

«Волны-убийцы» в морях и океанах

Н. К. Шелковников*

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
 физический факультет, кафедра физики моря и вод суши
 Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2
 (Статья поступила 16.06.2016; Подписана в печать 20.07.2016)

С целью выяснения возможных физических механизмов формирования волн-убийц нами были проведены измерения в районе банки Ампер. Было показано, что при одном и том же ветровом режиме характер волнения в районе банки и вне ее отличался. Кроме того, были проведены эксперименты в кольцевом канале. Было показано, что на всех этапах развития ветрового волнения критерий образования волны убийцы не выполнялся.

PACS: 92.10.H-, 92.10.hb. УДК: 551.466

Ключевые слова: ветровые волны, «волны-убийцы».

Как известно [1], наиболее распространенным явлением в природе является ветровое волнение. При заданной скорости ветра их высоты определяются энергией, поступающей в единицу времени, за счет работы нормальной и касательной сил ветра, а также расходом энергии в результате переноса и ее диссипации. Если поступление энергии превосходит ее расход, высоты волн возрастают. В противоположном случае — они уменьшаются. В силу того, что скорость ветра изменяется не только по величине, но и по направлению, ветровые волны имеют сложный трехмерный характер [2]. При математическом описании трехмерного волнения полагают, что оно возникает в результате наложения бесконечного множества плоских нерегулярных систем волн, интенсивность которых максимальна при совпадении со средним направлением ветра и убывает прямо пропорционально квадрату косинуса угла между направлением распространения данной системы и направлением ветра.

Из предположения о малости высоты волн по сравнению с их длиной вытекает возможность их сложения (суперпозиции). Это предположение является основным в теории волн малой амплитуды. Форма поверхностной волны полностью зависит от излучателя, воздействующего на поверхность жидкости. Исходя из вышеизложенного можно считать, что размеры и форма морских волн зависят от величины и направления ветра, наличия встречных течений и волн, а также от топографических особенностей дна, в том числе морских банок и хребтов. Это все является объективной причиной величины и формы поверхностного волнения, которую мы называем «экстремальные волны». Но, в отличие от фундаментального представления о волнах на поверхности жидкости (в том числе на поверхности морей и океанов), в последние десятилетия в научной литературе, вначале за рубежом, а затем и в России [3], появилось понятие о мифических «волнах-убийцах» в морях, океанах, на берегу

и даже в лабораторных условиях. В зарубежной литературе для описания волн-убийц часто используется понятие «freak waves» и «rogue waves», что в переводе означает необычные, причудливые, блуждающие волны, «возникающие из ниоткуда и исчезающие в никуда». Считается, что это одиночные аномально высокие и крутые волны, внезапно возникающие даже при отсутствии сильного ветра. В настоящее время, с совершенствованием конструкции кораблей и уменьшением числа аварий, исчезла причина называть подобные волны убийцами. В дальнейшем, отдавая дань традиции, все же используют это понятие, часто имея ввиду экстремальные волны. На практике для описания таких волн используется амплитудный критерий: высота волны-убийцы (ВУ) h должна превышать среднюю высоту значительных волн h_s в два раза ($h > 2h_s$). Впервые понятие значительных волн ввели Свердруп и Манк [4] в 1942 г. в рамках выполнения гранта ВМС США. Согласно гранту необходимо было определить уровень волнения на побережье северной Африки, где намечалась высадка десанта. С этой целью авторы предложили ввести среднюю высоту h_s и период T_s одной трети наиболее высоких волн. Волны с параметрами, определенных таким способом, они называли значительными волнами. Позже Манк этим понятием уже не пользовался. Кроме того волны, определенные таким способом требуют дальнейшего уточнения, так как состав одной трети наиболее высоких волн зависит от того, какие наиболее низкие волны принимаются во внимание. В работе [3] полагая поле волн как Гауссов случайный процесс, однородным с узким спектром, с разбросом амплитуды волн, подчиняющемуся рэлеевскому распределению, автор определил критерий волны-убийцы $h > 2h_s$ через параметр дисперсии $h > 8\sigma$.

