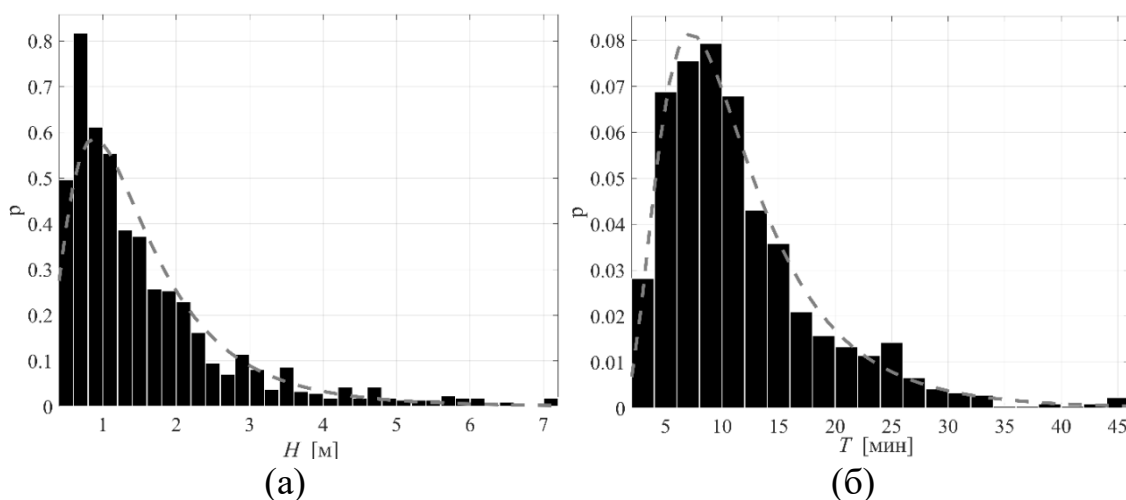


Рис. 7. Распределение высоты (а) и периодов волн (б) и их аппроксимации (пунктир) логнормальным законом распределения.

Оценки ожидаемых высот внутренних волн за периоды в 10, 30, 60 и 90 дней приведены в табл. 2.

Таблица 2.

Ожидаемые высоты внутренних волн в метрах, превышаемые хотя бы 1 раз за указанный период времени. В скобках указан 95%-ый доверительный интервал, м

	Период времени, за который высота волны будет превышена хотя бы 1 раз (дни)				Максимальная высота волны (из набл), м
	10	30	60	90	
Ожидаемая высота (м)	7.04 (5.12; 8.91)	8.25 (6.1; 10.36)	9.02 (6.72; 11.28)	9.47 (7.08;11.81)	9.73

В параграфе 4.3 приводится исследование гидрологических условий существования внутренних волн на примере Балтийского моря на основе натуральных измерений. Из рис. 8, на котором приведены дисперсионные кривые,

видно, что для рассмотренной акватории Балтийского моря свойственно плавное изменение частоты внутренних волн с уменьшением длины волны, а также присутствуют зоны сгущения.

