

УДК 551.466.3

Т.Г.Талипова¹, Е.Н.Пелиновский¹

МОДЕЛИРОВАНИЕ «ВОЛНЫ ЛАВРЕНОВА» НА ПОВЕРХНОСТИ НЕГЛУБОКОГО МОРЯ

Нелинейно-дисперсионный механизм взаимодействия волновых пакетов применяется для объяснения форм спорадически возникающих аномально больших волн на поверхности океана («волн-убийц»). Особое внимание уделено так называемой «волне Лавренова», состоящей из неглубокой и протяженной подошвы и следующим за ней высоким коротким гребнем.

Интерес к возникновению аномально больших волн («волн-убийц») на поверхности моря возник уже довольно давно, и к настоящему времени физические механизмы явления стали более ясными [1-6]. Актуальность исследования причин возникновения этих гигантских волн связана, в первую очередь, с обеспечением безопасности морского судоходства и освоением морского шельфа для добычи нефти и газа [7]. В России этот пласт задач был поднят почти 25 лет назад недавно ушедшим из жизни известным специалистом в области ветровых волн И.В. Лавреновым, который принимал участие в экспертизе реального события, случившегося с танкером-рефрижератором «Таганрогский залив» у берегов Южной Африки 27 апреля 1984 г. [8]. В 13 ч 01 мин судового времени (14 ч 01 мин по московскому времени) танкер подвергся воздействию аномальной волны, в результате чего матрос, участвовавший в палубных работах на баке судна, был смертельно травмирован и смыт за борт.

Вот как описано это событие в работах Лавренова [8, 9]: «27 апреля танкер следовал из Индийского океана в юго-восточную Атлантику. Дул 6-балльный северо-восточный-восточный ветер. В 05 ч ветер изменился на юго-западный и оставался прежней силы в 6 баллов. Атмосферное давление с вечера предыдущих суток понижалось до смены ветра, а затем начало повышаться. В 08 ч ветер стал постепенно усиливаться и к 11 ч достиг силы 8 баллов. Сразу после 12 часов было замечено ослабление ветра. Замер скорости, произведенный на пеленгаторском мостике на высоте 21 метр в 12 ч 30 мин, показал 15 м/с. Такой же силы ветер оставался и в последующие три часа. Волнение моря после 12 ч также несколько уменьшилось и не превышало 6 баллов. Ход судна был сбавлен до самого малого. Оно достаточно хорошо управлялось и хорошо отыгрывалось на волне. Заливание бака и палубы не наблюдалось. Неожиданно в 13 ч 01 мин носовая часть судна несколько опустилась, и вдруг у самого форштевня под углом 10-15° к курсу судна был замечен гребень одиночной волны, которая возвышалась на 4-5 м над баком. Необходимо отметить, что высота фальшборта бака от уровня воды 11 м. Гребень волны мгновенно обрушился

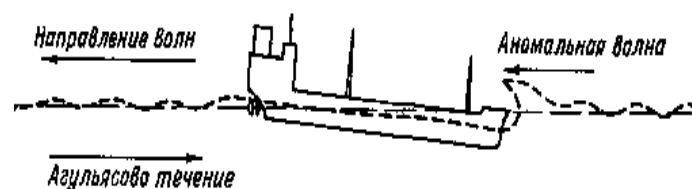


Рис. 1. «Волна-убийца», состоящая из подошвы и аномально высокого гребня [9]

на бак и накрыл работающих там матросов. По описанию ощутивших воздействие волны, судно как бы плавно пошло вниз, скользя по волне и «зарылось» в вертикальный срез ее фронтальной части. Схематично эта ситуация изображена на рис. 1. Никто удара не ощутил, вол-

¹ Институт прикладной физики РАН (Нижний Новгород)

на плавно перекатилась через бак судна, накрыв его слоем воды толщиной более 2 м. Не было также и продолжения волны ни вправо, ни влево. Один из матросов был смертельно травмирован этой волной, его смыло за борт.»

