

УДК 551.466.3

© *Е.Г. Шургалина, Е.Н. Пелиновский*, 2012

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород
Нижегородский государственный технический университет
Высшая школа экономики
eshurgalina@mail.ru

ПРОЯВЛЕНИЕ АНОМАЛЬНО БОЛЬШИХ ВОЛН ЗЫБИ НА ФОНЕ СЛАБОГО ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ

Рассмотрено взаимодействие попутно двигающихся волн зыби со слабым ветровым волнением в бесконечно глубоком море в рамках потенциальной теории. Ветровое волнение описывается спектром Пирсона–Московица, а волны зыби – частотно-модулированным волновым пакетом. Отмечается, что в случае переменного ветра в области шторма волны зыби могут фокусироваться на некотором расстоянии от области зарождения, образуя аномально большие волны («волны-убийцы»). Выполнено исследование видимости аномально больших волн зыби разной формы на фоне ветрового волнения.

Ключевые слова: волны на воде, ветровое волнение, волны-убийцы, дисперсионное фокусирование, времена жизни волн убийц.

За последние десятилетия накопилось большое количество фотографий и рассказов очевидцев волн-убийц в океане. Имеющиеся данные, собранные, например, в [1–3], доказывают существование волн-убийц различных форм. В литературе встречаются описания аномально больших волн в виде «белая стена», «одиночная башня», «три сестры» (группа из нескольких индивидуальных волн). Иногда перед ними движется впадина глубиной несколько метров – «дыра в море». Часто такие волны имеют крутые фронты и могут быть асимметричными, что свидетельствует о нелинейном характере волн-убийц. Характерные записи аномальных волн, включающих одну и две «сестры», приведены на рис. 1.

Среди различных механизмов формирования волн-убийц, описанных в [1, 3], можно выделить совместное действие геометрической (пространственной) и дисперсионной фокусировки, наблюдающейся на водной поверхности при наложении волн, движущихся в разных направлениях (на английском языке для описания такой ситуации используется термин «crossing sea»). Одной из причин такого наложения можно назвать взаимодействие волн зыби, приходящих из области далекого шторма, с ветровыми волнами, существующими в зоне локального шторма. Обычно для описания ветровых волн используются статистические методы, в то время как для описания зыби на больших расстояниях от шторма – детерминистские методы. Поскольку волны на воде являются дисперсионными, вне зоны шторма зыбь представляет собой частотно-модулированный пакет и более длинные волны, имеющие большую скорость распространения, бегут впереди более коротких. Это обстоятельство уже использовалось на практике для определения расстояния до зоны шторма по изменению текущей частоты волн зыби [6]. Между тем ветер в зоне шторма нельзя считать постоянным, и его изменчивость приводит к генерации волновых пакетов с весьма сложным законом изменения частоты со временем, в том числе генерации пакетов, у которых короткие волны бегут впереди длинных. Очевидно, что в силу дисперсии такой пакет будет фокусироваться в аномальную волну, а затем расплываться на большие расстояния от зоны шторма. Этот механизм дисперсионной фокусировки волн описан в деталях [1, 3]. Таким образом, на промежуточных расстояниях от зоны шторма можно ожидать появление аномально больших волн зыби

(волн-убийц), которые к тому же будут взаимодействовать со случайным полем ветровых волн, связанных с локальным штормом. Именно эта ситуация и рассматривается в данной работе при ряде упрощающих предположений: линейной потенциальной теории волн в жидкости бесконечно большой глубины, попутном распространении волн зыби и ветровых волн. Основной целью исследования является оценка времени жизни аномально большой волны зыби в поле ветровых волн.

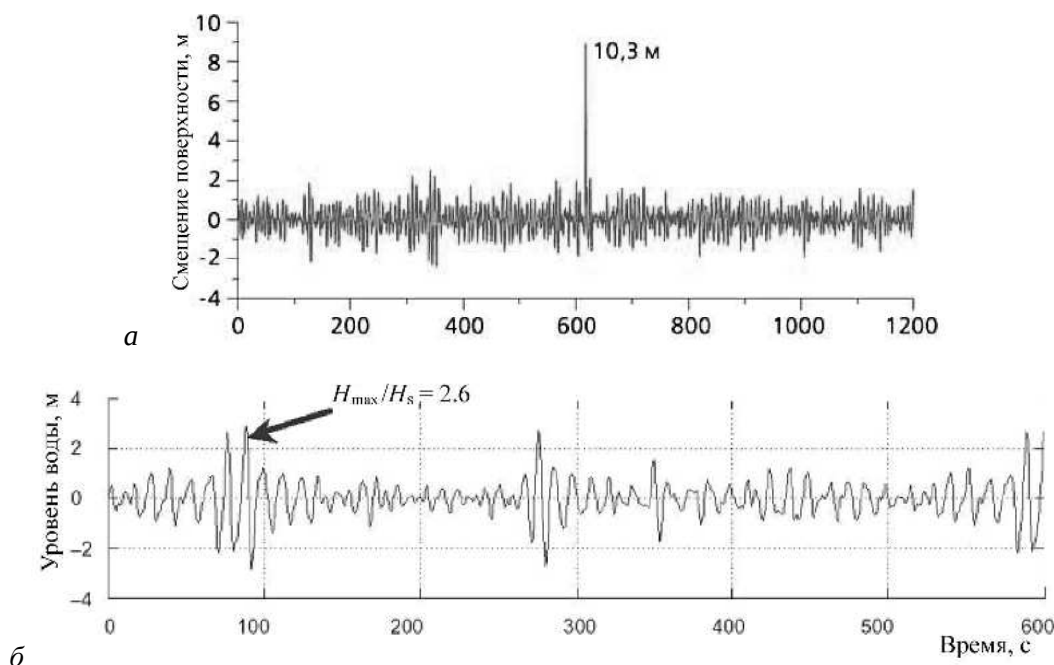


Рис. 1. Временная запись аномально высокой волны в Черном море (а), полученная 22 ноября 2001 г. [4], и группы аномально больших волн (б) в Японском море [5] – 24 января 1987 г.

Чтобы упростить задачу, будем считать, что аномальная волна зыби уже сформирована в начальный момент времени и заметно выделяется на фоне ветровых волн. В принципе она может иметь различную форму, как уже отмечалось вначале, поэтому мы рассмотрим несколько возможных форм волны-убийцы: расплывание аномально большой волны зыби на невозмущенной водной поверхности; процесс взаимодействия волны зыби со случайным полем ветровых волн.