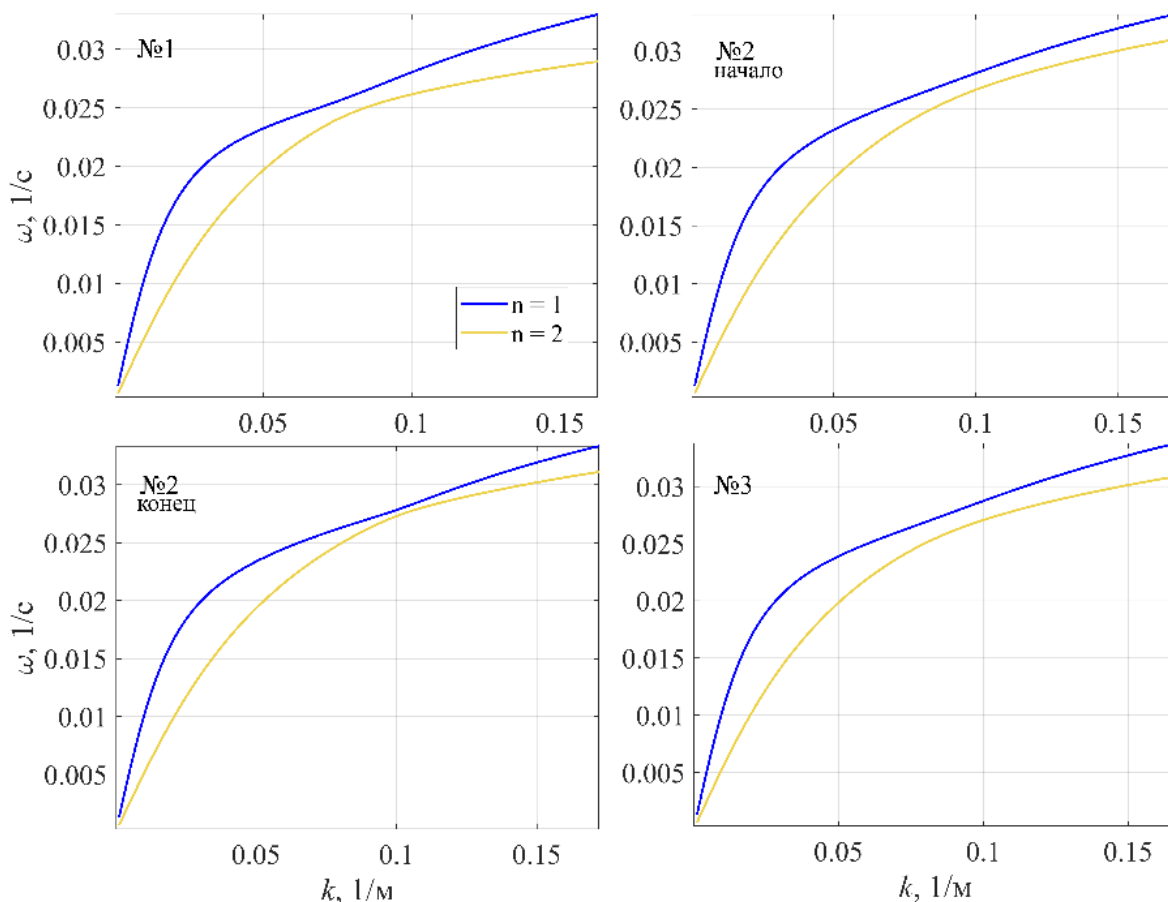


Рис. 8. Дисперсионные кривые трех низших мод внутренних волн.

Из дисперсионного соотношения, при известных значениях частоты внутренних волн, несложно вычислить групповую (c_g) и фазовую скорости (c_{ph}). Скорости изменяются в пределах от 0.4 м/с до 1.1 м/с и уменьшаются, как и ожидалось, с уменьшением длин волн.

В параграфе 4.4 обсуждается модовый состав полнонелинейного волнового поля смещений изопикнических поверхностей, полученных в результате численного моделирования. Разложение длинноволнового поля выглядит следующим образом:

$$\zeta(x, z, t) = \sum_n A_n(x, t) \Phi_n(z), \quad (23)$$

где
$$A_n(x, t) = \frac{\int_0^H \zeta(x, z, t) \Phi_n(z) N^2(z) dz}{\int_0^H \Phi_n(z) N^2(z) dz},$$
 n – номер моды, $\Phi_n(z)$ – модовая функция,

которая находится из решения задачи Штурма-Лиувилля (1) или (2), $A_n(x)$ – амплитуда бароклинных мод. Разложение можно произвести для любого числа n .

На примере поля плотности из результатов моделирования распространения локализованного внутреннего возмущения в виде осциллирующего волнового пакета (бризера) первой моды в трехслойной жидкости с неровным дном в виде сглаженной ступеньки [Лобовиков и др., 2019] показано разложение на бароклинные моды. Исходное волновое поле показано на рис. 9.

