

На правах рукописи



Химченко Елизавета Евгеньевна

**ВНУТРЕННИЕ ВОЛНЫ В ШЕЛЬФОВОЙ ЗОНЕ
ЧЕРНОГО МОРЯ**

Специальность 25.00.28 – Океанология

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата географических наук

Москва – 2019

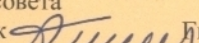
Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук

- Научный руководитель:** Доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник
Серебряный Андрей Нинелович
- Официальные оппоненты:** **Дианский Николай Ардальянович,** доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник кафедры физики моря и вод суши (Физический факультет, Отделение геофизики) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова»
Башмачников Игорь Львович, кандидат географических наук, доцент, старший научный сотрудник Научного фонда «Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена»
- Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук"

Защита состоится «10» декабря 2019 г. в 12 ч. 00 мин. на заседании Диссертационного совета Д 002.239.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук по адресу: Нахимовский пр., д. 36, г. Москва, 117997.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://www.dissser.ocean.ru> Института океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук.

Автореферат разослан «18» октября 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук  Винзбург Анна Ивановна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Внутренние волны в океанах и морях в существенной мере определяют изменчивость толщи водной среды в широких диапазонах пространственных и временных масштабов (Коняев, Сабинин, 1992; Gerkema and Zimmerman, 2008). Интенсивные внутренние волны способствуют перемешиванию вод и, тем самым, обогащению их кислородом и питательными веществами. В связи с этим, исследования внутренних волн приобретают определяющее значение для понимания процессов обмена в океанах и морях.

Хотя Черное море является замкнутым и практически бесприливным, в нем существует достаточно развитое поле внутренних волн. В связи со спецификой природы и сложностью строения внутренних волн для понимания их особенностей в бесприливном море необходимо проводить сбор информации о них как можно более длительное время, охватывая различные районы и акватории. Наличие нового высокоточного океанологического оборудования в современных наблюдениях позволяет более детально изучить особенности строения и параметры наблюдаемых внутренних волн, продвинуться в понимании природы внутренних волн и их свойств по сравнению с ранними исследованиями.

Несмотря на то, что изучение внутренних волн ведется на протяжении многих десятков лет, эта тема по-прежнему остается актуальной. Современные исследования дают новые результаты, в частности, обнаружение внутренних волн 2-ой моды (колебания верхних и нижних слоев водной толщи в противофазе). До недавнего времени считалось, что высшие моды внутренних волн, существование которых предсказывает теория, практически не встречаются в реальной океанской среде. Сравнительно недавно появились свидетельства наблюдений внутренних волн 2-ой моды в океане (Konyaev et al., 1995; Yang et al., 2009; Shroyer et al., 2010; Serebryany, 2018).

Таким образом, натурные наблюдения внутренних волн, а также научные проблемы, связанные с организацией их измерений, интерпретацией и

обобщением полученных результатов, по-прежнему остаются актуальной задачей современной океанологии.

Основная цель работы: исследовать особенности внутренних волн на различных типах шельфа Черного моря с применением современных средств и методов наблюдений. Представленная работа, основанная на долговременных полевых измерениях, также ставит своей целью пополнение знаний о поле черноморских внутренних волн. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- Проведение долговременных измерений внутренних волн в различных районах Черного моря (на крымском, геленджикском и абхазском шельфах) в условиях развитого сезонного термоклина;
- Обработка и статистический анализ полученных данных в диапазонах коротких и инерционных внутренних волн;
- Исследование изменчивости частотных спектров внутренних волн для различных районов;
- Исследование влияния внутренних волн на поле скорости звука на шельфе Черного моря;
- Выявление модового состава внутренних волн;
- Сравнение и выявление особенностей внутренних волн на крымском, абхазском и геленджикском шельфах Черного моря;
- Сравнение параметров короткопериодных внутренних волн бесприливных морей в условиях различной солености вод (на примере Черного и Аральского морей).

Научную новизну исследования составляют **основные положения, выносимые на защиту:**

1. Сравнением наблюдаемых внутренних волн инерционного и короткопериодного диапазонов на трех типах шельфа Черного моря (пологом у побережья Геленджика, приглубом у побережья Крыма, узком и крутом шельфе Абхазии) установлено, что наибольшие амплитуды инерционных внутренних волн характерны для узкого шельфа, короткие

внутренние волны на трех типах шельфа имеют схожие параметры (периоды – от нескольких минут до первых десятков минут, длины волн – от нескольких десятков до нескольких сотен метров), с несколько отличающимися высотами волн. На крутом абхазском шельфе чаще регистрируются внутренние волны высотой 5–6 и более метров, на геленджикском обнаружены короткопериодные волны рекордных для Черного моря высот (до 16 м), связанных с прохождением атмосферного фронта над морем.

2. В измерениях на Черном море выявлены внутренние волны 2-ой моды как инерционного, так и короткопериодного диапазона.
3. Обнаружено аномальное поведение годографов течений в инерционных движениях на крымском шельфе: зарегистрировано вращение эллипсов течений с инерционным периодом против часовой стрелки, обусловленное средней фоновой циклонической завихренностью Черного моря и сильной изменчивостью прибрежных вдольбереговых течений в море.
4. Установлено, что подход внутреннего бора на крымском шельфе был обусловлен внедрением в прибрежную зону придонного западного течения, резко сменившего наблюдавшееся до этого восточное течение. Показано, что внутренний бор оказывает сильное влияние на положение звукорассеивающих слоев и приводит к искажениям профиля скорости звука.
5. Продемонстрировано сильное влияние квазиинерционных внутренних волн на изменчивость профиля скорости звука в шельфовых водах Черного моря. При подходе интенсивных внутренних волн (высотой более 10 м и со значительной нелинейностью) перепады значений скорости звука на отдельных горизонтах достигают 20–25 м/с.
6. Выявлены различия в параметрах наблюдаемых короткопериодных внутренних волн в двух бесприливных морях (Черном и Аральском) с существенно различной соленостью вод. Из-за повышенной вязкости вод, обусловленной высокой соленостью (более 120 епс), внутренние волны

гипергалинного Аральского моря развиваются в основном в узком слое термоклина, что ограничивает их развитие по высоте (волны редко достигают высоты более 1–2 м). Однако они отличаются большей длиной (170 м для волн с периодом 5 мин) и скоростью распространения (0,6 м/с) по сравнению с черноморскими аналогами (90 м и 0,3 м/с соответственно).

