

Литература

1. Relativistic Jets in AGNs // Proceedings of the International Conference. Cracow, May 27—30 1997 / Eds. M.Ostrowski, M.Sikora, G.Madejski, M.Begelman.
2. Whitney A.R., Shapiro I.I., Rogers A.E.E. et al. // Science. 1971. V.173. P.225—230.
3. Urry C.M., Padovani P. // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. 1995. V.107. P.803—845.
4. Blandford R.D. // Progress of Theoretical Physics Supplement. 2001. №143. P.182—201.
5. Mirabel I.F., Rodriguez L.F. // Nature. 1994. V.371. P.46—48.
6. Fender R.P. Jets from X-ray binaries // Compact Stellar X-ray Sources / Ed. W.H.G.Lewin, M.van der Klis. Cambridge, 2006. P.381; astro-ph/0303339.
7. Постнов К.А. // УФН. 1999. Т.169. №5. С.545—558.
8. Jones T.W., O'Dell S.L. // Astronomy and Astrophysics. 1977. V.61. P.291—293.
9. Железняков В.В., Корягин С.А. // Письма в Астрономический журнал. 2002. Т.28. С.809—828.
10. Железняков В.В., Корягин С.А. // Письма в Астрономический журнал. 2005. Т.31. С.803—818.
11. Бережко Е.Г., Крымский Г.Ф. // УФН. 1988. Т.154. №1. С.49—91.
12. Derishev E.V., Abaronian F.A., Kocharovsky V.V., Kocharovsky V.I.V. // Physical Review D. 2003. V.68. P.043003(1—10).
13. Stern B.E. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2003. V.345. №2. P.590—600.
14. Derishev E.V., Abaronian F.A., Kocharovsky V.I.V. // The Astrophysical Journal. 2007. V.65. №1 (in press); astro-ph/0605456.
15. Derishev E.V., Kocharovsky V.V., Kocharovsky V.I.V. Cosmological Gamma-Ray Bursts: the Modern Scenario // Proc. of the 3rd International Sakharov Conference on Physics. Moscow, 2002. 24—29 June / Eds. A.Semikhatov, M.Vasiliev, V.Zaikin. 2003. V.1. P.373—385.
16. Бескин В.С. Осесимметричные стационарные течения в астрофизике. — М., 2005.
17. Derishev E.V., Kocharovsky V.V., Kocharovsky V.I.V. // The Astrophysical Journal. 1999. V.521. P.640—649.

«Фрики» — морские волны-убийцы



Е.Н.Пелиновский, А.В.Слюняев

Явление, о котором пойдет речь, в англоязычной литературе чаще всего обозначают термином *freak waves**. Помимо него, существует множество других названий, отражающих изумление и страх: *rogue waves*, *cape rollers*, *rabid-dog waves*, *abnormal waves*, *exceptional waves*, *giant waves*, *steep wave events*. В русском языке внезапно возникающие неожиданно высокие волны на морской поверхности называют аномально высокими, экстремальными, волнами-штормами, либо просто убийцами. Еще совсем недавно их существование подвергалось сомнению,

несмотря на значительное число свидетельств случайных очевидцев. Однако с появлением инструментальных измерений наличие проблемы стало бесспорным и породило огромное число исследований в последние 10—15 лет. В России над проблемой волн-убийц активно работает несколько групп, в том числе в Институте прикладной физики РАН.

Волны: высокие и аномальные

Волна в океане может быть большой. Ее высота может достигать полукилометра, как произошло в 1958 г. на Аляске, когда мощный оползень в маленькой бухте произвел эффект падающего куска

* Freak — необычный, причудливый; *freak waves* — волны блуждающие.

сахара в стакане. Возникшая волна просто захлестнула противоположный берег, смыв с него лесной покров и выбросив на берег стоявшие в бухте суда [1]. Понятно, что схожую картину можно ожидать и от падения крупных астероидов, но подобные источники генерации волн являются экстраординарными и крайне редкими. Такие волны относятся к разряду цунами; не нужно заглядывать далеко в историю за примерами их разрушительного действия: достаточно вспомнить индонезийское цунами 2004 года.

Существует большое количество менее экзотических по происхождению волн на поверхности Мирового океана, обусловленных действием гравитации, силой Кориолиса (следствие того, что точки разных широт на поверхности Земли имеют различные радиусы вращения), эффектами захвата неровностями дна и др. Волны, которые мы обычно наблюдаем на море, — гравитационные волны, возникшие под действием ветра. На больших дистанциях или в штормовых областях ветер создает наиболее интенсивные волны; потом они могут убежать из зоны генерации, несколько изменяясь из-за различного закона ослабления волн разной длины (такие волны называются зыбью).

Кроме интенсивности (она характеризуется высотой волны H — расстоянием по вертикали от дна ложбины до пика гребня), важна длина волны λ . Отношение этих двух величин для индивидуальной волны задает ее крутизну k :

$$k = \pi \frac{H}{\lambda}. \quad (1)$$

Волна не может быть слишком крутой. При достижении определенного порогового значения она начинает обрушиваться подобно тому, как осыпается слишком крутой песчаный бархан. Длина волны связана с периодом T через дисперсионное соотношение, куда для гравита-



Ефим Наумович Пелиновский, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории нелинейных геофизических процессов ИПФ РАН, профессор Нижегородского государственного технического университета. Лауреат Государственной премии России (1997) и нескольких международных премий. Занимается разработкой физико-математических моделей волновых процессов и их применением в прогнозировании морских природных катастроф.



Алексей Викторович Слюняев, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник той же лаборатории. Область научных интересов — нелинейные морские волны, нелинейные эволюционные уравнения.