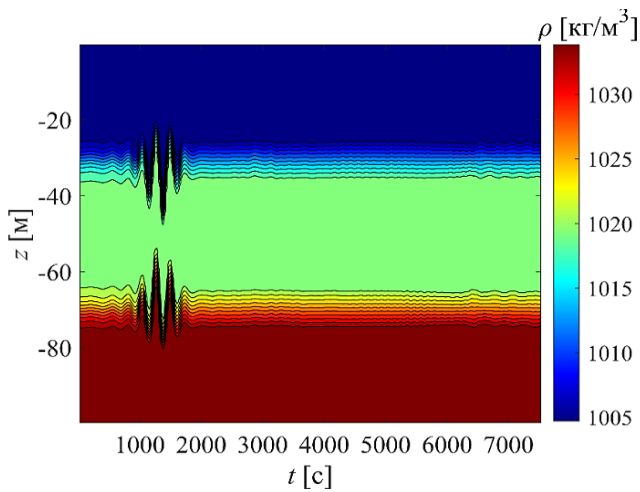


Рис. 9. Распределение поля плотности от времени в точке расчетной области $x^* = 11300$

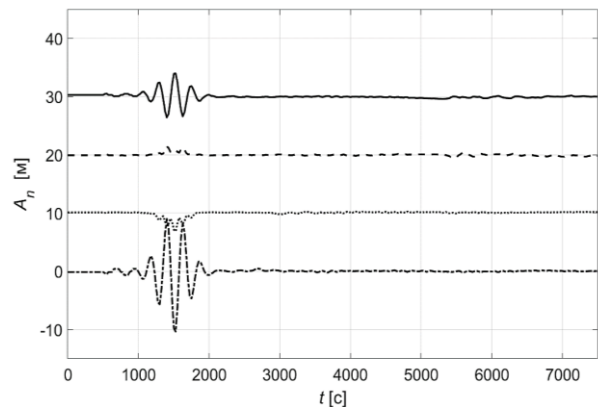


Рис. 10. Амплитуды теоретических мод $A_n(x^*, t)$ ($1 \leq n \leq 4$) в точке расчетной области $x^* = 11300$ м (--- мода 1; мода 2 (волна этой моды смещена на 10 м); -.-.- мода 3 (волна этой моды смещена на 20 м); — мода 4 ((волна этой моды смещена на 30 м)))

Из рис. 10 видно, что первая мода дает наибольший вклад в вертикальную структуру полнонелинейного бризера, поскольку в качестве начального условия использовался бризер первой моды. Однако, следует отметить, что возмущение второй моды имеет форму огибающей волнового пакета, а поправка четвертой моды в момент прохождения бризера через выбранную точку трассы распространения имеет форму самого волнового пакета и сравнимую с первой модой амплитуду. Слабые отраженные волны, пришедшие в рассматриваемую точку после 5000 с, наиболее заметны в поле третьей и четвертой моды

В параграфе 4.5 проведен расчет внутренних волновых пучков (с учетом неровностей дна) как для модельных условий, так и для реальных условий на шельфах российских морей. Волновые лучи, или пучки (beams), определяются из уравнения:

$$\frac{dz}{dx} = \pm \sqrt{\frac{\omega^2 - f^2}{N^2(z) - \omega^2}}, \quad (24)$$

Для акватории Балтийского моря с использованием данных наблюдений (гидрологические условия и временные ряды солености и температуры, описанные в параграфе 4.3) показано, что время движения волнового пучка между пикноклинами согласуется с результатами корреляционного анализа измеренного сигнала. На рис. 11 представлены рассчитанные численно для исследуемой акватории (при условии ровного дна, с отражением от морской поверхности и от дна) лучи, вдоль которых распространяется энергия внутреннего волнового поля. Лучи рассчитаны для периодов 30 минут и 1 час. Пучок, соответствующий периоду 30 минут, проходит расстояние от поверхности до дна за 34 минуты, при этом распространяясь на расстояние 2.32 км по горизонтали. Видно также, что лучи испытывают значительное преломление на пикноклинах. Для известной батиметрии бассейна лучи могут быть рассчитаны с учетом неоднородностей дна.

