

## Экстремальные волны в условиях океана

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

Рассмотрены вопросы, связанные с возможными механизмами формирования волн-убийц в океане под действием ветра. Приведены данные о формировании уединенных волн (волн-убийц) в кольцевом аэрогидроканале.

PACS: 92.10.H-, 92.10.Hb

УДК: 551.466

Ключевые слова: волны-убийцы, глубокий океан, мелкий океан.

Понятие об экстремальных волнах (ЭВ) в океане появилось практически одновременно с такими названиями как «гигантские волны» и «волны-убийцы» (ВУ). Под термином ВУ изначально понимались огромные волны, достигающие иногда 30 м. Считалось, что они внезапно появлялись «ниоткуда» и также быстро исчезали в «никуда». Встреча с ними морских судов нередко приводила к их гибели. В последнее время практически нет случаев гибели судов от мифических ВУ, поэтому название «волны-убийцы» потеряло свой смысл и в настоящее время более реальным является понятие «экстремальные волны» (включающее в себя и ВУ). Это название применимо для разных частных случаев, когда наблюдаются экстремальные значения высоты волн. Так, например, в Черном море под понятие ЭВ подходят высоты волн от 6 до 10 м, а в открытом океане они могут достигать 30 м. При проведении исследований механизмов формирования волновых процессов (включая ЭВ) на поверхности жидкости рассматриваются два крайних случая: глубокая вода ( $\lambda < H$ ) и мелкая вода ( $\lambda > H$ ), где  $\lambda$  — длина волны,  $H$  — глубина жидкости.

Исследования поверхностных волн на глубокой воде проводились многими авторами, так Лайтхил [1] показал, что слабонелинейный установившийся цуг волн на глубокой воде неустойчив по отношению к длинноволновой модуляции. Далее, более полное рассмотрение этого вопроса, с привлечением экспериментальных данных выполнили Бенджамен и Фейр [2], в результате появился термин «неустойчивость Бенджамена-Фейра». Далее встал вопрос о судьбе неустойчивого цуга волн на глубокой воде при его эволюции со временем. Исследуя эту проблему Бенни и Ньюэлл [3] получили нелинейное уравнение Шредингера. Со временем это уравнение стало основным для описания эволюции слабонелинейного цуга волн на глубокой воде. Далее Г. Юэн и Б. Лэйк [4], исследуя долговременную эволюцию волн на глубокой воде, показали, что при наложении наиболее неустойчивого возмущения модуляции возрастают до некоторой максимальной

величины, а затем убывают. При отсутствии диссипации волн такого цикла модуляции-демодуляции, с их точки зрения, должен существовать бесконечно долго. Это явление известно как возврат ФПУ (Ферми, Паста и Улама). Оно заключается в периодически повторяющейся во времени возврате амплитуды волны к своему начальному значению. Тенденцию к процессу модуляции-демодуляции наблюдали Лэйк и другие в течении только одного цикла из-за диссипации. Бенджаменом и Фейром проведены исследования в длинном прямолинейном канале на предмет неустойчивости периодических волн на различных расстояниях от волнопродуктора (рис. 1). Наиболее впечатляющим результатом исследования процесса возврата к начальным условиям приведены в работе Андерсона [5]. Процесс развития этого эффекта рассмотрен в работе Ахманова С. А., Дьякова Ю. Е., Чиркина А. С. [6] (рис. 2).

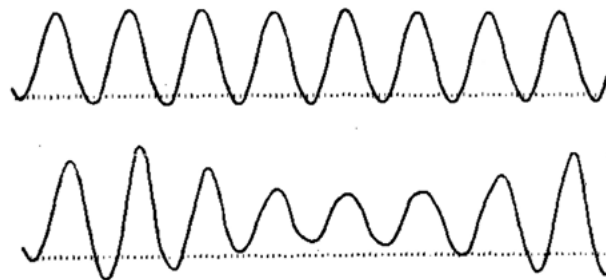


Рис. 1: Экспериментальные записи высоты поверхности воды в прямом канале в зависимости от времени для двух положений, показывающее самопровоизвольное развитие неустойчивости из фоновых помех. Верхняя запись снята на расстоянии 60 м от волнопродуктора, нижняя — на расстоянии 120 м.

В последнее время увеличилось число работ, посвященных численному моделированию процессов развития и формирования экстремальных волн и волн-убийц. Так, Захаровым и Шаминым [7] 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

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

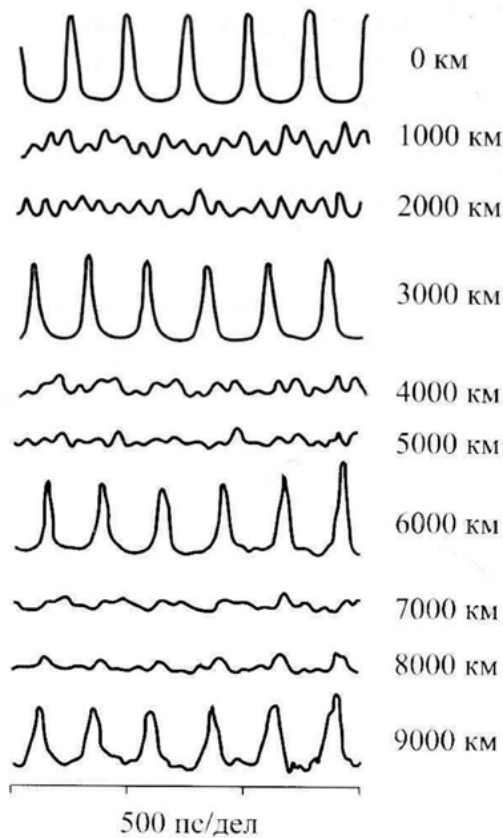


Рис. 2: Формы измеренных периодических импульсов, распространяющихся в оптическом волокне, на различных пройденных расстояниях. Видно, что импульсы восстанавливаются приблизительно через каждые 3000 км. Заимствовано из [6].