По мнению И.В. Лавренова, форма волны, изображенная на рис. 1, является типичной для аномальной волны (это мнение разделяют и некоторые зарубежные исследователи). В беседах с авторами данной статьи И.В. Лавренов часто ставил вопрос о причинах, которые могут привести к образованию впадины перед высоким гребнем, поскольку во многих публикациях «волна-убийца» представляет собой одиночный гребень или группу высоких волн. В настоящей работе мы обсудим одну из возможных причин образования аномальной волны, которую будем называть «*волной Лавренова*». Объяснение дано в рамках механизма нелинейной дисперсионной фокусировки волновых пакетов, активно разрабатываемого авторами статьи [1, 3, 4, 5, 11, 12]. Физика явления связана с дисперсией волн на воде, когда различные пакеты двигаются с различными скоростями и при определенных условиях могут «столкнуться» в одном месте (фокусе), приводя к появлению очень высоких волн. Этот механизм моделировался в лабораторных условиях [1, 13, 14]. При этом в большинстве теоретических и экспериментальных работ «волна-убийца» представлялась в виде одиночного гребня либо волнового пакета («три сестры»). Как будет показано ниже, в рамках данного механизма возможно появление аномально больших волн произвольной формы, в том числе и в виде «волны Лавренова».

Теоретическая модель. Для простоты рассмотрим волны в мелкой воде, когда дисперсия волн на воде мала и их нелинейность играет существенную роль. Мы ограничимся только одной горизонтальной координатой, чтобы исключить эффекты пространственного фокусирования волн, которые обычно малы для ветровых волн в бассейне постоянной глубины. Подходящей моделью слабонелинейных волн на мелкой воде является хорошо известное уравнение Кортевега-де Вриза:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + c \left(1 + \frac{3\eta}{2h} \right) \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{ch^2}{6} \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} = 0,$$

где η есть возвышение поверхности воды, h – невозмущенная глубина воды и $c = \sqrt{gh}$ – линейная скорость распространения длинных волн, g – ускорение свободного падения. Это уравнение сводится к безразмерной форме:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial \tau} + \frac{3}{2} \zeta \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{6} \frac{\partial^3 \zeta}{\partial y^3} = 0 \quad (1)$$

следующими заменами:

$$\zeta = \frac{\eta}{h}, \quad \tau = \frac{c}{h} t, \quad y = \frac{x - ct}{h}. \quad (2)$$

Эффективный алгоритм нахождения «волны-убийцы» был предложен в нашей работе (Pelínovsky et al, 2000) и основан на инвариантности уравнения (1) к смене знаков y -координаты и времени. Это означает, что в качестве начальных условий можно рассматривать сами «волны-убийцы» и решать прямую задачу для уравнения Кортевега-де Вриза. Получаемые здесь решения (аналитические или численные) после инвертации (зеркального отражения) в пространстве и будут представлять собой те волновые пакеты, эволюция которых приведет к появлению аномально высокой волны заданной формы.

Динамика импульсных возмущений (быстро спадающих на бесконечности) хорошо изучена в рамках точных решений уравнения Кортевега-де Вриза, получаемых с помощью метода обратной задачи рассеяния [15, 16]. Если начальное возмущение представляет собой гребень, то в процессе эволюции он распадается на солитоны и затухающий дисперсионный хвост.

Солитон описывается следующим выражением:

$$\zeta_s = A_s \operatorname{sech}^2 \left(\sqrt{\frac{3}{4}} A_s (y - (1 + A_s / 2) \tau) \right),$$

где A_s – амплитуда солитона.