ционных свободных волн помимо величины ускорения свободного падения g входит зависимость от глубины моря D :

$$\omega = \sqrt{kgth(kD)}, \quad \omega = 2\pi T^{-1}, \quad k = 2\pi\lambda^{-1}. \quad (2)$$

Типичная крутизна морских волн составляет 0.07–0.1. Нетрудно видеть, что для волн на глубокой воде ($kD \gg 1$) с периодом 10–12 с это соответствует высоте 3.5–7 м. Такой период волн характерен для хорошо развитого волнения, волны с меньшим периодом оказываются ниже по высоте. Обрушивающимися в приведенном примере становятся 20–30-метровые волны; обрушение ограничивает их возможные высоты и приводит к перераспределению энергии между волнами разных масштабов. Реально зарегистрированные волны в штормовых районах действительно достигают высоты 30 м. Эти волны ростом с десятиэтажный дом, несомненно, очень опасны. Однако для адекватной оценки опасности явления необходимо знать еще одну величину — его вероятность, т.е. как часто можно ожидать столь губительную волну. Например, по существующим представлениям, в Баренцевом море возможны волны высотой 24 м, а в Северном море — 30 м лишь один раз в 100 лет.

Ответ на вопрос о частоте повторяемости экстремальных волн призваны давать статистические теории. Они описывают не индивидуальные волны, а их ансамбли и способны прогнозировать вероятность появления волн с заданными характеристиками, если известны некоторые усредненные параметры волнения. Наиболее существенную роль в этом смысле играет значительная* высота волн H_s . В рамках классической статистической модели вероятность высот волн задается распределением Рэлея

$$P(H) \approx \exp\left\{-2 \frac{H^2}{H_s^2}\right\}. \quad (3)$$

* Значительная высота волн — средняя высота трети наиболее высоких волн в записи.

Формула (3), основанная на центральной предельной теореме, проверялась на большом статистическом материале и во многих случаях дает очень хорошее описание. Видно, что вероятность появления высоких волн экспоненциально падает, т.е. они должны быть очень редкими. Действительно, число измеренных волн с большим превышением средней высоты H/H_s мало, что ведет к недостаточной степени верификации формулы (3) (а значит, и достоверности) в области экспоненциальных «хвостов».

Морские описания богаты упоминаниями о волнах-убийцах («три сестры», «девятый вал», «стена воды», «дыра в море»), которые традиционно относились скорее к фольклору, нежели к реальному положению вещей. Понятно, что волны высотой с современный дом должны были приводить в ужас мореплавателей в прошлом. Несмотря на стремительный рост размеров и мощности кораблей и морских сооружений, ветровые волны продолжают быть разрушительными, приводя к серьезным повреждениям судов, гибели людей, а иногда и кораблей целиком. Так, за период 1969—1994 гг. 22 супертанкера были потеряны или существенно повреждены в Тихом и Атлантическом океанах; при этом погибло 525 человек, см. схему на рис. 1 [2]. Как минимум 12 схожих слу-

чаев известны для Индийского океана около побережья Южной Африки [3]. Географически места аварий судов коррелируют с основными судоходными путями в океане; обработка немецким аэрокосмическим центром наблюдений морской поверхности с Европейского космического спутника показывает, что наиболее интенсивные волны гуляют на больших акваториях (где разгон волн, а значит и способность ветра передавать энергию волнам, велики).

Аргументированно говорить о высоких волнах стало возможным, когда с помощью буев или стационарных высоотомеров начали вести записи последовательных измерений смещения поверхности воды. Наиболее интересны случаи внезапного возникновения высоких волн, значительно превосходящих окружающие. Пример такой записи дан на рис.2; она сделана у побережья Геленджика в Черном море и демонстрирует максимально известное нам усиление волны по отношению к среднему уровню [4]:

$$A = \frac{H}{H_s} \approx 3.9.$$

Если в формулу (3) подставить $H = 3H_s$, получим, что такая волна (для характерного периода ветровых волн 10 с) может наблюдаться один раз

