

На правах рукописи



СЛЮНЯЕВ Алексей Викторович

**АНОМАЛЬНО ВЫСОКИЕ МОРСКИЕ ВОЛНЫ:  
ФИЗИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ И МОДЕЛИРОВАНИЕ**

Специальность 25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Нижний Новгород – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» и в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», г. Нижний Новгород

Научный консультант: доктор физико-математических наук, профессор  
**Пелиновский Ефим Наумович**

Официальные оппоненты: **Захаров Владимир Евгеньевич**,  
академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор (Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН)

**Гулев Сергей Константинович**,  
член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор (Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН)

**Громов Евгений Михайлович**  
доктор физико-математических наук, профессор (Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова»

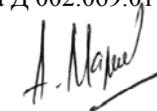
Защита состоится «15» февраля 2016 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.069.01 в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» по адресу: 603950 г. Н. Новгород, ул. Ульянова 46.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института прикладной физики РАН.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.069.01

кандидат физико-математических наук



А.И. Малеханов

## Актуальность проблемы

«Волны-убийцы» (в англоязычной литературе *rogue waves* или *freak waves*) – одна из наиболее интригующих проблем современной океанологии, которая уже стала причиной широкого спектра исследований: от теоретических до прикладных [Куркин и Пелиновский, 2004; Dysthe et al., 2008; Kharif et al., 2009\*; Slunyaev et al., 2011\*]. Сам термин «волны-убийцы» до настоящего времени остается не определенным однозначно; им называют опасные морские волны аномально большой высоты (по сравнению с фоновым волнением), которые редко возникают и на первый взгляд не предсказуемы. Научная важность и практическая значимость проблемы волн-убийц подтверждена, в частности, Европейской Комиссией, поддержавшей два крупных исследовательских проекта (в рамках шестой и седьмой Рамочных программ): MaxWave (завершен в 2003 г.) и Extreme Seas (завершен в 2013 г.).

Плохие погодные условия продолжают быть одной из основных причин происшествий в море. Среди них недавние случаи аварий, повлекших экологическое загрязнение обширных прибрежных акваторий (Prestige – 2002, MSC Napoli – 2007), сопровождавшихся существенным повреждением судов (Caledonia Star – 2001, Bremen – 2001, Explorer – 2005, Voyager – 2005, Norwegian Dawn – 2005, Louis Majesty – 2010; MOL Comfort – 2013) и гибелью людей (Voyager – 2005, Norwegian Dawn – 2005, Louis Majesty – 2010). Также хорошо известны случаи ударов неожиданно высоких волн о шельфовые нефтегазовые платформы, которые привели к существенным повреждениям или даже затоплению платформ (Veslefrikk B – 1995, Draupner – 1995, Shiehallion – 1998). Таким образом, «волны-убийцы» представляют серьезную угрозу морскому судоходству и освоению шельфа.

Данные натурных измерений экстремальных волн являются важнейшим источником первичной информации. К сожалению, на настоящий момент имеющиеся инструментальные данные не способны обеспечить статистическую выборку, достаточную для построения достоверной статистики «волн-убийц». В ряде работ по разработке вероятностного описания экстремальных волн по данным натурных измерений утверждается о занижении периода их повторения существующими общепринятыми теориями в сотни раз (например, [Stansell, 2004]), то есть, реальные морские волны намного более опасны, чем думалось ранее. В существующей ситуации, когда натурные данные оказываются недостаточными, физическое моделирование в лабораторных условиях, а также математическое моделирование играют ключевую роль.

Важный вопрос связан с физическими механизмами генерации «волн-убийц», их понимание необходимо для описания явления, в том числе, для выбора адекватных математических моделей. Наибольший интерес вызывают нелинейные механизмы, являющиеся более сложными для исследования и учета в статистических моделях. В частности, *эффект самомодуляции волн на глубокой воде* был предложен для объяснения более частого воз-

никновения высоких ветровых волн, чем это предсказывается общепринятыми квазилинейными теориями [Onorato et al., 2001; Dyachenko & Zakharov, 2005]. Ранее этот эффект считался практически нереализуемым для морских условий и потому не учитывался.

Нелинейные группы удерживаются от дисперсионного расплывания возникающими корреляциями в фазах взаимодействующих гармоник, что изменяет статистику волн. Такие группы в рамках первого приближения для слабой нелинейности и длинной модуляции соответствуют точным решениям – солитонам огибающей [Захаров, 1968]. Соответствующее эволюционное уравнение, обычно называемое нелинейным уравнением Шредингера, НУШ (либо нелинейным параболическим уравнением [Таланов, 1965]), было проинтегрировано методом обратной задачи рассеяния, МОЗР [Захаров и Шабат, 1971; Захаров и др., 1980]. МОЗР представляет собой исключительно удобный аппарат для описания динамики нелинейных волн и потенциально может быть использован для создания детерминистского прогноза «волн-убийц».

В качестве параметра, определяющего силу самомодуляционных эффектов для нерегулярных поверхностных волн, был предложен параметр подобия, индекс неустойчивости Бенджамина – Фейра (Benjamin – Feir Index, BFI), следующий из НУШ [Onorato et al., 2001; Janssen, 2003]. Он соответствует «солитонному числу», принятому в нелинейной оптике, и аналогичен параметру Урселла, используемому для определения степени нелинейности волн на мелкой воде. Параметр BFI на настоящий момент является главным претендентом на роль критерия опасности возникновения «волн-убийц» в море. В частности, он уже включен в оперативный прогноз Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF). Сложность использования параметра BFI заключается в том, что реальные параметры ветровых волн соответствуют случаю, когда «рафинированная» модуляционная неустойчивость ограничивается факторами нерегулярности волн, конечной спектральной ширины, действием эффектов сильной нелинейности и т.д. [Mogi & Janssen 2006; Segur et al., 2005; Leblanc, 2007; Voronovich et al., 2008; Henderson et al., 2010].

Из-за развития компьютерной техники и появления новых быстрых методов решения уравнений гидродинамики в последние полтора десятилетия стал доступным эффективный подход к исследованию статистики нелинейных морских волн, избавленный от ограничений кинетической теории, – т.н. стохастическое моделирование (Janssen, 2003; Chalikov, 2005; Захаров и Шамин, 2012 и др.). Сейчас уже известно, что динамика модуляционно неустойчивых волн на поверхности глубокой жидкости очень сильно отличается в случаях узкого и относительно широкого углового спектра [Onorato et al., 2002, 2009; Gramstad & Trulsen 2007; Mori et al., 2007; Ruban, 2007, 2009]. Потому одним из важнейших вопросов является выделение ситуаций, когда

реализуются узкие спектры морских волн, либо когда условия на узость спектра ослабляются.

Отметим такой важный момент, что исследования «волн-убийц» были очень быстро обобщены на другие проблемы, где наблюдаются схожие волновые эффекты: в нелинейной оптике, сверхтекучем гелии, плазме, даже в описании финансовых рынков и т.д. [Onorato et al., 2013; Dudley et al., 2014; Ruban et al., 2010\*]. Тем самым проблема «волн-убийц» приобрела в физике междисциплинарный характер и является актуальной для различных практических приложений.

### **Цель исследования**

Целью диссертационной работы является исследование физических механизмов возникновения аномально высоких морских волн (т.н. «волн-убийц») – экстремальных волн, которые возникают заметно чаще и приобретают большие высоты, чем ожидается из классических линейных теорий – в контексте возможности описания и прогноза.

### **Научная ценность и новизна результатов**

В диссертации представлены результаты исследования нелинейных механизмов генерации аномально высоких волн на морской поверхности, позволившие построить типичный портрет «волн-убийц» и предложить подходы для вероятностного и детерминистского прогноза опасных волн. Общий подход, используемый в диссертации, можно сформулировать как построение «мостиков», связывающих слабонелинейные теории и сильно нелинейную динамику волн. При этом разработаны новые физико-математические модели для описания модулированных гравитационных волн на поверхности воды, и выполнено численное моделирование приближенных и исходных уравнений гидродинамики. Для описания «волн-убийц» на струйных течениях предложен и развит модовый подход, позволивший перенести результаты нелинейной теории для двумерных модулированных волн на трехмерный случай.

### **Достоверность предложенных методов и решений**

Исследование основывается на теоретических методах исследований динамики нелинейных волн, динамики океана и современных численных методах. Большинство теоретических результатов, приводимых в диссертации, проверялись в численных и лабораторных экспериментах. При этом использовались различные численные коды, моделирующие уравнения гидродинамики на различных уровнях аппроксимации: от слабо нелинейных до полных. Такой подход позволил проводить сопоставление результатов, полученных в разных теоретических моделях, а также в лабораторных условиях, что обеспечивает их достоверность.

### **Практическое значение работы**

Результаты диссертации могут быть использованы для дальнейших исследований, в том числе, – в направлении прикладных разработок по прогнозу экстремальных морских волн и снижению их негативных последствий. Они использовались в НИР по тематикам нелинейных волн и экстремальных морских волн, включая выполнение государственных контрактов, грантов Президента РФ для поддержки молодых российских ученых и поддержки ведущих научных школ РФ, грантов Европейского Сообщества, грантов РФФИ. В частности, результаты проекта «Разработки для обеспечения безопасности судов в экстремальных морях» (“Design for Ship Safety in Extreme Seas”, 2009–2013), в котором диссертант принимал активное участие, были отмечены грамотой Европейского Союза «Чемпионы ЕС в области исследований для развития транспорта – 2014».

### **Личный вклад автора**

Глава 1 является преимущественно обзорной, ее отдельные части написаны в сотрудничестве с Е.Н. Пелиновским и К. Харифом (IRPHE, Марсель, Франция), которым принадлежит идея «нелинейно-дисперсионного» механизма генерации аномальных волн.

В исследованиях, описанных в Главах 2 и 3, автору диссертации принадлежит основная роль на всех этапах, исключая выполнение численных расчетов в рамках модифицированного нелинейного уравнения Шредингера для распространения волн на шельфе, обсуждаемых в Разделе 2.5 (А.В. Сергеева), постановку и проведение лабораторных экспериментов по моделированию рациональных бризеров высокого порядка, упоминаемых в Разделе 3.4 (А. Chabchoub и др.), постановку и проведение лабораторных экспериментов по моделированию волн в мелководном резонаторе, использованных при тестировании численного кода HOSM (А.Б. Езерский и др.). Натурные данные и их первичная обработка инструментальных измерений были предоставлены соавторами.

Постановка и проведение лабораторных экспериментов по моделированию нерегулярных интенсивных волновых групп в Разделе 4.2 принадлежат Л. Шемеру (Tel-Aviv University, Израиль); в остальных работах, описанных в Главе 4, диссертанту принадлежит основная роль. А.В. Сергеева участвовала в лабораторных экспериментах в волновом лотке университета Ганновера, ей принадлежит обработка данных измерений. Она также выполняла вспомогательное численное моделирование и обработку результатов численного моделирования (частично), описываемых в этой главе.