Эволюция волн зыби на невозмущенной водной поверхности. Как было сказано выше, будем предполагать, что аномально большая волна зыби уже сформирована в начальный момент времени. Ее форму будем моделировать в следующем классе модулированных волн с гауссовой огибающей

$$Y_0(x) = a \exp\left(-\frac{x^2}{l^2}\right) \cos(K_0 x), \quad (1)$$

где l – характерный размер волнового пакета (огибающей) и K_0 – волновое число несущей. Во всех случаях, рассматриваемых ниже, $K_0 = 0.07 \text{ м}^{-1}$, что соответствует длине индивидуальной волны примерно в 90 м. Изменяя l , мы фактически меняем число волн («сестер») в группе. Параметр a волны в линейной теории играет роль нормирующего множителя, помогающего «держать» амплитуду волнового пакета одинаковой. Различные формы аномально больших волн, эволюция которых будет рассмотрена в данном

разделе, представлены на рис. 2. Здесь мы приводим одну, две, три и четыре «сестры» (количество «сестер» соответствует количеству горбов над нулевым уровнем). Отметим, что глубокие впадины также могут рассматриваться как волны-убийцы отрицательной полярности. Длина волнового пакета в расчетах меняется от 200 до 800 м, а ее положительная амплитуда держится постоянной и равна 0.6 м. Крутизна аномальной волны в данном случае достаточно мала (0.042), так что можно рассматривать такую волну в рамках линейной теории.

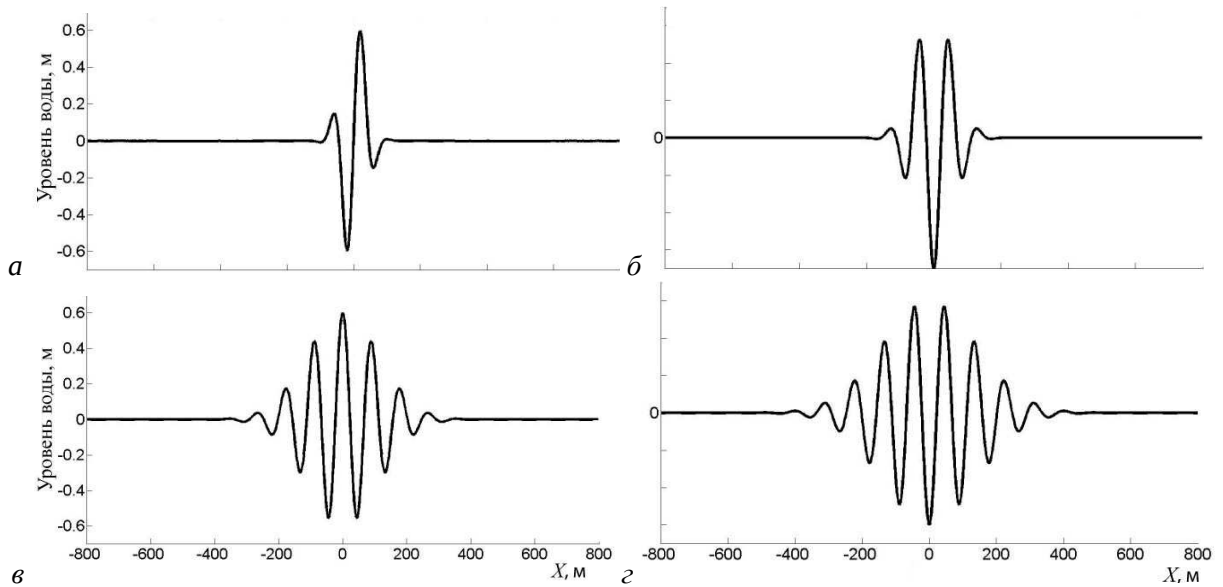


Рис. 2. Начальные возмущения разных форм в нулевой момент времени.
 а – «одна сестра» ($a = 0.72$ м, $l = 50$ м); б – группа аномальных волн типа «две сестры» ($a = 0.8$ м, $l = 80$ м);
 в – «три сестры» ($a = 0.59$ м, $l = 160$ м); г – «четыре сестры» ($a = -0.62$ м, $l = 200$ м).

С течением времени возмущение (1) в силу дисперсии волн на воде трансформируется в волновой пакет, что и продемонстрировано на рис. 3 для момента времени 50 с. Как видим, волновые пакеты для различных начальных возмущений ведут себя примерно одинаково. Из-за дисперсии цуги растягивается в пространстве, число индивидуальных волн растет линейно со временем, а амплитуда пакета со временем падает (рис. 4), причем на больших временах как $t^{1/2}$ [7–9]. На начальном этапе из-за процессов интерференции максимальная положительная амплитуда пакета может даже подрастать и изменяться немонотонно (рис. 4). Из-за уменьшения дисперсии в цуге «три сестры» расплываются в пространстве медленнее, чем «одна сестра».

Полученные выше решения показывают эволюцию волнового пакета на идеально гладкой поверхности. В этом случае время жизни волны бесконечно. Если же все-таки принять формально, что есть порог видимости волны на воде, то ее время жизни становится конечным. Для примера возьмем три критических значения амплитуды волны, при которых она становится «невидимой»: 0.3, 0.4 и 0.5 м (более правильное определение минимально наблюдаемой высоты волны должно делаться с учетом фоновое ветрового волнения – см. далее). Естественно, что времена жизни аномальных волн также будут меняться. Из рис. 5 видно, что с увеличением числа волн в начальном возмущении время жизни волны растет в среднем пропорционально квадрату числа волн; точнее – показатель степени в регрессионных кривых меняется от 1.7 до 1.8.