В [5] отмечается, что волны-убийцы могут существовать как на глубокой, так и на мелкой воде, а также на берегу. На плавных пляжах они обычно представляют собой короткое и внезапное затопление, а на крутых берегах и прибрежных сооружениях — неожиданно высокие заплески. Такие события могут привести к человеческим жертвам и к повреждениям бере-

*E-mail: shelkovnikov@phys.msu.ru

говой инфраструктуры. Для подтверждения теоретических результатов о накате случайного поля волн на наклонный берег, в [3] были проведены соответствующие эксперименты в волновых каналах университета Уорвика и университета Ганновера. Увеличение нелинейности волн вело к большим отличиям поля от гауссова со смещением в сторону больших амплитуд, что может трактоваться, как увеличение длительности наводнения. Было показано, что число волн-убийц в поле наката (высота волн на берегу) всегда больше, чем в падающем поле, что подтверждает предыдущие выводы о повышенной вероятности появления волны-убийцы на берегу. Также было показано, что изменение высот падающих волн в большую сторону приводит к их увеличению и обрушению, что ведет к уменьшению количества волн-убийц. В [5] исследовалось влияние узкополосности поля падающих на берег волн на возбуждение волн-убийц, которое показало, что число волн-убийц в поле наката тем больше, чем уже спектр падающих волн.

На основе данных каталога волн-убийц в работе [5] был проведен анализ возможности возбуждения волн-убийц на промежуточной и мелкой воде за счет механизма модуляционной неустойчивости. Было показано, что модуляционная неустойчивость играет важную роль в формировании волн-убийц вплоть до переходной глубины, равной 20 м, на глубинах меньше 20 м вклад модуляционной устойчивости в формирование волн-убийц маловероятен. На основе решений нелинейного уравнения Шредингера в бассейне переменной глубины в [5] показано, что с уменьшением глубины воды пакет волн-убийц становится шире и содержит большее число индивидуальных волн по сравнению с глубокой водой, что также было подтверждено наблюдениями.

Согласно [1], вследствие установления равновесия между нелинейными и частотно-дисперсионными процессами, в системах могут распространяться периодические волны постоянной формы с конечной амплитудой. Известно, что во многих случаях эти однородные цуги волн неустойчивы по отношению к малым возмущениям определенного рода, и при распространении на большие расстояния они будут распадаться. Эта неустойчивость, известная как неустойчивость Бенджамена — Фейра, проявляется при длинноволновой модуляции в области волновых чисел возмущения меньше некоторого критического значения.

Для подтверждения всего выше изложенного в [4] описан эксперимент в канале глубиной $H=7.5$ м, волна длиной 2.2 м создавалась волнопродуктором. Отмечается, что во время эксперимента имела место слабая длинноволновая модуляция. Они сравнили цуг волн вблизи волнопродуктора с тем же цугом волн — на расстоянии 60 м от волнопродуктора. Авторы считают, что резкое отличие между этими волнами обусловлено модуляционно-нелинейной неустойчивостью.

После открытия модуляционной неустойчивости волн считалось, что конечной стадией развития цуга

промодулированных волн может быть их полное разрушение или развитие цуга устойчивых солитонов огибающей. Однако, в [6] по данным экспериментов, проведенных в лабораторном лотке, было показано, что неустойчивые модуляции растут до некоторой максимальной высоты, а затем спадают. Кроме того авторы определили параметры волн и спектральную плотность при развитии неустойчивости.

В работе [7], на базе экспериментальных данных, был рассмотрен процесс формирования ВУ при трансформации изначально узкого спектра начальных волн. Было показано, что при распространении достаточно крутых монохроматических и бихроматических волн происходит быстрое смещение частоты максимума спектра в низкочастотную область. Это смещение является основной причиной изменчивости амплитудно-частотного состава индивидуальных волн и, как следствие, образование ВУ (в нашем понимании это не ВУ, а экстремальная волна). Эксперименты проводились в Гданьске в канале длиной 64 м и глубиной 1,4 м, при глубине воды 60 см. Гашение волн осуществлялось с помощью бетонного склона. Было показано, что изначально монохроматические волны под влиянием неустойчивости постепенно трансформировались в нерегулярное волнение. Развитие нерегулярности приводило к образованию отдельных пиков высоких волн h в 2 раза превышающих значительную высоту h_s волн, при расстоянии 38-47 м. Эти аномальные волны появлялись с того момента, когда значительная часть энергии волнения передалась в низкочастотную область. Таким образом, по мнению авторов, модуляционная неустойчивость порождала частоты, нелинейные взаимодействия между которыми и основной гармоникой приводили к сдвигу частоты максимума спектра в низкочастотную область. Этот процесс характеризовался быстрым пространственным изменением спектра в рассматриваемом случае порядка 50 длин волн.