Идея рассмотрения нелинейной динамики волн на струйных течениях в модовой постановке принадлежит В.И. Шприе (Keele University, Великобритания). Результаты, представленные в Разделах 5.2–5.4 (линейная и слабо нелинейная теория для захваченных волн на течении), получены в тесном сотрудничестве с ним. Результаты Раздела 5.5 получены преимущественно автором.

## Апробация работы

Основные результаты диссертации были представлены на многочисленных всероссийских и международных конференциях по физике нелинейных волн: «*Extreme events*» (Ганновер, Германия, 2013, 2014), «*Rogue Waves*» (Дрезден, Германия, 2011), «*Nonlinear Waves – Theory and Applications*» (Пекин, Китай, 2008, 2010, 2013), «*Solitons, Collapses and Turbulence*» (Черноголовка, 2009, 2012, 2014), «*Wave interactions*» (Линц, Австрия, 2012, 2014), «*Frontiers of Nonlinear Physics*» (Н. Новгород, 2004, 2010), *Wave-Flow Interaction Network* (Кембридж, Великобритания, 2011), «*Нелинейные волны*» (Н. Новгород, 2006, 2008, 2012), научные сессии Совета РАН по нелинейной динамике (Москва, 2004, 2006, 2008, 2009, 2011, 2012, 2014); «*Topical Problems of Nonlinear Wave Physics*» (Н.Новгород, 2003, 2005); геофизических конференциях: *EGS-AGU-EUG Joint Assembly* (Ницца, Франция, 2003), *European Geophysical Union General Assembly* (Ницца, Франция, 2004; Вена, Австрия, 2005-2015), *IAGS-IAPSO-IASPEI Joint Assembly* (Гетеборг, Швеция, 2013), «*Rogue Waves*» (Брест, Франция, 2008); конференциях по инженерным приложениям нелинейных волн: IUTAM «*Waves in fluids*» (Москва, 2012), «*Complexity of Nonlinear Waves*» (Таллинн, Эстония, 2014), *OMAЕ* (Роттердам, Нидерланды, 2011), *MARTECH-2011* (Лиссабон, Португалия, 2011), *Symp. on Hydraulic and Ocean Engineering* (Килунг, Тайвань, 2012), *THE-SEUS Taiwan Workshop* (Тайнань, Тайвань, 2013), «*Advanced Problems in Mechanics*» (С.-Петербург – Репино 2007, 2011), «*Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики*» (С.-Петербург, 2014).

В 2007 г. цикл работ «Аномально высокие морские волны: физические механизмы и моделирование» был отмечен медалью РАН с премией для молодых ученых РАН.

## Положения, выносимые на защиту

1. Асимптотическая теория 5-го порядка по нелинейности и дисперсии для модулированных волн на воде произвольной глубины позволяет во многих случаях получить хорошее описание существенно нелинейной динамики морских волн. С учетом нелинейности порог модуляционной неустойчивости сдвигается с критической глубины  $kh \approx 1.36$  в область более мелкой воды.
2. Оригинальный подход к анализу волновых записей с использованием метода обратной задачи рассеяния демонстрирует присутствие когерентных нелинейных групп в инструментальных записях, содержащих аномально высокие волны, и делает возможным краткосрочный прогноз наступления экстремальных волновых условий.
3. Реконструкция инструментально измеренных аномально высоких волн с помощью численного моделирования дает реалистичную картину события на небольших временах (до 10 мин) в предположении однонаправленных волн.

4. Существуют сильно нелинейные аналоги точных решений слабо нелинейной теории для слабо модулированных волн на поверхности большой глубины типа солитонов огибающей и бризеров.
5. Картина эволюции нерегулярных однонаправленных волн на поверхности глубокой воды с заданным начальным спектром хорошо параметризуется в терминах индекса модуляционной неустойчивости  $BFI$  и характерного времени нелинейности и определяет условия возникновения высокой вероятности больших волн.
6. Асимптотическая слабо нелинейная теория для модулированных захваченных волн на встречных струйных течениях позволяет эффективно описывать процессы нелинейной динамики волн, связанные с распространением солитоноподобных пакетов и возникновением аномально высоких волн.

## Объём и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и трех приложений. Она изложена на 338 страницах, включая 126 рисунков, 11 таблиц, список работ автора, в которых опубликованы основные результаты диссертации (39 наименований), и список цитируемой литературы (365 наименований).

## Благодарности

Автор благодарен Е.Н. Пелиновскому за участие и помощь во всем. Автор благодарен В.И. Шприре за опыт, который получил за время работы с ним, и помощь. Автор благодарен всем своим соавторам и коллегам за сотрудничество, взаимодействие и поддержку. Хочу высказать благодарность своему школьному учителю математики Л.Ф. Колесникову за его труд и искренность.

## Краткое содержание диссертации

Во **Введении** сформулирована суть и актуальность исследуемой проблемы, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, научная ценность и новизна результатов, обоснованы достоверность предложенных методов и решений и практическое значение работы, описан личный вклад автора, приведен список конференций, на которых апробировались результаты работы, представлены положения, выносимые на защиту, и описана структура диссертации. Дана предыстория проблемы аномальных морских волн и подчеркнуты причины «бума» исследований «волн-убийц», произошедшего на рубеже XX–XXI веков: интенсификация использования моря и измерений ветровых волн, развитие математического аппарата для описания нелинейных явлений.

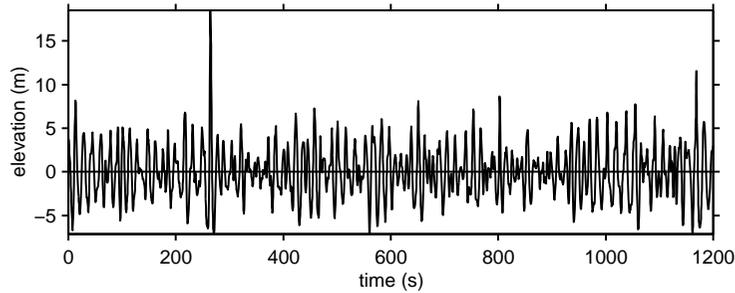
**Первая глава** «Наблюдения аномально высоких волн и современное состояние исследований» носит преимущественно обзорный характер. В ней формулируются доступные на настоящий момент знания об экстремальных ветровых волнах на морской поверхности, следующие из наблюдений и инструментальных измерений, дается их критический обзор. Во Введении указывается на важность натуральных данных для адекватной формулировки проблемы «аномальных морских волн» и проверки выводов исследований.

В Разделе 1.2 «Исторические свидетельства и современные факты» приводятся исторические и современные документальные описания случаев «волн-убийц» с целью получения общего представления о проблеме. Дана условная классификация опасных аномальных волн (в частности, «стена воды», «три сестры», «дырка в море»), обсуждается определение «волны-убийцы» по амплитудному критерию

$$AI = \frac{H}{H_s} > 2 \quad (1)$$

(где  $H$  – высота волны и  $H_s$  – значительная высота).

В Разделе 1.3 «Инструментальные измерения» приводятся доступные данные по долговременным инструментальным измерениям смещения морской поверхности, которые позволяют исследовать редкие события экстремальных волн. Подчеркиваются трудности измерения «волн-убийц» – как инструментального, так и общего плана (статистическая неоднородность данных), из-за чего статистика аномальных волн на настоящий день не может быть определена непосредственно из инструментальных измерений.



**Рис. 1.** «Новогодняя волна» (смещение поверхности от времени) [Haver, 2005], записанная с нефтяной платформы Draupner во время шторма 1 января 1995 г. Глубина места 85 м,  $AI = 2.24$ ,  $H_{max} = 25.6$  м.

Основную часть регистраций поверхностных волн представляют временные записи смещения поверхности; даны примеры таких записей, содержащих аномально высокие волны согласно критерию (1) (рис. 1). Приведены выводы исследований по результатам статистической обработки доступных натуральных данных, направленных на отыскание специфических состояний моря и соответствующих критериев, когда вероятность высоких

волн оказывается большой. Они во многом неожиданны: большая доля опасных волн наблюдалась при умеренных или даже спокойных условиях.

В Разделе 1.4 «Обзор предложенных и оригинальных физико-математических моделей «волн-убийц»» сформулированы основные физические механизмы, которые были предложены для объяснения явления «волн-убийц»: геометрическая фокусировка, дисперсионное сжатие, нелинейная фокусировка, другие нелинейные эффекты взаимодействий волн, взаимодействие с течениями, неоднородные и нестационарные условия.

В Заключении к первой главе формулируются основные выводы по главе. Важнейший из них заключается в невозможности построения достоверной прогностической модели для событий столь малой частоты повторения лишь на основе существующих натуральных измерений.

Во второй главе «Формирование аномально высоких волн с учетом слабости и умеренной нелинейности» приводится теоретическое описание нелинейной эволюции модулированных волн в рамках уравнений огибающей 3–5 порядков по малой нелинейности и дисперсии, а также демонстрируется возможность моделирования аномальных морских волн по данным измерений в одной точке. Во Введении к главе подчеркивается важность развития обобщенных моделей модулированных волн, позволяющих получать во многих случаях достаточно хорошее описание в рамках относительно простых уравнений; также отмечается исключительная роль МОЗР, позволившего «переполучить» и эффективно использовать многие результаты для описания нелинейной динамики модулированных волн.

В Разделе 2.2 «Уравнения огибающей 5-го порядка для двумерных гравитационных волн на воде» в рамках асимптотического подхода получено замкнутое уравнение пятого порядка по малой нелинейности и дисперсии  $\varepsilon \ll 1$  на эволюцию комплексной амплитуды огибающей  $\eta_{10}(x, t)$  для случая однонаправленных гравитационных волн на поверхности воды постоянной глубины:

$$\begin{aligned} & i \left( \frac{\partial \eta_{10}}{\partial t} + V \frac{\partial \eta_{10}}{\partial x} \right) + \varepsilon \beta_1 \frac{\partial^2 \eta_{10}}{\partial x^2} + \varepsilon \alpha_1 |\eta_{10}|^2 \eta_{10} + \\ & + i \varepsilon^2 \beta_2 \frac{\partial^3 \eta_{10}}{\partial x^3} + i \varepsilon^2 \alpha_{21} |\eta_{10}|^2 \frac{\partial \eta_{10}}{\partial x} + i \varepsilon^2 \alpha_{22} \eta_{10}^2 \frac{\partial \eta_{10}^*}{\partial x} + \\ & + \varepsilon^3 \beta_3 \frac{\partial^4 \eta_{10}}{\partial x^4} + \varepsilon^3 \alpha_{31} |\eta_{10}|^4 \eta_{10} + \varepsilon^3 \alpha_{32} |\eta_{10}|^2 \frac{\partial^2 \eta_{10}}{\partial x^2} + \\ & + \varepsilon^3 \alpha_{33} \eta_{10}^2 \frac{\partial^2 \eta_{10}^*}{\partial x^2} + \varepsilon^3 \alpha_{34} \eta_{10} \frac{\partial \eta_{10}}{\partial x} \frac{\partial \eta_{10}^*}{\partial x} + \varepsilon^3 \alpha_{35} \eta_{10}^* \left( \frac{\partial \eta_{10}}{\partial x} \right)^2 = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Важно, что полученная теория описывает нелинейную динамику волн в области вырождения нелинейного коэффициента  $\alpha_1$  (при  $kh = 1.363$ , где  $k$  –