Достоверность научных результатов и выводов работы обеспечивается проведением контактных измерений современными калиброванными приборами (зонд miniSVP фирмы «Valeport», точечные датчики «Star-Oddi» типа DST centi, доплеровский акустический измеритель течений ADCP «RioGrande 600 kHz»), широко использующимися в мировой практике, а также подробным анализом натурных данных с применением апробированных программ обработки и визуализации данных. Контактные измерения в период с 2009 по 2018 гг. проводились с использованием единой методики измерения внутренних волн со стационарных платформ (проведение ежечасных зондирований, непрерывное измерение температуры на отдельных горизонтах и непрерывное наблюдение за течениями от поверхности до дна).

Научное и практическое значение исследования. Полученные в результате исследования данные о параметрах наблюдаемых внутренних волн могут быть использованы для разработки теоретических и численных моделей циркуляции вод и динамических процессов в море, при анализе проявлений внутренних волн по данным дистанционного зондирования, а также для возможного прогнозирования внутриволнового поля в море. Изучение короткопериодных внутренних волн в бесприливном море позволяет наблюдать неприливные механизмы их генерации, которые трудно отделить в условиях приливного моря (например, генерация подходящими сгонно-нагонными фронтами).

Личный вклад автора характеризуется следующей деятельностью:

1. Участие в проведении измерений в Черном море в 2009–2014 и 2018 гг., в ходе которых получены данные, послужившие основой диссертации;
2. Проведение прямых измерений внутренних волн в Аральском море в 2013 г.;

3. Выполнение обработки и анализа данных наблюдений;
4. Участие в интерпретации полученных результатов;
5. Подготовка результатов к опубликованию, а также представление их на российских и международных научных конференциях и семинарах.

Апробация работы. Материалы диссертации были представлены и обсуждались на заседании Ученого совета Физического направления Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (апрель 2018 г., январь 2019 г.), ежегодной ассамблее Европейского сообщества наук о Земле (EGU) в Вене, Австрия (2013–2015 гг.), Всероссийских открытых конференциях "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса" (г. Москва, 2013–2018 гг.), Четвертой международной школе-семинаре «Спутниковые методы и системы исследования Земли» (г. Таруса, 2013 г.), школах-семинарах им. акад. Л.М. Бреховских "Акустика океана" (г. Москва, 2013, 2016, 2018), Международной конференции по нелинейным эффектам внутренних волн (Conference on Nonlinear Effects in internal waves, Cornell University, г. Итака, США, 2014 г.), Международной конференции "Forum Acousticum" (г. Краков, Польша, 2014 г.), на 8-ом Международном симпозиуме по стратифицированным течениям (ISSF) в г. Сан-Диего, США (2016 г.), на молодежных конференциях "Комплексные исследования Мирового океана" (КИМО) в Москве (2017 г.), Санкт-Петербурге (2018 г.) и Севастополе (2019 г.), на ежегодной конференции "Методы и средства океанологических исследований" (МСОИ) в Москве (2019 г.), на Второй Всероссийской акустической конференции в Нижнем Новгороде (2017 г.), на Совместной Ассамблее IAPSO–IAMAS–IAGA в Кейптауне, ЮАР (2017 г.), на Международном семинаре Teledyne Marine Workshop Europe 2018 в Каннах, Франция (2018 г.), на Международном симпозиуме "Мезомасштабные и субмезомасштабные процессы в гидросфере и атмосфере" (Москва, 2018 г.), а также на Международном симпозиуме «Акустика жидких сред» (IFA 2019 г.) в Сопоте, Польша.

Публикации соискателя по теме диссертации. Материалы диссертации полностью изложены в работах, опубликованных соискателем. По теме диссертации опубликовано 30 работ, из которых 7 статей в рецензируемых научных изданиях из списка, рекомендованного ВАК, 3 статьи в других рецензируемых изданиях, 2 главы в монографиях, 18 статей и тезисов в сборниках докладов российских и международных научных конференций. Еще одна статья из списка, рекомендованного ВАК, принята к печати.

Благодарности. Автор выражает признательность и благодарность своему научному руководителю д.ф.-м.н. Серебряному А.Н. за возможность участия в экспедициях на Черное море, общее руководство работой, ценные советы и всестороннюю поддержку на всех этапах работы над диссертацией. Автор благодарна академику РАН, д.ф.-м.н. Иванову В.А. за помощь в выборе направления научной деятельности, а также к.т.н. Кузнецову А.С. за постоянную поддержку и помощь в проведении экспедиционных работ на платформе МГИ РАН. Автор признательна д.ф.-м.н. Морозову Е.Г. за внимание к работе, а также конструктивные замечания, которые позволили ее улучшить. Автор выражает благодарность к.ф.-м.н. Гончарову В.В. за отзывчивость и помощь во время работы над диссертацией, а также к.г.н. Островскому А.Г. за интерес к диссертационной работе и полезные рекомендации. Автор благодарит член-корр. РАН, д.г.н. Завьялова П.О. за предоставленную возможность участия в экспедиции на Аральское море и всестороннюю помощь. Автор выражает благодарность соавторам публикаций за плодотворное сотрудничество, а также всем, с кем посчастливилось работать в экспедициях на Черном и Аральском морях. Особая благодарность выражается семье и друзьям за терпение и поддержку при подготовке автором диссертации.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников литературы. Объем работы составляет 160 страниц, включая 119 рисунков и 5 таблиц. Библиографический список включает в себя 174 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** представлены обоснование актуальности темы, основная цель исследования, поставленные задачи, основные защищаемые положения, достоверность полученных результатов, научная и практическая значимость, личный вклад автора, апробация результатов исследования и список опубликованных диссертантом работ.

