

## ФИЗИКА ЗЕМЛИ, АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

**Морские «волны-убийцы»: прогноз возможен?**А. В. Слюняев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Институт прикладной физики РАН, отдел нелинейных геофизических процессов.  
Россия, 603950, Бокс 120, Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46.*

<sup>2</sup> *Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева.  
Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24.  
E-mail: <sup>a</sup>slunyaev@hydro.appl.sci-nnov.ru*

Статья поступила 25.08.2016, подписана в печать 23.09.2016.

Приведен обзор наблюдательных данных по проблеме аномально высоких волн на морской поверхности (так называемых «волн-убийц»), сформулированы возникающие задачи и цели исследования, а также трудности на пути их достижения. Перечислены основные физические механизмы, предложенные для объяснения «волн-убийц», и обсуждены перспективные подходы к прогнозу опасных состояний моря. Предложены пути построения процедур краткосрочного оперативного прогноза опасных волн (до десятков периодов/длин волн) и приведены некоторые предварительные результаты их реализации.

*Ключевые слова:* аномальные волны, «волны-убийцы», прогноз морских волн, динамика морских волн.

УДК: 551.466, 530.182. PACS: 92.10.Hm, 47.20.Ky, 47.35.Fg, 05.45.Yv.

**Введение**

Признание научной общественностью факта существования опасного природного явления — морских «волн-убийц» на рубеже XX и XXI вв. повлекло всплеск исследований: сначала в основном океанографических, но вскоре — более широких по области применения, включая и чисто математические. В настоящее время бум в изучении экстремальных волновых явлений продолжается; новую мощную ветвь представляют работы в нелинейной оптике. Проблема морских «волн-убийц» является отчасти скандальной, поскольку затрагивает финансовые интересы крупных компаний и служит предметом спорных судебных разбирательств (вопросы стандартизации морских сооружений и судов, безопасности морепользования, включая экологическую, страхование имущества и жизни). Объективные данные, связанные с происшествиями в море (с судами и морскими платформами), обычно недоступны для исследования, а иногда нарочно замалчиваются. С другой стороны, существуют естественные причины, ограничивающие достоверность доступных данных. Все это создает некоторую неопределенность, и потому результаты исследований иногда могут использоваться в спекулятивной форме. Тем не менее сейчас изучение «волн-убийц» стало предметом серьезных научных изысканий, что позволяет поставить вопрос о возможности прогноза таких опасных волн.

В настоящей статье дан краткий обзор актуальных исследований по проблеме «волн-убийц», базирующийся в значительной степени на нашей монографии [1] и материалах диссертации [2]. Вначале

дан критический обзор наблюдений аномально высоких морских волн (разд. 1) и обсуждается формальное определение «волн-убийц» (разд. 2). В разд. 3 приводятся сведения об имеющихся инструментальных измерениях неожиданно высоких волн. Данные наблюдений, изначально мотивировавшие изучение аномально высоких морских волн, сейчас являются «мерилом» и конечным приложением развиваемых теорий. Имеющиеся свидетельства позволяют сузить круг поиска физических явлений, ответственных за морские «волны-убийцы», которые обсуждаются нами в разд. 4, сформулировать подходящие математические модели и верифицировать полученные результаты и объяснения. В разд. 5 сформулировано новое направление исследований, нацеленное на поиск возможностей применения развиваемых физико-математических моделей экстремальных морских волн для краткосрочного прогноза опасных ситуаций. Такие возможности неоднократно обсуждались на тематических конференциях — гипотетически, но сейчас возникает желание и, главное, вера в реализуемость практического использования наработок. В этой работе мы обсуждаем возможные пути развития этого направления и приводим некоторые предварительные результаты.

Дополнительный материал по проблеме «волн-убийц» может быть найден в русскоязычных монографиях [3–5]. Исторические описания событий «волн-убийц» можно найти в книге [6], а также в [7]. Физические обзоры по проблеме аномально высоких морских волн даны в статьях [8–10]. Можно выделить два недавних обзора [11, 12], освещающих проблему вне контекста морских волн,

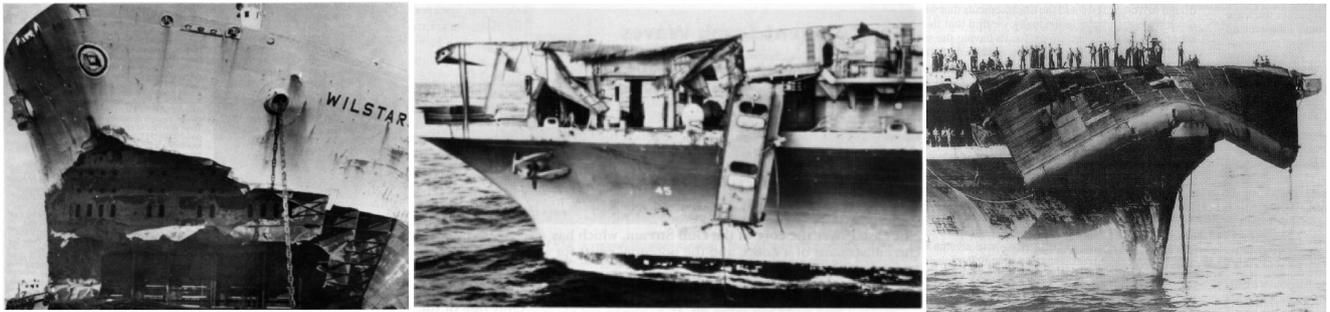


Рис. 1. Фотографии повреждений, вызванных экстремальными волнами



а

б

в

Рис. 2. События с аномально высокими волнами: а — тонущий танкер «Prestige» (2002 г.); б — фотография, сделанная на танкере «Esso Languedoc» у берегов Дурбана в 1980 г; в — фотография «стены воды»

и специальный выпуск журнала «The European Physical Journal» [13]. На русском языке вышли специальные номера журнала «Фундаментальная и прикладная гидрофизика» [14, 15]. Также нами опубликованы популярные статьи об аномальных морских волнах [16, 17].

### 1. Исторические свидетельства и современные факты

Аномально высокие волны могли бы так и остаться морским фольклором, если бы не аварии, потрясшие людское воображение. Примеры последствий встреч с необычно мощными волнами представлены на фотографиях на рис. 1. Длинный, но, очевидно, неполный список катастрофических ситуаций со времен Колумба собирает в Интернете известный океанограф П. Лью [75], множество других описаний может быть найдено в публикациях, а также в Иинтернете. Вот две цитаты из популярных изданий, характеризующие явление:

*«It came from nowhere, snapping giant ships in two. No one believed the survivors... until now»<sup>1</sup>* (обложка «New Scientist», 30 июня 2001 г.).

*«Our captain, who has 20 years on the job, said he never saw anything like it»<sup>2</sup>* (Сьюзан Робинсон (Susan Robison), представительница Норвежских круизных линий об инциденте с лайнером

«Норвежская заря» («Norwegian Dawn»), «New York Daily News», 17 апреля 2005 г.).

Первой трудностью на пути решения проблемы «волн-убийц» стало признание ее существования и перевод вопроса в плоскость научного исследования. В разных культурах такие волны получили разнообразные названия, дополненные после начала серьезного исследования новыми терминами: *freak waves, rogue waves, freaky waves, cape rollers, mad-dog waves, rabid-dog waves, abnormal waves, exceptional waves, giant waves, steep wave events, vagues scélérates, killer waves, anomalously high waves, extreme waves*. В русскоязычной литературе чаще всего используют термины аномально высокие (или просто аномальные) волны либо «волны-убийцы». Рассказываемые о разрушительных волнах истории зачастую бывают очень похожи, но могут демонстрировать и заметные различия; они могут быть использованы для лучшего понимания природного явления.

Одними из наиболее впечатляющих ситуаций являются волны с сильной локализацией. В качестве примера здесь можно привести случай с танкером «World Glory», являвшимся на момент выпуска в 1954 г. самым крупным танкером в мире и самым большим грузовым судном, построенным в США. Танкер затонул в 1968 г. в 105 км от Дурбана, унеся жизни 22 человек, после того как был разломлен

<sup>1</sup> «Она пришла из ниоткуда, раскалывая гигантские корабли пополам. Никто не верил выжившим... до настоящего времени».

<sup>2</sup> «Наш капитан, проработавший уже 20 лет, сказал, что никогда не видел ничего подобного».

пополам очень сильной волной. В результате аварии в море попало большое количество нефти. Танкер «Prestige» затонул у испанских берегов в 2002 г. абсолютно похожим образом (рис. 2, а), разлив нефти превзошел предыдущий случай. И хотя окончательный вывод о связи аварии с «волной-убийцей» не бесспорен, очевидно, что корпус судна оказался не способен выдержать волновую нагрузку. Судно было построено через 20 лет после событий с «World Glory», отвечало всем требованиям Американского бюро судоходства (American Bureau of Shipping, ABS) и Международной ассоциации стандартизирующих компаний.