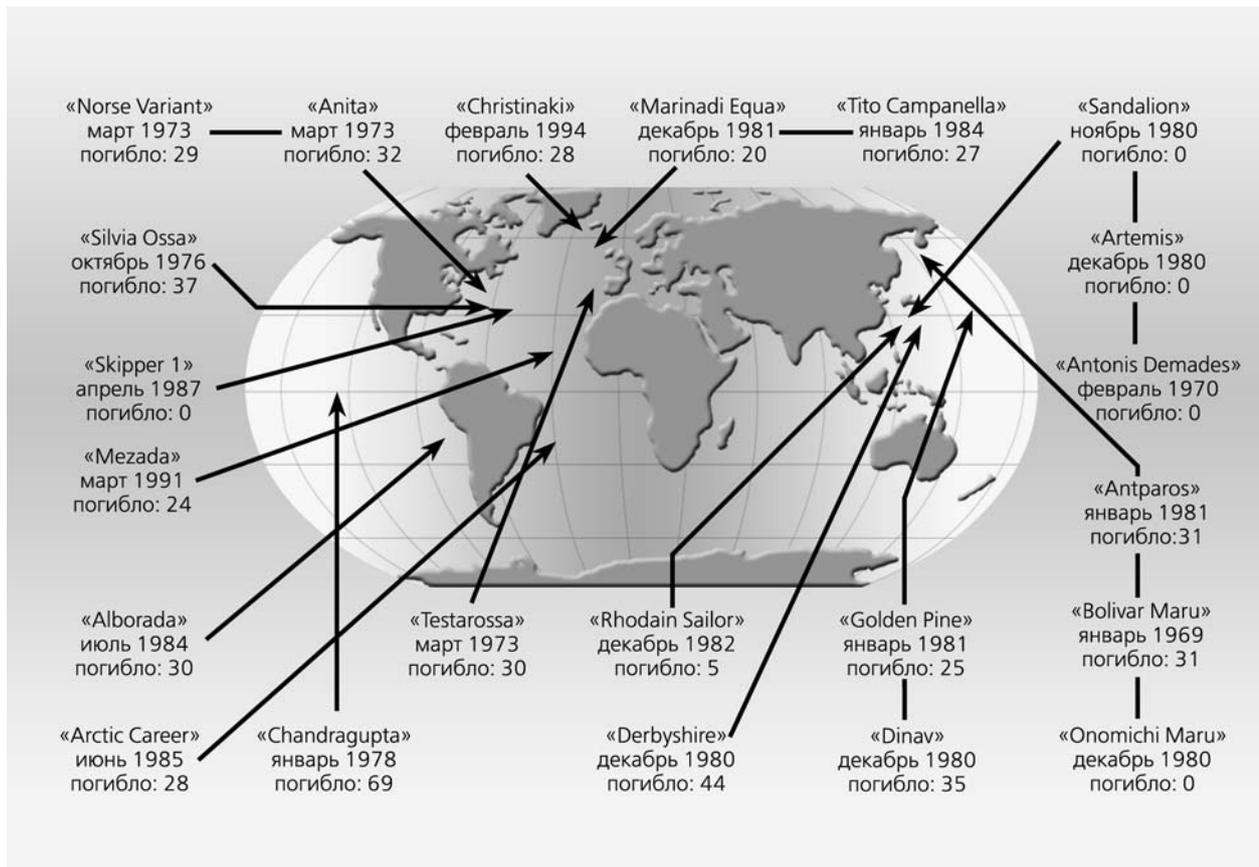
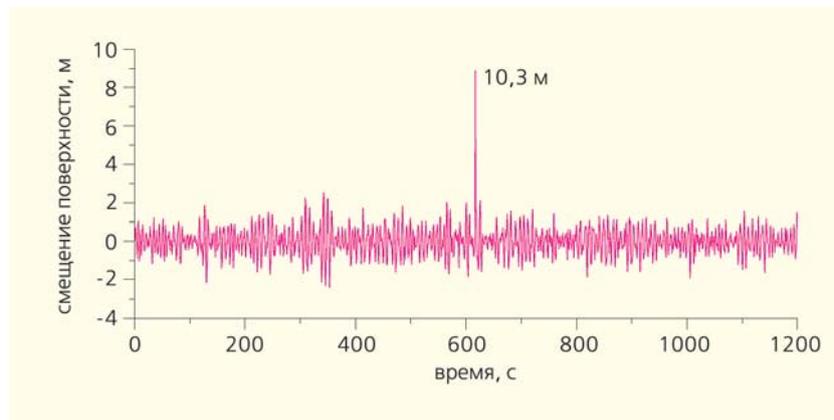


Рис.1. Статистика встреч супертанкеров с волнами-убийцами за 1968—1994 гг. [2].

Рис.2. Временная запись аномально высокой волны в Черном море, полученная 22 ноября 2001 г. [4].



в 20 лет. Тем не менее, за уже упомянутое трехнедельное наблюдение морской поверхности из космоса наблюдалось усиление $A = 2.9$; за 793 ч наблюдений волн в Северном море зарегистрировано $A = 3.19$ [5]. Столь неожиданно частая регистрация экстремальных волн привела к серьезному пересмотру классической статистической модели в области высоких волн (например, по данным [5], волна с параметром $A = 3.19$ оказалась в 300 раз более вероятной, чем ожидалось).

Волна, представленная на рис.2, не просто большая, а именно внезапно большая. Она резко выделяется из предшествующих и следующих за ней волн по высоте и форме, хотя ее длительность остается типичной для записи. Этот факт умножает ее губительность. Приведем в качестве примера описание встречи с волной-убийцей российского танкера-рефрижератора «Таганрогский залив» из книги [3]. *...27 апреля 1984 г. танкер следовал из Индийского океана в юго-восточную Атлантику. Дул 6-балльный северо-северо-восточный ветер. В 05 ч ветер изменился на юго-западный, стал постепенно усиливаться и к 11 ч достиг силы 8 баллов. Сразу после 12 ч было замечено ослабление ветра; в 12 ч 30 мин, согласно измерениям, его скорость составила 15 м/с. Такой же силы ветер оставался и в следующие три часа. Волнение моря после 12 ч тоже несколько уменьшилось и не превышало 6 баллов. Ход судна был сбавлен до самого малого, оно слушалось руля и хорошо «отыгрывалось» на волне. Бак и палуба водой не заливались. Неожиданно в 13 ч 01 мин носовая часть судна несколько опустилась, и вдруг у самого форштевня под углом $10-15^\circ$ к курсу судна был замечен гребень одиночной волны, которая возвышалась на 4–5 м над баком (фальшборт бака отстоял от уровня воды на 11 м). Гребень мгновенно обрушился на бак и накрыл работающих там матросов (один из них погиб). Матросы рассказывали, что судно как бы плавно пошло вниз, скользя по волне, и «зарылось» в вертикальный срез ее фронтальной части. Никто удара не ощутил, волна плавно перекадилась через бак судна, накрыв его слоем воды*

толщиной более 2 м. Ни вправо, ни влево продолжения волны не было.