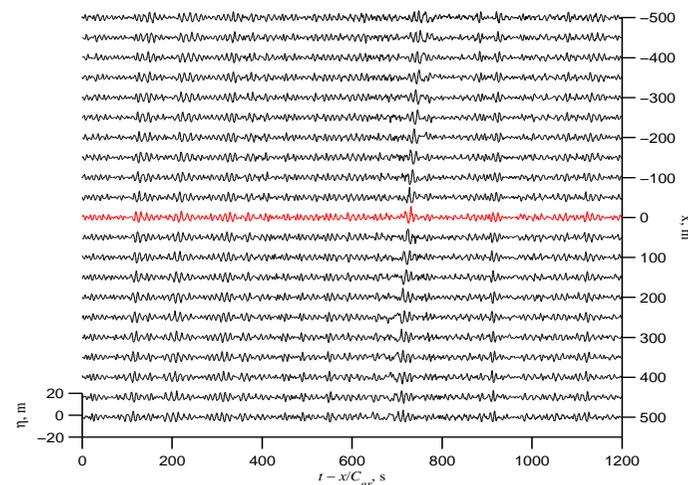
волновое число несущей и  $h$  – глубина). Предел бесконечно глубокой воды  $kh \rightarrow \infty$  требует отдельного рассмотрения. В предположении  $kh \geq 1/\varepsilon^2$  получено обобщение уравнения Диста [Dysthe, 1979] с нелокальным членом с учетом слагаемых следующего порядка малости.

Точные решения обратной задачи рассеяния для нелинейного уравнения Шредингера в приложении к описанию нелинейной стадии модуляционной неустойчивости обсуждаются в [Разделе 2.3 «Аналитическое описание усиления волн под действием самофокусирующей нелинейности»](#). Характеристики начальной и нелинейной стадии модуляционно неустойчивых цугов волн обсуждаются в деталях с использованием точных решений НУШ – бризеров. Используется интерпретация бризера как нелинейной суперпозиции солитона огибающей и фоновой волны, что позволяет ввести амплитуду бризера  $A_{br}$ , которая равна амплитуде солитона огибающей вдали от фоновой волны амплитуды  $A_{pw}$ . Во время эволюции бризера смещение поверхности воды  $\eta$  (в рамках модели НУШ) изменяется в интервале  $|A_{br} - A_{pw}| \leq \eta \leq |A_{br} + A_{pw}|$ , тем самым осуществляется линейная суперпозиция амплитуд волн, участвующих во взаимодействии. Такой подход позволяет упростить анализ и прогноз максимальной достижимой высоты волн на основе анализа данных спектральной задачи НУШ.

В [Разделе 2.4 «Применение МОЗР для выделения когерентных групп в записях, содержащих аномальные волны»](#) описан оригинальный подход к анализу инструментальных записей смещения поверхности в точке, использующий оконный МОЗР. Он применен для анализа записей, полученных в Северном море, которые содержат аномальные волны. Получено, что в большинстве случаев аномальная волна «вырастает» внутри интенсивной группы, так что большая часть «волн-убийц» (в 7 из 11 случаев) может быть объяснена динамикой солитоноподобной группы на фоне окружающих волн. На модельном примере продемонстрирована возможность подхода осуществлять краткосрочное предсказание максимально достижимой амплитуды волн.

В [Разделе 2.5 «Реконструкция событий аномальных волн в рамках численного моделирования»](#) выполнено компьютерное моделирование инструментальных регистраций аномальных волн, восстанавливающее картину пространственно-временной эволюции волн в предположении однонаправленного движения. Для расчета использована модель обобщенного НУШ (уравнения Диста, [Trulsen, 2006]), описывающая эволюцию в пространстве, а потому пригодная для восстановления данных по измерениям в точке (рис. 2). В частности, подход позволяет оценить время жизни «волн-убийц», которое по результатам моделирования оказалось до 10 периодов волн (около полутора минут), что согласуется с имеющимися свидетельствами очевидцев «волн-убийц». Применимость приближенной модели Диста для расчета эволюции сильно нелинейных волн до времен порядка 10 мин (для 10-сек штормовых волн в Северном море) была проверена с помощью комбинированного расчета против и по движению волн. Общая идея такова, что

сперва с помощью приближенной модели эволюции вспять рассчитывается начальное условие для последующего моделирования полных уравнений эволюции по направлению волн.



**Рис. 2.** Пространственно-временная эволюция волн (в сопровождающей системе координат), рассчитанная по регистрации смещений поверхности в точке (дистанция  $x = 0$ , шифр записи с платформы North Alwyn NA9711180110) в рамках уравнений Диста.

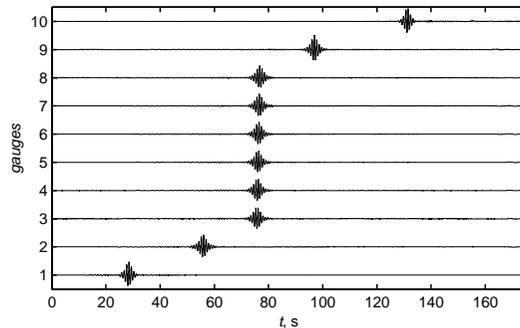
Основные результаты по второй главе сформулированы в [Заключении](#).

В [третьей главе «Сильнонелинейные сценарии формирования аномальных волн»](#) динамика и процессы генерации экстремальных коллинеарных волн на поверхности глубокой воды моделируются в рамках уравнений Эйлера в потенциальном приближении (включая численную схему для уравнений в конформных переменных [Zakharov et al., 2002]), а также в лабораторных условиях. Во [Введении](#) к главе обсуждаются пределы применимости асимптотических моделей огибающей для описания сильно нелинейных процессов и приводятся примеры описания в рамках исходных уравнений гидродинамики и приближенных моделей для огибающей разных порядков точности по слабой нелинейности и дисперсии.

[Раздел 3.2 «Моделирование «предельных» солитонов огибающей»](#) посвящен численному моделированию распространения и взаимодействия «структурных элементов» нелинейной динамики групп волн на глубокой воде – солитонов огибающей. При этом рассматриваются условия сильной нелинейности и сильной дисперсии. Описаны результаты лабораторного моделирования солитонов огибающей большой крутизны. Начальное условие во всех случаях задавалось, в том числе, с помощью точного аналитиче-

ского решения НУШ. В численных экспериментах показано, что до крутизны солитонов огибающей  $kA \approx 0.2$  эволюция уединенной волновой группы хорошо описывается в рамках обобщенного НУШ (уравнения Диста). Для большей крутизны отличия между расчетом исходных уравнений и модели Диста становятся существенными. При превышении порога  $kA \approx 0.3$  происходит быстрое обрушение волн. По данным компьютерного моделирования взаимодействия волновых групп во многих случаях оказываются почти упругими; в то же время приводятся примеры разрушения солитона меньшей амплитуды (но близкой крутизны) при попутном взаимодействии и связывания двух солитонов с очень близкими скоростями.

Существование интенсивных солитонов огибающей и возможность их генерации с помощью точного решения НУШ были проверены в лабораторных условиях. Максимальная крутизна структурно устойчивой группы волн оценивается равной  $A_{cr}\omega_m^2/g = 0.3$  (где  $A_{cr}$  – амплитуда гребня,  $\omega_m$  – средняя частота,  $g$  – ускорение свободного падения); в моментальном снимке такой группы можно выделить всего пару осцилляций. Солитонная группа преодолела весь экспериментальный лоток (около 60 длин волн, что равно примерно 15 длинам группы) без заметных изменений формы и излучения (рис. 3). При задании начального условия большей амплитуды происходило обрушение волн.



**Рис. 3.** Инструментальные записи смещения поверхности с 10 датчиков при пробеге по лотку солитона огибающей с крутизной  $kA_0 = 0.3$ .

В [Разделе 3.3 «Моделирование бризера \(одной моды модуляционной неустойчивости волны Стокса\) в рамках исходных уравнений гидродинамики»](#) выполнено численное моделирование модуляционно неустойчивых волновых цугов, особое внимание уделено нелинейной стадии. Рассмотрен широкий диапазон параметров, соответствующих реалистичным ситуациям интенсивных морских волн (крутизны невозмущенных цугов  $kA = 0.04...0.24$ , число волн в группе  $N_w = 3...20$ ). Для расчета использовались потенциальные уравнения Эйлера. Начальные условия задавались в виде нелинейной волны

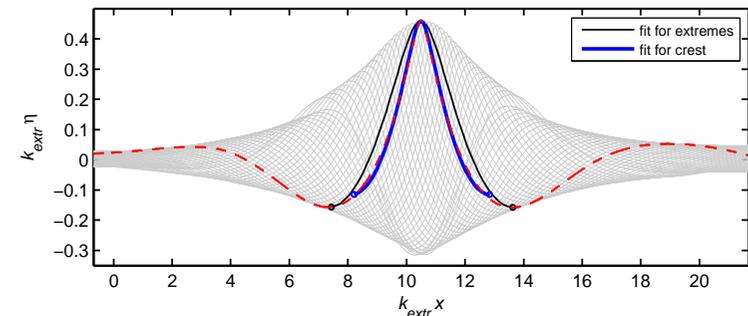
Стокса с модуляцией заданной длины, соответствующей точному бризерному решению нелинейного уравнения Шредингера (обычно возмущение составляло 1% амплитуды), что отличается от классической постановки задачи, когда задается только пара спектральных сателлитов.

Теория НУШ занижает порог возникновения неустойчивости (по крутизне  $kA$  для заданного числа волн в группе  $N_w$ ), нами предложена приближенная формула, учитывающая этот эффект в терминах поправки к индексу модуляционной неустойчивости  $BFI$ .

$$BFI_{adj} = 2\sqrt{2}kA(N_w - N_{adj}), \quad (3)$$

где  $N_{adj} = 0.47 \approx 0.5$  – подгоночный параметр. Волны неустойчивы при  $BFI_{adj} > 1$ . Отметим, что здесь под величиной  $BFI$  подразумевается детерминистский аналог индекса модуляционной неустойчивости, введенного для случайных волн, – параметр порядка для нелинейного уравнения Шредингера (в оптике ему соответствует солитонное число).

Получены коэффициенты усиления волн (высот, высот гребней и глубин ложбин) в зависимости от крутизны и величины  $N_w$ , времена нелинейной фокусировки, времена жизни «волн-убийц», характеристики максимально усиленных волн. Общая картина коэффициентов усиления амплитуд гребней и ложбин описана аналитически (приближенно) на основе подправленного решения НУШ для огибающей и решения высокого порядка для волны Стокса. Обнаружена универсальность картины максимально усиленной необрушающейся группы волн (для заданного  $N_w$ ) и максимальной волны в ней (рис. 4). Локально гребень максимальной волны близок к порогу обрушения волны Стокса.