В последнее время увеличилось число работ, посвященных численному моделированию процессов развития и формирования экстремальных волн и волн-убийц. Так, в [8] было решено уравнение Эйлера для жидкости со свободной поверхностью на глубокой воде. При этом считалось, что жидкость идеальная и несжимаемая. Периодические и граничные условия создавались в виде волны Стокса (100 периодов). Она была слегка промодулирована низкой частотой (10^{-5}). Считается, что такая волна неустойчива и модуляция со временем должна возрасти. Авторы отмечали, что «ВУ возникает сама по себе как естественное явление, при этом не требуется никаких дополнительных условий, в том числе ветра».

С нашей точки зрения на процесс образования уединенной волны повлияла топография дна. Для исследования влияния топографических особенностей морского дна в виде морских банок на структуру гидродинамических полей нами с борта НИС «Академик Петровский» был проведен комплекс измерений верти-

кального распределения температуры, электропроводности и скорости течения на многосуточных станциях и на пространственных разрезах в районе банки Ампер (Атлантический океан). В течение всего времени происходило наблюдение за волновым режимом в районе банки. Проведенные нами измерения над вершиной банки Ампер показали наличие области со значительной степенью обособленности от окружающих ее водных масс. Существование этой области было обусловлено обтеканием достаточно высокого подводного препятствия и возникновением замкнутых линий тока. В однородной жидкости эта область имеет форму столба, занимающая всю толщу жидкости от поверхности препятствия до свободной поверхности. С течением времени движение внутри этой жидкости исчезает за счет трения о дно. Вместе с тем, уменьшение глубины жидкости H в области банки приводит к условию «мелкой воды» ($\lambda > H$) при котором поверхностными волнами захватывается вся область от поверхности до дна. Это означает, что одни и те же волны вне банки являются «коротким», а над банкой — «длинным», с вытекающими отсюда последствиями: волны начинают укручиваться и расти, а по мере прохождения банки волны опять оказываются в условиях глубокой воды и они начинают принимать свою обычную форму в соответствии с условиями вне банки. Таким образом, рассмотренный процесс распространения волн над банкой и после нее приводит к заключению, что для постороннего наблюдателя огромная одиночная волна появлялась «из ниоткуда» и исчезла «в никуда». Кроме того уединенная волна может «блуждать» по поверхности океана над топографической неоднородностью даже при относительно слабом ветре.

С целью выяснения возможных физических механизмов формирования экстремальных волн нами были проведены эксперименты в кольцевом аэрогидроканале (КК) [9]. Внешний и внутренний диаметры КК составили соответственно 202 см и 165 см, высота 40 см.

Следует отметить, что к достоинствам КК можно отнести следующие возможности реализации режимов: развития ветровых волн, начиная от гравитационно-капиллярных до уединенных волн; квазистационарно ветрового волнения на разных этапах их развития за счет выравнивания соотношения энергии воздушно-го потока в кольцевом канале и потерь ее в результате влияния трения о дно и стенки канала; затухающего, имеющего место в случае, когда происходит поэтапное или разовое уменьшение скорости воздушного потока. Кроме того, к преимуществам кольцевого канала относятся и более «реальный» процесс генерации и развития ветровых волн по сравнению с прямыми каналами, в которых волны создаются волнопродукторами. В связи с этим следует отметить, что процесс модуляционной неустойчивости цугов ветровых волн в кольцевом канале может отличаться от такого процесса в прямых каналах, а при иных режимах ветрового волнения может вообще отсутствовать. Ранее кольцевой канал («штормовой бассейн») был создан В. В. Шулейкиным

для исследования ветрового волнения и зыби [10]. Под уединенной волной он понимал волны сейсмической природы.

К недостаткам кольцевых каналов относятся: влияние его размеров на параметры ветровых волн; возникновение вертикальной циркуляции, обусловленной повышением уровня воды у внешней стенки; возникновение поперечных колебаний поверхности жидкости в кольцевых каналах при уменьшении скорости воздушного потока.