Таким образом, волна появилась внезапно, была неожиданно высокой и крутой. Эти свойства формируют среди высоких волн особый класс — необычных, аномальных волн, волн-убийц. Поскольку многие их параметры остаются неизвестными, само определение оказывается довольно расплывчатым. Чаще всего пользуются амплитудным критерием выделения аномально высоких волн:

$$A > 2. \quad (4)$$

Ему удовлетворяют несколько сотен известных инструментальных регистраций аномальных волн на морской поверхности. Вопрос о форме волны также важен (волны разной формы могут оказывать различное по силе воздействие на корабли и морские сооружения), но более сложен. Форма волны зависит от действующих физических механизмов, а при моделировании — от точности модели. В дополнение к (4) предлагались более строгие критерии отбора аномальных волн, суживающие это понятие, но мы будем использовать только условие (4). Недавняя фотография волны у побережья Камчатки (рис.3) демонстрирует, насколько неординарной может быть волна-убийца. По свидетельству фотографа, он наблюдал несколько подобных одиночных волн, которые появлялись на времена порядка десятка секунд и пробегали около 50 м. В случае с «Таганрогским заливом» (а также в некоторых других сходных описаниях) отмечался очень крутой передний склон волны с глубокой впадиной; такая асимметрия определяла особую опасность волны. Наоборот, для волны на рис.3 заметной впадины у фронта не было. Важно, что во многих описаниях волно-убийцы возникают на фоне почти спокойного моря.

Конечная цель исследований волно-убийц — определение их параметров и разработка методов прогноза. Для этого необходимо изучать их статистику в различных акваториях Мирового океана в зависимости от многочисленных географических факторов (батиметрии морского дна,



Рис.3. Фотография волны, сделанная у мыса Ольга (юг Кроноцкого п-ова, Камчатка) В.Соколовским в июне 2006 г.

очертаний береговой линии, течений, циклонов, ураганов). Важное место здесь принадлежит физике формирования волн-убийц. Поняв механизмы их зарождения, ученые смогли бы районировать Мировой океан по степени риска, а также определить условия, предшествующие появлению волн-убийц.

Механизмы-претенденты и модели

Признание проблемы аномально высоких волн вызвало всплеск интереса к высоким морским волнам вообще. Если не использовать многие традиционные упрощения, волны на морской поверхности оказываются достаточно сложной системой: это трехмерный объект, включающий границу двух сред с потоками (ветром и течениями) и определенной долей перемешивания. Волны, согласно (2), обладают дисперсией групповой скорости $c_{gr}(k) = d\omega/dk$ и нелинейны; наконец, водная толща неоднородна по многим параметрам и содержит движения разных масштабов. В слишком огрубленных моделях (а без упрощения невозможно понимание физики сложного процесса) могут теряться эффекты, обуславливающие явление волн-убийц. Поэтому главная теоретическая задача — понять физические механизмы, способные приводить к существенному усилению волн в локальной области, и сформулировать соответствующие модели, описывающие процесс.

Наиболее просты и интуитивно понятны линейные модели, которые для объяснения аномально высоких волн были предложены первыми. Волны на воде несут в себе энергию — тем большую, чем выше волны. Потому естественно ожидать, что процессы различного рода фокусировки волновой энергии могут порождать очень высокие волны. Сконцентрировать энергию различных волн в одной области можно, например, если сгонять их под разными углами (пространственная, или геометрическая фокусировка — как оптических лучей). Еще один вариант — собрать волны

вместе из-за разницы в скорости распространения индивидуальных волн (благодаря уже упомянувшейся дисперсии групповой скорости — дисперсионная фокусировка). Для этого волны должны быть неоднородными: таковы различные системы волн (например, генерируемые в данной области ветровые волны плюс зыбь, приходящая из другой области генерации) или неоднородные сонаправленные волны. Вариации в волновых параметрах могут вызываться переменными условиями распространения (батиметрией, течениями, прохождением сильных атмосферных фронтов).

На рис. 4 приведен пример определения текущей групповой скорости в 20-минутной выборке поверхности волн (она высчитывалась через дисперсионное соотношение (2) по найденному локальному периоду волн). Видно, как резко ее величина изменяется внутри записи. Такая неоднородность приводит к постоянному схождению-расхождению волн и в принципе способна обеспечивать их сильный рост. На рис.5 показан результат лабораторного моделирования фокусировки волн в результате действия дисперсии [6]. Создаваемый волнопродуктором пучок волн соответствует случаю, когда длинные (более быстрые) волны расположены позади коротких, а закон модуляции частоты волн подобран таким образом, чтобы их схождение было максимальным (в теории — в одной точке и в один момент времени). Видно формирование фактически одиночной волны в момент максимального сжатия, которая затем обрушается из-за слишком боль-

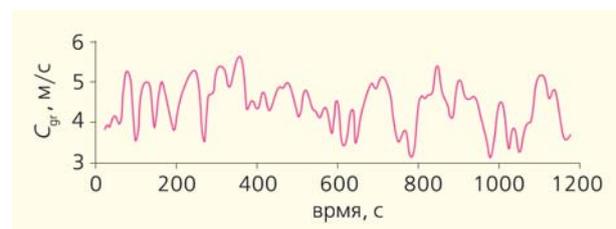


Рис.4. Групповая скорость волн, определенная по записи на рис.2.