В 1995 г. 30-метровую аномальную волну встретил круизный лайнер «Queen Elizabeth II» во время шторма в Северной Атлантике. Капитан вспоминал, что они наблюдали с мостика за *стеной воды* в течение пары минут до того момента, как она ударила судно существенно выше ватерлинии. Подобное же описание «стены воды» давал один из членов персонала плавающей буровой вышки Veslefrikk компании Statoil, которая была атакована большой волной в том же году, что привело к значительному ущербу. Первый помощник капитана нефтетанкера «Esso Languedoc» так описывал волну, запечатленную на рис. 2, б: «Был шторм, и танкер двигался, опережая море. Поразительная волна пришла с кормы и обрушилась, перехлестнув корму. Я не видел ее, пока она не появилась у борта, но она была особенной, много больше, чем остальные» [18]. Другой пример «стены воды» показан на рис. 2, в.

Последовательности нескольких волн неожиданно большой амплитуды также известны, их часто именуют «*три сестры*». Одним из известных случаев является встреча французского крейсера «Жанна д'Арк» («Jeanne d'Arc») со «славной троицей» из трех неожиданно высоких волн, пришедших под углом к направлению основного волнения. Ситуация для корабля осложнялась поломкой одного из винтов, так что инцидент едва не кончился для корабля плачевно, на русском языке этот случай подробно описан в [7]. В 1943 г. две последовательных неожиданно высоких волны разбила иллюминаторы круизного лайнера «Queen Elizabeth» на уровне 28 м выше ватерлинии. Две неожиданно мощные волны перевернули траулер «Kotoku» в 2006 г., три другие волны вышвырнули рыболовецкое судно «Starrigan» на мол в 2007 г. [18].

Разбиение волн на группы является естественным процессом, как будет обсуждаться далее. Волна, находящаяся в центре группы, обладает большей высотой и энергией. В прошлом моряки разных национальностей замечали опасные волновые группы, и очевидно, что вариант названия «три сестры» является аналогом русского «девятого вала». Серфингисты иногда ждут максимальную, седьмую волну. Последовательность интенсивных волн опасна не только большой амплитудой индивидуальных

волн, но и возможностью войти в резонанс с судном или морским сооружением.

Советский танкер «Таганрогский залив» испытал на себе действие волны другого вида — «*дырки в море*», которую иногда полагают даже более опасной, чем волна с высоким гребнем, поскольку провал в морской поверхности не заметен капитану до того момента, пока судно не начало в него скатываться. В результате инцидента с «Таганрогским заливом» погиб матрос и было назначено расследование с привлечением научной экспертизы [19]. Свидетели отмечали, что неожиданная единичная волна появилась перед судном и захлестнула его, накрыв слоем воды толщиной более 2 м. По описанию матросов, ощутивших воздействие волны, судно как бы плавно пошло вниз, скользя по волне, и «зарылось» в вертикальный склон ее фронтальной части.

Очень похожие описания, относящиеся ко времени Второй мировой войны, давали капитаны корабля «Edinburgh Castle», крейсера «Birmingham» и некоторых других [20]. Эти случаи произошли вдоль юго-восточного побережья Африки, известного своим сильным течением мыса Игольного, идущим с северо-востока на юго-запад вдоль берега. Капитан Дж. Мэллори собрал коллекцию документированных случаев встреч судов с аномальными волнами на течении мыса Игольного и проанализировал их, выдвинув гипотезу о механизмах формирования таких волн в результате суперпозиции нескольких волновых систем с добавлением эффекта блокировки волн на встречном течении, которые позднее были отчасти признаны. В [6] можно найти другие описания происшествий с судами в этой акватории. В качестве другого примера *аномальных волн на течениях* приведем здесь случай с крупным грузовым судном «Semfjord», которое перевернулось и затонуло, не успев передать сигнал о помощи, в проливе Пентленд-Ферт (Pentland Firth, Шотландия) в начале января 2015 г. Это место известно сильнейшими приливными течениями (до 5 м/с и больше).

Небольшое исследовательское судно NOAA «Ballena» было опрокинуто неожиданно появившейся *уединенной волной* у берегов Калифорнии в 2000 г. Погода была хорошей с ясным небом и прозрачными волнами зыби высотой 1.5–2 м, как вдруг примерно в 30 м в стороне от судна начала нарастать волна высотой около 4.5 м. Она достигла обрушения и опрокинулась над судном, перевернув его. Другой похожий случай относится к акватории у берега Камчатки, где каякерами наблюдалось около 10 необычных одиночных волн (рис. 3, а). С моря приходили пологие волны каждые 15–20 с. Аномальные волны вырастали, распространялись примерно на 50 м и обрушивались. Свидетели уточняют, что фотография на рис. 3, а имеет особый ракурс — с торца протяженной (порядка 70 м) волны. Окончательной интерпретации этих волн дано не было,



а



б

Рис. 3. Фотография необычной волны у берегов Камчатки, сделанная М. Соколовским (а) и волна, сгенерированная в изогнутом лотке Университета Эдинбурга (б)

но на рис. 3,б нами приведена фотография из изогнутого экспериментального бассейна Эдинбурга, где видна волна, созданная в результате схождения волн, приходящих под разными углами, которая очень похожа на изображенную на рис. 3,а.

Экстремальные события на берегу, схожие по своим характеристикам неожиданности и интенсивности с описанными выше примерами, сейчас кажутся описанными существенно хуже, несмотря на то, что наблюдались давно. Обычно такие события характеризуются внезапным, скоротечным затоплением берега либо возникновением у кромки воды неожиданно сильных волн, их всплесков, зачастую в условиях спокойного моря [10, 21, 22]. Эти явления также очень интересны, но в нашем обзоре рассматриваться не будут.

## 2. Определение «волны-убийцы»

Приведенная выше классификация экстремальных волн условна, другие способы разделения аномальных волн на разные классы предлагались неоднократно (например, [20, 23, 24]). Окончательная классификация сейчас вряд ли возможна, особенно учитывая нечеткое определение «аномальной волны». Наиболее частым является определение с использованием лишь одного критерия превышения по высоте  $H$  (определяемой как расстояние по вертикали от дна ложбины до вершины гребня волны)

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

где  $H_s$  – значительная высота (т.е. среднее от трети наиболее высоких волн в выборке). Такое определение, в частности, не делает различий между волнами разной абсолютной высоты. В то же время ясно, что с практической точки зрения волны высотой 10 см, превышающие окружающие в 3 раза, менее опасны, чем 20-метровые волны, пусть и превышающие соседние «всего» в 2 раза. По этой причине в ряде работ (особенно по измерениям в море) вводится дополнительный критерий на минимальную высоту волны. Другой вопрос касается числа 2, расположенного в правой части неравенства (1). Его соотносят с определением «волны-убийцы» как

самой высокой волны, которая может быть измерена за типичное время шторма — 6–8 ч. При этом используют распределение Рэля, описывающее вероятность возникновения волны с высотой не менее чем  $H$ ,

$$P(H) = \exp\left(-2\frac{H^2}{H_s^2}\right). \quad (2)$$

Формула (2) применима в предположении, что смещение морской поверхности описывается случайным гауссовым процессом, а спектр волн узок. Добавим, что эффект статистической неопределенности (ошибка в определении средних величин на основе конечного числа измерений) растет с ростом  $H_s$ , по имеющимся натурным данным для  $H_s = 6–8$  м в условиях Северного моря для 20-минутных записей волн он может достигать 7%.

Модификации определения «волны-убийцы», учитывающие другие геометрические характеристики волны либо другие статистические характеристики выборки волн, можно найти в [23]. Отметим здесь, что в настоящее время анализ инструментальных записей волн разработан для временных последовательностей смещения поверхности. Для моментальных снимков однонаправленных волн, вообще говоря, подходы анализа волн должны быть модифицированы. Для измерений двумерной взволнованной поверхности, которые в наши дни становятся доступными, методы выделения и анализа волн еще только формулируются.

Для безопасности морских платформ критическим параметром волн является не высота волны  $H$ , а высота гребня  $H_{cr}$ , так что в приложении к этой проблеме вместо критерия (1) используют схожий, но записанный для  $H_{cr}$  (например,  $H_{cr}/H_s > 1.25$ ); иногда критерии на  $H$  и  $H_{cr}$  используют совместно. Высота волны — наиболее удобная для наблюдения характеристика, отражающая степень интенсивности волны. С другой стороны, кроме высоты, опасность представляет специфичная форма волны или последовательности окружающих волн. Нетипичная длина волны или ширина гребня могут стать причиной недопустимого перераспределения нагрузки на корпус судна и вызвать трагедию, схожую с иллюстрированными на рис. 1 и 2,а.

Случаи недопустимо серьезных происшествий, связанных с воздействием морских волн на платформы, известны. 15 февраля 1982 г. огромная волна выбила окна и затопила комнату управления буровой установки, обслуживаемой компанией Mobil Oil на Большой Ньюфаундлендской банке (the Grand Banks of Newfoundland). Вышка вскоре опрокинулась и затонула, при этом погибли 84 человека [18]. Хорошо известная «новогодняя волна» (рис. 4, а) захлестнула платформу «Дропнер» («Draupner») в Северном море 1 января 1995 г., ее высота составила почти 26 м.