**Рис. 4.** Характерный вид максимальной группы и волн с максимальным гребнем (длинный пунктир). Также показаны подогнанные профили волн Стокса по экстремумам волны (тонкая линия) и по гребню (широкая линия). Параметры начального условия:  $k_0H/2 = 0.125$ ,  $N_w = 4$ ,  $k_0 = 4$  рад/м; параметры подгонки по экстремумам: волновое число  $k_{extr} = 4.7$  рад/м, крутизна  $k_{extr}H_{max}/2 = 0.31$ , возвышение  $k_{extr} \Delta \bar{\eta} = +0.1$ .

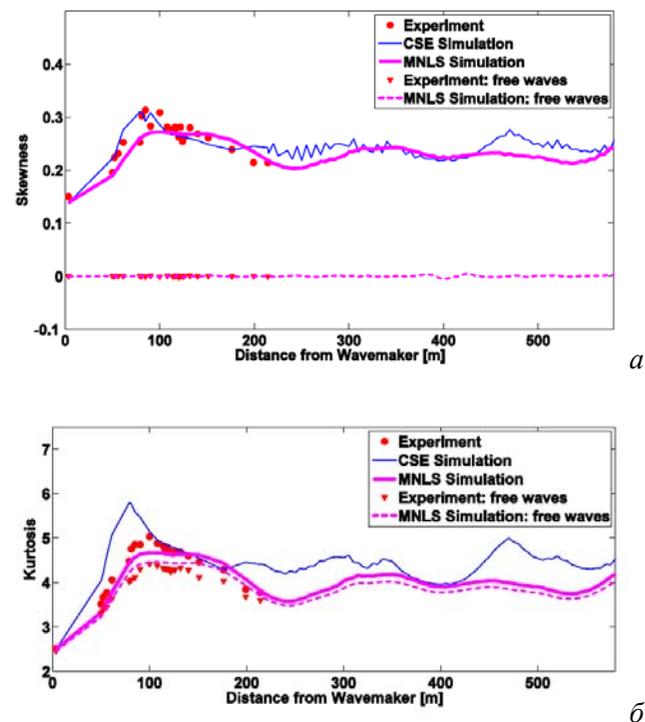
В Разделе 3.4 «Моделирование динамики мультибризерных полей («супер-волн-убийц»)» численно и с использованием лабораторных данных исследован многомодовый режим модуляционной неустойчивости с учетом эффектов сильной нелинейности (с использованием мультибризерных рациональных решений НУШ). Обнаружено, что на небольших временах аналитическое решение НУШ описывает эволюцию волн довольно хорошо, но в целом «выживает» только одна мода неустойчивости (динамика близка к бризерному решению Перегринна [Peregrine, 1983]), что делает процесс фокусировки схожим во всех рассмотренных случаях. Получено хорошее соответствие между результатами численного моделирования и лабораторными измерениями.

В **Заключении** сформулированы основные результаты по третьей главе. Делается вывод о существенной доле «преemptивности» сильно нелинейной динамики волн по отношению к слабонелинейным решениям. Слабонелинейные решения и их обобщения в ряде случаев могут быть использованы для понимания и описания сильнонелинейной динамики.

**Четвертая глава** «Стохастическое моделирование «волн-убийц» на поверхности глубокой воды» посвящена моделированию динамики ансамблей квазислучайных волн, позволяющему получить статистическое описание волн без использования гипотез замыкания. Во **Введении** к главе подчеркивается исключительная роль т.н. стохастического моделирования в плане получения статистических данных для решения проблемы аномальных морских волн. Такой подход лишен ограничений кинетической теории; современный уровень развития техники и алгоритмов расчета позволяет получать большие объемы данных моделирования, требуемые для изучения редких экстремальных событий. Подчеркивается важность установления связей между спектральными величинами и распределением вероятности высот волн в целях среднесрочного оперативного прогноза опасных состояний моря.

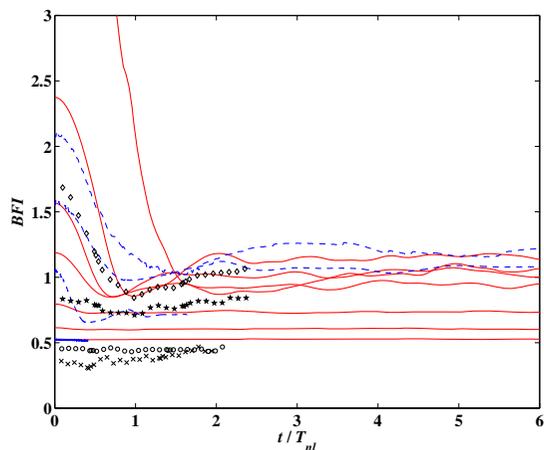
В Разделе 4.2 «Нелинейная динамика нерегулярных волновых групп с заданным начальным спектром» описываются лабораторные (в 300-метровом лотке Ганноверского университета) и численные эксперименты по моделированию нелинейной эволюции волн с заданным спектром. По своей постановке эти эксперименты родственны многим другим подобным работам, выполнявшимся другими исследовательскими группами примерно в это же время, с общей целью изучения соотношения между спектром начальных условий и статистикой волн. В то же время имеются важные отличия наших экспериментов, а именно, не производится усреднения по трассе, генерируется относительно короткий цуг волн вместо непрерывно работающего волнопродуктора и др. Численное моделирование пространственных версий классического НУШ и обобщенного НУШ (модели Диста) имело целью определить область применимости моделей огибающей для описания одной реализации и для статистического описания ансамбля реализаций (в среднем). Показано, что даже в случае интенсивных волн (без обрушения) моде-

ли огибающей способны давать достаточно хорошее описание на длительности лабораторного лотка. Модель Диста довольно хорошо описывает как структуру групп, так и фазы индивидуальных волн на протяжении всего лабораторного лотка (около  $1-2 T_{nl}$ , где  $T_{nl}$  – характерное время нелинейности, обратно пропорциональное квадрату крутизны волн). Простейшая модель – НУШ – описывает поведение статистических и спектральных характеристик неожиданно удовлетворительно (рис. 5). Полученное согласие позволило рассматривать эволюцию волн на еще больших временах эволюции (линии на рис. 5); в том числе были выполнены расчеты в рамках полных уравнений гидродинамики идеальной несжимаемой жидкости в потенциальном приближении. В результате была построена общая картина эволюции



**Рис. 5.** Эволюция третьего (а) и четвертого (б) статистических моментов смещения поверхности (асимметрии *skewness* и эксцесса *kurtosis*) от дистанции по данным лабораторных (точки) и численных (НУШ – тонкой линией и модель Диста – широкой) экспериментов. Треугольники и пунктирная линия соответствуют статистическим моментам, построенным для компонент свободных волн в лабораторных экспериментах и расчетах модели Диста соответственно. Начальные условия соответствуют  $BFI > 1$ .

нерегулярных волн с заданным начальным спектром в зависимости от значения индекса модуляционной неустойчивости  $BFI$  в начальный момент времени (рис. 6).

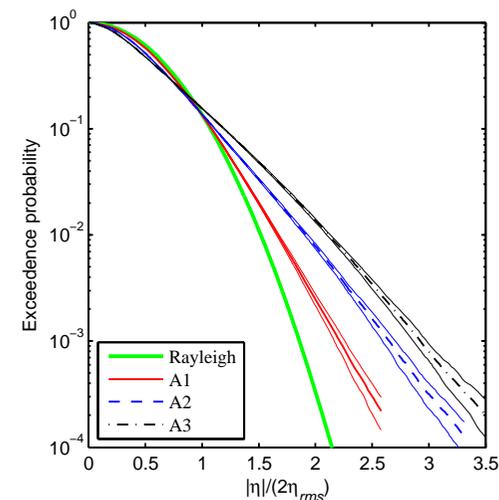


**Рис. 6.** Зависимость моментального значения  $BFI$  от нормированной дистанции / времени по данным численного моделирования НУШ (сплошная линия), исходных уравнений гидродинамики (штриховая линия) и лабораторных экспериментов (последовательности значков).

В случае начальных условий с  $BFI > 1$  усредненный спектр волн претерпевает существенные изменения, сначала расширяясь, а затем частично сужаясь. Волны достигают нового состояния статистического равновесия за  $1-2 T_{nl}$ , при этом моментальное значение  $BFI$  становится примерно равным единице. Когда начальное значение  $BFI < 1$ , усредненный спектр не изменяется существенно, и моментальное значение  $BFI$  не эволюционирует (рис. 6). Важно, что максимальная вероятность высоких волн и наибольшие значения 4-го статистического момента (экссесса) смещения поверхности достигаются во время вышеописанной переходной стадии установления нового состояния равновесия (как показано на рис. 5). Хотя отличия в распределениях вероятности наблюдаются и для установившихся состояний: в ситуациях с большим значением  $BFI$  вероятность высоких волн больше (рис. 7).

Стохастическое моделирование волн с целью получения вероятностного описания и примеров событий аномальных волн выполнено в [Разделе 4.3 «Численное моделирование нерегулярных однонаправленных волн с учетом сильной нелинейности»](#). После задания квазислучайных начальных условий происходит плавное «включение» нелинейности в системе, а затем выжидается промежуточный процесс перехода в равновесное состояние (описанный выше). Тем самым достигается квазиравновесное состояние волновой системы.

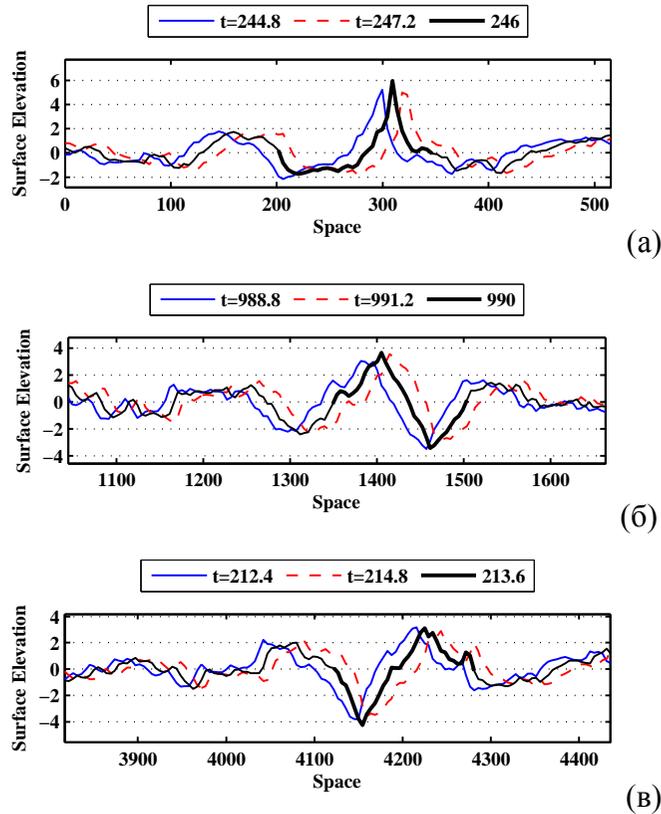
Изначально волны задаются в виде суперпозиции линейных волн, характеризуемых спектром JONSWAP. Выполняется расчет эволюции примерно 10-км последовательности волн в течение 20 мин с высоким разрешением в пространстве и времени. Далее полученный массив данных может быть исследован стандартными



**Рис. 7.** Результаты численного моделирования нерегулярных волн в рамках НУШ. A1, A2, A3 – функции распределения вероятности амплитуд для квазиравновесных состояний, с начальными условиями, соответственно,  $BFI = 0.56, 1.1$  и  $2.1$ . Тонкими линиями обозначены доверительные интервалы. Широкой линией построено распределение Рэлея.