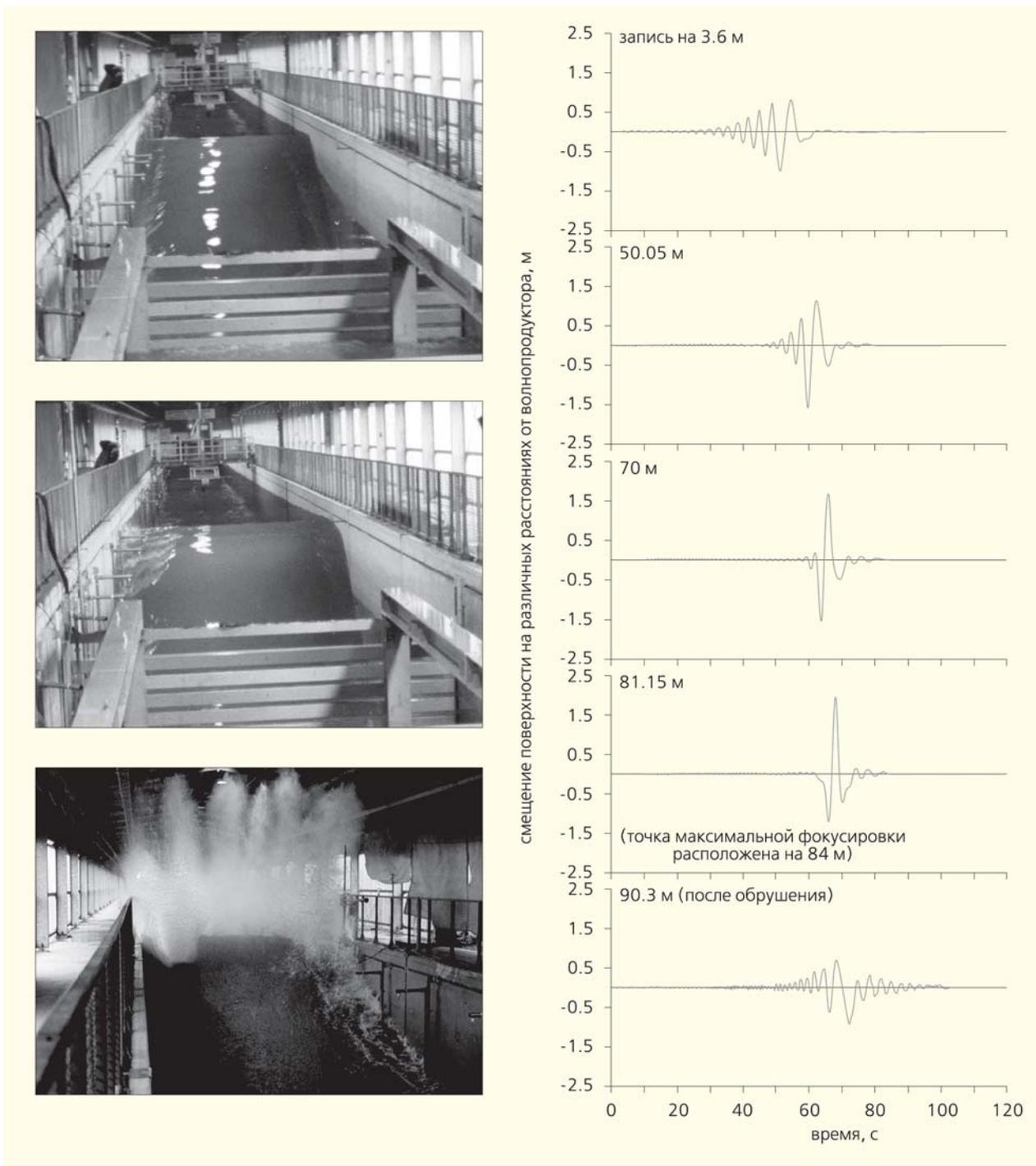


Рис.5. Моделирование сжатия волнового пакета в результате дисперсии в лабораторном бассейне [6].

шой крутизны. Дисперсионная фокусировка — классический эффект линейной физики, хорошо известный в оптике. Эффективность сжатия частотно-модулированных пакетов поверхностных волн доказана в многочисленных лабораторных экспериментах, этот механизм часто используют в лотке для получения интенсивных волн. Для со-

здания частотной модуляции в цуге реальных морских волн требуются переменные вынуждающие силы или условия распространения: например, сильное течение, переменная глубина, неоднородный ветер.

Влияние переменной батиметрии на распространение поверхностных волн превосходно де-

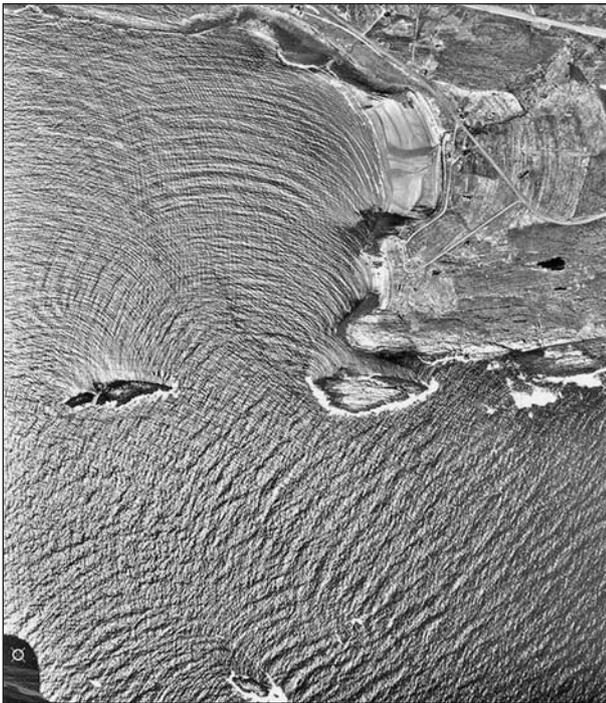


Рис.6. Искривление волновых фронтов как следствие влияния переменной глубины и обтекания препятствий.

монстрирует фотография на рис.6. Скорость волн зависит от глубины (см. (2)), поэтому волны с более глубоких областей догоняют волны на мелководье, и волновой фронт вытягивается вдоль береговой линии. По той же причине образуются области схождения волн за обтекаемыми островами, что также хорошо заметно на рис.6. Искривление волнового фронта приводит к геометрической фокусировке волновой энергии; этот процесс

может дополняться дисперсионной фокусировкой либо действовать независимо. Процесс дисперсионного сжатия с геометрической подфокусировкой может проходить еще резче, чем в одномерном случае, что понятно на качественном уровне.

Волны малой амплитуды слабо взаимодействуют, оставаясь почти линейными. Поэтому быстрый процесс роста волн оказывается слабо чувствительным к «зашумлению» модулированного цуга другими волнами (рис.7 показывает фокусировку волн в присутствии сильной случайной компоненты для случая двух координат x и y), и простая линейная модель зачастую удовлетворительно описывает эту динамику.