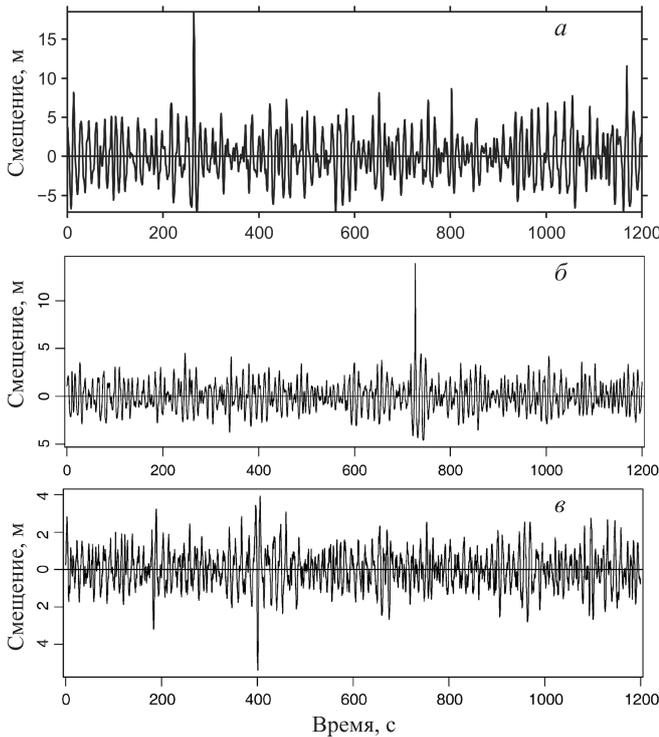


Рис. 4. Последовательности смещения морской поверхности в точке измерения, содержащие аномальные волны: а — «новогодняя волна», записанная с нефтяной платформы «Драупнер» во время шторма 1 января 1995 г. Глубина места 85 м,  $AI = 2.24$ ,  $H_{max} = 25.6$  м; б — волна из материалов измерений [32] с максимальным усилением высоты, измерение лазерным высотомером с платформы в Северном море. Глубина места 126 м,  $AI = 3.19$ ,  $H_{max} = 18.04$  м; в — пример другой записи из исследования [32]: так называемая «дырка в море»,  $AI = 2.46$ ,  $H_{max} = 9.3$  м

Наиболее впечатляющие примеры аномальных волн, приводимые в современной литературе, представлены сильно асимметричными волнами с гребнями, очень высокими по сравнению с ложбинами или глубиной места. В сложных метеоусловиях суда обычно движутся почти перпендикулярно линиям гребней с малой скоростью. Особое направление движения интенсивной волновой группы, как в случае «трех сестер», приведенном выше, может сопровождаться сложным волновым движением и креном судна, препятствующим безопасному прохождению волн. Крутые волны даже не очень большой высоты

являются причиной опасных для судна процессов, таких как слеминг (удар днищевой части носовой оконечности корпуса о воду). Также известно, что обрушающиеся волны оказывают существенно более сильное воздействие на судно или сооружение, чем пологие волны схожего размера.

По всей видимости, как минимум в практических целях стоит использовать разные критерии для определения аномальных волн и «степени аномальности», поскольку конечной целью оценок безопасности являются не сами волны, а различные объекты, на которые они действуют. Общим свойством является неожиданность возникновения таких волн и связанного с ними воздействия.

### 3. Инструментальные измерения аномальных волн

Неожиданность и скоротечность аномально высоких волн (имеющиеся свидетельства очевидцев «волн-убийц» в открытом море обычно говорят о длительности до 1.5–2 мин, т.е. до  $\sim 10$  периодов волн) ведут к малому числу фотографических регистраций и зачастую к противоречивым свидетельствам. Инструментальные измерения способны предоставить объективную информацию для анализа и аккуратного исследования физических эффектов, лежащих в основе аномальных морских волн. Программы регулярных инструментальных измерений морских волн стали разворачиваться в 1960-х гг. Сегодня поверхностные колебания в диапазоне ветровых волн измеряют посредством различных устройств: датчиков давления и ультразвуковых датчиков, оборудованных акселерометрами буев, лазерными альтиметрами, радарными. Измерения, сделанные смотрящими вниз лазерными альтиметрами и заякоренными буйами, являются источником наибольшего объема достоверных данных и обеспечивают длительные записи, необходимые для регистрации таких редких событий, как «волн-убийцы».

#### 3.1. Многолетние измерения. Проблемы измерений «волн-убийц»

Аномальные волны относятся к *редким событиям* и могут регистрироваться только при достаточно длительном измерении. Согласно нормам стандартизирующей компании Det Norske Veritas (которые, например, применяются для конструкций в Северном море) при проектировке шельфовой платформы требуется уверенность, что волна, способная залить платформу (без повреждения конструкции и травмирования обслуживающего персонала), встретится не чаще чем 1 раз в 100 лет. В течение 10 000 лет на платформу не должна обрушиться волна, которая привела бы к ее разрушению, серьезному загрязнению окружающей среды или воспрепятствовала безопасной эвакуации рабочих. По этой причине вопрос о вероятностном описании волн является критическим.

В настоящее время число инструментально измеренных волн, удовлетворяющих критерию (1) или его небольшим модификациям, составляет десятки тысяч. Такие волны были зарегистрированы как в открытом океане, так и в шельфовых областях, открытых или закрытых морях; глубины акваторий варьируются от десятков метров до нескольких километров. Вблизи берегов России «волны-убийцы» регистрировались в Черном море [23], у побережья Сахалина [25]. Они также измерялись в Таллинской бухте Балтийского моря [26].

Наиболее представительная известная нам статистика «волн-убийц» собрана в работах [27, 28], она базируется на 122 млн индивидуальных волн. Этот объем эквивалентен примерно 38 годам непрерывного измерения в одной точке (исходя из периода 10 с) и, согласно распределению (2), обеспечивало бы одно событие с превышением  $H/H_s \approx 3.05$ . В литературе по результатам измерений в акваториях разной глубины докладывались качественно различные выводы о сопоставлении распределения вероятности натуральных «волн-убийц» с распределением Рэлея. Существенное превышение распределения Рэлея получено в работах на глубокой воде [24, 29–32], для относительно мелкого моря распределение примерно соответствует рэлеевскому [33] либо высокие волны возникают даже реже [34]. В исследовании [28] также делается вывод о согласии данных наблюдений с квазилинейной теорией для распределения высот волн (когда учитывается нелинейное отклонение формы волны от синусоидальной, но пренебрегаются более медленные динамические эффекты взаимодействия волн, включая модуляционную неустойчивость).

Период аномальной волны не выбивается из ряда периодов «обычных» ветровых волн, и в наших оценках мы будем обычно считать волновой период равным 10 с. Появление «волны-убийцы» — обычно *краткосрочное событие*, ее «время жизни» обычно не более нескольких минут. Это свойство приводит к необходимости достаточно частых измерений смещения поверхности (в отличие, например, от записи приливных волн или волн цунами). Такое требование вступает в противоречие с необходимостью длительного времени регистрации волн, — в том смысле, что объем данных измерений становится огромным. Обычно данные последовательных измерений представлены отрезками 10–30 мин, что объясняется требованием к выбору интервала статистической квазистационарности ветровых волн.

Наконец, «волна-убийца» обычно является *экстремальной волной*, что усложняет задачу ее измерения, которое заключается в определении моментальных положений границы раздела между водой и воздухом. Для этой цели применяются различные методы, основанные, например, на отражении оптического, электромагнитного или акустического сигналов от поверхности, слежении

за ускорением плавающих буев и т.д. Определение границы раздела между водой и воздухом является нетривиальной задачей в случае наличия воздушных пузырей, брызг, дождя, что нередко в ситуациях очень крутых обрушающихся волн, а также в штормовых условиях. Буи обладают собственной инерцией, искажающей измерения. Вместе с низкой частотой измерений и плохой калибровкой эти проблемы способны полностью перечеркнуть научную ценность экспериментальных результатов. Кроме огромного массива данных, отличительной особенностью исследования [27] является многоступенчатый контроль достоверности записей. По результатам такого контроля было отсеяно 18% мареограмм без аномальных волн и 84% (!) записей с волнами-убийцами.

Существующий массив измерений поверхностных волн огромен, но он собран из данных для разных условий измерений (глубина места, течения, метеосостояния), измеренных различными устройствами и с заметной долей недостоверности. По этой причине проблема вероятностного описания экстремальных волн по натурным данным до сих пор не решена: разные статистические исследования приводят к противоположным заключениям.

### 3.2. Временные последовательности, содержащие регистрации «волн-убийц»

Цитата из популярной книжки [21] начала эры инструментальных измерений ветровых волн дает такую оценку максимально достижимых высот: «Большинство океанских штормовых волн имеет в высоту 4–4.5 м. Волны выше 6–7 м — довольно редкое явление. Что же касается максимальной высоты волн, то в различных областях океана она может быть разной, но в общем не превышает 20 м». Несостоятельность таких представлений стала очевидной лишь сравнительно недавно под давлением новых наблюдательных фактов. В литературе упоминается осмеянный доклад французского ученого и офицера капитана Д. д'Урвиля (Dumont d'Urville), в 1826 г. заявившего о встрече с 30-метровой волной. Другое известное свидетельство относится к 1933 г., тогда 34-метровая волна была встречена американским судном в северной части Тихого океана. На сегодня существует значительное число инструментальных регистраций волн 30-метровой высоты. Например, 30-метровые волны регистрировались во время урагана «Льюис» в 1995 г. («Halloween Storm», Hurricane «Luis»), 32-метровые волны — во время тайфуна «Кросса» (typhoon «Krosa»). Значительная высота волн более 16 м регистрировалась буями в разных областях северо-западной Атлантики, по данным спутниковых измерений значения  $H_s$  могут превосходить порог 20 м.