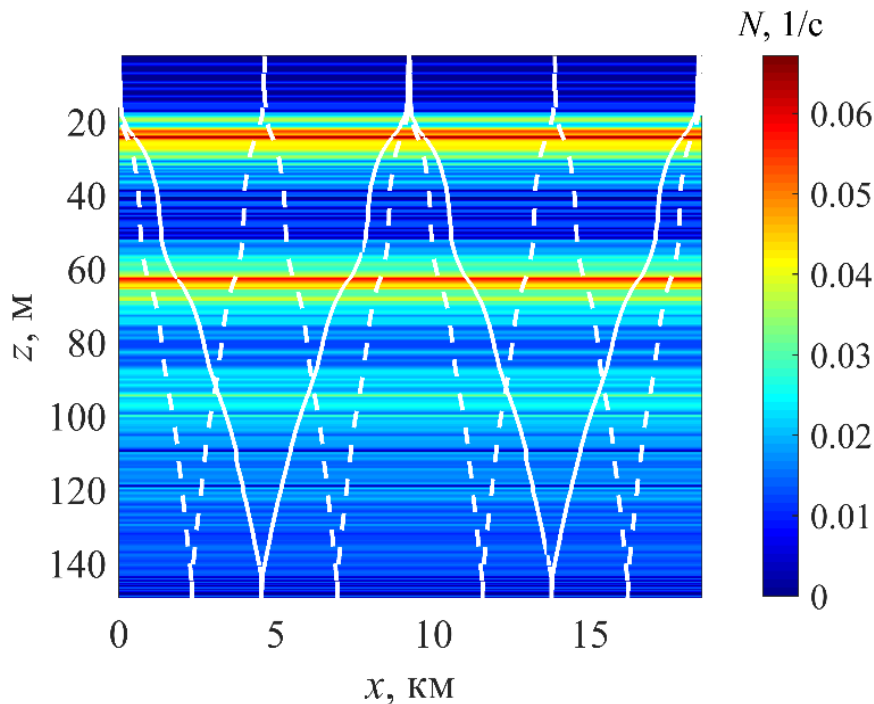


Рис. 11. Структура внутренних волновых пучков с частотой, соответствующей периоду один час (сплошная линия) и соответствующая периоду 30 мин (штриховая линия) для исследуемой акватории.

В параграфе 4.6 проводится численное моделирование поля внутренних волн в летний период на шельфе полуострова Камчатка и анализ их транспортных свойств в рамках слабонелинейной теории. Для условий шельфа полуострова Камчатка в Охотском море характерна трансформация приливной волны в солибор на континентальном склоне, причем при приближении к берегу про-

исходит достаточно стремительное нарастание амплитуды солитонов внутренних волн. Очевидно, что генерация солибора на шельфе приводит к возникновению достаточно сильных течений, индуцированных внутренними волнами, амплитуда которых превышает амплитуду приливных течений. При этом интенсивные придонные потоки, индуцированные внутренними солитонами отрицательной полярности, распространяющимися в сторону берега, могут осуществлять транспорт донных отложений в глубоководные области. Результаты расчетов показали, что приблизительно до 140 км вдоль расчетной области не наблюдается движения донных отложений, однако, на расстоянии 180 км от начальной точки трассы распространения видно, что перестройка волнового поля и его амплификация приводят к появлению придонных скоростей, достаточных для транспорта частиц на отдельных участках трассы (рис. 12).