Взаимодействие с сильными неоднородными течениями приводит к искажению траекторий волн и блокировке последних. В простейшей модели поведение волн описывается с помощью модифицированного дисперсионного соотношения (2) с учетом переменного течения и закона энергетического баланса — уравнения волнового действия. Задачу можно наглядно интерпретировать на манер представления потенциальной ямы (которое часто используется в механике для иллюстрации постоянства суммы потенциальной и кинетической энергии и соответствующей динамики): запишем групповую скорость в приближении глубокой воды

$$c_{gr} = \frac{d\omega}{dk} = \frac{1}{2} \sqrt{g/k} + U. \quad (5)$$

Неоднородное течение $U(x)$ здесь играет роль потенциальной ямы, вернее — наклонного барьера. В полномерном случае $U(x, y)$ — это «потенциальный овраг», в котором распространяются волны. Они не могут его покинуть, если склоны (перепад скорости течения) слишком высоки, и распространяются в среднем вдоль течения (явление

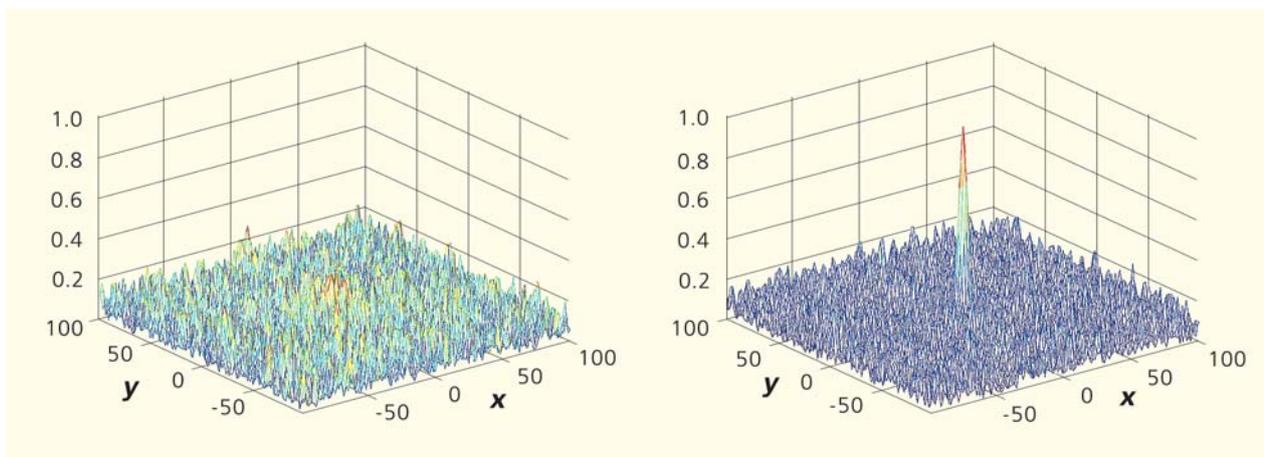


Рис.7. Численное моделирование дисперсионно-геометрического сжатия в присутствии случайных волн: начальное условие со «спрятанной» частотной модуляцией (слева). Видна группировка у центра интенсивных («красных») волн, но их амплитуда еще невелика. Момент образования большой волны (справа) [8].

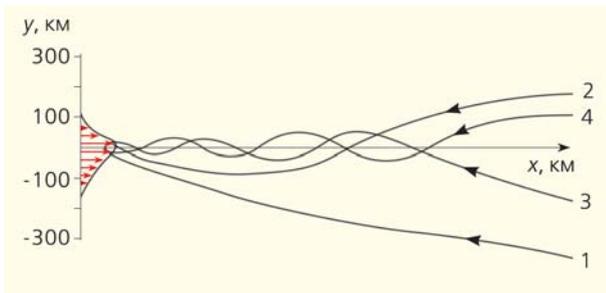


Рис.8. Поведение лучевых линий волн на встречном течении, построенное для района мыса Игольного [3].

захвата волн), а также могут обращаться вспять (блокировка волн течением). При этом происходит перераспределение волновой энергии, появление областей ее концентрации (каустики); лучевые линии в поле течения ведут себя, как показано на рис.8.

Значительное усиление волны на встречном течении заметно в устьях рек, когда морская волна заходит вверх по течению реки. Существование областей схождения волн в результате действия течений, влияния переменной глубины, блокировки волн течениями повышает вероятность появления высоких волн в этих точках, хотя сами области фокусировки волновой энергии (каустики) могут случайно возникать и исчезать. Описанный выше случай из книги [3] относится к юго-восточному побережью Африки, где вдоль материкового склона проходит сильное неоднородное течение мыса Игольного (Агульсово течение). Расчет лучевой картины для описанных условий [3] показал наличие каустических точек с концентрацией волновой энергии (рис.8). Согласно наблюдениям, волны-убийцы на течении мыса Игольного часто появляются через несколько часов после того, как усиливающийся ветер изменяет свое направление с северо-восточного на юго-восточное. Поскольку за формирование волн, систем разнонаправленных волн, модулированных волн ответственны атмосферные факторы, погодные закономерности напрямую связаны с созданием условий, благоприятных для появления волн-убийц, и должны изучаться.

Эффекты нелинейности

Пока речь шла о физических эффектах, которые описываются линейными моделями. В действительности морским волнам свойственна нелинейная динамика, ярким примером которой служит их обрушение. Чтобы понять происхождение эффектов нелинейности, достаточно осознать, что бегущая волна сама изменяет условия распространения, и чем она интенсивнее, тем значительно

это влияние. Степень нелинейности однородных (монокроматических) волн определяется крутизной k . Нелинейность в первую очередь модифицирует все фокусирующие механизмы [7, 8], поскольку скорость распространения волн становится функцией их амплитуды, а также способствует эффективному взаимодействию отдельных волн. Возникают принципиально новые — нелинейные — механизмы генерации очень высоких волн.