Здесь мы приводим несколько примеров инструментальных измерений аномальных волн, помогающих представить «портрет» «волны-убийцы». Уже ставшая классической в проблеме «волн-убийц»

запись «новогодней волны» («New Year Wave»), датированная 1 января 1995 г., приведена на рис. 4, а. Высота единичной волны 26 м, а превышение фонового волнения,  $AI = 2.24$ . С. Хавер (S. Haver) отмечал, что ее высота ниже, чем у 100-летней волны (около 27 м), но высота гребня  $H_{cr} = 18.5$  м — исключительная, ее вероятность близка к одному случаю в 10 000 лет.

На рис. 4, б приведена запись, сделанная в Северном море, демонстрирующая очень большой коэффициент усиления,  $AI = 3.19$  (хотя волна меньше по абсолютной величине, чем на рис. 4, а). Согласно линейной теории (распределение Рэлея) эта волна должна встречаться раз в 200 лет, но по данным своих измерений П. Станселл [31, 32] говорит о превышении этой волной расчетной вероятности примерно в 300 раз. Пример «дырки в море» дан на рис. 4, в. Хотя абсолютная величина высоты волны не велика, коэффициент усиления очень большой ( $AI = 2.46$ ). В целом число волн на глубокой воде с высокими гребнями превышает число волн с глубокими ложбинами, как и ожидается для волн Стокса.

Интересна запись аномально высокой волны во время шторма «Андреа» («Andrea» Storm) в ноябре 2007 г. в Северном море с платформы «Ekofisk» ( $AI = 2.49$ ): она была зарегистрирована сразу четырьмя близко расположенными высотомерами [35]. Также широко известна волна «Юра» («Yura wave»,  $AI = 2.67$ ), записанная на небольшой глубине (43 м) в Японском море [33].

Регистрация трехмерных волн является технически существенно более сложной задачей, и такие подходы развиваются в настоящее время. Можно выделить пирамидальные аномальные волны или «стены воды» (как на рис. 2, в). В первом случае протяженность гребня сопоставима или даже короче, чем длина волны, а во втором гребни могут быть очень длинными (для волн зыби — километровой длины). В первом случае нет выделенного направления расположения волновых фронтов и эта ситуация очень сложна для мореплавания. Во втором случае создаются условия, благоприятные для развития модуляционной неустойчивости.

### 3.3. Критерии опасных состояний моря

Аномальные волны сильно локализованы во времени (от секунд до нескольких минут) и пространстве (несколько длин волн — от сотни метров до километров). Для столь малых масштабов очень трудно или даже невозможно обеспечить глобальный детерминистский прогноз, учитывая, во-первых, огромную разницу с масштабами внешних сил (ветры, атмосферные фронты, штормы, течения, геострофические вихри), а во-вторых, исключительное разнообразие и сложность процессов, сопровождающих динамику ветровых волн. Известный океанолог Л. Кавальери выделяет области детерминистского прогноза (на масштабах длин волн и вол-

новых групп) и неминуемо вероятностного описания (на масштабах размеров штормовых областей и больше) [36]. На «метеорологическом» масштабе разумно говорить об усредненных параметрах волн, которые должны характеризовать *состояние моря*. Общепринятые характеристики — значительная высота волн, пиковый период и направление волн во многих случаях достаточны для описания волновой обстановки. Новые исследования связаны со случаями, когда перечисленных характеристик недостаточно. Ключевой проблемой «волн-убийц» является установление связей между параметрами состояния моря и степенью опасности волн, формулирование критериев-предикторов, числовых индексов опасности. При отсутствии достаточного объема данных натуральных измерений проводятся теоретические исследования в рамках упрощенных постановок задачи или физическое моделирование. На наш взгляд, здесь наиболее интересный результат связан с учетом эффекта модуляционной неустойчивости морских волн на глубокой воде, вклад которой в динамику волн ранее считался ничтожным.

## 4. Предложенные физико-математические модели «волн-убийц»

Список физических механизмов, предложенных для объяснения «волн-убийц», довольно длинный [1, 8–10], и он продолжает пополняться. Ниже сформулированы наиболее существенные направления, соответствующие различным физическим эффектам.

### 4.1. Геометрическая (пространственная) фокусировка

Линейный эффект пространственной фокусировки хорошо известен в разных областях физики. Для случая поверхностных волн на воде он вызывается волнами, приходящими в одну область с разных направлений (см. эксперимент на рис. 3, б). Такая ситуация может возникать при интерференции различных волновых систем (например, ветровых волн, созданных разными штормами, либо сложением ветровых волн и зыби), рефракцией или дифракцией волн на особенностях батиметрии (подводные холмы, гребни, береговые линии и т. д.), а также на течениях. Пространственная фокусировка способна приводить к значительному усилению волн в фокальных областях. Непредсказуемость образования «волн-убийц» может обеспечиваться изменчивостью картины ветровых волн в зоне шторма, когда малое возмущение траектории волны может приводить к исчезновению каустики (фокуса) в одном месте и ее появлению в другом, возможно удаленном месте. Учет нелинейности не исключает эффект геометрической фокусировки, но делает его более сложным: нелинейные поправки к скорости волн меняют положение фокальных областей и поведение в них интенсивности волн (см., например, [37]).

#### 4.2. Дисперсионная фокусировка

Волны на поверхности воды (кроме случая очень мелкой воды) являются диспергирующими. Волны разной длины бегут с разными скоростями, и может так оказаться, что они сходятся вместе в одной точке пространства в один момент времени, приводя к сложению энергии волн [38]. Процесс дисперсионной фокусировки постоянно происходит в океане. Из-за изменчивости ветра возникают волны разных длин, и они случайным образом складываются, приводя к быстрым локальным всплескам интенсивности волн.

Эффект дисперсионной фокусировки воспроизводился во многих экспериментальных лотках, включая распространение волн на течении, в присутствии ветра. Рядом исследователей он предлагается в качестве основного механизма генерации морских «волн-убийц». Сочетание дисперсионной и геометрической фокусировки является эффективным способом создания экстремальных волн (см. пример цилиндрического схождения волн с образованием единичного всплеска на рис. 5). Как и в случае геометрической фокусировки, нелинейность делает эффект дисперсионного сложения волн сложнее в описании, но не отменяет его [39, 40]. Вместе с тем эффекты геометрической и дисперсионной группировки волн могут обеспечивать подготовительную стадию для достижения условий модуляционной неустойчивости, которая ведет к дополнительному усилению волн.



Рис. 5. Сфокусированная волна в новом круговом бассейне университета Эдинбурга.

(Подробнее: FloWave Ocean Energy Research Facility <http://www.flowavett.co.uk/>)

#### 4.3 Фокусировка из-за нелинейной неустойчивости поверхностных волн

Как известно с 1960-х гг., волны на достаточно глубокой воде подвержены модуляционной неустойчивости по отношению к длинным возмущениям [41], что приводит к разбиению волн на группы. В спектре Фурье энергия доминирующей волны передается растущим сателлитам. Общая картина неустойчивостей поверхностных волн сложна (зависит от глубины, интенсивности волн, направления возмущения), но для ситуации не слишком

крутых волн это доминирующий тип неустойчивости, обеспечиваемый квазирезонансным взаимодействием четверок волн. Проблема аномально высоких волн придала «второе дыхание» модуляционной неустойчивости, роль которой в динамике и статистике волн на морской поверхности оказалась серьезно недооцененной.

Нелинейное параболическое уравнение (иначе нелинейное уравнение Шрёдингера, НУШ) является простейшей моделью для описания эволюции слабомодулированных слабонелинейных волн на поверхности воды [42]. Довольно неожиданным результатом исследований последних лет явилась применимость этой модели (конечно, с определенными оговорками) для описания даже сильно нелинейных волн и коротких волновых групп, состоящих всего из нескольких волн [43, 44]. НУШ интегрируется методом обратной задачи рассеяния (МОЗР) [45] и потому чрезвычайно удобно. Параметр подобия НУШ (соотношение его нелинейной части к дисперсионной, характеризующее соотношение эффектов нелинейной самомодуляции и дисперсионного расплывания) определяет режимы устойчивой и неустойчивой динамики, характеризующиеся разными функциями распределения вероятности высот волн: в случае модуляционно неустойчивых волн вероятность высоких волн существенно выше. Параметр подобия (модуляционной неустойчивости), или Benjamin–Feir index, BFI,

$$BFI = \sqrt{2} \frac{\varepsilon}{\Delta\omega/\omega_p} \quad (3)$$

(где  $\varepsilon = k_p \sigma$  — крутизна, определенная через волновое число максимума спектра  $k_p$  и среднеквадратичное смещение поверхности  $\sigma$ , а  $\Delta\omega/\omega_p$  — относительная ширина частотного спектра) был предложен в работах М. Онорато и П. Янсена [46, 47], и он потенциально может быть использован для прогноза опасных состояний моря.