Глава 1 носит обзорный характер. В ней кратко изложены общие сведения о явлении внутренних волн в океане (**раздел 1.1**), представлен литературный обзор о наблюдении внутренних волн в Черном море (**раздел 1.2**). В **разделе 1.3** рассмотрены районы исследования и дано их краткое физико-географическое описание.

Океанографическая платформа Морского гидрофизического института (МГИ РАН) расположена на шельфе Черного моря у п. Качивели Южного берега Крыма (ЮБК). Платформа находится на расстоянии 600 м от берега, где глубина моря составляет 29 м.

Морской павильон Института экологии Академии наук Абхазии (эстакада ГИАНА) расположен у м. Сужумский (г. Сухум, Абхазия) на северо-восточном шельфе Черного моря и соединен с берегом. Глубина в районе эстакады составляет 13 м.

На северо-восточном шельфе наблюдения велись на базе Южного отделения (ЮО) ИО РАН вблизи г. Геленджика и залива Голубая бухта.

В наблюдаемых районах исследований морфологические особенности шельфа принадлежат разным типам геоморфологического районирования (Гончаров и др., 1972). Так, шельф ЮБК принадлежит Центральному Крымскому типу, геленджикский шельф относится к Западно-Кавказскому типу, а шельфовая зона Сухума принадлежит Восточно-Кавказскому типу.

Шельф Черного моря в районе Геленджика является преимущественно неглубоким, в месте работ увеличение глубины моря по мере отдаления от берега происходит постепенно, шельф пологий. Крымский шельф

характеризуется относительно небольшим наклоном дна, составляющим всего несколько минут. Переход шельфа к материковому склону происходит постепенно. Однако в районе платформы МГИ РАН отмечается несколько более резкое увеличение глубин, поэтому шельф этого района можно характеризовать как приглубый. Шельф у берегов Сухума узкий и крутой с резким свалом глубин, глубины около 100 м наблюдаются там на удалении всего нескольких сотен метров от берега.

В разделе 1.4 рассмотрены материалы, методика измерений и состав океанологического оборудования, использованные в работе.

Основной массив данных, анализируемый в диссертации, получен в период с 2009 по 2018 гг. во время наблюдений со стационарных оснований – океанографической платформы МГИ РАН и эстакады ГИАНА. Кроме того, исследования проводились на геленджикском шельфе при помощи заякоренных станций и буксировок с малотоннажного судна, оснащенного ADCP.

Во время измерений использовалось современное высокоточное океанологическое оборудование (ADCP, зонд «miniSVP», термодатчики «Star-Oddi»). Все эксперименты были выполнены по единой методике, что позволяет сопоставлять данные, полученные в различных точках наблюдений.

Глава 2 посвящена наблюдениям квазиинерционных внутренних волн на шельфе Черного моря по результатам данных контактных измерений. В исследуемых районах локальный инерционный период варьируется в пределах 17,1–17,6 ч. В каждом районе наблюдений были зарегистрированы квазиинерционные внутренние волны с периодом, близким к локальному инерционному.

В разделе 2.1 представлены примеры квазиинерционных внутренних волн на пологом геленджикском шельфе. За шестидневный период наблюдений в 2013 г. на шельфе Геленджика наблюдалось пять хорошо выраженных квазиинерционных внутренних волн высотой около 5 м.

В разделе 2.2 приведены результаты измерений со стационарной платформы МГИ РАН на крымском шельфе. В качестве примера представлен временной ход изменений температуры воды и ее вертикальные профили при прохождении внутренних волн 11–12 июля 2011 г. (рисунок 1а, 1б). Дополнительно изображены вертикальные профили меридиональной (северной) компоненты скорости течения и прогрессивная векторная диаграмма течений за период прохождения волны (рисунок 1в, 1г).