В случае начальных возмущений отрицательной полярности (подошва) солитоны не образуются, и поле представляет собой волновые пакеты. Простейшей моделью «волны-убийцы» может являться дельта-функция. Решение уравнения Кортевега-де Вриза с таким начальным условием хорошо известно. Если дельта-функция положительна, то на больших временах остается только один солитон, а если отрицательна – то затухающий волновой пакет напоминает волну Эйри. Очевидно теперь, что, обращая волну Эйри в пространстве (даже маленькой амплитуды) или солитон и дисперсионный хвост, можно получить очень большую аномальную волну. Кажется естественным, что возможна и суперпозиция дельта-функций разной полярности, чтобы получить «волну Лавренова». Детали появления такой волны исследованы численно в рамках уравнения Кортевега-де Вриза.

Численное моделирование. Численная модель уравнения Кортевега-де Вриза (2) основана на конечно-разностной схеме с выполнением критерия Куранта [17]. Основной целью численных расчетов является анализ условий возникновения «волны Лавренова» из нелинейно-дисперсионных волновых пакетов.

В первой серии расчетов волновые пакеты генерировались из гауссового короткого гребня $A_f \exp(-y^2/L^2)$, как это делалось в нашей более ранней работе [10]. Волновое поле представляет собой солитон и затухающий дисперсионный пакет; данное волновое поле после обращения его в пространстве схлопывается в «волну-убийцу» в форме гауссового гребня. Этот процесс показан на рис. 2 для двух значений амплитуд гауссового импульса 0.2 и 0.4 при одинаковой длительности $L = 0.55$. В данном случае процесс образования «волны-убийцы» занимает 2000 единиц времени. Отметим, что амплитуды возникающих солитонов различаются почти в четыре раза (0.025 и 0.092), в то время как амплитуды диспергирующих хвостов отличаются почти в два раза. Таким образом, уже этот простой расчет подтверждает теоретические выводы [10], что наиболее сильно на высоту «волны-убийцы» влияет амплитуда диспергирующего цуга.

В дальнейшем солитоны были вырезаны из волнового поля и изучался процесс формирования «волны-убийцы» непосредственно из диспергирующих пакетов. Результаты расчетов показаны на рис. 3. Из дисперсионного пакета (рис. 3, а) генерируется высокая волна знакопеременной формы (рис. 3, б), высота (от подножия до гребня) которой (0.4) оказывается такой же, как и из полного волнового поля, содержащего солитон. Превышение над фоном составляет 6.7, так что такая волна удовлетворяет амплитудному критерию «волны-убийцы» (достаточно превышения в два раза). Видно также, что отрицательная фаза «волны-убийцы» (подножие) имеет большую длительность. Итак, эволюция дисперсионных пакетов позволяет объяснить появление «волны Лавренова», которая в рамках идеализированной модели имеет весьма специфическую форму. Амплитуда осцилляций в диспергирующем цуге меняется очень сильно, поэтому распределение массы (интеграла по волновому возмущению) в нем сильно неоднородно. Так, если убрать наиболее энергичную отрицательную полуволну (рис. 3, в), что сразу меняет массу волнового поля, то образовавшаяся «волна-убийца» (рис. 3, г) содержит большой гребень и два небольших подножия. И хотя ее высота стала немного ниже (0.33), превышение над фоном составляет почти те же 6.7 раз. Таким образом, масса диспергирующего пакета влияет значительно на форму аномальной волны, но в любом случае она становится знакопеременной.

Аналогичные расчеты были проделаны с гауссовым импульсом отрицательной полярности. В этом случае, как известно, солитоны не образуются, а форма дисперсионного цуга напоминает волну Эйри, особенно при малых амплитудах. Его схлопывание приводит к появлению аномальной глубокой подошвы на поверхности моря (рис. 4). Наибольшая высота волны в пакете на рис. 4, а) (перепад между впадиной и гребнем) составля-

ет 0.1, в то время как импульс достигает амплитуды 0.2. Так что образующийся импульс и здесь удовлетворяет амплитудному критерию «волны-убийцы».