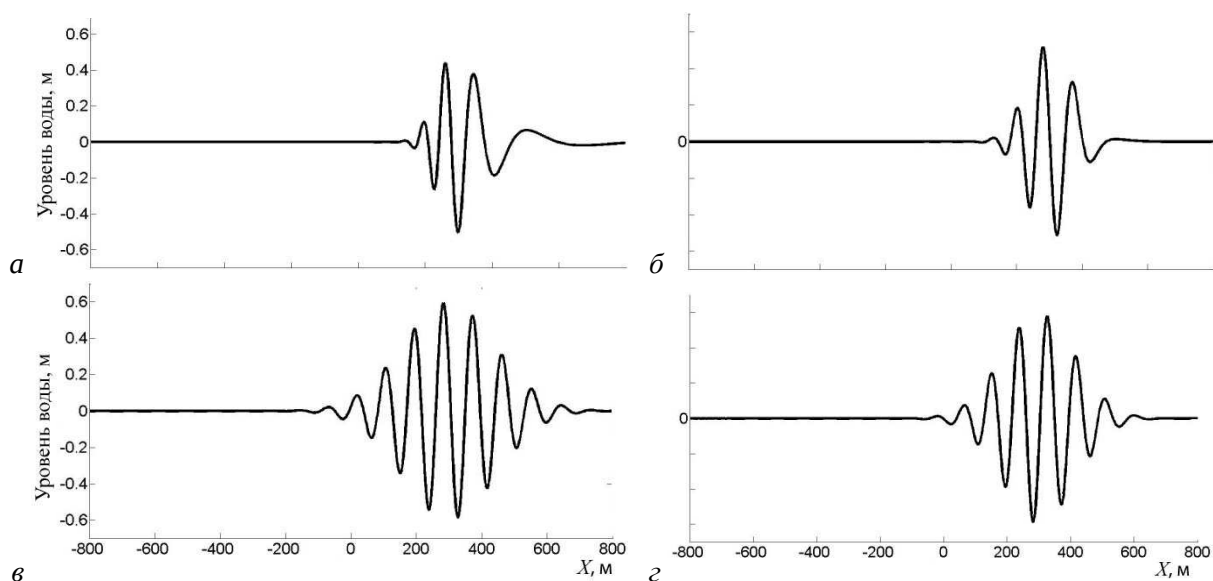


Рис. 3. Форма различных волновых пакетов в момент времени 50 с.
а – «одна сестра», б – «две сестры», в – «три сестры» г – «четыре сестры».

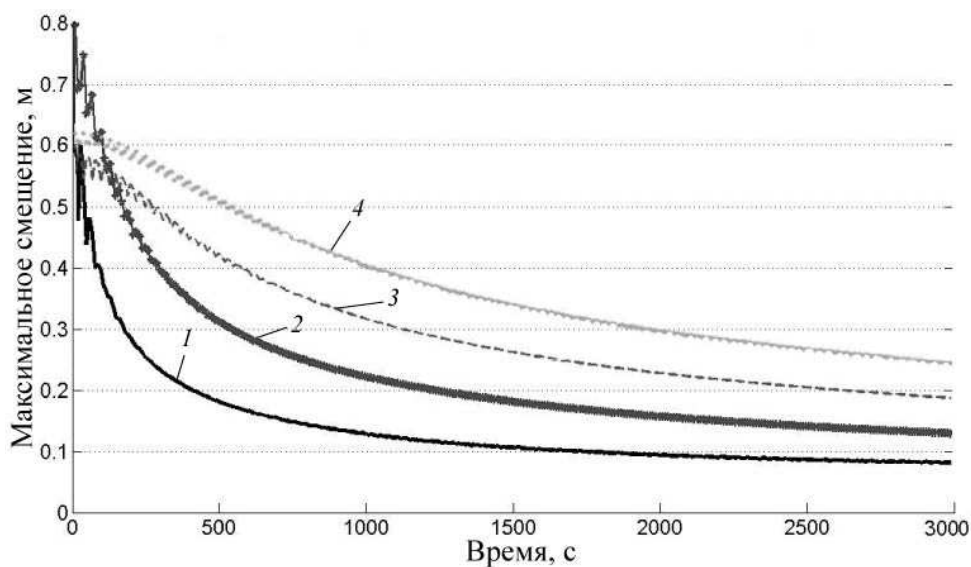


Рис. 4. Изменение максимального смещения водной поверхности со временем.
1 – «одна сестра», 2 – «две сестры», 3 – «три сестры», 4 – «четыре сестры».

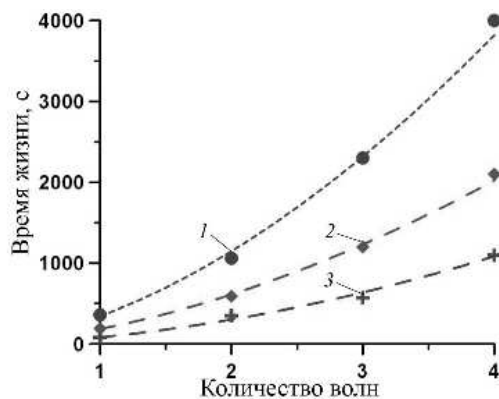


Рис. 5. Зависимость времени жизни волн-убийц от количества волн для разных критических значений порога видимости.
Амплитуда волны, м:
1 – уровень 0.3, 2 – 0.4, 3 – 0.5.
Штриховые линии – регрессионные кривые.

Сама величина времени жизни волны-убийцы в рамках детерминистской задачи является в значительной степени условной, поскольку она сильно зависит от «уровня видимости». Более важно понять влияние нелинейности на величину времени жизни и применимость линейной теории к описанию процесса формирования аномальной волны. В этой связи отметим работу [10], где описаны результаты лабораторного эксперимента и численного моделирования процесса дисперсионного фокусирования волнового пакета в рамках нелинейной теории. В частности, показано, что время жизни волны-убийцы составляет 1–3 мин при крутизне волн 0.2–0.3. Такая же оценка вытекала из результатов наших работ [7, 8] для одиночной волны. Учитывая это, можно надеяться, что наши оценки времени жизни аномальных волн разной формы, приведенные на рис. 5, сохранятся и в нелинейной теории.

Проявление аномально больших волн зыби на фоне ветрового волнения. Волны зыби распространяются на фоне ветровых волн, обусловленных действием локального ветра. Мы будем предполагать, что ветер достаточно слабый, так что аномальные волны зыби заметны на их фоне. В численных экспериментах случайное поле ветровых волн задают с помощью суперпозиции спектральных компонент со случайными фазами

$$Y(x, t) = \sum_{i=1}^N A_i \cos(\omega_i t - k_i x + \varphi_i), \quad (2)$$

где спектральные амплитуды $A_i = \sqrt{S(k_i) \Delta k}$; $S(k)$ – пространственный спектр ветрового волнения; Δk – интервал дискретизации спектра; N – общее число гармоник. Фазы φ_i распределены равномерно в интервале $[0; 2\pi]$ и задаются с помощью генератора случайных чисел.

В качестве модели аппроксимации спектра ветрового волнения использовался спектр Пирсона–Московица для развитого волнения, зависящий только от скорости ветра [11]; этот спектр здесь перепишем в виде одномерного пространственного спектра через дисперсионное соотношение волн на глубокой воде:

$$S(k) = \frac{\alpha}{2k^3} \exp\left[-\frac{\beta g^2}{U^4 k^2}\right], \quad (3)$$

где $\alpha = 8.1 \cdot 10^{-3}$; $\beta = 0.74$; g – ускорение свободного падения; U – скорость ветра.

В наших экспериментах размер домена выбран равным 25 000 м и, значит, $\Delta k = \frac{2\pi}{L} = 0.00025 \text{ м}^{-1}$. Для того чтобы хорошо описать высокочастотную часть спектра вплоть до волновых чисел $k = 3 \text{ м}^{-1}$, в экспериментах рассматривалось число гармоник, равное 6000.