Явление модуляционной неустойчивости проявляется в экспоненциально быстром росте слабых модуляций, приводящем к концентрации волновой энергии в области фокусировки. Этот процесс в рамках приближенных нелинейных уравнений описывается решениями, близкими к так называемым гомоклиническим орбитам, что ведет к трудно прогнозируемой хаотической динамике волн. Эффект модуляционной неустойчивости широко известен в разных областях физики [41, 48], что обеспечивает применимость результатов исследований «волн-убийц» для многих других приложений.

#### 4.4. Существенно нелинейные взаимодействия волн

К этому виду механизмов нами отнесены все другие виды нелинейных взаимодействий волн (солитонов, ударных волн), когда волновая динамика оказывается сложнее, а усиление — существенно больше, чем ожидается в рамках линейного рассмотрения. В частности, таковы эффекты возникновения

аномально больших амплитуд при взаимодействии планарных солитонов на мелкой воде [49, 50], росте длинных стоячих волн достаточно большой амплитуды [51], а также нелинейные эффекты высокого порядка, «включающиеся» при достижении волнами большой амплитуды (сильно нелинейные эффекты, которые в настоящее время по большей части исследуются в рамках исходных уравнений гидродинамики), и мультисолитонные взаимодействия [52].

#### 4.5. Взаимодействия с течениями и другие неоднородные условия распространения

Процессы формирования экстремальных волн на течениях исследовались задолго до общего признания явления «волн-убийц» из-за множества случаев встреч неожиданно высоких волн на морских течениях (см. разд. 1). Присутствие течения изменяет локальное дисперсионное соотношение, что действует на волны так же, как и другие неоднородности условий распространения. Линейные эффекты захвата, отражения, блокировки волн течениями схожи с рефракцией и отражением волн на неоднородностях и традиционно изучаются в рамках лучевых подходов [19, 53]. Роль нелинейной самомодуляции волн на встречных течениях активно исследуется в последнее время в связи с интересом к проблеме «волн-убийц» (см. обзор в [54]). Недавно нами предложен альтернативный подход для описания нелинейных волн на встречных струйных течениях, основанный на модовом подходе [54], в частности нами описаны солитоны огибающей захваченных волн [55]. Канализование волн течениями или на особенностях топографии эффективно уменьшает размерность динамической системы (например, в глубоководном случае волны описываются модификацией одномерного НУШ вместо двумерного), что может обеспечивать благоприятные условия для развития нелинейной самомодуляции [55, 56].

В предположении узкого спектра и незначительности нелинейных эффектов вероятность высот волн подчиняется распределению Рэлея (2). Как уже отмечалось, эффекты нелинейной самомодуляции волн на глубокой воде способны привести к существенному отклонению от него. В численных и лабораторных экспериментах было неоднократно показано, что состояния волновых систем, характеризующиеся большим значением BFI, демонстрируют экстремальную статистику: вероятность высоких волн на переходной стадии, длящейся 1–2 характерных временных масштаба нелинейности  $T_{nl} = \varepsilon^{-2} \omega_p^{-1}$  (здесь  $\omega_p$  — частота спектрального пика), существенно превосходит вероятность в линейном случае [57].

Отдельный класс механизмов усиления поверхностных волн связан с эффектами внешнего воздействия на волновую систему (сильный ветер, атмосферные фронты, тайфуны и т. д.), которые нами здесь не рассматриваются.

### 5. Возможные пути осуществления краткосрочного (детерминистского) прогноза экстремальных волн на морской поверхности

В этом разделе нами формулируются принципы, на основе которых потенциально возможно развитие краткосрочного детерминистского прогноза возникновения опасных волн, включая «волны-убийцы». Ключевым здесь является слово «детерминистский», т. е. это не прогноз *вероятности* появления опасных волн, в том числе повышенной вероятности, а предсказание конкретного профиля волны либо областей интенсивных волн с характерным размером в несколько длин волн. Более или менее очевидно, что такой прогноз не может быть слишком заблаговременным, а лишь краткосрочным: решения будут отклоняться из-за погрешности в задании начальных условий, влияния неучтенных факторов, внутренних эффектов системы.

Большинство существующих измерений поверхностных волн в море представлено записью смещения поверхности в одной точке (рис. 4), но в настоящее время активно развиваются подходы к моментальным измерениям взволнованной поверхности на площадке и слежению за ее временной эволюцией. Поэтому мы будем предполагать, что смещение поверхности в какой-то области (например, вокруг судна) может быть измерено (с помощью аппаратуры, установленной на самом судне, на сопровождающем его дроне или дирижабле, спутнике и т. п.). Для получения полной информации о волне (в частности, для задания начальных условий для эволюционных уравнений), кроме положения границы раздела между водой и воздухом, требуется знание скоростей частиц жидкости. Для потенциальных волн достаточно знать скорости на поверхности, которые можно определять, например, частым измерением движения поверхности. Вместо допущения этой возможности мы, наоборот, несколько усложним задачу, предполагая поле скоростей неизвестным, но одновременно сделаем предположение, что волны однонаправлены, задача двумерна (одна координата по горизонтали) и море глубокое по сравнению с длиной волны. Тогда можно воспользоваться доступными соотношениями между смещением поверхности и поверхностным потенциалом скорости: в линейном приближении, в рамках асимптотической теории НУШ или канонического представления волн в теории Захарова. Ниже мы будем пользоваться вторым подходом (подробности можно найти в [58]).

#### 5.1. Моделирование динамики волн вблизи места измерения

По результатам анализа скорости разбегания фазовых траекторий в рамках уравнений Захарова [59] волны «забывают» начальное условие за время, пропорциональное  $T_{nl}$ . Для типичных условий ветровых волн в море эта оценка ограничивается  $\sim 10^3$  периодов волн, что соответствует времени до сотни

минут. Многочисленные примеры успешного сопоставления лабораторных измерений в волновых лотках с численным моделированием свидетельствуют о хорошем описании волн модельными уравнениями (вплоть до порога обрушения) как минимум на расстояниях в несколько десятков длин волн. Причем хорошее согласие демонстрируют и упрощенные модели типа обобщенного НУШ с добавлением слагаемых более высоких порядков асимптотического разложения по малой крутизне и ширине спектра. Таким образом, очевидный подход к краткосрочному детерминистскому прогнозу морских волн заключается в прямом численном моделировании волновой динамики. Ожидаемый горизонт прогноза составляет несколько десятков периодов/длин волн, что в реальных величинах соответствует от единиц до десятков минут/километров.

Для демонстрации потенциальной возможности такого подхода нами выполнены следующие расчеты в рамках двумерных уравнений для потенциальных волн на поверхности глубокой идеальной жидкости. В качестве «реальных» волн использован расчет нерегулярных волн в рамках уравнений Эйлера с учетом сильной нелинейности и дисперсии, выполненные нами ранее [60]. В этих численных экспериментах рассчитывалась эволюция случайных реализаций 10-километровых последовательностей волн с популярным в океанологии спектром JONSWAP и пиковым периодом волн около 10 с в течение более чем 20 мин; в том числе была рассчитана эволюция поверхностей  $\eta_{\text{ref}}(x, t)$ . «Моментальные снимки» поверхности при  $t = 0$ ,  $\eta_{\text{ref}}(x, 0)$ , мы используем в качестве входных данных для процедуры прогноза. При этом информация о поле скорости не будет использована. Потенциал скорости на поверхности будет рассчитываться в соответствии с упоминавшейся выше *приближенной* процедурой в рамках модели НУШ высокого порядка, основанной на предположении об *однонаправленности* волн [58].

Последующий расчет эволюции волн  $\eta(x, t)$  для  $t > 0$  выполнен в рамках различных *приближенных* уравнений для волн на воде: линейной теории, нелинейного уравнения Шрёдингера (с модификацией дисперсионной части — для точного описания линейного закона дисперсии) и обобщенного НУШ с учетом слагаемых следующего порядка асимптотического разложения по малой нелинейности (также с модификацией дисперсионной части, — модель Диста–Трулсена [61]). Подчеркнем, что нами осознанно используются не самые точные доступные уравнения, а наиболее удобные для анализа и быстрого расчета. На рис. 6, а приведено сопоставление реконструированной поверхности  $\eta(x, t)$  с «реальной»  $\eta_{\text{ref}}(x, t)$  в терминах среднеквадратичного отклонения для фиксированных моментов времени для случая умеренной крутизны волн  $k_p H_s / 2 \approx 0.07$ .