Поверхностные волны подвержены многим нелинейным неустойчивостям, когда малые возмущения могут стремительно нарастать. Это означает передачу энергии однородной системы волн волнам других масштабов и ведет к пространственному перераспределению волновой энергии и появлению областей ее концентрации. Наиболее известная неустойчивость — эффект самомодуляции волн на глубокой воде: однородные волны разбиваются на долгоживущие связанные группы. Хорошо известно явление биения волн — сильная неоднородность поля, состоящего из суперпозиции волн двух близких частот. В результате нелинейной неустойчивости энергия монокроматических волн передается двум другим системам волн — чуть большей и чуть меньшей частоты — и концентрируется в областях нелинейного фокуса. Эффект управляется двумя параметрами: крутизной и числом индивидуальных волн в группе, иначе амплитудой волн и длиной возмущения (которое всегда присутствует в реальности). Неустойчивыми становятся только достаточно длинные возмущения; ими могут оказаться волновые компоненты разных масштабов, и тогда волновое поле имеет очень сложный, в реальной задаче — хаотический характер.

Даже в случае однонаправленных волн развитие самофокусирующейся неустойчивости может перераспределять энергию в поперечном направлении и формировать сильно локализованные трехмерные волновые группы и уединенные волны. Это связано со сложной диаграммой направлений и длин неустойчивых возмущений, которая также зависит от глубины места. Описание одномерного процесса самомодуляции (когда все волновые гребни вытянуты в линию) в рамках простых теоретических моделей ограничивает усиление волн величиной $A = 3$; полнонелинейное численное моделирование говорит о несколько большем возможном усилении. В полномерном случае это усиление может быть значительно большим. Например, на рис.9 волны в результате довольно сложного процесса развития модуляционной неустойчивости вырастают более чем в семь раз [8] — таков результат численного моделирования нелинейного уравнения Шредингера [9] для случая двух поверхностных координат. Данное уравнение описывает модуляции огибающей слабонелинейных волн (именно огибающая построена на рис.9). Помимо самомодуляции монокроматических волн с плоским волновым фронтом теорети-

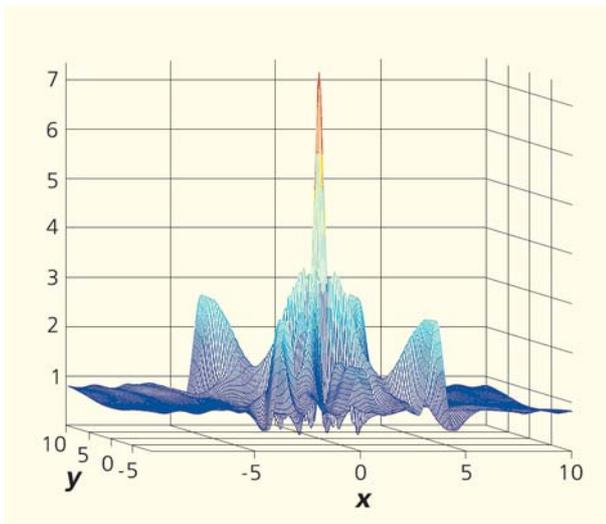


Рис.9. Результат развития модуляционной неустойчивости. Показана огибающая поля. Начальное условие — слабо возмущенный цуг волн единичной амплитуды [8].

чески изучаются неустойчивости других, более сложных волновых систем. Проблема волн-убийц простимулировала исследования неустойчивостей поверхностных волн; в частности, в работе [10] говорится о значительно большем стабилизирующем влиянии на процессы нелинейной самомодуляции слабой диссипации волн, которой очень часто пренебрегают в теоретических и численных расчетах.

Мы проанализировали имеющиеся записи аномально высоких волн в поисках связанных нелинейных волновых групп — солитонов огибающей, используя подход на основе теории задачи рассеяния. Для всех 11 обработанных записей оказалось, что аномальная волна возникла на такой нелинейной группе, что свидетельствует о важной роли самомодуляционных эффектов [11].

Процессы генерации высоких волн с участием нелинейных неустойчивостей могут быть очень чувствительными к возмущениям, а значит, трудно воспроизводимыми в лабораторном эксперименте и практически непредсказуемыми в реальном океане. Например, волна-монстр с рис.9 не образуется уже при слабом изменении начальных условий этого численного эксперимента. Потому здесь важно понимать потенциальные возможности усиления волн и определять вероятность таких процессов. Для первого необходимо развивать и изучать динамику волн в рамках наиболее реалистичных уравнений, а для второго — анализировать статистику нелинейных волн.

Последнее время стало особенно плодотворным для подобных исследований, так как постоянное наращивание вычислительных мощностей современных компьютеров сопровождалось разра-

боткой новых быстрых алгоритмов решения или исходных уравнений гидродинамики [12], или упрощенных, но очень аккуратных уравнений. В результате численное моделирование не только оказывается удобнее лабораторного эксперимента для решения модельных задач, но и обретает способность давать результаты для построения статистики. Использование численного моделирования снимает проблему статистической однородности: реализации аномально высоких волн должны соответствовать одинаковым условиям, что на практике не выполняется для столь малого числа имеющихся измерений волн-убийц. Сейчас это направление интенсивно развивается; моделирование выявило влияние нелинейности случайного волнового поля на функции распределения. В частности, функция распределения смещения поверхности становится асимметричной (положительный третий момент), так что число больших гребней превышает число больших «ям», возникает зависимость четвертого момента (экспесса, влияющего на долю высоких волн) от степени нелинейности ([13] и ссылки в статье). Вероятностные свойства интенсивных волн можно также рассчитывать в рамках статистического подхода [14] или оценивать по записям волн и тем самым находить области Мирового океана, где аномально высокие волны наиболее вероятны.