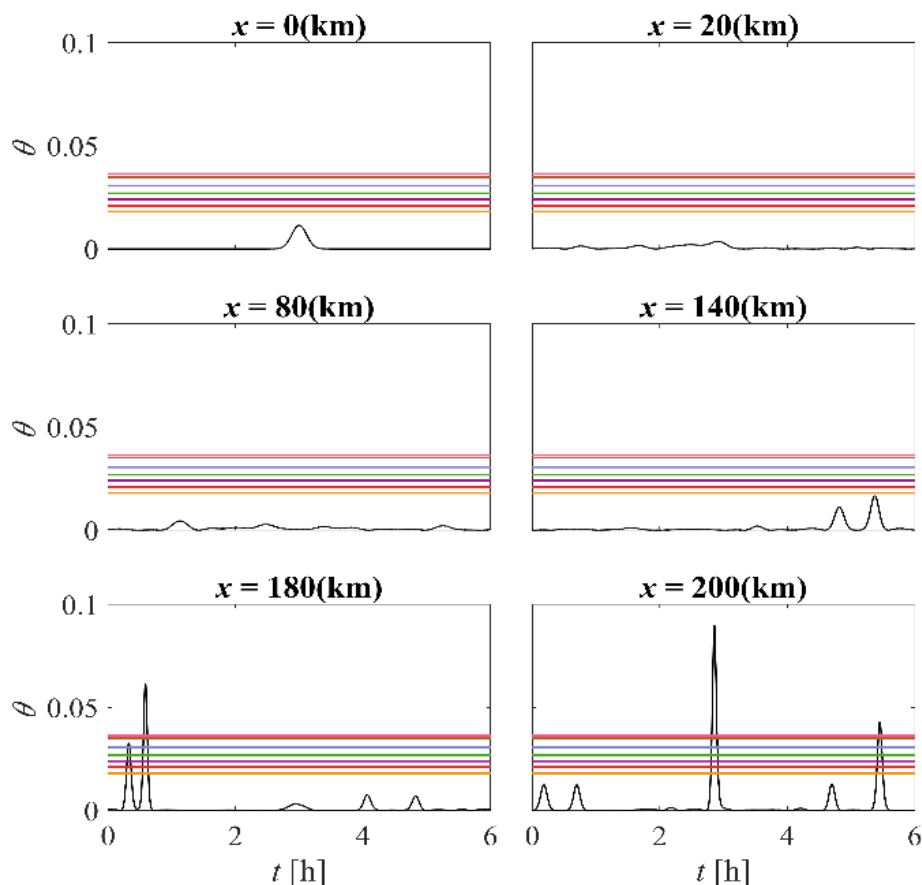


Рис. 12. Временной ряд параметра Шилдса θ в точках трассы 0, 20, 80, 140, 180, 200 км (черная линия); цветными горизонтальными линиями показаны вероятностные уровни (см., рис. 13)

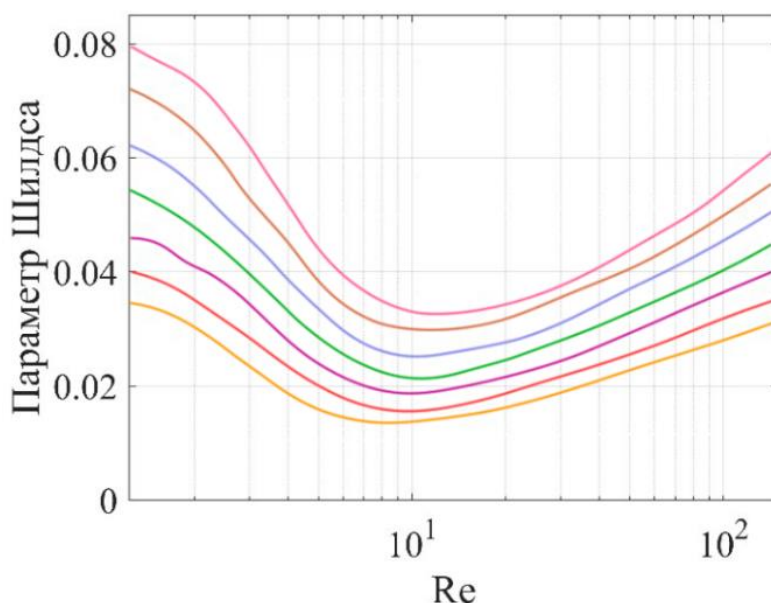


Рис. 13. Плоскость параметров Шилдса θ и Рейнольдса Re .

— случайное движение частиц на некоторых участках; — частичное движение частиц на некоторых участках; — частичное движение частиц на многих участках; — частичное движение частиц почти на всех участках; — частичное движение частиц на всех участках; — постоянное движение частиц на всех участках; — общий транспорт (инициация эволюция профиля дна).

В параграфе 4.7 приведены результаты исследований **главы 4**.