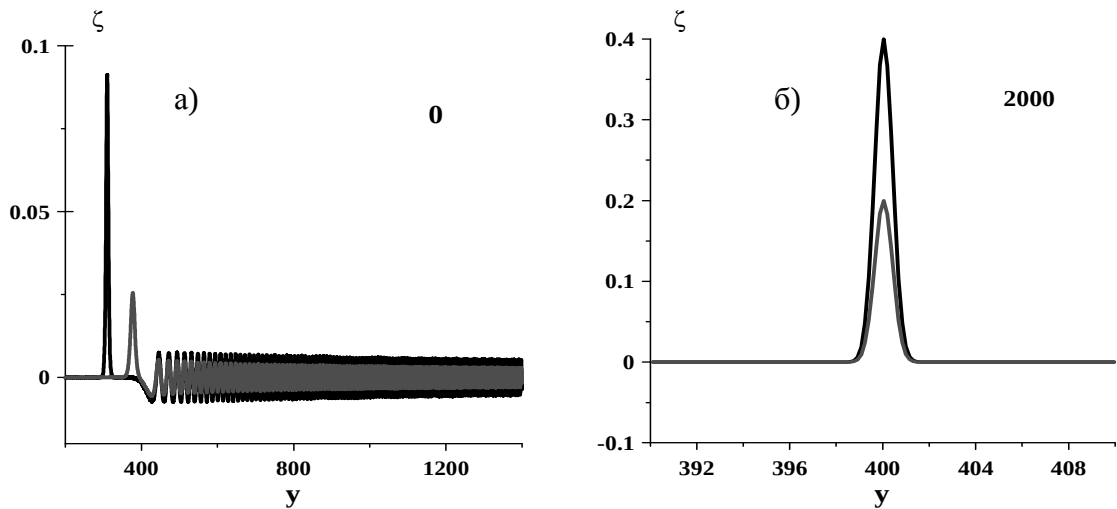


Рис. 2. Волновые пакеты (а), приводящие к образованию положительных гауссовых импульсов (б); с амплитудами 0.2 (серый) и 0.4 (черный) и длиной 0.55