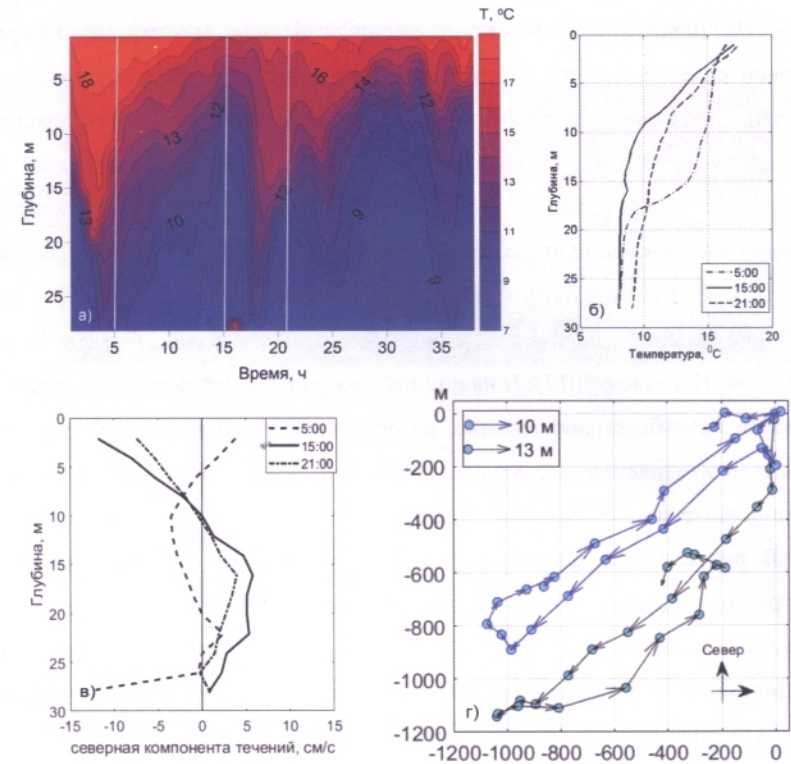


Рисунок 1. Проявление внутренних волн инерционного периода 1-ой моды 11–12 июля 2011 г. (а). Дополнительно представлены профили температуры воды (б) и северной компоненты скорости течений (в), выполненные в конкретные часы (отмечены вертикальными линиями на разрезе), а также прогрессивная векторная диаграмма течений (г) по измерениям ADCP за период с 00:00 ч по 21:00 ч 11 июля 2011 г. (показана для горизонтов 10 м и 13 м). Кружки отмечают часы, начало диаграммы в точке (0, 0). По осям рис. 1г отложены смещения в м

На записи с 2 ч 11 июля виден резкий подъем термоклина, а после 17 ч – заглупление, при этом значения температуры воды на горизонтах изменились в пределах 5–7°C. Подобные синхронные смещения термоклина по всей водной толще были вызваны прохождением инерционных внутренних волн 1-ой моды. На вертикальных профилях скорости течения видно, что во время прохождения внутренней волны в области слоя скачка температуры происходит смена направления течения на противоположное, что характерно для внутренних волн. На горизонте 10 м за инерционный период происходит поворот по часовой стрелке, а всего через 3 м на горизонте 13 м вектор течений снова совершает оборот против часовой стрелки (рис. 1г), что anomalно для инерционных внутренних волн, наблюдаемых в Северном полушарии. Такое нехарактерное поведение эллипсов инерционных течений объясняется суперпозицией инерционных колебаний и фонового сдвигового течения, что вместе с близостью берега привносит дополнительное искажение. Данная гипотеза была недавно проверена и подтверждена аналитически в работе (Сабинин, Коротаев, 2017). В наших наблюдениях почти всегда присутствовало фоновое вдольбереговое течение, которое вместе с близостью берега сильно искажало измеряемые характеристики инерционного течения. В связи с этим инерционные колебания в течениях были далеки от классических.

В разделе 2.3 описаны результаты наблюдений за квазиинерционными внутренними волнами на абхазском шельфе. Особенности рельефа дна на шельфе Абхазии (узкий шельф и близость глубокой воды) оказывают влияние на динамику прибрежных процессов и, вероятно, являются благоприятным условием для развития здесь внутренних волн максимальных амплитуд. Так, в зоне абхазского шельфа наблюдаются инерционные внутренние волны с большими высотами (до 20 м и более) по сравнению с другими типами шельфов Черного моря, где высоты подобных волн – в среднем 5–10 м. Для абхазского шельфа также был проведен анализ записи температуры длительностью более 3 месяцев по данным термогирлянды, установленной на глубине 50 м. Это позволило оценить сезонную изменчивость внутреннего

волнения в данном регионе. Интенсивные квазиинерционные колебания наблюдались в начале измерений в октябре–декабре (рисунок 2а), когда термоклин располагался на глубине около 30–35 м. Во время прохождения инерционных внутренних волн происходили вертикальные смещения термоклина размахом до 20–25 м. Характер колебаний температуры заметно изменился к концу осени – началу зимы, что связано было с охлаждением всего водного столба и заглуплением термоклина. При этом инерционные движения в колебаниях температуры в декабре–феврале стали малозаметны (рисунок 2б).