Значительная высота волны (средняя высота одной трети больших волн) может быть оценена как $H_s = 4\sigma$, используя предположение о гауссовости слабого ветрового волнения [1]. Здесь σ есть дисперсия колебаний уровня моря:

$$\sigma^2 = \int_0^\infty S(k) dk = 2.74 \cdot 10^{-3} \frac{U^4}{g^2}. \quad (4)$$

В результате, значительная высота ветрового волнения связана со скоростью ветра равенством

$$H_s = 0.2 \frac{U^2}{g}. \quad (5)$$

Для определенности последующие расчеты будут проведены для скорости ветра $U = 4.3$ м/с, когда еще можно пользоваться линейной теорией (оценки см. ниже). Пространственный спектр ветрового волнения для данной скорости ветра представлен на рис. 6.

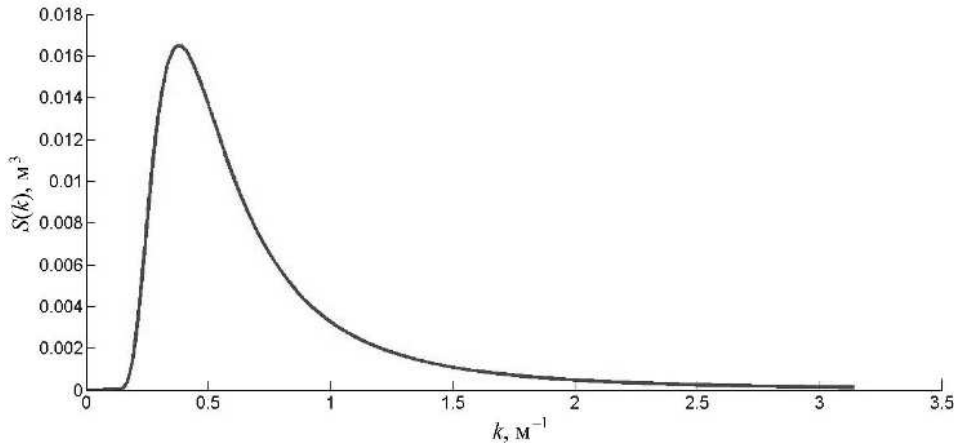


Рис. 6. Спектр ветрового волнения при скорости ветра $U = 4.3$ м/с.

Значительная высота волны при скорости ветра $U = 4.3$ м/с есть $H_s = 0.38$ м. Для последующего удобно использовать не высоту волны, а амплитуду, так что значительная амплитуда $a_s = H_s / 2 = 0.19$ м. Центральное волновое число в спектре есть $k_0 = 0.4$ м⁻¹, что соответствует длине волны $\lambda_0 = 15.7$ м. В рамках модели Пирсона–Московица крутизна основной волны, определенная по значительной высоте ($k_0 a_s = 0.076$), достаточно мала, что свидетельствует в пользу применимости линейной теории.

В качестве критерия волн убийц выбран амплитудный критерий [1, 3]

$$a > a_{fr} = 2a_s = H_s, \quad (6)$$

так что все волны с амплитудой больше 38 см рассматриваются как волны-убийцы, независимо от их происхождения (волна зыби или ветровая волна).

Далее рассмотрим эволюцию волн-убийц зыби в поле ветровых волн (очевидно, что со сменой знака времени легко рассмотреть и обратный процесс формирования аномальной волны зыби в поле ветровых волн). Для простоты мы рассматриваем две системы волн, которые движутся в одном направлении. Длина ветровых волн и волн зыби отличается примерно в 6 раз. Соответственно групповые скорости также различаются (примерно в 2.5 раза), так что эти системы волн с течением времени многократно налагаются друг на друга с разными фазами и амплитудами.

Суперпозиция детерминистских возмущений (1) со случайным волнением одного фиксированного набора фаз приведена на рис. 7 для момента времени 0 с (момент образования волны-убийцы) и на рис. 8 – для момента времени 200 с. Вследствие дисперсии аномальные волны зыби расплываются в волновые пакеты, число индивидуальных волн растет, их амплитуды уменьшаются. В то же время в поле ветровых волн могут появляться и (как покажем ниже) появляются «собственные» волны-убийцы, амплитуды которых превышают критическое значение $a_{fr} = 0.38$ м.

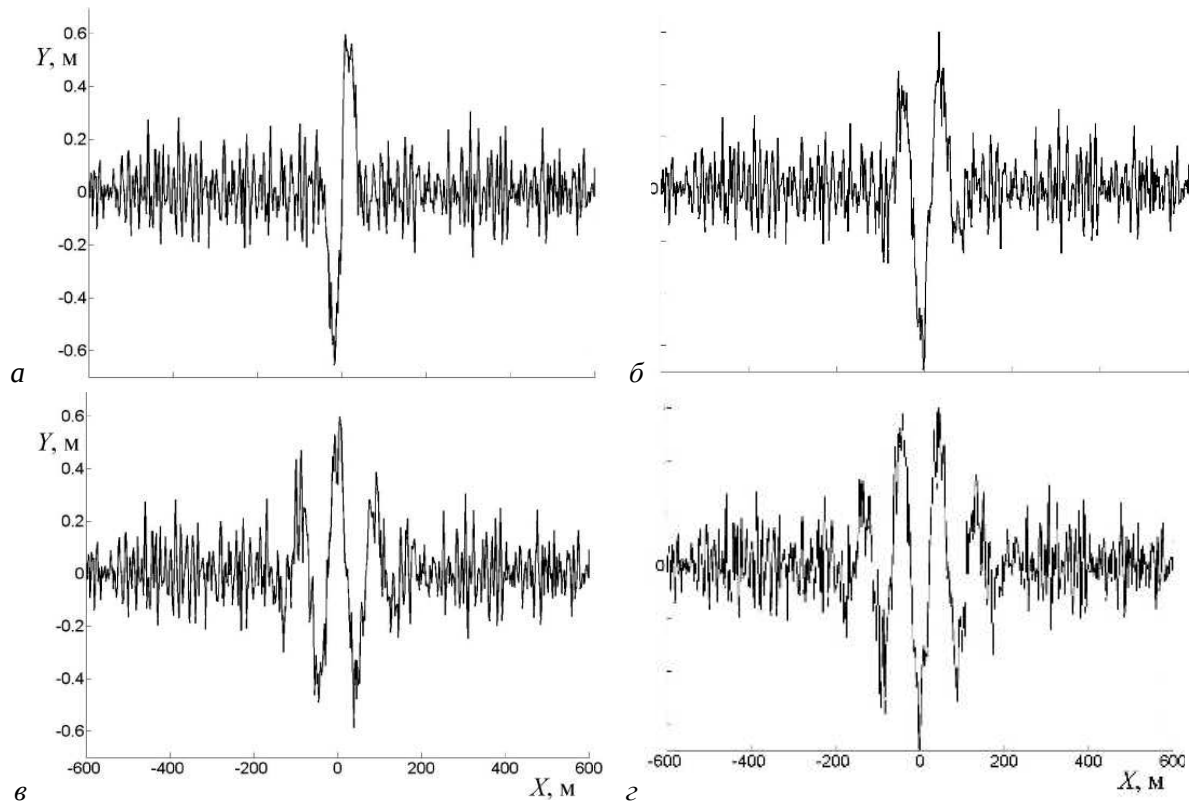


Рис. 7. Волны-убийцы в поле ветровых волн в нулевой момент времени.
 а – «одна сестра», $l = 35$ м; б – «две сестры», $l = 70$ м; в – «три сестры», $l = 110$ м; г – «четыре сестры», $l = 140$ м (l – характерный размер огибающей волнового пакета).