их времена жизни, асимметрия профилей, кинематические характеристики. В частности, была обнаружена не упоминавшаяся ранее асимметрия между передним и задним фронтом экстремальных волн в случае состояния моря, характеризуемого большой крутизной волн, противоположная форме «волны Лавренова» [Лавренов, 1998]. В большинстве случаев задний склон аномальной волны выше, чем передний. Этот вывод подтверждается и некоторыми другими данными натуральных измерений и численного моделирования [Pinho et al., 2004, Xiao et al., 2013].

В [Разделе 4.4 ««Волны-убийцы» как когерентные состояния в стохастических полях поверхностных волн»](#) обсуждается связь между вероятностными свойствами нерегулярных волн в различных условиях и когерентными состояниями (для условий глубокой воды – квазисолитонами огибающей).



**Рис. 8.** Примеры профилей волн-убийц (жирным) и смещения поверхности в соседние моменты времени по результатам расчета уравнений Эйлера: высокий гребень (а), крутой перепад (б), «дырка в море» (в). Волны распространяются слева направо.

Действие нелинейности (хотя и слабой) оказывается принципиальным для поверхностных волн, поскольку приводит к образованию относительно долгоживущих образований, изменяющих статистику волн в сторону «экстремизации» (рис. 7). Предложена корреляционная функция, демонстрирующая наличие со-фазных состояний на периферии энергонесущей области спектра волн. Наиболее опасными с точки зрения высокой вероятности экстремальных волн являются переходные ситуации – установления квазиравновесных нелинейных состояний. Их частными примерами является описанный выше случай задания начального условия в виде нерегулярных волн с гауссовой статистикой, принудительное перемешивание (рандомизация) фаз гармоник Фурье, быстрое изменение ветра (внешней накачки), другие быстрые изме-

нения условий распространения (течения, глубины места и др.). Естественно, что для этих ситуаций статистические формулы, полученные в предположении слабой негауссовости и стационарности процесса [Mori & Janssen, 2006], уже не применимы.

Возможны и другие эффекты, связанные с присутствием в нерегулярных волнах когерентных квазисолитонных образований. Под действием слабой накачки солитоны огибающей способны адиабатически наращивать свою интенсивность, тем самым «в среднем» забирая энергию из системы; для неинтегрируемых систем характерна ситуация, когда в результате неупругих столкновений среди солитонов выделяется один – максимальный. В конце раздела формулируются причины, осложняющие использование индекса модуляционной неустойчивости  $BFI$  для целей оперативного прогноза: негрубость определения  $BFI$ , малый разброс значений, реализуемых в море, «эффект памяти», сдвигающий моменты больших значений  $BFI$  и наиболее экстремальных волн на временах порядка  $T_{nl}$  (от единиц до десятков минут).

В Заключении сформулированы основные результаты по четвертой главе. С одной стороны, подчеркивается важность и во многих случаях эффективность параметра модуляционной неустойчивости  $BFI$  для оценки отклонения статистики от гауссовой. С другой – особо отмечаются опасные переходные процессы, где использование этого параметра не эффективно.

В пятой главе «Аномально высокие волны на встречном струйном течении» строится асимптотическая модовая теория для трехмерных нелинейных волн, распространяющихся навстречу струйному течению. Для простоты глубина предполагается бесконечно большой, а течение – вертикально однородным. Во Введении к главе дан краткий обзор ныне доминирующего лучевого подхода к исследованию динамики волн на фоне течения, указываются затруднения, которые встречаются при его применении к описанию нелинейных волн и захваченных волн (в частности, НУШ для волн на течениях [Stocker & Peregrine, 1999; Hjelmerik & Trulsen, 2009] захваченные волны не учитывают).

В Разделе 5.2 «Линейная теория в рамках модового подхода» сформулирована постановка задачи о волнах на встречном струйном течении. Течение предполагается однородным в направлении движения волн ( $Ox$ ) и стационарным, зависящим только от поперечной координаты  $y$ ,  $\vec{U} = (U(y), 0, 0)$ , что позволяет искать решение в виде суперпозиции гармоник с заданными продольными волновыми числами и частотами. В частности, одна гармоника смещения поверхности  $\eta$ , вертикальной компоненты скорости  $w$  и давления  $P$  записывается в виде

$$\eta(x, y, t) = A(y) \exp(i\omega t - ikx), \quad (4)$$

$$w(x, y, z, t) = \hat{w}(y, z) \exp(i\omega t - ikx), \quad (5)$$

$$P(x, y, z, t) = \hat{P}(y, z) \exp(i\omega t - ikx) - gz. \quad (6)$$

Ось  $Oz$  направлена вверх. В линейном приближении получена двумерная ( $y$ - $z$ ) краевая задача на модовую структуру волн поперек направления движения волн. В терминах вертикальной компоненты скорости она имеет вид

$$\frac{\partial^2 \hat{w}}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \hat{w}}{\partial y^2} - k^2 \hat{w} + \left( \frac{\Omega''}{\Omega} - 2 \frac{\Omega'^2}{\Omega^2} \right) \hat{w} = 0 \quad \text{при } z \leq 0, \quad (7)$$

$$\frac{\partial \hat{w}}{\partial z} = \frac{\Omega^2}{g} \hat{w} \quad \text{при } z = 0, \quad \text{и} \quad \hat{w} \rightarrow 0 \quad \text{при } z \rightarrow -\infty,$$

$$\Omega(y) \equiv \omega - kU \quad (8)$$

и может решаться численно. Для краевой задачи (7) должны быть еще заданы граничные условия на поверхности для  $y \rightarrow \pm\infty$ , которые разделяют захваченные, проходящие и отраженные волны.

В предположении достаточно широкой струи течения  $L_U$  ( $kL_U \gg 1$ ) можно ввести разделение переменных для структуры моды следующим образом

$$\hat{w}(y, z) = Y(y)Z(y, z), \quad Z(y, z) = \exp\left(z \frac{\Omega^2}{g}\right), \quad (9)$$

где  $Z(y, z)$  слабо зависит от  $y$ . Тогда двумерная задача (7) приближенно сводится к одномерной нелинейной краевой задаче на поперечный горизонтальный профиль моды  $Y(y)$ . В случае дополнительно слабого течения по сравнению со скоростью волн ( $\max|U| \ll C_{ph}$ ) нелинейная краевая задача сводится к стационарному уравнению Шредингера с потенциалом, пропорциональным течению

$$\frac{\partial^2 Y}{\partial y^2} + 4k^2 \left( \frac{\omega - \omega_g}{\omega_g} - \frac{kU}{\omega_g} \right) Y = o(\gamma), \quad \omega_g = \sqrt{gk} \quad (10)$$

и соответствующими граничными условиями для  $y \rightarrow \pm\infty$ . В частности, для захваченных течением волн граничные условия имеют вид

$$Y \xrightarrow{y \rightarrow \pm\infty} 0. \quad (11)$$

Таким образом, одномерная краевая задача становится классической – типа Штурма – Лиувилля, а потому допускает подробный анализ и имеет точные аналитические решения. Ее собственные функции описывают структуру моды (в соответствии с (9)), а собственные значения – частоты  $\omega$ . Особенно важной является полнота системы собственных функций такой краевой задачи, что делает развиваемую теорию удобной с математической точки зрения. В разделе приводится сопоставление аналитических решений задачи Штурма – Лиувилля, численных решений нелинейной одномерной краевой задачи и численных решений исходной двумерной краевой задачи (как возмущения уравнения Гельмгольца с соответствующими граничными условиями): модовых функций и дисперсионных соотношений. Показано хоро-

шее соответствие при выполнении предположений на параметры течения. Для типичных ветровых волн и волн зыби с характерными длинами  $\sim 10^2$  м и скоростями  $\sim 10^1$  м/с все течения в море – слабые, и большинство течений – широкие. Для случая течения мыса Игольного характерное число захваченных мод исчисляется  $\sim 10^2 - 10^3$ .

В Разделе 5.3 «Нелинейная теория для 3-волновых взаимодействий захваченных мод» указывается возможность выполнения трехволновых резонансных условий для мод захваченных волн, которые не могут выполняться для свободно распространяющихся волн на глубокой воде. Взаимодействующие волны могут быть сопоставимых длин и частот в случае достаточно сильного течения. В противоположном случае слабого течения одна из захваченных волн должна быть много длиннее остальных  $k_{LW}/k = O(\gamma^2)$  и быстрее  $\omega_{LW}/\omega = O(\gamma)$  (здесь нижний индекс  $LW$  обозначает длинную волну в триаде), где  $\gamma = \max|U|/C_{ph}$ . Получена система уравнений для трех резонансно взаимодействующих слабо нелинейных захваченных волн в предположении широкого течения. Вывод не использует предположения о потенциальности движения воды. В случае незначительности 'подчиненных' (slave) мод (т.е., компонент разложения нелинейной моды по базису из линейных мод), что происходит, например, в случае слабого течения, уравнения на амплитуды мод имеют вид классических уравнений для трехволнового резонанса,

$$\begin{aligned} \frac{\partial \hat{P}_1}{\partial t} + \bar{V}_1 \frac{\partial \hat{P}_1}{\partial x} - i \bar{\rho}_1 \hat{P}_2^* \hat{P}_3^* &= 0, \\ \frac{\partial \hat{P}_2}{\partial t} + \bar{V}_2 \frac{\partial \hat{P}_2}{\partial x} - i \bar{\rho}_2 \hat{P}_1^* \hat{P}_3^* &= 0, \\ \frac{\partial \hat{P}_3}{\partial t} + \bar{V}_3 \frac{\partial \hat{P}_3}{\partial x} - i \bar{\rho}_3 \hat{P}_1^* \hat{P}_2^* &= 0. \end{aligned} \quad (12)$$

$$\bar{V}_j = \frac{1}{N_j} \int_{-\infty}^{\infty} V_j Y_j^2 dy, \quad \bar{\rho}_j = \frac{1}{N_j} \int_{-\infty}^{\infty} \rho_j Y_1 Y_2 Y_3 dy, \quad N_j \equiv \int_{-\infty}^{\infty} Y_j^2 dy, \quad j = 1, 2, 3. \quad (13)$$

Здесь система (12) записана для амплитуд давлений  $P_j$ , использовано резонансное условие в виде  $k_1 + k_2 + k_3 = 0$  и  $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 0$ ; величины  $\bar{V}_j$  определяют скорости мод; нелинейные коэффициенты  $\rho_j$  определяются через продольные волновые числа и частоты взаимодействующих волн. Нелинейные коэффициенты  $\bar{\rho}_j$  зависят также и от геометрии профилей мод  $Y_j$ . Нелинейные коэффициенты в общем случае очень сложны для анализа; в ситуации слабого течения они соответствуют распаднему типу взаимодействия, когда энергия из коротких волн может передаваться в длинную волну.