В **Заключении** диссертационной работы перечислены основные результаты исследований.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Выявлена сильная корреляция между скоростью распространения внутренних волн и индексом стратификации, позволяющая выполнять экспресс-оценки скоростей волн без решения краевой задачи Штурма-Лиувилля.
2. Показано, что массовая сила плавучести суточного прилива значительно превышает силу полусуточных приливов практически повсеместно в Охотском море. Максимальные значения данной величины характерны для районов с резким батиметрическим уклоном.
3. Обработан долговременный ряд профилей температуры длительностью около 210 часов, полученный в шельфовой зоне Японского моря по данным инструментальных наблюдений ТОИ ДВО РАН. В записи было идентифицировано более 1000 короткопериодных внутренних волн с высотами 1—10 м при общей глубине в точке измерений 42 м, что указывает на нелинейный характер поля внутренних волн. Оценены вероятности появления интенсивных возмущений.
4. На основе имеющихся гидрологических данных рассчитаны и представлены в виде атласа карты кинематических параметров внутренних волн на примере Японского моря. Они использованы для построения карт возможных типов локализованных внутренних волн и предельных амплитуд различных семейств солитонов для этого бассейна. Типичными являются солитоны отрицательной

полярности (с понижением пикноклина). «Толстые» солитоны теоретически могут встречаться в прибрежных зонах.

5. Исследованы режимы многомодового распространения внутренних волн в природных водоемах. Корреляционный анализ измеренных сигналов свидетельствует в пользу лучевого характера распространения внутренних волн в таких регионах, траектории лучей рассчитаны для реальных условий с учетом переменной глубины.
6. Показано, что распространение внутреннего волнового пакета умеренной амплитуды приводит к значительному увеличению донных скоростей, так что волновой пакет может способствовать взвешиванию осадков и транспорту донных отложений на значительных расстояниях.
7. Разработана и реализована (https://lfnad.nntu.ru/ru/projects/property_IW/) геоинформационная онлайн-система, которая дает возможность провести анализ кинематических и нелинейных характеристик внутренних волн по имеющимся данным натурных наблюдений.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зимин А. В., Свергун Е. И., Атаджанова О. А. Прогноз повторяемости интенсивных внутренних волн в Белом море //Комплексные исследования Мирового океана. – 2017. – С. 243-244.
2. Миropольский Ю.З. Динамика внутренних гравитационных волн в океане. – Гидрометеoиздат, 1981.
3. Baines P. G. On internal tide generation models //Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers. – 1982. – Т. 29. – №. 3. – С. 307-338.
4. Boyer T.P., Garcia H.E., Locarnini R.A., Zweng M.M., Mishonov A.V., Reagan J.R., Weathers K.A., Baranova O.K., Seidov D., Smolyar I.V. World Ocean Atlas 2018. [temperature, salinity]. NOAA National Centers for Environmental Information. Dataset. [Electronic resource] <https://www.ncei.noaa.gov/archive/accession/NCEI-WOA18>.
5. Egbert G. D., Erofeeva S. Y. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides //Journal of Atmospheric and Oceanic technology. – 2002. – Т. 19. – №. 2. – С. 183-204.
6. Ladd C., Stabeno P. J. Stratification on the Eastern Bering Sea shelf revisited //Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. – 2012. – Т. 65. – С. 72-83
7. Talipova T. Pelinovsky E., Kurkina O., Giniyatullin A., Kurkin A. Exceedance frequency of appearance of the extreme internal waves in the World Ocean //Nonlinear Processes in Geophysics. – 2018. – Т. 25. – №. 3. – С. 511-519.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК и/или входящих в международные базы цитирования WoS и Scopus:

- К 1. Лобовиков П.В., Куркина О.Е., Куркин А.А., **Кокоулина М.В.** Трансформация бризера внутренних волн первой моды над вертикальным уступом в трехслойной жидкости //Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2019. – Т. 55. – №. 6. – С. 182-193.