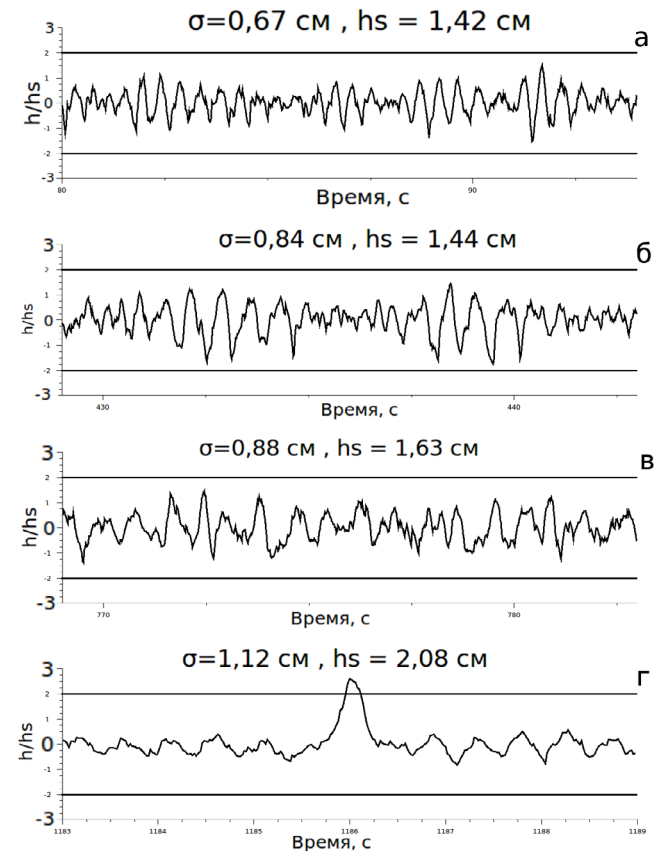


Рис. 1: Волнограммы, полученные при глубине жидкости 12 см и скорости ветра 8 м/с, заведомо превышающей необходимую скорость ветра для формирования уединенной волны. а) начальная стадия, при выполнении условий глубокой воды ($\lambda < H$), формируются цуги волн. б,в) переходный период ($\lambda \approx H$). г) заключительная стадия ($\lambda > H$) при которой формируется одна уединенная волна, которая существует до тех пор, пока действует ветер

Измерения, проведенные в кольцевом аэрогидроканале, при скорости ветра 8 м/с (заведомо превышающей необходимую скорость ветра для формирования уединенной волны) и глубине 12 см (глубокая вода), показали что со временем формируются цуги волн с наличием «девятого вала» [11]. При увеличении длины волны возникает условие мелкой воды и формируется уединенная волна. На рис. 1 представлены волнограммы, полученные при данных условиях. По-

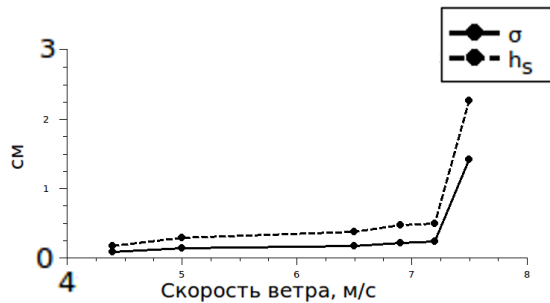


Рис. 2: Зависимость дисперсии и средней высоты значительных волн от скорости ветра

казаны фрагменты записи на различных этапах развития: а) начальная стадия, при выполнении условий глубокой воды ($\lambda < H$), формируются цуги волн. б, в) переходный период ($\lambda \approx H$). г) заключительная стадия ($\lambda > H$) при которой формируется одна уединенная волна, которая существует до тех пор, пока действует ветер [12].

Такие эксперименты проводились для различных значений воздушного потока, в том числе меньшего, чем необходимо для образования уединенной волны. На рис. 2 показаны зависимости дисперсии волнения и высоты значительных волн в канале от скорости ветра над поверхностью жидкости при полностью установившемся волновом режиме. Образование уединенной волны происходило только при скорости ветра выше 7.5 м/с, что проявлялось как резкое увеличение дисперсии и значительной высоты волн.

Для более полного представления механизмов формирования экстремальных волн и «волн — убийц» представляется полезным сопоставить результаты экспериментов [6] с нашими данными, приведенными ниже. На рисунке 3 слева (рис. 3а) приведен пример долговременной эволюции слабomodулированного цуга нелинейных волн, показывающий начало модуляционной неустойчивости и последующую демодуляцию.

Заметим, что профили отдельных волн не повторяются точно в каждом периоде модуляции. Этот пример показывает также, что при демодуляции происходит уменьшение несущей частоты, а не полный возврат, так как цуг волн демодулирует к другой частоте, меньшей частоты исходного слабomodулированного цуга волн. На волнограммах справа (рис. 3б) приведены реализации, полученные в кольцевом канале при глубине 12 см и ветре 5 м/с (при условии глубокой воды). Видно, что имел место квазистационарный режим, при

котором периодически происходило появление и исчезновение цугов волн. Это с большой вероятностью свидетельствует об амплитудно-частотной дисперсии, в отличие от амплитудной модуляции в случае а).