Коэффициент нелинейного взаимодействия для системы (12) становятся аномально малым в практически важном случае слабого течения, и тогда должны учитываться классические для волн на глубокой воде 4-волновые

взаимодействия. Нелинейные эволюционные уравнения для амплитуд квартетов мод захваченных волн получены в [Разделе 5.4](#) «*Нелинейная теория для 4-волновых взаимодействий захваченных мод*». Здесь для простоты сделано предположение о слабом течении, позволяющее решать уравнения в потенциальном приближении и пренебречь эффектами подчиненных (slave) мод. Система уравнений для квартета взаимодействующих мод имеет вид связанных нелинейных уравнений Шредингера, учитывающих эффекты самовоздействия, попарного взаимодействия и взаимодействия между всеми волнами в квартете. Как и в случае трехволновых взаимодействий (12), нелинейные коэффициенты зависят, в том числе, от геометрии взаимодействующих мод. Их вид громоздок, но допускает некоторый анализ.

Существуют различные важные частные случаи взаимодействующих квартетов. Одним из них является модель одной захваченной моды в предположении о слабости взаимодействий с другими модами. В этой ситуации динамика одной захваченной моды, распространяющейся навстречу течению, описывается интегрируемым НУШ, а структура моды  $Y(y)$  – решением классической задачи Штурма-Лиувилля (10)-(11). В предположении слабого течения НУШ для компоненты смещения поверхности можно записать в виде

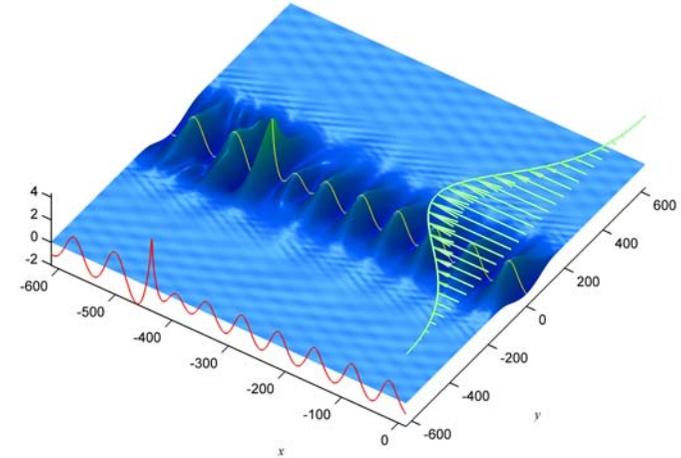
$$i \left[ \frac{\partial A}{\partial t} + \left( \frac{1}{2} \frac{kg^2}{\omega^3} + \frac{5}{2} \bar{U} \right) \frac{\partial A}{\partial x} \right] + \frac{\omega_g}{k^2} \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + I \frac{\omega_g k^2}{2} |A|^2 A = 0, \quad (14)$$

$$\bar{U} = \frac{1}{N} \int_{-\infty}^{\infty} UY^2 dy, \quad I = \frac{1}{N} \int_{-\infty}^{\infty} Y^4 dy, \quad N \equiv \int_{-\infty}^{\infty} Y^2 dy.$$

Важно, что динамика трехмерных волн оказалась описанной одномерным (1+1D) НУШ (подобно другому случаю топографически захваченных краевых волн [Pelinovsky et al, 2010]). Одномерное НУШ, как известно, демонстрирует значительно большую вероятность высоких волн, чем его двумерный аналог (2+1D). Узость углового спектра не была использована при выводе модовой теории волн на течениях, а потому она применима и для захваченных волн с узким угловым спектром (мода с большим порядковым номером).

В подтверждение развитой нелинейной теории для захваченных волн в [Разделе 5.5](#) «*Численное моделирование возникновения «волн-убийц» на встречном струйном течении в рамках исходных уравнений гидродинамики*» выполнен расчет эволюции волн на встречном струйном течении. Начальные условия задавались в виде точных решений НУШ для одной моды (14) и в соответствии с решением краевой задачи на структуру моды. Эволюция рассчитывалась с помощью алгоритма для решения уравнений Эйлера в потенциальном рассмотрении (модификация псевдоспектрального кода высокого порядка, High Order Spectral Method [West et al., 1987]); рассмотрены режимы сильной нелинейности. Показано существование гребенчатого частотного спектра, отвечающего за модовый состав волн, и удержание энергии в изначально заданной моде, что подтверждает применимость мо-

дового представления. Модуляционная неустойчивость захваченных волн приводит к нарастанию возмущения цуга волн и образованию аномально высокой волны (рис. 9) в хорошем согласии с уравнением (14). Только на финальной стадии, когда образуется обрушивающаяся волна, имеет место заметное перераспределение энергии между модами захваченных волн. Впервые показано существование солитонных структур волн на глубокой воде, локализованных во всех направлениях. Такие трехмерные волновые группы способны распространяться на значительные расстояния.



**Рис. 9.** Образование «волны-убийцы» в результате развития модуляционной неустойчивости фундаментальной моды захваченных волн. Вид поверхности перед обрушением волны; максимальная волна оценивается крутизной  $kH/2 \approx 0.32$ . Линией показан разрез вдоль течения через максимум ( $y = 0$ ). Все размеры – в метрах.

В [Заключении](#) к главе сформулированы ее основные результаты и выводы. В частности, развитая теория нелинейных волн на струйных течениях позволяет предложить серию новых возможных механизмов формирования аномально высоких волн: нелинейная неустойчивость захваченных мод, увеличение локализации мод на усиливающихся либо зауживающихся течениях, адиабатическое усиление солитонных волновых групп на усиливающихся течениях, взаимодействие с проходящими модами. Одномерность захваченных волн является благоприятным фактором для развития модуляционной неустойчивости. Все эффекты одномерной динамики формирования экстремальных волн, исследовавшиеся в большинстве работ по «волнам-убийцам», в том числе, в главах 2–4 диссертации, могут быть применимы к волнам, захваченным течением. Близость динамики захваченных волн к интегрируемому НУШ позволяет использовать детерминированное описание «волн-убийц» в целях оперативного краткосрочного прогноза опасных событий.

В **Заключении** по диссертации отмечается, что в ней представлены результаты исследования нелинейных механизмов генерации аномально высоких волн на морской поверхности, позволившие построить типичный портрет «волн-убийц» и предложить подходы для вероятностного и детерминистского прогноза опасных волн. В частности:

1. Выведены асимптотические эволюционные уравнения 5-го порядка для огибающей нелинейных диспергирующих потенциальных волн на поверхности воды произвольной постоянной глубины. Полученная теория обобщает известные модели (нелинейное уравнение Шредингера, модель Диста), в частности, описывает модулированные волны в пределах мелкой и глубокой воды, а также описывает ситуацию вблизи критической глубины  $kh \approx 1.36$ . Показано, что порог модуляционной неустойчивости для волн конечной крутизны сдвигается от  $kh \approx 1.36$  в область мелкой воды.
2. Предложен оригинальный подход к анализу записей волн на поверхности глубокой воды и осуществления краткосрочного прогноза экстремальных волн, основанный на оконном анализе ассоциированной задачи рассеяния (в рамках метода обратной задачи рассеяния для нелинейного уравнения Шредингера, НУШ) и выделении солитоноподобных групп. По имеющимся инструментальным измерениям показано, что большинство «волн-убийц» возникает на фоне интенсивной когерентной волновой группы. Для ряда случаев интерпретация динамики в терминах бризеров НУШ (солитонов огибающей на фоновом волнении) способна полностью объяснить наблюдаемые высоты волн. По данным расчета полных уравнений гидродинамики выявлена сильная корреляция между спектральными квартетами, возникающая в полях нерегулярных волн.
3. Выполнено численное моделирование, реконструирующее пространственно-временную эволюцию событий «волн-убийц» по данным измерения смещения поверхности в одной точке. Времена жизни «волн-убийц» по данным расчетов достигают 100 с (порядка 10 периодов волн). Показана реалистичность реконструкций интенсивных морских волн для записей длительностью до 10 мин. Ограничения используемой теории для прогрессивных волн приводят к систематическому занижению реконструированных высот волн.
4. В рамках численного и лабораторного моделирования показано существование структурно устойчивых уединенных групп волн (квазисолитонов огибающей) во всем диапазоне амплитуд: от малых до предела обрушения (в пренебрежении поперечными эффектами). В случае большой амплитуды такие группы представимы всего 2–3 осцилляциями. Их вертикальная асимметрия подобна асимметрии однородных волн Стокса, но нелинейная поправка к скорости существенно больше. Такие группы могут взаимодействовать неупруго, либо почти упруго в зависимости от соотношения параметров. Аналитическое решение солитона

огибающей нелинейного уравнения Шредингера может быть использовано для генерации солитонных групп в лабораторных условиях до крутизны 0.3 (определенной по высоте гребня). Эволюция интенсивных солитонов огибающей может быть довольно хорошо описана в рамках обобщенного уравнения Шредингера (модели Диста) до крутиз волн порядка 0.2. Для еще больших крутиз отличия становятся качественными и быстро проявляются.