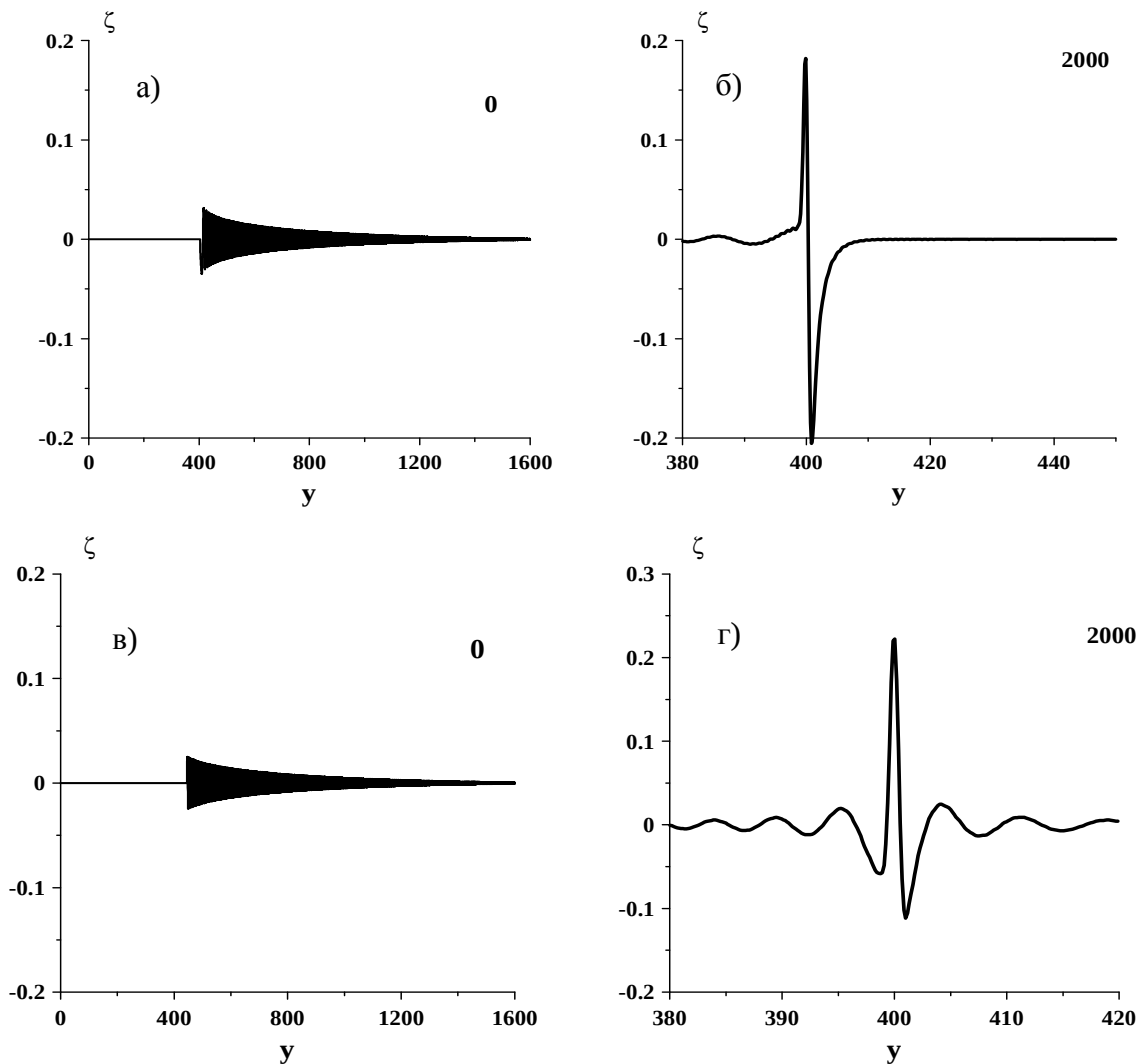


Рис. 3. Начальный волновой пакет (а); волна большой амплитуды, возникающая в результате дисперсионной фокусировки (б); начальный пакет, из которого вырезана еще одна волна перед солитоном (в); волна, возникающая при фокусировке этого пакета (г)

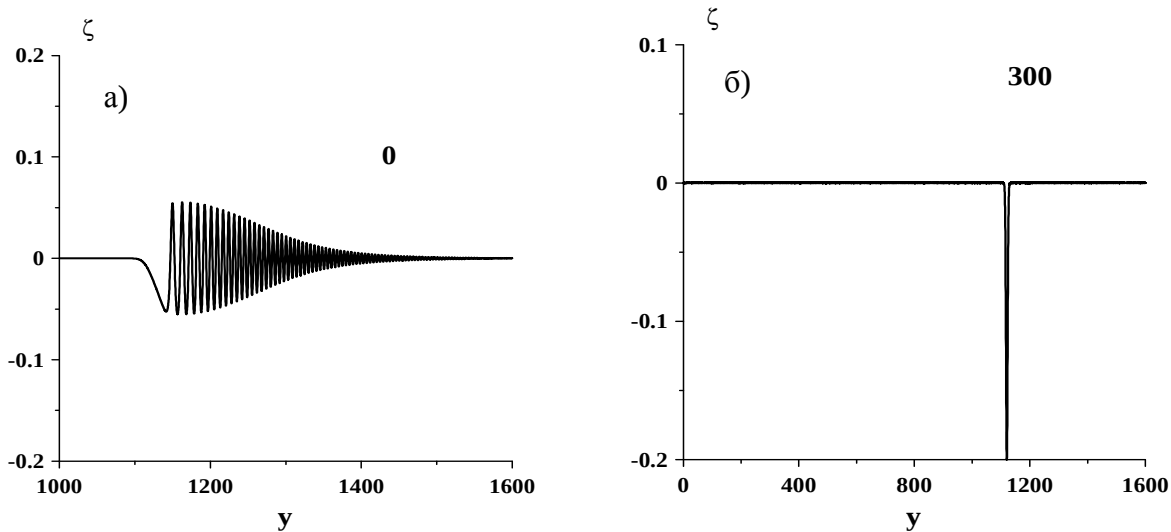


Рис. 4. Начальный пакет (а), трансформирующийся в гауссов импульс отрицательной полярности (б)