- К 2. **Кокоулина М.В.**, Куркина О.Е., Рувинская Е.А., Куркин А.А. Вероятностные характеристики интенсивных короткопериодных внутренних волн в Японском море // Морской гидрофизический журнал. – 2020. – Т. 36. – №. 5 (215). – С. 545-558.
- К 3. **Кокоулина М.В.**, Куркина, О.Е., Рувинская Е.А., Куркин А.А. Гидрологические условия и эпизоды наблюдений внутренних волн в Балтийском море в сентябре 2019 г. // Экологические системы и приборы. – 2022. – №. 10. – С. 78-90.
- К 4. **Кокоулина М.В.**, Куркина О.Е., Рувинская Е.А., Куркин А.А. Geographical and seasonal distribution of tidal body force field in the Sea of Okhotsk in the context of internal wave dynamics // Russian Journal of Earth Sciences. – 2022. – №. 6. – С. ES6013.
- К 5. **Кокоулина М.В.**, Куркина О.Е., Куркин А.А., Епифанова А.С., Епифанов С.А. Особенности гидрологических условий в Охотском море, влияющих на характеристики внутренних волн // Экологические системы и приборы – 2023. – № 7. – С. 3-17.
- К 6. **Кокоулина М.В.**, Куркина О.Е., Талипова Т.Г., Куркин А.А., Пелиновский Е.Н. Особенности среднеклиматических характеристик внутренних волн в Японском море на основе атласа WOA18 // Морской гидрофизический журнал. – 2023. – № 5.
- К 7. **Кокоулина М.В.**, Епифанова А.С., Куркина О.Е., Куркин А.А., Винокуров М.С., Епифанов С.А. Океанографическая геоинформационная онлайн-система для расчета и анализа характеристик внутренних волн в стратифицированных бассейнах // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2023. – №3. – С. 18-29.

Тезисы докладов на международных и всероссийских конференциях:

- К 8. Куркина О.Е., Куркин А.А., **Кокоулина М.В.** Идентификация бароклинных мод в волновых полях в стратифицированных бассейнах // Нелинейные задачи теории гидродинамической устойчивости и турбулентность. – 2018. – С. 179-179.
- К 9. **Kokoulina M.**, Kurkina O., Rouvinskaya E., Kurkin A., Giniyatullin A. Statistics of field data on internal waves // 14th MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation, MEDCOAST 2019. – 2019. – С. 733-743.
- К 10. **Кокоулина М.В.**, Талалушкина Л.В., Куркина О.Е., Гиниятуллин А.Р. Моделирование поля внутренних волн и оценка их транспортных свойств на шельфе полуострова Камчатка // Материалы 31-й Всероссийской научно-методической конференции по графическим информационным технологиям и системам «КОГРАФ-2021». – Нижний Новгород, 2021. – С. 231-235.
- К 11. **Кокоулина М.В.**, Куркина О.Е., Куркин А.А. Прототип океанографической геоинформационной онлайн системы для расчета характеристик длинных короткопериодных внутренних волн в Охотском море // Материалы IV Всероссийской конференции с международным участием «Геодинамические процессы и природные катастрофы», – Южно-Сахалинск, 2021. – С. 80.
- К 12. **Кокоулина М.В.**, Куркина О.Е., Куркин А.А. Расчет пучков внутренних волн, возбуждаемых баротропным приливом в зоне морского шельфа // Моря России: Вызовы отечественной науки. Тезисы докладов Всероссийской научной конференции. – Севастополь, 2022. – С. 90-91.

Авторские свидетельства:

- К 13. Куркина О.Е., Куркин А.А., Гиниятуллин А.Р., Рыбин А.В., **Кокоулина М.В.** Программный комплекс для идентификации теоретических и эмпирических вертикальных бароклинных вод в волновых полях в стратифицированных бассейнах. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2017660434 от 21.09.2017.
- К 14. **Кокоулина М.В.**, Рувинская Е.А., Куркина О.Е., Куркин А.А., Гиниятуллин А.Р. Программный комплекс для оценки транспортных свойств поля внутренних волн в придонном пограничном слое. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2019664184 от 01.11.2019.
- К 15. **Кокоулина М.В.**, Куркина О.Е., Куркин А.А. Программный комплекс для расчета траекторий внутренних волновых пучков на стратифицированном неоднородном шельфе. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2021617341 от 13.05.2021.

- К 16. **Кокоулина М.В.**, Куркина О.Е., Рувинская Е.А., Куркин А.А. Программный комплекс для расчета индекса стратификации морской воды в выбранной акватории Мирового океана на основе данных гидрологического атласа WOA18. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2022666337 от 30.08.2022.
- К 17. **Кокоулина М.В.**, Куркина О.Е., Рувинская Е.А., Куркин А.А. Программный комплекс для расчета объемной силы прилива в стратифицированном море с неровным дном на основе международных атласов и моделей. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2022665027 от 09.08.2022.