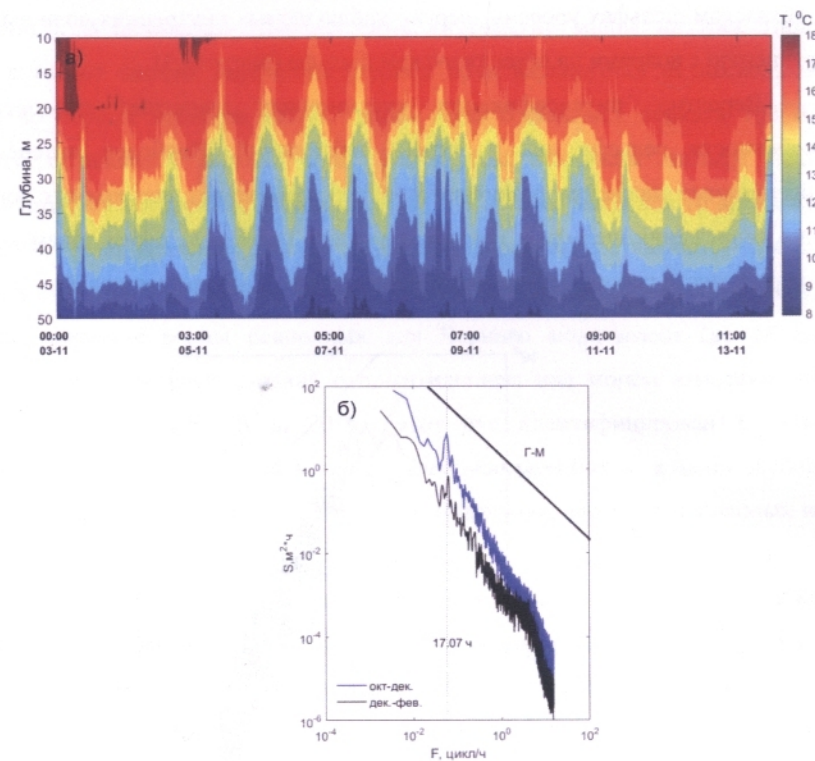


Рисунок 2. Временной ход температуры по данным термогирлянды на абхазском шельфе 3–13 ноября 2013 г. (а). Частотные спектры колебаний температуры по данным смоделированного распределенного датчика температуры в период наблюдения интенсивных внутренних волн (синяя линия) и в период их ослабления (черная линия), Г-М – модельный спектр Гаррета-Манка (б)

В разделе 2.4 проводится сравнение квазиинерционных внутренних волн на разных типах шельфов Черного моря. Для каждого района наблюдений характерно наличие инерционных внутренних волн, однако их высоты заметно отличаются. Так, на геленджикском шельфе высоты внутренних волн составляют в среднем не более 5–7 м, на крымском шельфе высоты волн достигают 10–12 м, а на абхазском шельфе – до 20 м и более.

Сравнение частотных спектров в низкочастотном диапазоне внутренних волн в летний период для трех типов шельфа указывает на то, что на крымском и абхазском шельфах уровень энергии наблюдаемых внутренних волн выше по сравнению с волнами на геленджикском шельфе (рисунок 3).

Вероятно, интенсификации инерционных движений способствуют особенности рельефа дна в точках наблюдений. Наиболее интенсивные инерционные движения развиваются в так называемых переходных зонах, в зоне сопряжения шельфа и континентального склона. К таким зонам как раз можно отнести районы наблюдений на крымском и абхазском шельфах.

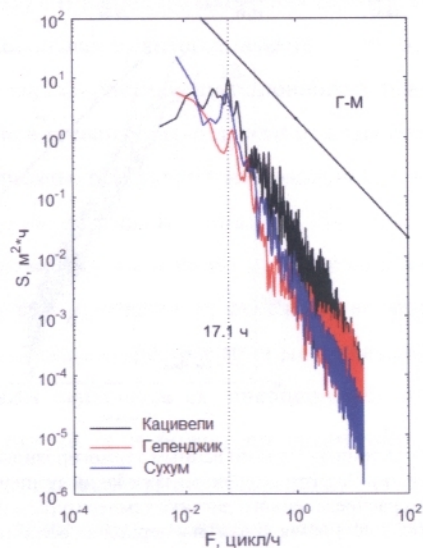


Рисунок 3. Частотные спектры внутренних волн для разных типов шельфа в 2013 г., Г-М – спектр Гаррета-Манка

В разделе 2.5 даются основные выводы по Главе 2.

В Главе 3 представлены результаты натурных наблюдений короткопериодных внутренних волн на шельфах Черного моря. Приводятся отдельные примеры коротких внутренних волн, зарегистрированных на геленджикском (раздел 3.1), крымском (раздел 3.2) и абхазском (раздел 3.3) шельфах. Для каждого района характерно развитое поле внутренних волн. Наиболее часто внутренние волны были зарегистрированы при распространении по шельфу длинных внутренних волн (инерционных колебаний). В целом, короткопериодные внутренние волны на трех типах шельфа имеют схожие параметры (период волн варьируется от нескольких минут до первых десятков минут, длины волн составляют порядка 100 м), немного отличаются высоты волн. На крутом абхазском шельфе чаще регистрируются внутренние волны высотой 5–6 и более метров, в то время как на пологом геленджикском шельфе их высоты в среднем составляют 1–2 м. Во время осенних наблюдений на геленджикском шельфе в 2015 г. обнаружены короткопериодные волны рекордных для Черного моря высот (до 16 м), генерация которых была связана с прохождением над морем атмосферного фронта (Бондур и др., 2018, 2019). Этот цуг идентифицирован в точке измерений, расположенной в акватории Геленджикской бухты, а не в Голубой, как большинство примеров коротких внутренних волн, зарегистрированных на шельфе Геленджика.

На рисунке 4 показана запись гирлянды датчиков температуры, видны синхронные колебания температуры во всех слоях водного столба, вызванные проходом цуга внутренних волн. Размах колебаний по температуре достигал 3–4°C, что соответствовало высотам волн в цуге до 12–16 м. Спектр цуга волн имел ярко выраженный пик, соответствующий периодам волн 7–8 мин. В сравнении с фоновыми колебаниями термоклина прохождение цуга волн приподняло спектральный уровень почти на 2 порядка.

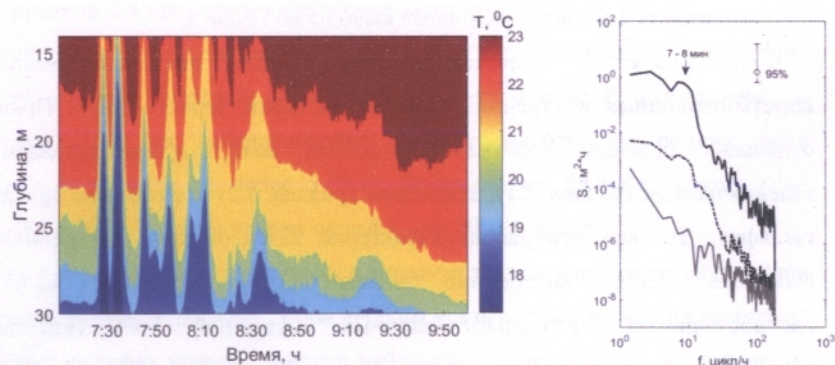


Рисунок 4. Слева: путь внутренних волн на геленджикском шельфе 7 октября 2015 г., по данным термогирлянд. Справа: частотные спектры пуга внутренних волн, рассчитанные по данным смоделированного распределенного датчика температуры (штрихпунктирная линия), и фоновых внутренних волн (сплошная серая линия). Частотный спектр по данным о вертикальных смещениях изотермы 19°C показан черной сплошной линией.