Исключение из начального пакета замыкающей отрицательной полуволны (рис. 5, а) приводит при фокусировке к образованию впадины перед высоким гребнем (рис. 5, б). Однако в этом случае за гребнем следует подошва еще большей амплитуды и следующий гребень, так что картина подобна аномальному волновому пакету, который часто в литературе называют «три сестры». Перепад между первым гребнем и второй наибольшей впадиной составляет 0.33, что в три раза больше высоты исходного пакета, то есть амплитудный критерий «волны-убийцы» выполняется. Итак, появление глубокой впадины перед основным гребнем возможно и при эволюции данного класса волновых пакетов.

В третьей серии экспериментов в качестве исходной волны при прямом расчете выбрана непосредственно «волна Лавренова» (рис. 6, б). В этом случае начальным для образования такой волны будет волновое поле, содержащее солитон (рис. 6, а). Превышение над фоном при фокусировке здесь более чем в три раза. Главное, что отличает данное волновое поле от использованных ранее, это немонотонная модуляция в диспергирующем пакете, что по существу может интерпретироваться как почти линейная интерференция двух пакетов, возникших от положительной и отрицательной частей «волны Лавренова».

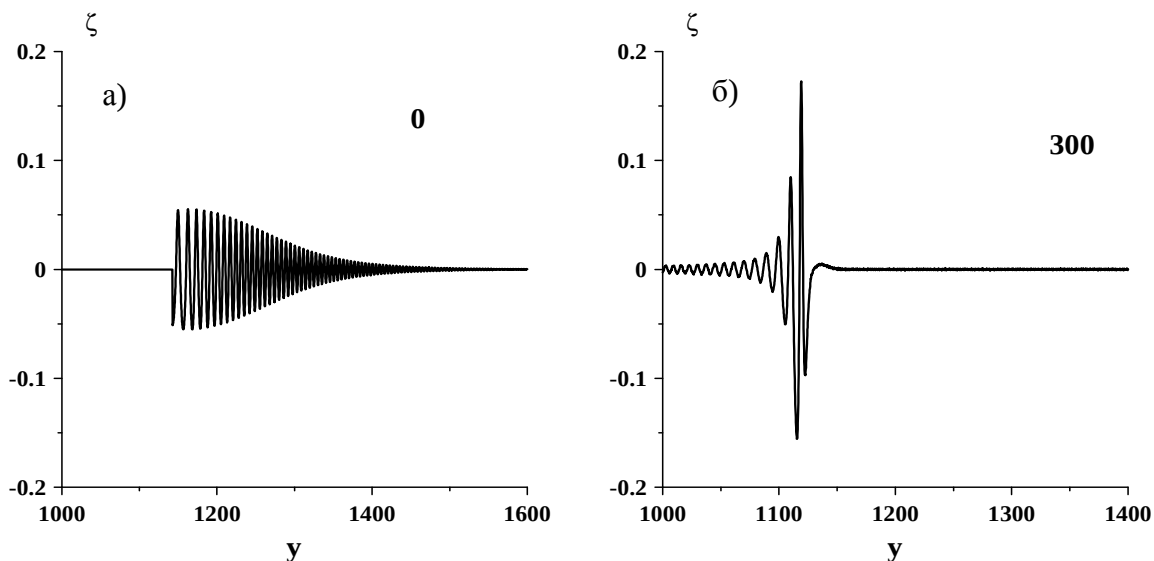


Рис. 5. Начальный пакет (а), трансформирующийся в пакет «три сестры» (б)