5. Детально исследовано развитие и нелинейная стадия одномодовой модуляционной неустойчивости потенциальных волн на поверхности глубокой воды в области параметров, наиболее интересных в приложении к морским «волнам-убийцам», в рамках полных уравнений гидродинамики. Показано, что порог возникновения модуляционной неустойчивости занижен, и нелинейная фокусировка происходит медленнее, чем предсказывает решение слабо нелинейной теории. Дано количественное описание порога модуляционной неустойчивости, картины максимального усиления амплитуд гребней и впадин, а также высот волн во всем рассмотренном диапазоне параметров вне обрушения. Тем самым, показано существование сильно нелинейных аналогов бризерных решений НУШ. Максимальное усиление амплитуд гребней необрушающихся волн чуть менее 4.2, максимальное усиление амплитуд ложбин, максимальное усиление высот волн – около 3. Обнаружена и описана универсальная картина максимальной группы и максимальной волны в такой группе. Исследована динамика мультибризерных решений нелинейного уравнения Шредингера в ситуации сильной нелинейности.
6. Изучена общая картина эволюции ансамблей однонаправленных поверхностных волн с заданным начальным спектром. Предложена ее параметризация в терминах индекса модуляционной неустойчивости,  $BFI$ , и характерного масштаба кубической нелинейности,  $T_{nl}$ . В случае  $BFI > 1$  усредненный спектр волн претерпевает существенные изменения, сначала расширяясь, а затем частично сужаясь. Волны достигают нового состояния статистического равновесия за  $1-2T_{nl}$ , при этом моментальное значение  $BFI$  становится примерно равным единице. Максимальная вероятность высоких волн и наибольшие значения 4-го статистического момента (экспесса) смещения поверхности достигаются во время вышеописанной переходной стадии установления нового состояния равновесия, когда происходит формирование волновых групп. Такой же эффект возникает и при других способах нарушения статистического равновесия: искусственного перемешивания фаз гармоник Фурье, быстрого включения или выключения мощной накачки волн извне. При этом нарушается пропорциональная связь между экспессом смещения поверхности и  $BFI$ , полученная ранее теоретически в приближениях близости к стационарному гауссовому процессу.

7. Проведено стохастическое моделирование интенсивных поверхностных морских волн с модельным спектром (гауссовым и JONSWAP) в предположении однонаправленного распространения. Проанализирована эволюция сильно нелинейных нерегулярных волн на пространственно-временных областях 10 км × 20 мин. Впервые обнаружена асимметрия фронтов экстремальных волн в случае морского состояния, характеризуемого большой степенью нелинейности. Показано несоответствие в статистическом смысле между волнами большой высоты и волнами с большими скоростями жидкости на поверхности.
8. Предложен подход для последовательного описания линейной и нелинейной динамики волн на струйных течениях, основанный на модовом представлении. Предложено разделение переменных для двумерной краевой задачи на моды в случае широкого течения по сравнению с длиной волны вдоль течения, позволяющее свести задачу к существенно более простой – одномерной, а в случае слабого течения – к классической задаче Штурма-Лиувилля с модами, составляющими полный базис. Показано хорошее согласие между решениями упрощенных одномерных краевых задач и исходной двумерной задачи.
9. Выведены нелинейные эволюционные уравнения для взаимодействующих триад (непотенциальная теория) и квартетов (в потенциальном приближении) захваченных мод на течении. В зависимости от параметров задачи доминировать могут 3- или 4-волновые взаимодействия, либо их комбинации. Квадратичные резонансные взаимодействия ожидаются наиболее существенными для случая сильного течения, тогда продольные длины взаимодействующих волн сопоставимы. В случае слабого течения одна из волн в триаде много длиннее и быстрее остальных, а нелинейное взаимодействие ослабляется и может быть сопоставимым или слабее, чем эффекты кубической нелинейности. Возможна перекачка энергии вниз по спектру в результате 3-волнового взаимодействия. Решения полученной слабо нелинейной теории для 4-волновых взаимодействий модулированных волн проверены в рамках численного моделирования исходных уравнений гидродинамики (в предположении потенциальности движения). Показано существование долгоживущих когерентных локализованных по всем направлениям волновых пакетов, распространяющихся навстречу течению вблизи его струи (солитоны огибающей захваченных волн).
10. Предложены возможные механизмы формирования аномально высоких волн в поле захваченных течением волн. На адиабатически изменяющемся течении это: укручение волн на усиливающемся течении, увеличение локализации мод на усиливающемся либо суживающемся течении, адиабатическое усиление солитонных волновых групп на усиливающемся течении. Эффективно одномерный характер динамики захваченных волн делает возможным развитие модуляционной неустойчиво-

сти даже в случае широкого углового спектра волн. Возможность образования аномально высоких волн в результате нелинейной самомодуляции захваченных волн предсказана в рамках слабо нелинейной теории и показана в рамках численного моделирования полных уравнений гидродинамики. Близость эволюционных моделей, описывающих захваченные волны на встречном течении, к интегрируемым системам позволяет развивать детерминистское описание «волн-убийц» в целях краткосрочного прогноза опасных событий.

#### Публикации автора по теме диссертации

##### Монография

[1\*]. Kharif, C., Pelinovsky, E., **Slunyaev, A.** Rogue waves in the ocean. – Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2009. 216 p.

##### Обзор

[2\*]. **Slunyaev, A.**, Didenkulova, I., Pelinovsky, E. Rogue waters // Contemporary Physics. 2011. V. 52. P. 571-590.

##### Статьи в журналах

- [3\*]. Дивинский Б.В., Левин Б.В., Лопатухин Л.И., Пелиновский Е.Н., **Слюняев А.В.** Аномально высокая волна в Черном море: наблюдения и моделирование // Доклады академии наук. 2004. Т. 395. С. 690-695.
- [4\*]. Пелиновский Е.Н., **Слюняев А.В.**, Талипова Т.Г., Хариф К. Нелинейное параболическое уравнение и экстремальные волны на морской поверхности // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2003. Т. 46. С. 499-512.
- [5\*]. **Слюняев А.В.** Взаимодействие солитона огибающей с плоской волной в рамках нелинейного уравнения Шредингера // Известия АИН им. А.М. Прохорова. 2005. Т. 14. С. 41-46.
- [6\*]. **Слюняев А.В.** Нелинейное уравнение высокого порядка для огибающей гравитационных волн на воде конечной глубины // ЖЭТФ. 2005. Т. 128. С. 1061-1077.
- [7\*]. **Слюняев А.В.** Численное моделирование «предельных» солитонов огибающей гравитационных волн на глубокой воде // ЖЭТФ. 2009. Т. 136. С. 785-796.
- [8\*]. **Слюняев А.В.**, Сергеева А.В. Стохастическое моделирование однонаправленных интенсивных волн на глубокой воде в приложении к аномальным морским волнам // Письма в ЖЭТФ. 2011. Т. 94. С. 850-858.
- [9\*]. **Слюняев А.В.**, Сергеева А.В. Численное моделирование и анализ пространственно-временных полей аномальных морских волн // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2012. Т. 5. С. 24-36.
- [10\*]. Chabchoub, A., Hoffmann, N., Onorato, M., **Slunyaev, A.**, Sergeeva, A., Pelinovsky, E., Akhmediev, N. Observation of a hierarchy of up to fifth-order rogue waves in a water tank // Phys. Rev. E. 2012. V. 86. Art. 056601.
- [11\*]. Didenkulova, I.I., **Slunyaev, A.V.**, Pelinovsky, E.N., Kharif, Ch. Freak waves in 2005. Natural Hazards Earth Syst. Sci. 6, 1007-1015 (2006).
- [12\*]. Ezersky, A., **Slunyaev, A.**, Mouazé, D., Chokchai, W. Occurrence of standing surface gravity waves modulation in shallow water // Eur. J. Mech. B / Fluids. 2009. V. 28. P. 521-531.

- [13\*]. Grimshaw, R., **Slunyaev, A.**, Pelinovsky, E. Generation of solitons and breathers in the extended Korteweg-de Vries equation with positive cubic nonlinearity // *Chaos*. 2010. V. 20. Art. 013102.
- [14\*]. Ruban, V., Kodama, Y., Ruderman, M., Dudley, J., Grimshaw, R., McClintock, P., Onorato, M., Kharif, C., Pelinovsky, E., Soomere, T., Lindgren, G., Akhmediev, N., **Slunyaev, A.**, Solli, D., Ropers, C., Jalali, B., Dias, F., Osborne, A. Rogue waves - towards a unifying concept? Discussions and debates // *Eur. Phys. J. Special Topics*. 2010. V. 185. P. 5-15.
- [15\*]. Sergeeva, A., **Slunyaev, A.** Rogue waves, rogue events and extreme wave kinematics in spatio-temporal fields of simulated sea states // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2013. V. 13. P. 1759-1771.
- [16\*]. Sergeeva, A., **Slunyaev, A.**, Pelinovsky, E., Talipova, T., Doong, D.-J. Numerical modeling of rogue waves in coastal waters // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2014. V. 14. P. 861-870.
- [17\*]. Shemer, L., **Sergeeva, A.**, Slunyaev, A. Applicability of envelope model equations for simulation of narrow-spectrum unidirectional random field evolution: experimental validation // *Phys. Fluids*. 2010. V. 22. Art. 016601.
- [18\*]. Shrira, V.I., **Slunyaev, A.V.** Nonlinear dynamics of trapped waves on jet currents and rogue waves // *Phys. Rev. E*. 2014. V. 89. Art. 041002(R).
- [19\*]. Shrira, V.I., **Slunyaev, A.V.** Trapped waves on jet currents: asymptotic modal approach // *J. Fluid Mech.* 2014. V. 738. P. 65-104.
- [20\*]. **Slunyaev, A.** Freak wave events and the wave phase coherence // *Eur. Phys. J. Special Topics*. 2010. V. 185. P. 67-80.
- [21\*]. **Slunyaev, A.** Nonlinear analysis and simulations of measured freak wave time series // *Eur. J. Mech. B / Fluids*. 2006. V. 25. P. 621-635.
- [22\*]. **Slunyaev, A.**, Clausen, G.F., Klein, M., Onorato, M. Simulations and experiments of short intense envelope solitons of surface water waves // *Phys. Fluids*. 2013a. V. 25. Art. 067105.
- [23\*]. **Slunyaev, A.**, Pelinovsky, E., Guedes Soares, C. Modeling freak waves from the North Sea // *Appl. Ocean Res.* 2005. V. 27. P. 12-22.
- [24\*]. **Slunyaev, A.**, Pelinovsky, E., Guedes Soares, C. Reconstruction of extreme events through numerical simulations // *J. Offshore Mech. Arctic Eng.* 2014. V. 136. Art. 011302.
- [25\*]. **Slunyaev, A.**, Pelinovsky, E., Sergeeva, A., Chabchoub, A., Hoffmann, N., Onorato, M., Akhmediev, N. Super rogue waves in simulations based on weakly nonlinear and fully nonlinear hydrodynamic equations // *Phys. Rev. E*. 2013b. V. 88. Art. 012909.
- [26\*]. **Slunyaev, A.**, Sergeeva, A., Pelinovsky, E. Wave amplification in the framework of forced nonlinear Schrödinger equation: the rogue wave context // *Physica D*. 2015. V. 303. P. 18-27.
- [27\*]. **Slunyaev, A.V.**, Shrira, V.I., On the highest non-breaking wave in a group: fully nonlinear water wave breathers vs weakly nonlinear theory // *J. Fluid Mech.* 2013. V. 735. P. 203-248.

#### Статьи в трудах конференций

- [28\*]. Диденкулова И.И., Куркин А.А., Пелиновский Е.Н., Полухина О.Е., Сергеева А.В., **Слюняев А.В.** «Волны-убийцы» на берегу: наблюдения и моделирование // Труды VIII Всерос. конф. «Современные методы математического мо-

делирования природных и антропогенных катастроф». - Кемерово: Инс-т угля и нефтехимии СО РАН. 2005. С. 147-157.