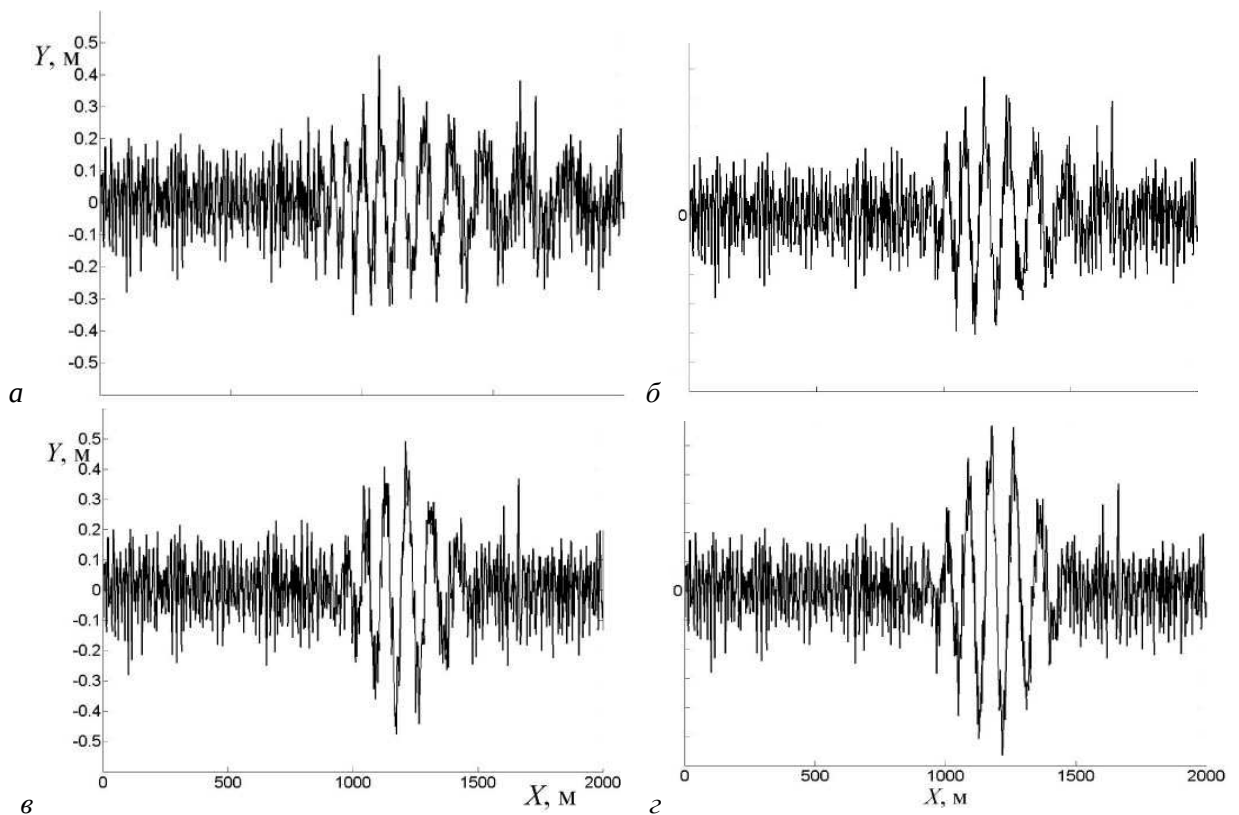


Рис. 8. Наложение волн зыби и ветровых волн в момент времени 200 с
 для различной формы anomalной волны зыби.
 Объяснение а-г – см.рис. 3.

Хорошим способом исследования эволюции волн является построение пространственно-временных ($x - t$) диаграмм, поскольку он позволяет разделить волны зыби и ветровые волны, движущиеся с разными скоростями. Этот метод активно используется для анализа дисперсионных волновых пакетов. Пространственно-временные диаграммы для всех рассматриваемых форм аномальной волны зыби представлены на рис. 9. На диаграммах даны срезы волнового поля с уровнем, превышающим амплитуду волн-убийцы: $a_{fr} = 0.38$ м. Четко прослеживается яркая полоса, идущая из начала координат, – она соответствует расплыванию аномальной волны зыби в поле ветровых волн. В силу периодических граничных условий, применяемых при расчете, эта полоса продолжается на времени 4000 с опять при $x = 0$. Значительное количество случайно появляющихся одиночных точек и коротких линий заметно и вне яркой полосы. Наклон этих линий и групп одиночных точек отличается от наклона основной полосы – свидетельство того, что эти аномальные волны появляются главным образом в самом ветровом волнении. Существование таких «точек» и «линий» разной длины говорит о большом разнообразии времен их жизни, причем некоторые из них могут существовать довольно долго, пропадая и возникая вновь (прерывистые линии). Важно отметить, что «естественные» волны-убийцы в поле ветровых волн возникают достаточно часто в соответствии с предсказаниями линейной статистической теории, основанной на Релеевском распределении. Пространственно-временные диаграммы, приведенные выше, показывают также, что число возникающих волн-убийц зависит от размера вычислительной области, – этот вопрос пока еще плохо исследован. Наконец, качественно диаграммы остаются похожими для разного начального выбора набора случайных фаз. Как видно на рис. 9, правые и левые диаграммы, соответствующие двум реализациям ветрового волнения, в целом отличаются незначительно. «Полосы» волн-убийц остаются практически одинаковыми по интенсивности, в то время как локализация аномальных волн в фоне изменяется.