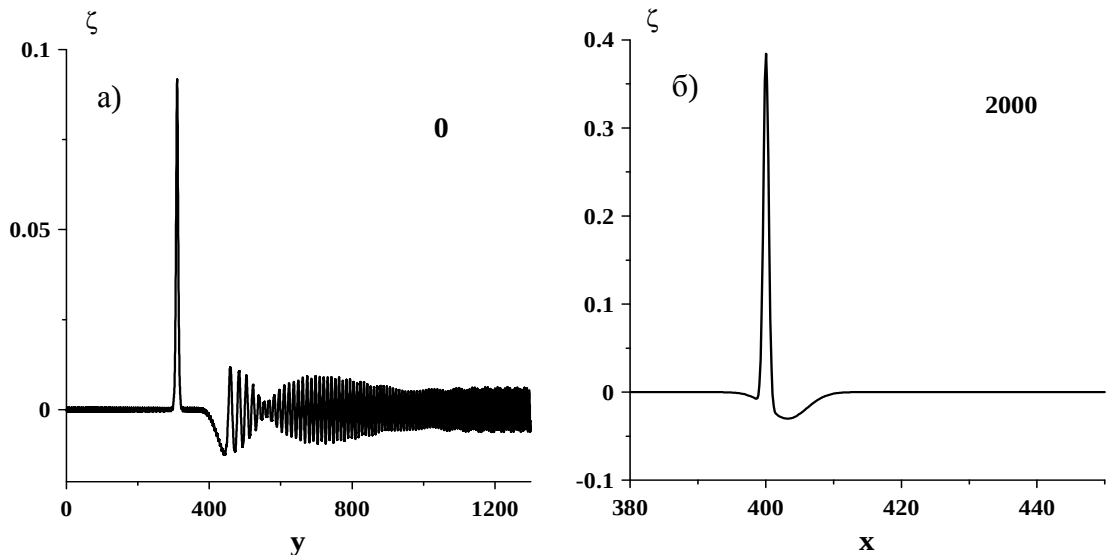


Рис. 6. Начальный пакет (а); «волна Лавренова» (б)

Итак, уже в рамках нелинейно-дисперсионного механизма возникает большое разнообразие форм аномально-большой волны, в том числе и «волны Лавренова», состоящей из высокого гребня и впадины перед ним. Следует подчеркнуть, что данный механизм не является очень чувствительным к вариациям формы волнового пакета, как это обычно представляется. Оптимальное фокусирование волновых пакетов с «нужными» фазами, конечно же, обеспечивает наибольший выигрыш в амплитуде аномальной волны, однако амплитудный критерий выполняется и при достаточно сильной деформации волнового пакета, как это иллюстрируется в данной работе. Разумеется, из данной простейшей теории не удастся получить преимущественную форму аномальной волны, и в рамках этой модели появление «волны Лавренова» или «трех сестер» равновероятно. На наш взгляд, и натурные данные наблюдений аномальных волн также не дают преимущественной формы таких волн, поэтому вопрос о наиболее распространенной форме аномальной волны пока остается открытым. В то же время представляется, что появление аномальной волны, состоящей из гребня и впадины, более вероятно, чем только гребня или только впадины, поскольку для появления последних необходимо только специальное изменение фаз.

В дальнейшем мы предполагаем рассмотреть вопрос о форме «волны-убийцы» в рамках прямого численного моделирования случайных полей, что может дать ответ о вероятностных характеристиках различных ее форм, и, в частности, о вероятности появления «волны-убийцы».

Аналогичные процессы могут встречаться и в поле внутренних волн, где используются те же аналитические модели, основанные на уравнении Кортевега-де Вриза [18-20].

Авторы посвящают данную работу памяти Игоря Викторовича Лавренова, одного из пионеров исследования «волн-убийц».