- [29\*]. Куркин А.А., Пелиновский Е.Н., **Слюняев А.В.** Физика волн-убийц в океане // Труды Научной школы «Нелинейные волны-2004». 2005. Н. Новгород: ИПФ РАН. С. 37-51.
- [30\*]. **Слюняев А.В.** Моделирование и прогноз аномальных морских волн // Ежегодник РАО "Акустика неоднородных сред". Сборник трудов школы-семинара под руководством проф. С.А. Рыбака. – Изд-во Тривант. г. Троицк. 2008. Вып. 9. С. 228-241.
- [31\*]. Pelinovsky, E., Kharif, Ch., **Slunyaev, A.**, Talipova, T., Sergeeva, A. Freak waves: physical mechanisms and experimental data // *Proc. 2nd Int. Conf. "Frontiers of Nonlinear Physics"*. – Nizhny Novgorod, Russia. 2005. P. 169-178.
- [32\*]. Pelinovsky, E., **Slunyaev, A.**, Talipova, T., Sergeeva, A. *Mechanics of Freak Waves // Asian and Pacific Coasts 2005 / Eds: Choi, B.H., Suh, K.D., Yoon, S.B. – Hanrimwon Publishing Co., Korea. 2005. P. 67-78.*
- [33\*]. Sergeeva, A., Doong, D.-J., Pelinovsky, E., Talipova, T., **Slunyaev, A.** Simulations of rogue waves in coastal waters: effects of variable bathymetry // *Proc. Joint Symp. on Hydraulic and Ocean Engineering*. 2012. P. 481-498.
- [34\*]. Shemer, L., Sergeeva, A., **Slunyaev, A.** Experimental and numerical study of evolution of statistical properties of unidirectional narrow-banded steep wave groups // *Proc. Workshop "Rogue Waves 2008" / Eds. Olagnon, M., Prevosto, M. – Ifremer. 2009. P. 179-189.*
- [35\*]. Shemer, L., **Slunyaev, A.**, Dorfman, B. Direct measurements of temporal wave field evolution in a laboratory tank and comparison with strongly nonlinear simulations // *Proc. Workshop "Rogue Waves 2008" / Eds. Olagnon, M., Prevosto, M. – Ifremer. 2009. P. 191-198.*
- [36\*]. **Slunyaev A.** Evidence of the wave phase coherence for freak wave events // *Nonlinear and complex dynamics: Applications in physical, biological, and financial systems / Eds. Machado, J.A.T., Baleanu, D., Luo, A.C.J. – Springer Science+Business Media. 2011. P. 147-158.*
- [37\*]. **Slunyaev, A.**, Ezersky, A., Mouazé, D., Chokchai, W. Nonlinear modulations of standing long gravity waves in a resonator // *Proc. Workshop "Rogue Waves 2008" / Eds. Olagnon, M., Prevosto, M. – Ifremer. 2009. P. 209-218.*
- [38\*]. **Slunyaev, A.**, Pelinovsky, E., Guedes Soares, C. Reconstruction of extreme events through numerical simulations // *Proc. 30th Int. Conf. on Ocean, Offshore and Arctic Eng. (OMAE-2011)*. 2011. OMAE2011-50314.
- [39\*]. **Slunyaev, A.V.**, Sergeeva, A.V., Pelinovsky, E.N. Modelling of deep-water rogue waves: different frameworks // *CENTEC Anniversary Book. Marine Technology and Engineering / Ed. Guedes Soares, C., Garbatov, Y., Fonseca, N., Teixeira, A.P. – Taylor & Francis Group, London. 2012. P. 199-216.*

#### **Список цитируемой литературы**

- Захаров В.Е. Устойчивость периодических волн на поверхности глубокой жидкости // *ПМТФ*. 1968. Т. 9. С. 86-94.
- Захаров В.Е. Шабат А.Б. Точная теория двумерной самофокусировки и одномерной автомодуляции волн в нелинейных средах // *ЖЭТФ*. 1971. Т. 61. С. 118-134.

Захаров В.Е., Шамин Р.В. Статистика волн-убийц в вычислительных экспериментах // Письма в ЖЭТФ. 2012. Т. 96. С. 68-71.

Захаров В.Е., Манаков С.В., Новиков С.П., Питаевский Л.П. Теория солитонов. Метод обратной задачи. – М.: Наука. 1980. 319 с.

Куркин А.А., Пелиновский Е.Н. Волны-убийцы: факты, теория и моделирование. – Нижний Новгород. 2004. 158 с.

Лавренев И.В. Математическое моделирование ветрового волнения в пространственно-неоднородном океане (под ред. Давидана И.Н.). – СПб: Гидрометеоздат. 1998. 500 с.

Таланов В.И. О самофокусировке волновых пучков в нелинейных средах // Письма в ЖЭТФ. 1965. Т. 2. С. 218.

Chalikov, D. Statistical properties of nonlinear one-dimensional wave fields // Nonlin. Proc. Geophys. 2005. V. 12. P. 671-689.

Dudley, J.M., Dias, F., Erkintalo, M., Genty G. Instabilities, breathers and rogue waves in optics // Nature Photonics. 2014. V. 8. P. 755-764.

Dyachenko, A.I., Zakharov, V.E. Modulation instability of Stokes Wave → Freak Wave // Письма в ЖЭТФ. 2005. Т. 81. С. 318-322.

Dysthe, K., Krogstad, H.E., Muller, P. Oceanic rogue waves // Annu. Rev. Fluid. Mech. 2008. V. 40. P. 287-310.

Dysthe, K.B. Note on a modification to the nonlinear Schrödinger equation for application to deep water waves // Proc. Roy. Soc. London A. 1979. V. 369. P. 105-114.

Gramstad, O., Trulsen, K. Influence of crest and group length on the occurrence of freak waves // J. Fluid Mech. 2007. V. 582. P. 463-472.

Henderson, D.M., Segur, H., Carter, J.D. Experimental evidence of stable wave patterns on deep water // J. Fluid Mech. 2010. V. 658. P. 247-278.

Hjelmervik, K.B., Trulsen, K. Freak wave statistics on collinear currents // J. Fluid. Mech. 2009. V. 637. P. 267-284.

Janssen, P.A.E.M. Nonlinear four-wave interactions and freak waves // J. Phys. Oceanogr. 2003. V. 33. P. 863-884.

Leblanc, S. Amplification of nonlinear surface waves by wind // Phys. Fluids. 2007. V. 19. Art. 101705.

Mori, N., Janssen, P.A.E.M. On kurtosis and occurrence probability of freak waves // J. Phys. Oceanogr. 2006. V. 36. P. 1471-1483.

Mori, N., Onorato, M., Janssen, P.A.E.M., Osborne, A.R., Serio, M. On the extreme statistics of long-crested deep water waves: Theory and experiments // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. Art. C09011.

Onorato, M., Osborne, A.R., Serio, M. Extreme wave events in directional, random oceanic sea states // Phys. Fluids. 2002. V. 14. P. L25-L28.

Onorato, M., Osborne, A.R., Serio, M., Bertone, S. Freak waves in random oceanic sea states // Phys. Rev. Lett. 2001. V. 86. P. 5831-5834.

Onorato, M., Residori S., Bortolozzo U., Montinad A., Arecchi F. T. Rogue waves and their generating mechanisms in different physical contexts // Phys. Rep. 2013. V. 528. P. 47-89.

Onorato, M., Waseda, T., Toffoli, A., Cavaleri, L., Gramstad, O., Janssen, P. A., Kinoshita, T., Monbaliu, J., Mori, N., Osborne, A.R., Serio, M., Stansberg, C.T., Tamura, H., Trulsen, K. Statistical properties of directional ocean waves: the role of the modulational instability in the formation of extreme events // Phys. Rev. Lett. 2009. V. 102. Art. 114502.

Pelinovsky, E., Polukhina, O., Kurkin, A. Rogue edge waves in the ocean // Eur. Phys. J. Special Topics. 2010. V. 185. P. 35-44.

Peregrine, D.H. Water waves, nonlinear Schrodinger equations and their solutions // J. Austral. Math. Soc. Ser. B. 1983. V. 25. P. 16-43.

Pinho, U.F., Liu, P.C., Ribeiro, C.E.P. Freak Waves at Campos Basin, Brazil // Geofizika. 2004. V. 21. P. 53-67.

Ruban, V.P. Nonlinear stage of the Benjamin - Feir in-stability: three-dimensional coherent structures and rogue waves // Phys. Rev. Lett. 2007. V. 99. Art. 044502.

Ruban, V.P. Two different kinds of rogue waves in weakly crossing sea states // Phys. Rev. E. 2009. V. 79. Art. 065304.

Segur, H., Henderson, D., Carter, J., Hammack, J., Li, C., Phei, D., Socha, K. Stabilizing the Benjamin-Feir instability // J. Fluid Mech. 2005. V. 539. P. 229-272.

Stansell, P. Distributions of freak wave heights measured in the North Sea // Appl. Ocean Res. 2004. V. 26. P. 35-48.

Stocker, J.D., Peregrine, D.H. The current-modified nonlinear Schrodinger equation // J. Fluid Mech. 1999. V. 399. P. 335-353.

Trulsen, K. Weakly nonlinear and stochastic properties of ocean wave fields: application to an extreme wave event // Waves in geophysical fluids: Tsunamis, Rogue waves, Internal waves and Internal tides / Eds. Grue, J., Trulsen, K. – CISM Courses and Lectures No. 489. New York, Springer Wein. 2006.

Voronovich, V.V., Shrira, V.I., Thomas, G. Can bottom friction suppress ‘freak wave’ formation? // J. Fluid Mech. 2008. V. 604. P. 263-296.

West, B.J., Brueckner, K.A., Janda, R.S., Milder, D.M., Milton, R.L. A new numerical method for surface hydrodynamics // J. Geophys. Res. 1987. V. 92. P. 11803-11824.

Xiao, W., Liu, Y., Wu, G., Yue, D.K.P. Rogue wave occurrence and dynamics by direct simulations of nonlinear wave-field evolution // J. Fluid Mech. 2013. V. 720. P. 357-392.

Zakharov, V.E., Dyachenko, A.I., Vasilyev, O.A. New method for numerical simulation of a nonstationary potential flow of incompressible fluid with a free surface // Eur. J. Mech. B / Fluids. 2002. V. 21. P. 283-291.

---

Слюняев Алексей Викторович

**АНОМАЛЬНО ВЫСОКИЕ МОРСКИЕ ВОЛНЫ:  
ФИЗИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ И МОДЕЛИРОВАНИЕ**

А в т о р е ф е р а т

Подписано к печати 03.11.2015.  
Формат 60 × 90 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная.  
Усл. печ. л. 2,0. Тираж 120 экз. Заказ № 100(2015).

Отпечатано на ризографе в типографии Института прикладной физики РАН,  
603950 Н. Новгород, ул. Ульянова, 46