В принципе пространственно-временные диаграммы могут быть использованы для оценки времени жизни волн-убийц. Ввиду случайного характера ветрового волнения время жизни волн-убийц, естественно, также является случайным. Даже если сосредоточиться на оценке времени жизни аномальной волны зыби, увидим, что она также меняется, поскольку яркая, почти сплошная полоса на больших временах переходит в прерывистую (рис. 9). Используя амплитудный критерий (см.(6)), получаем, что аномальная волна в виде «одной сестры» исчезает примерно за 4–8 мин, «две сестры» – за 30–40 мин, «три сестры» – 60–70 мин, а «четыре сестры» – более чем за 2 ч. Эти цифры больше, чем времена жизни только детерминированных сигналов, рассмотренных во втором параграфе, где, однако, порог их видимости был выбран искусственно. Однако тенденция увеличения времени жизни волн-убийц с ростом числа индивидуальных волн в волновом пакете сохраняется в обоих случаях. Разумеется, нельзя придавать приведенным выше цифрам очень большое значение, поскольку время жизни зависит от соотношения между высотой волны зыби и фоновой волны. В нашем случае амплитуда аномальной волны зыби была выбрана достаточно большой (0.6 м), ее превышение над значительной амплитудой примерно 3.2. Такие волны крайне редко наблюдаются на поверхности океана. Если рассмотреть волны только очень большой амплитуды, втрое превышающие значительную амплитуду волны, то число таких волн, как и следовало ожидать, существенно меньше на пространственно-временных диаграммах (рис. 10). Фактически все «естественные» волны-убийцы пропали и заметно только расплывание аномально большой волны зыби.

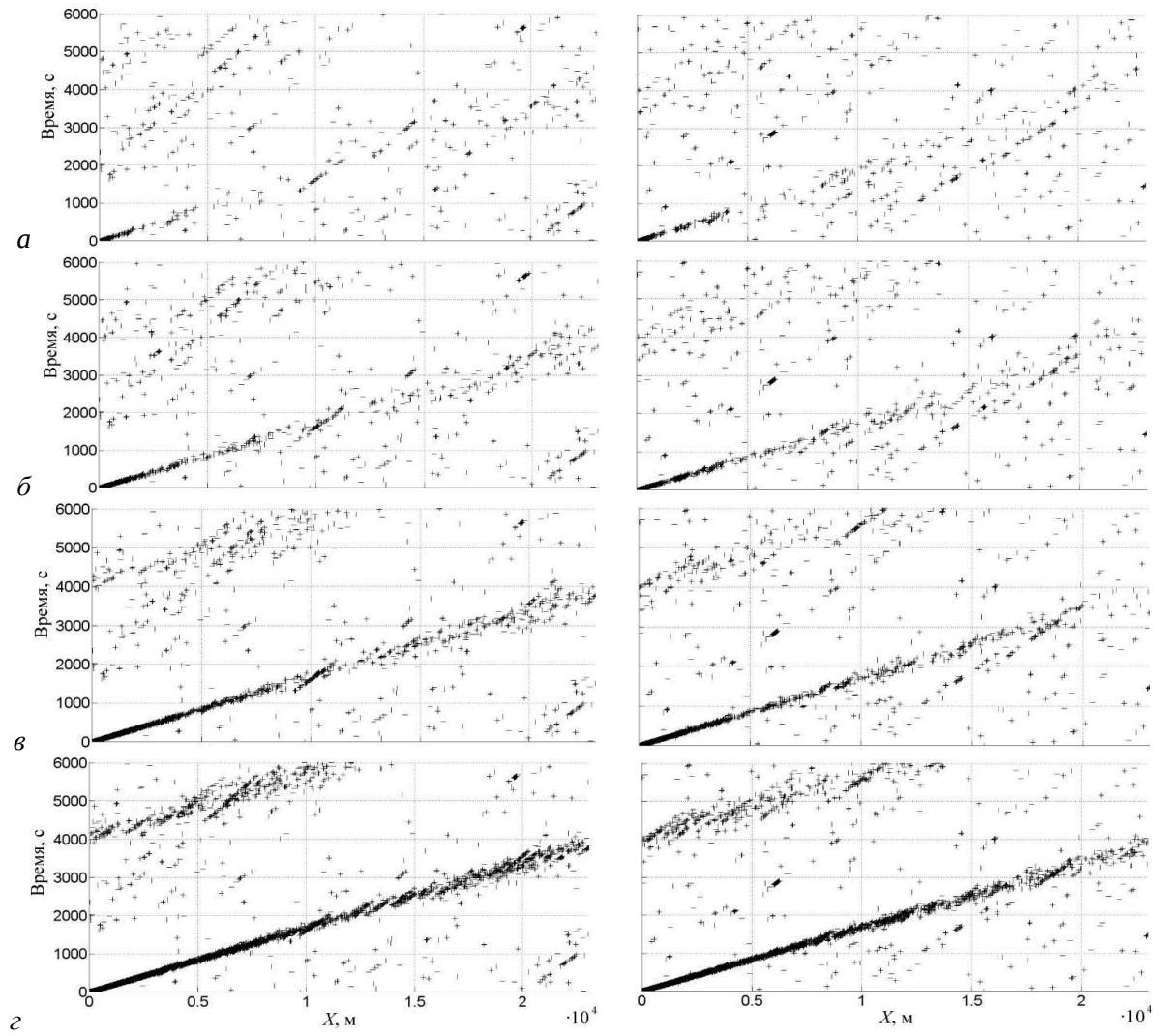


Рис. 9. Пространственно-временные диаграммы.

a – «одна сестра»; *б* – «две сестры»; *в* – «три сестры»; *г* – «четыре сестры». Левые и правые диаграммы соответствуют двум разным реализациям ветрового волнения.