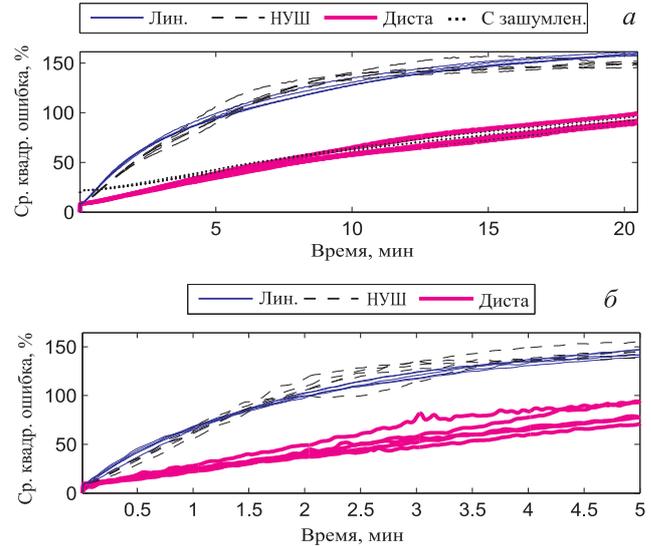


Рис. 6. Относительная (в %) ошибка реконструкции смещения поверхности по данным расчета линейных уравнений («лин.»), НУШ и модели Диста–Трулсена. Представлена реконструкция пяти случайных реализаций волн, характеризуемых спектром JONSWAP: а — случай умеренной нелинейности (пиковатость  $\gamma = 3$ , период волн  $T_p = 10$  с, значительная высота  $H_s = 3.5$  м ( $k_p H_s / 2 = 0.07$ )), дополнительно показан результат расчета в рамках модели Диста–Трулсена зашумленных начальных данных; б — случай морского состояния с большей крутизной волн ( $\gamma = 3.3$ ,  $T_p \approx 10$  с,  $H_s = 6.6$  м ( $k_p H_s / 2 = 0.13$ ))

Отметим, что ошибка отлична от нуля с самого начала расчета из-за неточности реконструкции поля скоростей для начального условия. Далее видно, как ошибка реконструкции растет, причем расчет нелинейной модели НУШ не дает преимущества по сравнению с линейной теорией (линия «лин.»), обе эти модели обеспечивают существенно худший прогноз, чем обобщенное нелинейное уравнение Шрёдингера (линия «Диста»).

Для оценки роли погрешностей, неизбежных при измерении поверхности, в следующей серии численных экспериментов к исходным данным  $\eta_{\text{ref}}(x, 0)$  была добавлена аддитивная компонента шума, который характеризовался тем же спектром JONSWAP, что и полезный сигнал, только в 5 раз слабее по амплитуде,  $\eta_{\text{noise}}(x)$ . Как и ранее, зашумленные данные  $\eta_{\text{ref}}(x, 0) + \eta_{\text{noise}}(x)$  были использованы для определения потенциала скорости на поверхности и далее проведен расчет в рамках показавшей лучший результат модели Диста–Трулсена (линии «с зашумлен.» на рис. 6, а). Видно, что зашумление наиболее сильно сказалось на точности прогноза динамики волн на начальном этапе (до 3–5 мин, т. е. до 30 периодов); интересно, что на больших временах эффект зашумления практически не заметен.

Пример прогноза волновой динамики для более крутых волн  $k_p H_s / 2 = 0.13$ , когда происходили эпизодические обрушения (проявлявшиеся в численной неустойчивости, которая гасилась с помощью введения вязкости на малых масштабах), приведен

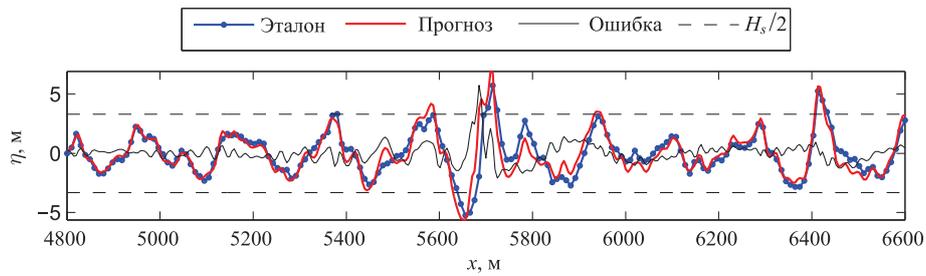


Рис. 7. Пример участка максимального расхождения между «реальной» поверхностью («эталон») и расчетом в рамках модели Диста–Трулсена («прогноз») для условий на рис. 6, б и времени  $t = 120$  с. Расхождение между прогнозом и «реальной» поверхностью построено тонкой линией («ошибка»)

на рис. 6, б. Графики на рис. 6, б отражают значительно более короткий интервал времени, чем рис. 6, а. В остальном они схожи: прогноз в рамках линейных уравнений и в рамках нелинейного уравнения Шрёдингера существенно хуже, чем предсказание модели огибающей следующего порядка по слабой нелинейности. На рис. 7 область смещения поверхности в момент  $t = 2$  мин, рассчитанного в рамках модели Диста–Трулсена, сопоставлена с «реальной» записью. Представленный интервал соответствует наибольшей локальной ошибке реконструкции на всей десятикилометровой области вычисления; на рис. 6, б этому моменту соответствует средняя ошибка примерно 45%. Видно, что погрешность реконструкции заключается, главным образом, в неточном определении положения большой волны (иначе говоря, фазы волны) и описании перекоса интенсивной волны, а в остальном волны воспроизведены достаточно хорошо, несмотря на формально значительную ошибку.

Таким образом, предложенный здесь подход к прогнозу опасных морских волн посредством прямого численного моделирования динамики поверхности способен давать разумные результаты как минимум на временах до нескольких десятков волновых периодов, что во многих случаях представляет собой существенный или даже достаточный запас времени для избегания опасной ситуации. Разумеется, нами была рассмотрена лишь модельная задача и требуются дальнейшие исследования. В общем случае можно сформулировать следующие направления развития этого подхода, упорядоченные по степени идеализации уравнений для расчета эволюции волн в пространстве или во времени.

1. Численное интегрирование полных по нелинейности и дисперсии уравнений гидродинамики. Преимуществом такого подхода является наибольшая реалистичность волновой динамики; современные алгоритмы и компьютеры позволяют производить расчет эволюции поля волн в значительной области с опережением реального времени. С другой стороны, использование полных уравнений — все же задача довольно затратная в смысле требуемого для вычислений компьютерного времени; исходные уравнения записаны для эволюции во времени, хотя зачастую более удобна граничная задача; требует-

ся дополнительная трактовка ситуаций обрушения волн, которые не могут быть рассчитаны напрямую. Возможной альтернативой использованию уравнений Эйлера может быть использование уравнений Захарова (для начальной или граничной задач), которые не учитывают нелинейных взаимодействий высоких порядков, включая их компактные формы [42, 62, 63].

2. Использование приближенных нелинейных уравнений для огибающей (в частности, иерархии нелинейных уравнений Шрёдингера), как было сделано в нашем примере выше. Преимущества такого подхода заключаются в хорошей развитости моделей для огибающей волн, хорошей точности описания волн даже в «сложных» случаях большой крутизны и сильной модуляции. Уравнения формулируются как для начальной, так и для граничной задач. Они быстро считаются с помощью псевдоспектральных алгоритмов. Ограничения, связанные с приближенным характером таких уравнений, могут не проявиться существенно на небольших временах прогноза. Применимость уравнений для огибающей требует узкого или хотя бы однопикового спектра, но для обхода этой трудности можно предложить использование связанных уравнений для нескольких систем волн.

3. Наконец, использование линейных уравнений для прогноза волн не требует пошагового расчета уравнений в частных производных как такового, являясь очень удобной и быстрой процедурой. Проведенное нами сравнительное моделирование (рис. 6) показало существенно худший результат применения линейной теории, чем использование обобщенного НУШ. В то же время в работе [64] прогноз волн на основе линейного решения было предложено использовать вкуче с дополнительными представлениями о том, что нелинейная динамика волн обычно приводит к появлению больших волн, т.е. линейное решение предлагается использовать как своего рода «оценку снизу».

## 5.2. Оперативное выделение опасных волновых групп

Вторая возможность краткосрочного прогноза волновой обстановки может основываться на моментальном анализе, т.е. без непосредственного решения эволюционных уравнений, что роднит его

с п. 3 предыдущего раздела. Можно предложить несколько способов прогноза в зависимости от степени идеализации задачи.

1. Простейший пример такого подхода был продемонстрирован в нашей работе [65] для результатов реконструкции натуральных записей «волн-убийц» в Северном море в рамках численного моделирования. Поскольку необычно высокие волны могут возникать лишь в тех областях, где запасено много энергии, и эта волновая энергия волнами постоянно переносится, то имеет смысл отслеживать направления движения потоков энергии на взволнованной поверхности. В рамках линейного приближения для описания эволюции во времени подходит уравнение энергетического баланса, где энергия оценивается через амплитуду волны, а скорость ее распространения — через групповую скорость, определяемую по дисперсионному соотношению для локальной длины волны. Возникновение экстремальных волн наиболее вероятно в областях конвергенции энергии, которые можно отслеживать приведенным способом — как в двумерной, так и в трехмерной постановках задачи. Подход может быть очевидным образом улучшен с помощью учета нелинейных поправок к решению (локальной групповой скорости, энергии волны). Его можно рассматривать как огрубление линейного метода прогноза, рассмотренного в предыдущем разделе.