В разделе 3.4 сравниваются внутренние волны бесприливных водоемов с различной соленостью вод (Черного и Аральского морей). Измерения внутренних волн в Аральском море были проведены с 29 октября по 2 ноября 2013 г. (Ижицкий и др., 2014). Короткопериодные внутренние волны в Аральском море отличаются от черноморских аналогов меньшими высотами (1–2 м), распространяясь в большинстве случаев в узком слое термоклина.

Для коротких внутренних волн Черного и Аральского морей для основных наблюдаемых периодов в таблице представлены длины этих волн, рассчитанные путем численного решения уравнения внутренних волн.

Таблица. Расчетные параметры внутренних волн в районах исследования

Район наблюдений	Период, мин	Длина, м (теор. расчет)	Период, мин	Длина, м (теор. расчет)	Период, мин	Длина, м (теор. расчет)
Геленджик	5	95	10	220	20	460
Кацивели	5	80	10	190	20	390
Сухум	5	90	10	215	20	450
Аральское море	5	170	10	350	20	700

Так, для черноморских волн, имеющих период 5 мин, длины волн – порядка 90 м, а для аналогичных аральских почти в два раза больше – 170 м. То же наблюдаем и для волн с периодом 20 мин: длины черноморских волн – около 400 м, а аральских – 700 м. Из полученных дисперсионных соотношений рассчитанная фазовая скорость черноморских внутренних волн составляет около 0,3 м/с, а для аральских внутренних волн – 0,65 м/с. Внутренние волны в Аральском море развиваются на очень резком пикноклине, что и обуславливает такую высокую скорость распространения.

В разделе 3.5 приводятся основные выводы по Главе 3.

Глава 4 посвящена особенностям внутренних волн в Черном море, которые удалось зарегистрировать во время контактных измерений.

В разделе 4.1 приводятся первые наблюдения внутренних волн 2-ой моды квазиинерционного диапазона. Во время измерений на ЮБК с платформы МГИ в 2011 г. были зарегистрированы квазиинерционные внутренние волны 2-ой моды (Серебряный, Химченко, 2014). Океанографическая платформа МГИ располагается в начале резкого уклона шельфа, от которого начинается граница материкового склона, что создает благоприятные условия для генерации 2-ой моды внутренних волн. На рисунках 5а и 5б представлены температурные колебания водной толщи и вертикальные профили температуры во время наблюдения инерционной внутренней волны 2-ой моды 16–17 июля 2011 г. Видно, как за 16-часовой период слои верхней половины водной толщи поднимаются с глубины 16 м на глубину 7–8 м, после чего вновь занимают исходное положение. Одновременно с этим слои нижней половины водной толщи заглубляются от 16 м на глубину до 21 м. Подобные движения относятся к внутренним волнам 2-ой моды типа "растяжения". Амплитуда этих волн достигала 7 м.

Также продемонстрированы вертикальные профили меридиональной компоненты скорости течения и прогрессивная векторная диаграмма течений (рисунки 5в, 5г). На соответствующих вертикальных профилях скорости течения отмечается, что во время прохода внутренней волны 2-ой моды дважды

происходит смена знака направленности течения по глубине. При этом на профилях скорости течения максимумы наблюдаются в 6 ч и 20 ч. Как и в случае с внутренними волнами 1-ой моды, вектор скорости течений претерпевает значительные изменения.