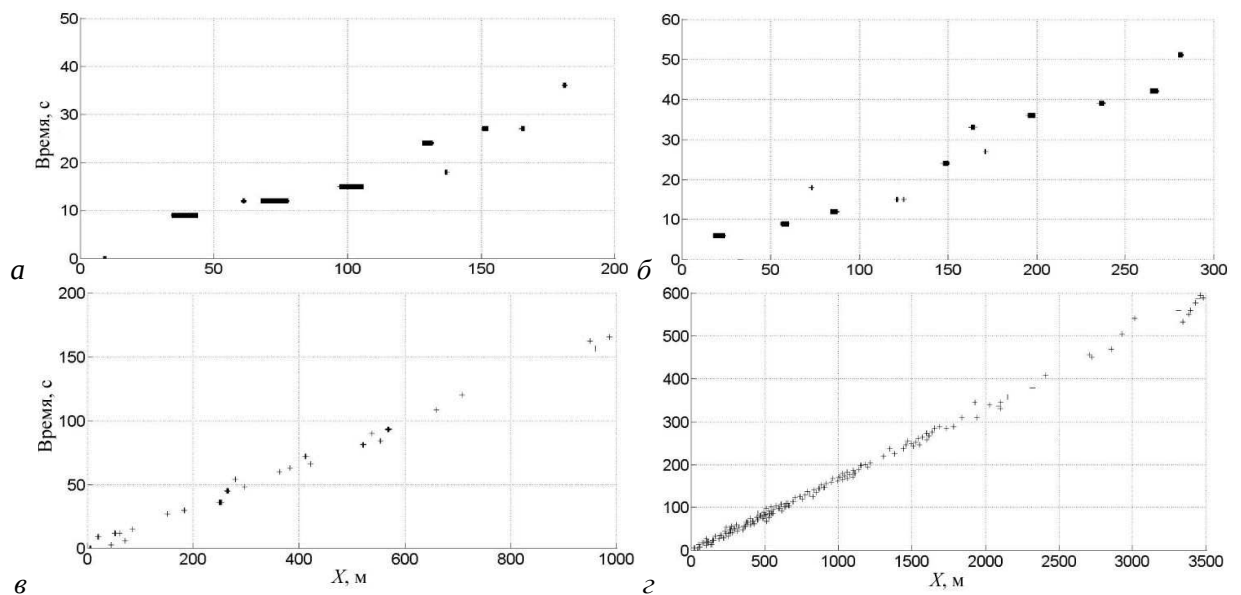


Рис. 10. Срез волнового поля на уровне троекратного превышения значительной амплитуды. Объяснение *a–г* – см.рис. 3. Для удобства выбран разный масштаб.

Выберем более «маленькие» аномальные волны зыби с $a/a_s = 2.2, 2.7$, которые должны наблюдаться чаще. На рис. 11 изображены срезы волнового поля (по уровню двойного превышения значительной амплитуды) в случае эволюции «одной сестры» для трех разных амплитуд зыби в начальный момент времени, соответствующий формированию волны-убийцы. Естественно: чем больше начальная амплитуда, тем дольше она будет превышать порог a_{fr} . И хотя по рисунку трудно сказать, где аномальная волна зыби теряется в ветровом волнении, имеющем «собственные» волны-убийцы, мы можем оценить время ее жизни. Так, в случае, когда $a/a_s = 2.2$ (рис. 11, а), время исчезновения аномальной волны составляет 1–2 мин, в случае $a/a_s = 2.7$ (рис. 11, б) – 2–3 мин, в случае $a/a_s = 3.2$ (рис. 11, в) – 6–7 мин.

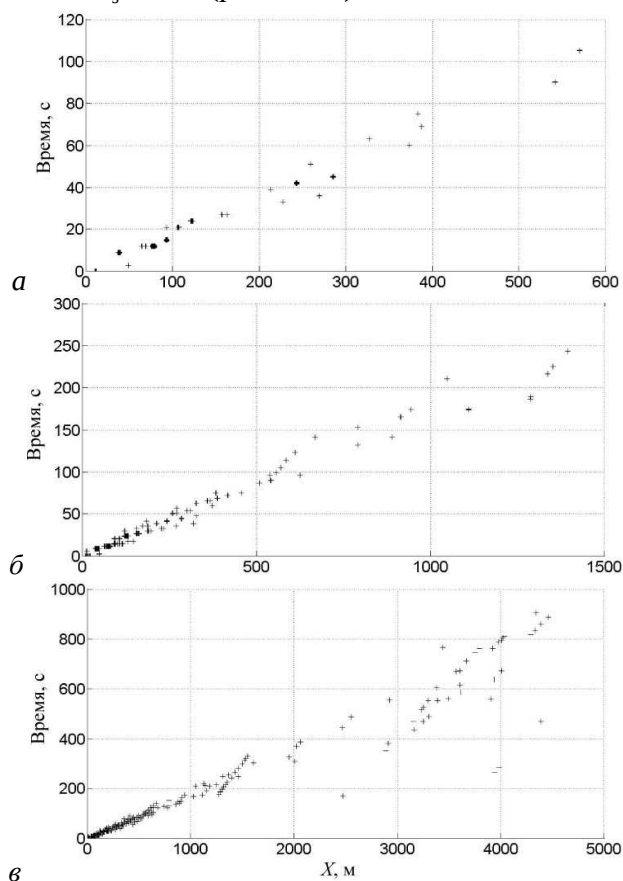


Рис. 11. Срезы волнового поля в случае эволюции «одной сестры» для различных значений отношения амплитуды волны-убийцы зыби к значительной амплитуде.

а – $a/a_s = 2.2$; б – $a/a_s = 2.7$; в – $a/a_s = 3.2$.

но, что видимость с корабля напрямую зависит от погодных условий. Будем считать, что волна-убийца может быть заметна на расстоянии 500 м от корабля. Тогда, по данным диаграмм, полное время жизни (появление + исчезновение волны) всех видов волн зыби составляет примерно 4 мин (эта оценка сделана исходя из условия, что корабль находится на расстоянии 500 м от места образования волны). Скорость зыби, вычисленная по наклону на пространственно-временных диаграммах, равняется примерно 5.8 м/с. Если воспользоваться стандартной формулой для групповой скорости волнового пакета на

Аналогичные рисунки могут быть приведены для аномальных волн зыби в виде «двух, трех и четырех сестер». Качественно они все похожи, будут меняться лишь интенсивность и ширина линий. В случае «двух сестер» для отношений $a/a_s = 2.2, 2.7$ и 3.2 среднее время исчезновения аномальных волн зыби составляет 9, 15 и 35 мин соответственно; в случае «трех сестер» – 15, 50 и 80 мин, в случае «четырёх сестер» время жизни превышает 2 ч. И такие долгоживущие волны трудно называть аномальными.

Уже говорилось, что глубокие впадины также могут рассматриваться как волны-убийцы. На рис. 12 приведены «отрицательные» срезы тех же волновых полей (меньших, чем a_{fr}), «положительные» срезы которых приводились на рис. 9 (правые диаграммы). Как и следовало ожидать, положительные и отрицательные срезы очень похожи друг на друга, что свидетельствует о симметричности волнового процесса относительно нулевого уровня.

Данные о времени жизни волн-убийц в настоящее время фактически берутся из описаний моряков, которые сообщают, с какого расстояния они замечают аномальную волну. Естественно,

глубокой воде ($0.5\sqrt{g/k_0}$), то получим значение 6 м/с, что близко к прямой оценке скорости зыби. Тогда можно вычислить время, за которое волна проходит расстояние 1000 м (500 м – до апогея волны и 500 м – после), оно равняется примерно 3 мин, что несколько меньше визуальной оценки (4 мин) в силу расплывания волнового пакета. Время жизни также может меняться в зависимости от положения корабля относительно «эпицентра» волны. Например (рис. 9, *з*, левая часть), на расстоянии 20 км волной пакет зыби уже достаточно широк и расстояние 1 км волна-убийца проходит за 15 мин. Итак, если корабль находится близко к «эпицентру», то аномальные волны движутся с наибольшей амплитудой, но имеют меньшую продолжительность; и наоборот, если далеко – то амплитуды волн-убийц сравнительно небольшие, но корабль будет трясти дольше (в силу дисперсионного расплывания волновой пакет на больших расстояниях будет шире).