Данная работа частично поддержана грантами РФФИ (08-05-00069, 08-05-72011, 08-05-91850, 09-05-00204, 08-01-90425).

Литература

1. Kharif C., Pelinovsky E. Physical mechanisms of the rogue wave phenomenon // European Journal Mechanics / B-Fluid. 2003. V.22. P.603-634.
2. Лопатухин Л.И., Бухановский А.В., Дивинский Б.В., Рожков В.А. О необычных волнах в океанах и морях

- // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2003. № 26. С.65-73.
3. Куркин А.А., Пелиновский Е.Н. Волны-убийцы: факты, теория и моделирование. Нижний Новгород: ННГУ, 2004.
 4. Куркин А.А., Пелиновский Е.Н., Слюняев А.В. Физика волн-убийц в океане // «Нелинейные волны - 2004». Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2005. С.37-51.
 5. Пелиновский Е.Н., Слюняев А.В. «Фрики» — морские волны-убийцы // Природа. 2007. № 3. С.14-23.
 6. Dysthe K., Krogstad H.E., Muller P. Oceanic rogue waves // Annual Review Fluid Mech. 2008. № 40. С.287-310.
 7. Бадулин С., Иванов А., Островский А. Влияние гигантских волн на безопасность морской добычи и транспортировки углеводородов // Технологии ТЭК. 2005. № 1. С.56-62.
 8. Лавренов И.В. Встреча с волной-убийцей. Морской флот. 1985. 12. 28-30.
 9. Лавренов И.В. Математическое моделирование ветрового волнения в пространственно-неоднородном океане. С.-П.: Гидрометеиздат, 1998.
 10. Pelinovsky E., Kharif Ch., Talipova T. Nonlinear dispersive mechanism of the freak wave formation in shallow water. //Physica D. 2000. V. 147. No. 1-2. P. 83-94.
 11. Kharif C., Pelinovsky E., Talipova T., Slunyaev A. Focusing of nonlinear wave groups in deep water // Письма в ЖЭТФ. 2001. № 73. С.190-195.
 12. Slunyaev A., Kharif C., Pelinovsky E., Talipova T. Nonlinear wave focusing on water of finite depth // Physica D. 2002. V.173. No.1-2. P.77-96.
 13. Touboul, J., Giovanangeli, J.P., Kharif, Ch., Pelinovsky, E. Experiments and simulations of freak waves under the action of wind // European J. Mechanics / B-Fluids. 2006. V.25. P.662-676.
 14. Kharif C., Giovanangeli J-P., Touboul J., Grare L., Pelinovsky, E.N. Influence of wind on extreme wave events: Experimental and numerical approaches. // J. Fluid Mechanics. 2008. V.594. P.209-247.
 15. Пелиновский Е.Н. Гидродинамика волн цунами. Нижний Новгород: ИПФ, 1996.
 16. Лэмб Дж. Л. Введение в теорию солитонов // Под ред. В.Е. Захарова. Физматгиз. 1997.
 17. Березин Ю.А. Моделирование нелинейных волновых процессов. Новосибирск: Наука, 1982.
 18. Пелиновский Е.Н., Полухин Н.В., Талипова Т.Г. Моделирование характеристик внутренних волн в Северном Ледовитом океане. Поверхностные и внутренние волны в арктических морях // Под ред. И.В.Лавренова и Е.Г.Морозова. Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 2002. С.235-279.
 19. Pelinovsky E., Polukhina O., Slunyaev A., Talipova T. Internal solitary waves. Solitary Waves in Fluids // Ed. R.Grimshaw. Southampton, Boston: WIT Press. 2007. P.85-110.
 20. Grimshaw R., Pelinovsky E., and Talipova T. Modeling Internal solitary waves in the coastal ocean // Survey in Geophysics. 2007. V.28. P.273-298.

Статья поступила в редакцию 23.10.2008 г.