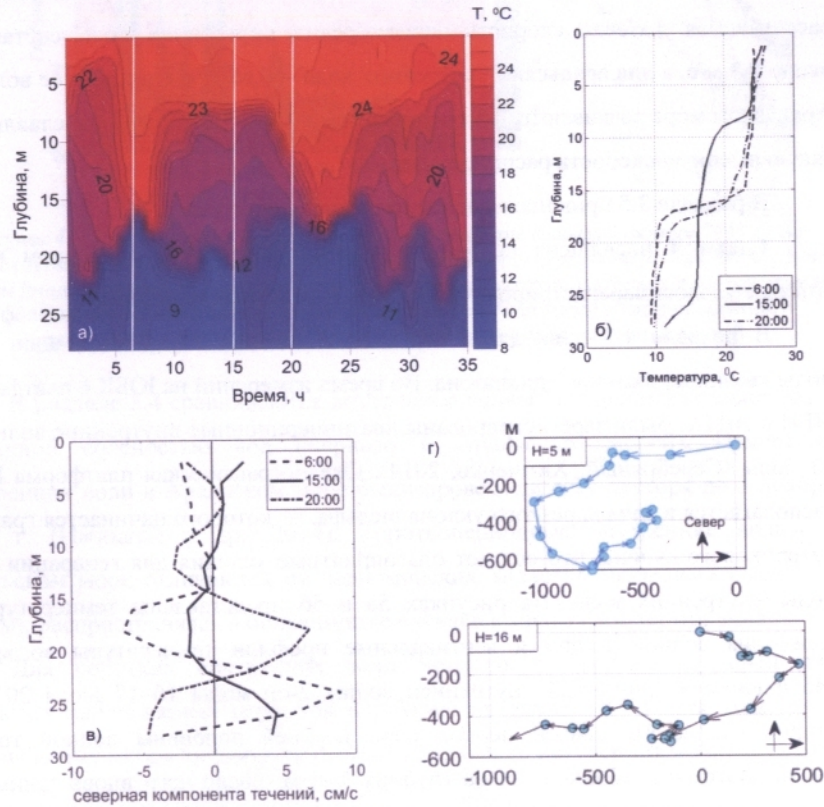


Рисунок 5. Проявление внутренней волны квазинерционного периода 2-ой моды 16–17 июля 2011 г. (а). Дополнительно представлены профили температуры (б), северной компоненты скорости течений (в), выполненные в конкретные часы (отмечены вертикальными линиями на разрезе), а также прогрессивная векторная диаграмма течений (г) по измерениям ADCP за период с 06:00 ч 16 июля по 01:00 ч 17 июля 2011 г. (показана для горизонтов 5 м и 16 м). Кружки отмечают часы, начало диаграммы в точке (0, 0). По осям рис. 5г отложены смещения в м

Сопоставление теоретических и наблюдаемых величин вертикальных смещений во внутренних волнах показывает хорошее совпадение. В последующих измерениях в 2013 г. в районе ЮБК нам также удалось

зарегистрировать квазинерционные внутренние волны 2-ой моды, однако менее интенсивные (Серебряный, Химченко, 2014).

В разделе 4.2 приведены примеры наблюдений короткопериодных внутренних волн 2-ой моды на шельфе ЮБК и Абхазии.

Новые данные о нелинейной внутренней волне – внутреннем боре, который наблюдался на разных типах шельфа, представлены в разделе 4.3. Рассматривается изменчивость течений в момент наблюдения бора, а также его влияние на положение звукорассеивающих слоев (ЗРС). Появление типичного внутреннего бора на крымском шельфе сопровождалось резкой сменой вдольбереговых течений в прибрежной зоне (характерен подход придонного западного течения, резко меняющегося наблюдающееся до этого восточное течение). Подход бора сопровождался резким усилением скорости придонного течения до 0,5 м/с при фоновой скорости течения 0,1–0,2 м/с. Во время прохода бора ЗРС резко поднимаются вверх, т.е. двигаются одновременно с термоклином.

На шельфе Абхазии внутренний бор был зарегистрирован на переднем фронте подходящей инерционной волны и привел к генерации цуга короткопериодных внутренних волн–возвышений на приповерхностном термоклине.

В разделе 4.4 рассмотрено воздействие внутренних волн на изменчивость скорости звука. Анализ долговременных измерений скорости звука со стационарных платформ на крымском и кавказском шельфах Черного моря показал повсеместное присутствие значительных флуктуаций скорости звука морской воды, вызванных прохождением инерционных внутренних волн. Выявлено, что при проходе по шельфу инерционных внутренних волн наблюдается значительная перестройка вертикального профиля скорости звука (на отдельных горизонтах изменения скорости звука – до 20 м/с), а во время прохождения внутреннего бора происходит скачек скорости звука до 20–25 м/с.

В разделе 4.5 приводятся краткие выводы по Главе 4.

В **Заключении** приводятся основные результаты диссертационной работы.

В каждом из трех районов, где выполнялись натурные наблюдения, зарегистрированы внутренние волны инерционного периода (локальный инерционный период – 17,1–17,6 ч), однако их высоты заметно отличаются на разных типах шельфа. Показано, что наибольшие амплитуды инерционных внутренних волн встречаются на узком шельфе с резким свалом глубин (шельф Абхазии). Здесь волны достигают высот 20–25 м, в то время как на других типах шельфа Черного моря (пологом геленджикском и приглубом крымском) высоты волн в среднем – 5–10 м.

- 1) Сравнение частотных спектров в низкочастотном диапазоне внутренних волн на трех типах шельфа в летний период указывает на то, что на абхазском и на крымском шельфах уровень энергии наблюдаемых внутренних волн выше по сравнению с волнами на геленджикском шельфе.
- 2) На примере долговременных (продолжительностью более 3 месяцев) измерений на абхазском шельфе прослежена сезонная изменчивость (переход от летних условий к зимним) внутреннего волнения. Выявлено заметное изменение характера колебаний температуры морской толщи к концу осени–началу зимы, что связано с охлаждением всего водного столба и заглублением термоклина. При этом инерционные движения в колебаниях температуры становятся практически невидимы.
- 3) Обнаружено anomальное поведение годографов течений в инерционных движениях в прибрежной зоне крымского шельфа. А именно: зарегистрировано вращение эллипсов течений с инерционным периодом против часовой стрелки. Такое anomальное поведение обуславливается существующей средней фоновой циклонической завихренностью Черного моря, а также сильным влиянием вдольбереговых течений.
- 4) Короткопериодные внутренние волны на трех типах шельфа имеют схожие параметры (периоды волн – в пределах от нескольких минут до первых десятков минут, длины волн изменяются от нескольких десятков до нескольких сотен метров), немного отличаются высоты волн. На крутом абхазском шельфе чаще регистрируются короткие внутренние волны

высотой 5–6 и более метров, в то время как на пологом геленджикском шельфе их высоты в среднем составляют 1–2 м. Интенсивные внутренние волны в отдельных случаях были зарегистрированы как по данным колебаний температуры, так и в данных сигнала обратного рассеяния. В большинстве случаев короткопериодные внутренние волны, регистрируемые на шельфе, подходят из глубоководной части моря, по мере распространения к берегу их высота и скорость уменьшаются. Появление интенсивных коротких волн часто происходит на фоне подхода к берегу внутренних инерционных волн больших амплитуд.