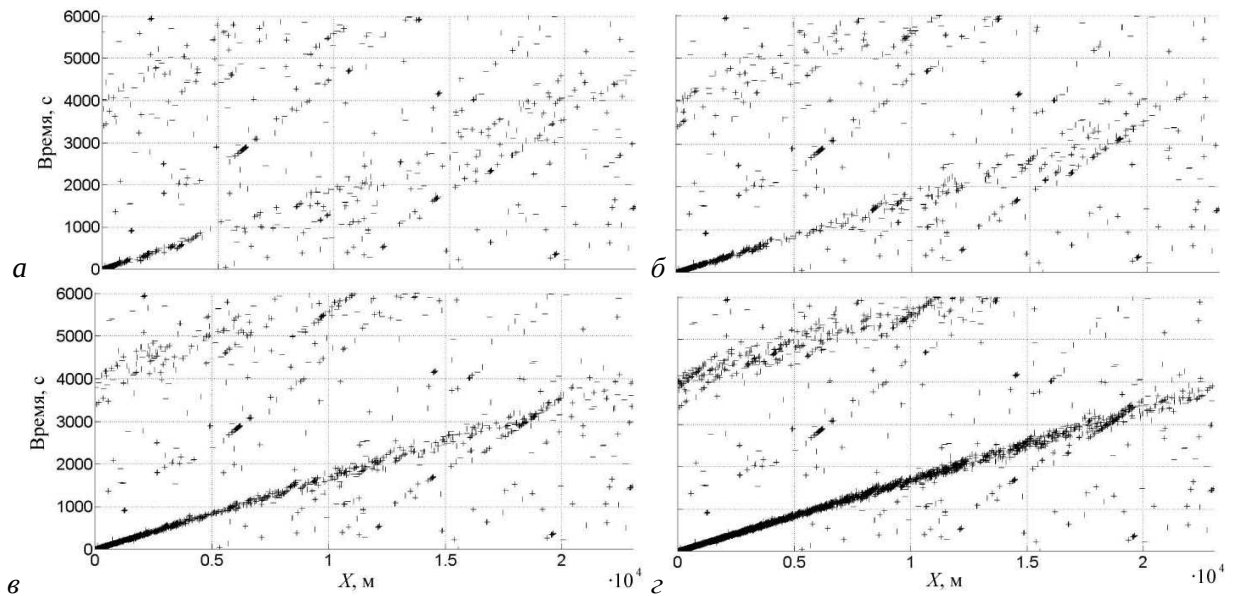


Рис. 12. «Отрицательные» срезы волнового поля.
Объяснение *а–г* – см.рис. 3.

В данной работе исследуется проблема видимости аномальных волн зыби на фоне умеренного ветрового волнения. Обе системы волн предполагаются распространяющимися в одном направлении, при этом спектр ветрового волнения описывается спектром Пирсона–Московица. Расчеты выполнены в рамках линейной потенциальной теории волн в бесконечно глубоком море. На этой основе анализируется время жизни волн-убийц зыби различных форм – «одной, двух, трех и четырех сестер» в рамках механизма дисперсионного фокусирования волновых пакетов. Время жизни растет с увеличением числа индивидуальных волн в аномальном волновом пакете. Так, для соотношения $a/a_s = 2.2$ время исчезновения «одной, двух, трех и четырех сестер» составляет соответственно 1.5, 9, 15 и 80 мин. С увеличением отношения a/a_s время жизни возрастает, но и случаются такие события очень редко. С другой стороны, для экипажа корабля, который находится в непосредственной близости от эпицентра волны-убийцы, их «видимое» время жизни составляет около 4 мин, что, конечно, недостаточно для подготовки экипа-

жа к встрече с аномально большой волной. Обсуждается также проявление аномальной волны зыби в виде глубокой впадины на фоне ветрового волнения.

Данное исследование проведено при поддержке грантов РФФИ (11-05-00216, 11-05-92002, 11-05-97006, 11-02-00483) и европейской программы FP7 «Extreme Seas» (№ 234175), а также VolkswagenStiftung (Е.П.), фонда «Династия» и гранта Президента РФ для молодых кандидатов наук (МК-1440.2012.5) (Е.Ш.). Авторы благодарны А.В. Сергеевой за конструктивные замечания.

Литература

1. Куркин А.А., Пелиновский Е.Н. Волны-убийцы: факты, теория и моделирование. Н.Новгород: ННГУ, 2004. 157 с.
2. Faulkner D. Rogue waves – defining their characteristics for marine design // Rogue Waves 2000 (Brest, France, 2000) / Eds.: M.Olagnon, G.A.Athanassoulis. Ifremer, 2001. P.3–18.
3. Kharif Ch., Pelinovsky E., Slunyaev A. Rogue Waves in the Ocean. Springer, 2009. 216 p.
4. Пелиновский Е.Н., Слюняев А.В. «Фрики» – морские волны-убийцы // Природа. 2007. № 3. С.14–23.
5. Mori N., Liu P.C., Yasuda T. Analysis of freak wave measurements in the Sea of Japan // Ocean Engineering. 2002. V.29. P.1399–1414.
6. Snodgrass, F.E.; Groves G.W., Hasselmann K.F., Miller G.R., Munk W.H., Powers W.H. Propagation of ocean swell across the Pacific. Phil. Trans. R. Soc. Lond., 1966. A 259: P.431–497. doi:10.1098/rsta.1966.0022.
7. Пелиновский Е.Н., Шургалина Е.Г. Аномальное усиление волны вблизи вертикальной преграды // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2010. № 4 (10). С.29–38.
8. Pelinovsky E., Shurgalina E., Chaikovskaya N. The scenario of a single freak wave appearance in deep water – dispersive focusing mechanism framework // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2011. N 11. P.127–134.
9. Уизем Дж. Линейные и нелинейные волны. М.: Мир, 1977. 622 с.
10. Shemer L., Goulitski K., Kit E. Evolution of wide-spectrum unidirectional wave groups in a tank: an experimental and numerical study // Europ. J. of Mechanics. 2007. B/Fluids 26. P.193–219.
11. Трубкин И.П. Ветровое волнение (взаимосвязи и расчет вероятностных характеристик). М.: Научный мир, 2007. 264 с.

Статья поступила в редакцию 06.09.2011 г.