2. Второй способ, который можно выделить, заключается, по сути, во введении детерминистского аналога индекса модуляционной неустойчивости BFI (3) для групп волн на поверхности глубокой воды. В работе [66] было предложено параметризовать все волновые группы характерным универсальным профилем, так что их описание в рамках уравнений в частных производных сводится к обыкновенным дифференциальным уравнениям на поведение параметров групп. Определенное их соотношение может вести к нарастанию амплитуды волновых цугов (самоодуляции), что является опасной ситуацией. Преимуществом подхода, представленного в работе [66], является то, что он не опирается на интегрируемость НУШ. Такой анализ не требует большой мощности компьютера, может быть обобщен на трехмерный случай, а также может улучшаться посредством более аккуратной оценки локальной устойчивости группы. Его недостатком является явное использование параметризации формы группы и нацеленность на учет только одного механизма образования аномально высоких волн — из-за модуляционной неустойчивости волн.

3. Третий способ применим для моделей, интегрируемых методом обратной задачи рассеяния [45]. Основным его преимуществом по сравнению с вышеописанными двумя методами является потенциально *полное* описание задачи. МОЗР можно назвать нелинейным аналогом метода Фурье. Решение начальной задачи сводится к определению данных

рассеяния линейной ассоциированной задачи рассеяния (решение прямой задачи). Ее спектр не изменяется во времени; он состоит из двух частей: дискретного и сплошного спектров. Эволюция базисных функций решения определяется отдельной задачей; дискретный спектр отвечает за локализованные решения. Восстановление решения в произвольный момент времени (решение обратной задачи) не требует его нахождения в предшествующие моменты. К сожалению, в общем виде применение этого метода является трудоемким; существенно проще происходит решение в случае учета только дискретного спектра, который соответствует волнам или волновым группам солитонного типа. Солитоны интегрируемых уравнений не разрушаются при взаимодействии с другими волнами, они переносят энергию и в ряде случаев обеспечивают повышенную вероятность высоких волн (по сравнению с линейной теорией), что объясняет интерес к ним в ключе проблемы «волн-убийц». Существует значительное число точных решений НУШ солитонного типа, описывающих возникновение больших волн на слабо возмущенном фоне и последующее их «исчезновение», обычно называемых бризерами (см. обзоры в [67, 68]). На нулевом фоне солитонные решения НУШ представлены уединенными группами — солитонами огибающей. Исходные уравнения гидродинамики не решаются МОЗР, но могут быть аппроксимированы системой из иерархии интегрируемых нелинейных уравнений Шрёдингера (так называемая асимптотическая интегрируемость), что открывает путь к применению МОЗР для более точного прогноза динамики реальных волн. Приложение МОЗР к анализу морских волн развивается сразу несколькими группами (отметим монографию [69]), схожие проблемы имеют огромное практическое значение для развития оптических солитонных линий связи.

В простейшем случае в качестве модели для однонаправленных поверхностных волн мы используем классическое НУШ, интегрируемое МОЗР [45]. В отличие от других авторов, применяющих МОЗР на периодическом интервале, нами используется постановка на бесконечном интервале с нулевыми граничными условиями для оконных выборок волн, что, на наш взгляд, обладает рядом преимуществ [70]. Важным свойством солитонных структур, описываемых дискретной частью спектра, является линейная суперпозиция парциальных амплитуд. То есть при взаимодействии нескольких солитонов НУШ максимально достижимое значение смещения поверхности (когда фазы групп подобраны соответствующим образом) равно сумме амплитуд взаимодействующих солитонов; если солитоны распространяются на каком-то фоновом уровне, то и его амплитуда входит в пиковое значение смещения как линейная добавка [70–73].

На рис. 8 приведен пример отслеживания эволюции интенсивного волнового цуга с помощью

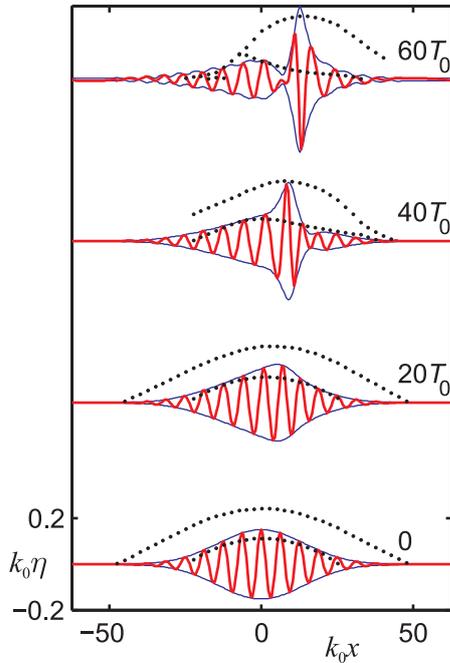


Рис. 8. Расчет эволюции волнового пакета с максимальной крутизной  $k_0\eta_{\max} = 0.15$  (сплошная толстая линия — смещение поверхности, тонкая — огибающая) и результат решения спектральной задачи НУШ в оконных выборках (точки)

оконного МОЗР. Построены смещения поверхности и огибающие для 4 моментов времени численного моделирования — от начального до 60 периодов. Жирными точками обозначены амплитуды солитонов огибающей, определенные посредством численного решения задачи рассеяния для НУШ. Когда окно выборки захватывает солитон не целиком, то определяемая программой амплитуда солитона меньше истинной, поэтому солитоны представлены дугами. Максимум каждой дуги соответствует «истинной» амплитуде солитона, а его положение — положению солитона. В случае на рис. 8 в цуге определяется 2 солитона огибающей, которые разделяются со временем из-за различной скорости солитонов. Фактическое смещение поверхности может превышать амплитуду солитона (например, при  $t = 40 T_0, 60 T_0$ ), что происходит из-за взаимодействия солитонов и эффекта связанных волн, которые описываются в рамках используемого подхода.

### Заключение

Определение «волн-убийц» до сих пор носит условный характер, а вероятность их возникновения остается предметом споров. В общем, под аномальными подразумеваются волны, возникающие в результате относительно быстрой фокусировки энергии поверхностных волн. Различные примеры и проявления таких волн описаны в первой части статьи. К настоящему времени предложены различные механизмы, способные описывать возникновение неожиданно высоких волн. В нашем исследовании наибольшее внимание уделено собственным

эффектам волновой динамики. Исследования, проводимые примерно с начала 2000-х гг., позволяют сделать вывод о том, что модуляционная неустойчивость волн на поверхности глубокой воды способна приводить к возникновению аномально высоких волн. Особенно важно то, что при этом изменяется статистика редких событий — экстремальных волн, что требует учета при строительстве и использовании морских сооружений и судов.

Условия, благоприятные для развития самомодуляции волн (узкий спектр волн как по частоте, так и по направлению), не характерны для моря, и вопрос, когда такие условия реализуются, еще не достаточно прояснен. Индекс модуляционной неустойчивости BFI, как предполагается, должен характеризовать благоприятные для этого процесса условия, и в настоящее время предпринимаются первые попытки его использования в целях прогноза (хотя бы ретроспективного) [74]. Карты индексов BFI уже предоставляются Европейским центром среднесрочного прогноза погоды (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF). В то же время можно перечислить ряд причин, затрудняющих его использование, в частности неустойчивость величины BFI по отношению к способу его вычисления по реальным данным при относительной малости диапазона принимаемых значений.

Понимание механизмов волновой динамики, ответственных за появление «волн-убийц», позволяет предложить упрощенные подходы к их описанию, которые могли бы быть использованы для оперативного прогноза опасных ситуаций, включая детерминистское описание волновой поверхности. В настоящей статье сформулированы два направления такого прогноза: на основе прямого численного моделирования и на основе одномоментного анализа волновых данных. Предложенные подходы обладают рядом преимуществ и недостатков и, возможно, оптимальным является комбинация сразу нескольких. Требуется дальнейшее теоретическое исследование их возможностей и ограничений. Развитие средств регистрации взволнованной морской поверхности позволяет надеяться на возможность аппаратной реализации развиваемых подходов уже в обозримом будущем.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 16-17-00041).

### Список литературы

1. *Kharij C., Pelinovsky E., Slunyaev A.* Rogue Waves in the Ocean. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2009.
2. *Слюняев А.В.* Аномально высокие морские волны: физические механизмы и моделирование. Дисс. ... д-ра физ.-мат. наук. Н. Новгород, 2016.
3. *Куркин А.А., Пелиновский Е.Н.* Волны-убийцы: факты, теория и моделирование. Н. Новгород, 2004.
4. *Доценко С.Ф., Иванов В.А.* Волны-убийцы. Севастополь: МГИ НАН, 2006.