По мере уменьшения глубины области неустойчивых возмущений сужаются и физически отсутствуют в мелководном пределе ($kD \ll 1$ в (2)). Однако и в этом случае волны не перестают быть нелинейными (и даже наоборот, сила нелинейных эффектов по отношению к дисперсионным возрастает). Аномальные волны были зарегистрированы и на умеренных глубинах, и в условиях мелководья. Здесь предложены сценарии возникновения аномальных волн в результате динамики нелинейных уединенных волн (солитонов), которые выглядят как долгоживущие гребни волн, а также их взаимодействия с потоками.

Понимание механизмов образования аномально высоких волн и моделирование их динамики отвечают на вопросы, где и когда ожидать такую волну, как она выглядит и эволюционирует. Мы численно промоделировали динамику аномальных волн на основе инструментальных регистраций. Хотя запись волн в одной точке не описывает их развития (не определяется, например, время жизни волны-убийцы), приближенные эволюционные модели позволяют восполнить этот пробел: пересчитать запись в соседние пространственные точки так, словно по ходу волн были расположены другие самописцы. По нашим расчетам, времена жизни измеренных волн-убийц оказались от нескольких секунд до полутора минут. Такое динамическое моделирование наиболее информативно, но требует много данных, причем с высокой точностью, а его результаты для больших времен (или дистанций) могут сильно иска-

жаться из-за неустойчивостей. Поэтому в прогнозных моделях должны, очевидно, использоваться кинетические модели, описывающие эволюцию спектра волн, динамическое же описание следует применять для получения параметров аномальных волн, важных для разработки норм строительства безопасных кораблей и морских сооружений.

Бликие родственники

Явление аномально высоких волн можно понимать шире; к нему можно отнести неожиданные заплески прибрежной зоны, которые не удастся объяснить выходом волн цунами либо приходом штормовых волн. Такие процессы известны, и в настоящее время их связывают, в частности, с динамикой краевых волн, распространяющихся вдоль берега [15]. Занимательная фотография подобного эпизода приведена на рис.10. Мы начали собирать описания аномальных волн; этот материал может служить лучшему пониманию и классификации природного явления, однако, к сожалению, не всегда по-настоящему достоверен.

Предложенные для объяснения аномально высоких волн механизмы мы, конечно, изложили бегло и неполно; подробнее см. в монографии [16]. Несмотря на значительное число претендентов на роль родителей волн-убийц, они пока довольно оторваны от реальных наблюдений. По всей видимости, в океане работают различные механизмы образования «фриков», но какие из них оказываются наиболее распространенными, а какие практически не реализуемы — сегодня доподлинно неизвестно. Тем самым картина волны-



Рис.10. Случай внезапного кратковременного затопления берега на пляже Маракас (Тринидад и Тобаго) в октябре 2005 г.

убийцы остается незаконченной. Обнаруженные сценарии генерации «примеряются» и на другие типы волн: внутренние волны, существующие в стратифицированном океане, захваченные топографией краевые волны, глобальные волны Россби; возможны приложения этих теорий в физике плазмы, включая астрофизическую плазму, в оптике. Недавние случаи неожиданных столкновений высоких волн с крупными лайнерами и нефтяными платформами привлекли к проблеме дополнительное внимание. К сожалению, публикации в широкой прессе наряду со свежей информацией содержат много неточностей, а то и просто неверных данных. Но проблема продолжает свое развитие и стимулирует исследования в смежных областях. ■

Работа выполнялась при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 05-05-64265), ИНТАС (грант 06-1000013-9236), Фонда содействия отечественной науке и ведущей научной школы академика В.И.Таланова.

Литература

1. Пелиновский Е.Н. Нелинейная динамика волн цунами. Горький, 1982.
2. Lawton G. // New Scientist. 2001. V.170. №2297. P.28—32.
3. Лавренов И.В. Математическое моделирование ветровых волн в пространственно-неоднородном океане. СПб., 1998.
4. Дивинский Б.В., Левин Б.В., Лопатухин Л.И. и др. // ДАН. 2004. Т.395. №5. С.690—695.
5. Stansell P. // Applied Ocean Research. 2004. V.26. P.35—48.
6. Clauss G. // Appl. Ocean Research. 2002. V.24. P.147—161.
7. Pelinovsky E., Talipova T., Kharif C. // Physica D. 2000. V.147. №1—2. P.83—94.
8. Slunyaev A., Kharif C., Pelinovsky E., Talipova T. // Physica D. 2002. V.173. №1—2. P.77—96.
9. Островский Л.А., Потанов А.И. Введение в теорию модулированных волн. М., 2003.
10. Segur H., Henderson D., Carter J. et al. // J. Fluid Mech. 2005. V.539. P.229—271.
11. Slunyaev A., Pelinovsky E., Guedes Soares C. // Applied Ocean Research. 2005. V.27. P.12—22.
12. Dyachenko A.I., Zakharov V.E. // Письма в ЖЭТФ. 2005. Т.81. №6. С.318—322.
13. Pelinovsky E., Sergeeva (Kokorina) A. // European J. of Mechanics B / Fluids. 2006. V.25. №4. P.425—434.
14. Janssen P.A.E.M. // J. Phys. Oceanogr. 2003. V.33. P.863—884.
15. Kurkin A., Pelinovsky E. // European J. of Mechanics B / Fluids. 2002. V.21. №5. P.561—577.
16. Куркин А.А., Пелиновский Е.Н. Волны-убийцы: факты, теория и моделирование. Нижний Новгород, 2004.