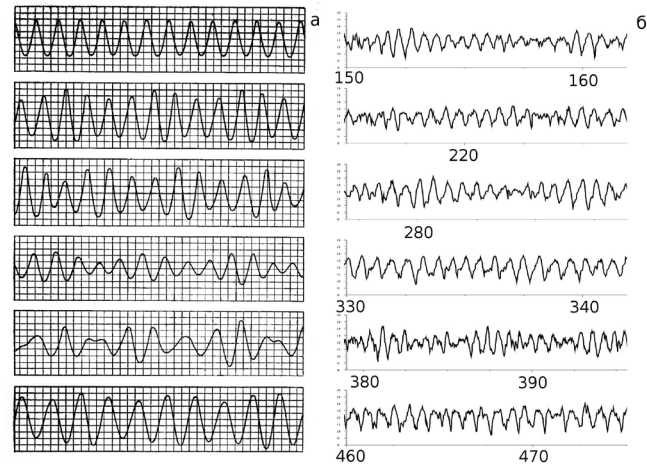


Рис. 3: а) Пример долговременной эволюции слабomodулированного цуга нелинейных волн, показывающий начало модуляционной неустойчивости и последующую демодуляцию. б) Реализации, полученные в кольцевом канале при глубине 12 см и ветре 5 м/с (при условии глубокой воды).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ наблюдений, проведенных автором в Тихом, Атлантическом океанах, а также в Черном и Средиземном морях, показал, что во всех случаях при условии глубокой воды под воздействием ветра имели место цуги волн с наличием «девятого вала».

Наблюдение за волновым режимом в районе банки Ампер показало, что резкое увеличение высоты волн «ниоткуда» наблюдалось над банкой, в условиях мелкой воды, а вне банки, в условиях глубокой воды, высота волн резко уменьшалась, волна «исчезала в никуда» и принимала форму, общую для всего морского пространства вне банки.

Анализ волнограмм, полученных в кольцевом канале, показал, что на всех этапах развития ветрового волнения, за исключением момента формирования уединенной волны, критерий образования волны убийцы $h > 2h_s$ не выполнялся. Выполнение критерия волны-убийцы имеет место только для уединенных волн, поэтому использование понятия «волны-убийцы» при условии глубокой воды не имеет смысла.

- [1] Заславский М. М., Монин А. С. Ветровые волны. Океанология. Физика океана. 2. Гидродинамика океана. (М., 1978)
- [2] Захаров В. Е. ПМТФ. №2. С. 86. (1968).
- [3] Куркин А. А., Пелиновский Е. Н. Волны-убийцы: факты,

теория и моделирование. (Нижний Новгород, 2004).

- [4] Свердруп Г., Мунк В. Основы предсказания ветровых волн, зыби и приюба. Москва. Сборник статей под редакцией Штокмана В. Б. 1951.
- [5] Диденкулова И. И., Куркин А. А., Пелиновский Е. Н.

- Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. **43**, №3. С. 419. (2007).
- [6] Юэн Г., Лэйк Б. Нелинейная динамика гравитационных волн на глубокой воде. (М.: Мир, 1987).
- [7] Кузнецов С., Сапрыкина Я. Экспериментальные исследования возникновения волн-убийц при эволюции узкого спектра крутых волн. Сборник трудов «Фундаментальная и прикладная гидрофизика». **5**, №1. (СПб: Научный центр РАН, 2012).
- [8] Захаров В. Е. Шамин Р. В. Письма в ЖЭТФ. **91**, вып. 2. С. 68. (2010).
- [9] Шелковников Н. К. Письма в ЖЭТФ. **82**, вып. 10. С. 720. (2005).
- [10] Шулейкин В. В. Физика моря. (М.: Наука, 1968).
- [11] Шелковников Н. К. Изв. РАН. Сер. физ. **78**, №12. С. 1621. (2014).
- [12] Шелковников Н. К. Изв. РАН. Сер. физ. **80**, №2. С. 229. (2016).

Rogue waves in seas and oceans

N.K. Shelkovnikov

Department of Physics of sea and inland water, Faculty of Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

E-mail: shelkovnikov@phys.msu.ru

In order to clarify the possible physical mechanisms of rogue waves we performed measurements in the Ampere bank Area. It was shown that at the same time the nature of wind disturbances near banks and outside different. In addition, experiments were conducted in ring aerohydrobasin. It was shown that criteria of rogue wave formation at all stages of the wind wave generation are not met.

PACS: 92.10.H-, 92.10.hb

Keywords: freak waves, rogue waves.

Received 16.06.2016.

Сведения об авторе Шелковников Николай Константинович — доктор физ.-мат. наук, профессор, гл. науч. сотрудник; тел.: (915) 108-25-11, e-mail: shelkovnikov@phys.msu.ru.