5. Шамин Р.В. Математические вопросы волн-убийц // Синергетика: от прошлого к будущему. 2016. № 76.
6. Давидан И.Н., Лопатухин Л.И. На встречу со штормами. Л.: Гидрометеиздат, 1982.
7. Дьяченко А.И., Захаров В.Е., Шамин Р.В., Бадунин С.И. Волны-убийцы и задачи их исследования // Мировой океан / Под ред. Л.И. Лобковского. М.: Научный мир, 2013. Т. 1. С. 576.
8. Kharif C., Pelinovsky E. // Eur. J. Mech. B. Fluid. 2003. **22**. P. 603.
9. Dysthe K., Krogstad H.E., Muller P. // Annu. Rev. Fluid. Mech. 2008. **40**. P. 287.
10. Slunyaev A., Didenkulova I., Pelinovsky E. // Contemp. Physics. 2011. **52**. P. 571.
11. Onorato M., Residori S., Bortolozzo U. et al. // Phys. Rep. 2013. **528**. P. 47.
12. Dudley J.M., Dias F., Erkintalo M., Genty G. // Nature Photonics. 2014. **8**. P. 755.
13. Akhmediev N., Pelinovsky E. // Eur. Phys. J. Special Topics. 2010. **185**. P. 1.
14. Пелиновский Е.Н., Слюняев А.В. // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2011. **4**. С. 4.
15. Пелиновский Е., Слюняев А. // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2012. **5**. С. 4.
16. Пелиновский Е., Слюняев А. // Газета «Физика». 2006. № 2. С. 29; № 4. С. 35.
17. Пелиновский Е.Н., Слюняев А.В. // Природа. 2007. № 3. С. 14.
18. Lawton G. // New Scientist. 2001. Iss. 170. N 2297. P. 28.
19. Лавренов И.В. Математическое моделирование ветрового волнения в пространственно-неоднородном океане / Под ред. И.Н. Давидана. СПб.: Гидрометеиздат, 1998.
20. Haver S., Andersen O.J. // Proc. 10th Int. Offshore and Polar Eng. Conf. ISOPE. Seattle, USA, 2000. P. 123.
21. Горский Н.Н. Тайны океана. М.: Наука, 1968.
22. Nikol'skina I., Didenkulova I. // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2011. **11**. P. 2913.
23. Лопатухин Л.И., Бухановский А.В., Дивинский Б.В., Рожков В.А. // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2003. Вып. 26. С. 65.
24. Liu P.C., MacHutchon K.R. // Proc. 25th Int. Conf. OMAE 2006. 2006. Art. OMAE2006-92619.
25. Кузнецов К.И., Зайцев А.И., Костенко И.С. и др. // Экологические системы и приборы. 2014. **2**. С. 33.
26. Didenkulova I. // Boreal Env. Res. 2011. **16A**. P. 138.
27. Christou M., Ewans K. // Proc. 30th Int. Conf. Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE-2011). 2011. Art. OMAE2011-50168.
28. Christou M., Ewans K. // J. Phys. Oceanogr. 2014. **44**. P. 2317.
29. Mori N. // Ocean Eng. 2004. **31**. P. 165.
30. Pinho U.F., Liu P.C., Ribeiro C.E.P. // Geofizika. 2004. **21**. P. 53.
31. Stansell P. // Appl. Ocean Res. 2004. **26**. P. 35.
32. Stansell P. // Ocean Eng. 2005. **32**. P. 1015.
33. Mori N., Liu P.C., Yasuda T. // Ocean. Eng. 2002. **29**. P. 1399.
34. Chien H., Kao C.-C., Chuang L.Z.H. // Coast. Eng. J. 2002. **44**. P. 301.
35. Magnusson A.K., Donelan M.A. // J. Offshore Mech. Arct. Eng. 2013. **135**. Art. 031108.
36. Cavaleri L. // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2006. **87**. P. 207.
37. Пелиновский Е.Н. Нелинейная динамика волн цунами. Горький: ИПФ АН, 1982.
38. Островский Л.А., Потанов А.И. Модулированные волны в линейных средах с дисперсией. Горький: ГГУ, 1990.
39. Kharif C., Pelinovsky E., Talipova T., Slunyaev A. // Письма в ЖЭТФ. 2001. **73**. С. 190.
40. Slunyaev A., Kharif C., Pelinovsky E., Talipova T. // Physica D. 2002. **173**. P. 77.
41. Zakharov V.E., Ostrovsky L.A. // Physica D. 2009. **238**. P. 540.
42. Захаров В.Е. // Журн. прикл. механики и техн. физики. 1968. **9**. С. 86.
43. Slunyaev A., Clauss G.F., Klein M., Onorato M. // Phys. Fluids. 2013. **25**. Art. 067105.
44. Slunyaev A.V., Shrira V.I. // J. Fluid Mech. 2013. **735**. P. 203.
45. Захаров В.Е., Манаков С.В., Новиков С.П., Питаевский Л.П. Теория солитонов. Метод обратной задачи. М.: Наука, 1980.
46. Onorato M., Osborne A.R., Serio M., Bertone S. // Phys. Rev. Lett. 2001. **86**. P. 5831.
47. Janssen P.A.E.M. // J. Phys. Oceanogr. 2003. **33**. P. 863.
48. Власов С.Н., Таланов В.И. Самофокусировка волн. Н. Новгород: ИПФ РАН, 1997.
49. Peterson P., Soomere T., Engelbrecht J., van Groesen E. // Nonlin. Proc. Geophys. 2003. **10**. P. 503.
50. Porubov A.V., Tsuji H., Lavrenov I.V., Oikawa M. // Wave Motion. 2005. **42**. P. 202.
51. Ezersky A., Slunyaev A., Mouazé D., Chokchai W. // Eur. J. Mech. B. Fluids. 2009. **28**. P. 521.
52. Shurgalina E., Pelinovsky E. // Physics Letters. A. 2016. **380**. P. 2049.
53. Басович А.Я., Таланов В.И. // Изв. АН. ФАО. 1977. **13**. С. 766.
54. Shrira V.I., Slunyaev A.V. // J. Fluid Mech. 2014. **738**. P. 65.
55. Shrira V.I., Slunyaev A.V. // Phys. Rev. E. 2014. **89**. Art. 041002(R).
56. Pelinovsky E., Polukhina O., Kurkin A. // Eur. Phys. J.. 2010. **185**. P. 35.
57. Слюняев А.В., Сергеева А.В. // Письма в ЖЭТФ. 2011. **94**. С. 8508.
58. Slunyaev A., Pelinovsky E., Guedes Soares C. // J. Offshore Mech. Arctic Eng. 2014. **136**. Art. 011302.
59. Annenkov S.Y., Shrira V.I. // J. Fluid Mech. 2001. **449**. P. 341.
60. Sergeeva A., Slunyaev A. // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2013. **13**. P. 1759.
61. Trulsen K., Dysthe K.B. // Wave Motion. 1996. **24**. P. 281.
62. Shemer L., Haiying J., Kit E., Agnon Y. // J. Fluid Mech. 2001. **427**. P. 107.
63. Dyachenko A.I., Kachulin D.I., Zakharov V.E. // Nat. Hazards. 2016. **84**. P. 529.
64. Рубан В.П. // Письма в ЖЭТФ. 2016. **103**. С. 647.
65. Slunyaev A., Pelinovsky E., Guedes Soares C. // Appl. Ocean Res. 2005. **27**. P. 12.
66. Cousins W., Sapsis T.P. // Phys. Rev. E. 2015. **91**. Art. 063204.
67. Dysthe K.B., Trulsen K. // Physica Scripta. 1999. **T82**. P. 48.
68. Kedziora D.J., Ankiewicz A., Akhmediev N. // Phys. Rev. E. 2013. **88**. Art. 013207.

69. Osborne A.R. Nonlinear Ocean Waves and the Inverse Scattering Transform. Academic Press, 2010.
70. Slunyaev A. // Eur. J. Mech. B / Fluids. 2006. **25**. P. 621.
71. Dubard P., Matveev V. // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2011. **11**. P. 667.
72. Slunyaev A.V., Pelinovsky E.N. // Phys. Rev. Lett. 2016. **117**. Art. 214501.
73. Sun Y.-H. // Phys. Rev. E. 2016. **93**. Art. 052222.
74. Leon P.S., Guedes Soares C. // Ocean Modelling. 2014. **81**. P. 78.
75. <http://freakwaves.blogspot.ru/>

### Predicting rogue waves

A. V. Slunyaev<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Applied Physics, Department of Nonlinear Geophysical Processes.  
Box 120, Nizhny Novgorod 603950, Russia.

<sup>2</sup> Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev. Nizhny Novgorod 603950, Russia.  
E-mail: <sup>a</sup> [slunyaev@hydro.appl.sci-nnov.ru](mailto:slunyaev@hydro.appl.sci-nnov.ru).

Observational data regarding anomalously high waves on the sea's surface (freak or rogue waves) are reviewed. The objectives of the research are identified, and the difficulties encountered are noted. The main physical mechanisms employed in explaining rogue waves are listed, and possible approaches to predicting marine hazards are discussed. Principles for ongoing short-term forecasting of extreme waves (within tens of wave periods or wavelengths) are proposed. Some preliminary results are presented.

*Keywords:* rogue waves, freak waves, anomalous waves, ocean waves, wave dynamics.

PACS: 92.10.Hm, 47.20.Ky, 47.35.Fg, 05.45.Yv.

Received 25 August 2016.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2017. **72**, No. 3. Pp. 236–249.

### Сведения об авторе

Слюняев Алексей Викторович — доктор физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник;  
тел.: (831) 416-47-49, e-mail: [slunyaev@hydro.appl.sci-nnov.ru](mailto:slunyaev@hydro.appl.sci-nnov.ru).