- 5) Самые большие по амплитуде, рекордные для Черного моря на сегодняшний день короткопериодные внутренние волны были зарегистрированы на геленджикском шельфе в октябре 2015 г. Цуг солитоноподобных внутренних волн двигался из открытого моря к берегу, высоты волн в нем достигали 15–16 м при глубине моря в месте наблюдения около 30 м. Генерация цуга anomальных внутренних волн была связана с прохождением над морем холодного атмосферного фронта (Бондур и др., 2018, 2019).
- 6) Представлено сравнение наблюдаемых короткопериодных внутренних волн двух бесприливных водоемов с различной соленостью вод (на примере Черного и Аральского морей). Из-за повышенной вязкости вод, обусловленной высокой соленостью (более 120 епс), внутренние волны гипергалинного Аральского моря развиваются в основном в узком слое термоклина. Это ограничивает их развитие по высоте (волны редко достигают высоты более 1–2 м), однако при этом они отличаются в два раза большей длиной и скоростью распространения по сравнению с черноморскими аналогами.
- 7) В проведенных морских экспериментах показано существование в Черном море внутренних волн 2-ой моды как инерционного, так и короткопериодного диапазона. Зарегистрированный нами факт появления квазиинерционных внутренних волн 2-ой моды в условиях, когда термоклин оказался ближе расположенным ко дну, можно связать с механизмом

генерации, когда появление 2-ой моды происходит при разрушении длинной нелинейной внутренней волны 1-ой моды, движущейся вверх по склону.

Случаи появлений короткопериодных внутренних волн 2-ой моды по данным наблюдений на крымском шельфе были приурочены к подходу инерционных внутренних волн. На абхазском шельфе был зарегистрирован пакет короткопериодных внутренних волн 2-ой моды, сгенерированный подходящим в прибрежную зону холодным гидрологическим фронтом.

- 8) Выявлены новые черты внутреннего бора в прибрежной зоне на примере измерений на крымском шельфе. Установлено, что появление типичного внутреннего бора на крымском шельфе сопровождается резкой сменой вдольбереговых течений в прибрежной зоне (характерен подход придонного западного течения, резко меняющего наблюдающееся до этого восточное течение). Показано, что внутренний бор оказывает сильное влияние на звукорассеивающие слои на шельфе, резко смещая их вверх из начального придонного положения, что приводит к их последующему быстрому исчезновению из района прибрежных вод. Внутренний бор также приводит к существенным искажениям вертикального профиля скорости звука в шельфовой зоне.
- 9) Продемонстрировано сильное влияние квазиинерционных внутренних волн на изменчивость профиля скорости звука в шельфовых водах Черного моря. При подходе интенсивных внутренних волн перепады значений скорости звука на отдельных горизонтах водной толщи могут достигать 20–25 м/с.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в изданиях из перечня ВАК:

1. Бондур В.Г., Серебряный А.Н., Замшин В.В., Тарасов Л.Л., **Химченко Е.Е.** Интенсивные внутренние волны аномальных высот на шельфе Черного моря // Известия РАН, Физика атмосферы и океана. – 2019. – Т. 55. – № 1. – С. 114–127.

2. Серебряный А.Н., **Химченко Е.Е.** Сильная изменчивость скорости звука в шельфовой зоне Черного моря, вызванная инерционными внутренними волнами // Акустический журнал. – 2018. – Т. 64. – № 5. – С. 580–590.
3. Серебряный А.Н., Попов О.Е., Кенигсбергер Г.В., Елистратов В.П., **Химченко Е.Е.** Фронт в прибрежной зоне моря с узким шельфом: поверхностные проявления и внутренняя динамика // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2018. – Т. 15. – № 3. – С. 167–183.
4. **Химченко Е.Е.**, Серебряный А.Н. О наблюдении внутренних волн на шельфе Черного моря // Процессы в геосредах. – 2018. – № 3 (17). – С. 324–325.
5. Серебряный А.Н., Кенигсбергер Г.В., Елистратов В.П., Сабинин К.Д., Попов О.Е., Свадковский А.Н., Тарасов Л.Л., Денисов Д.М., **Химченко Е.Е.**, Чекайда В.Н. Акустическая диагностика гидрофизической изменчивости на абхазском шельфе Черного моря // Ученые записки физического факультета Московского университета. – 2017. – Т. 5. – 1750130.
6. Серебряный А.Н., **Химченко Е.Е.** Исследования внутренних волн на кавказском и крымском шельфах Черного моря летом 2013 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2014. – Т. 11. – № 3. – С. 88–104.
7. Ижицкий А.С., **Химченко Е.Е.**, Завьялов П.О., Серебряный А.Н. Гидрофизическое состояние Большого Аральского моря осенью 2013 г.: термическая структура, течения, внутренние волны // Океанология. – 2014. – Т. 54. – № 4. – С. 451–463.

Статья в издании из списка ВАК, принятая к печати:

- Серебряный А.Н., **Химченко Е.Е.** Внутренние волны второй моды в Черном море // Доклады Академии наук. – 2019. – Т. 488. – № 5 (в печати).

Также по теме диссертации опубликованы 3 статьи в рецензируемых изданиях, 2 главы в монографиях, 18 статей и тезисов в сборниках докладов конференций.

Подписано в печать 07.10.2019 г.
Формат А5
Объем усл. печ. листов 1.2
Бумага офсетная. Печать цифровая.
Тираж 100 Экз. Заказ №183387-10-19 Типография
ООО “МДМпринт”
(Печатный салон МДМ)
119146, г. Москва, Дмитрия Ульянова д. 20 к.1
Тел. +7 (495) 256 1000
E-mail: 301@mdmprint.ru