волна неустойчива и модуляция со временем должна возрастать. Авторы отмечают, что ВУ возникает сама по себе как естественное явление, при этом не надо никаких дополнительных условий, в том числе ветра, т.е. формирование волны-убийцы в глубоком океане происходит без каких-либо внешних причин, только за счет нелинейности внутриволновых процессов. Полученные в результате численного эксперимента данные они сопоставляли с «новогодней волной» (высотой 29 м), измеренной с платформы «Дропнер», находящейся на глубине 80 м в Северном море. Отметим, что глубина 80 м является «мелкой водой» для уединенной «новогодней волны».

С другой стороны известно, что в глубоком океане под действием ветра формируются группы волн, в числе которых имеется самая большая волна, так называемый «9 вал», который также причисляется к волнам-убийцам.

В глубоком океане, при отсутствии топографических неоднородностей дна в виде банок и хребтов, появление УВ маловероятно, что также подтверждается на-

блюдениями автора, проведенными им в Тихом и Атлантическом океанах. Согласно этим наблюдениям, под действием штормовых ветров происходило формирование групп волн с наличием «9 вала».

С целью выяснения возможных физических механизмов формирования ЭВ нами были проведены измерения в кольцевом аэрогидроканале (КК) [8]. Внешний и внутренний диаметры КК составляли соответственно 202 и 165 см, а высота — 40 см. При проведении исследований нами рассматривались два крайних случая механизмов формирования ветровых волн как в мелкой, так и в глубокой воде. Изучение особенностей формирования волн на мелкой воде впервые провел Рассел, который и ввел понятие уединенной волны (УВ). Это волна, которая при распространении на мелководье захватывает слой жидкости от поверхности до дна. Со временем стало ясно, что свойствами УВ обладают волны-цунами сейсмического происхождения, а также одиночные волны, возникающие при взрывах бомб в воде, при падении метеоритов в океан и при обрушении огромных масс скальных пород у крутых берегов морей и океанов. Уединенные волны описываются с помощью уравнения КДВ.

При проведении исследований возможных механизмов формирования уединенных волн нами рассматривались все этапы их развития в КК. На начальном этапе, при включении вентилятора, в КК проходили все стадии развития ветровых волн, постепенно переходя из условий «глубокой воды» (короткие волны), к «мелкой воде», где и формировалась уединенная волна в виде солитона. Интересно отметить, что на заключительной стадии развития ветровых волн, когда в КК оставалась одна уединенная волна, имело место формирование «временных цугов» этой уединенной волны (рис. 3). Такая форма существования одной уединенной волны сохранялась и при условии, когда для нагнетания воздуха в КК использовался только один воздуховод вместо четырех. С другой стороны длительное наблюдение за характером ветрового волнения, при условии «глубокой воды» показало, что возможно периодическое появление отдельных всплесков высоты волн, выходящее за пределы значимой высоты волн.  $H_s \geq 4\sigma$ , где  $\sigma$  — стандартное отклонение водной поверхности. Считается, что ВУ возникают при  $H_s \geq 4\sigma$ , однако в КК использование этого параметра оказалось не очень убедительным, так как при увеличении ветра возникает одна огромная уединенная волна, во много превышающая значение  $H_s$ .

Впервые обнаружено формирование экстремальных волн под действием ветра в кольцевом аэрогидроканале. В отличие от Рассела, в нашем случае ветровая уединенная волна формировалась в течении определенного промежутка времени, проходя при этом все стадии развития ветровых волн. В процессе развития формировалось несколько уединенных волн, в результате взаимодействия между которыми оставалась одна экстремальная волна.

Показано, что при увеличении ветра и уменьшении

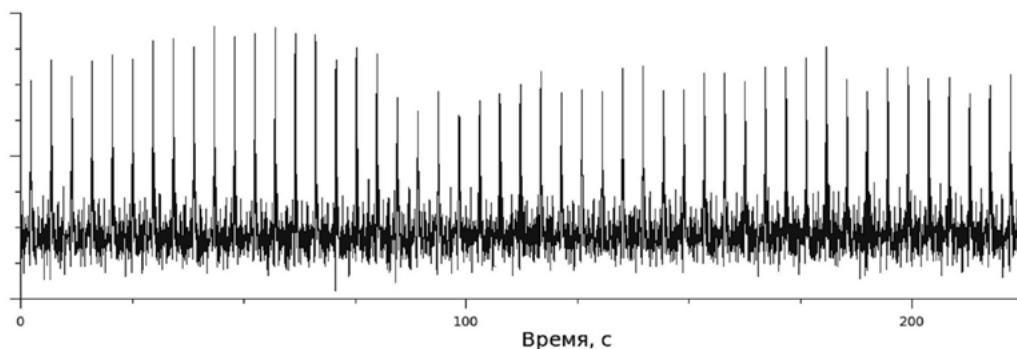


Рис. 3: Пример формирования «временных цугов» одной уединенной волной.

глубины профиль волны становится близким к бору, а при последовательном увеличении скорости воздушного потока и глубины жидкости в КК происходит поэтапное увеличение экстремальных волн.

В итоге отмечается, что экстремальные волны, до-

стигающие 30 м и более, могут иметь место в виде уединенной волны в условиях мелкой воды на шельфе, а также — в открытом глубоком океане — в виде цуга с максимальной волной (т. е. 9 вал).

- [1] *Lighthill M.J.* J. Inst. Math. Appl. **1**. P. 269. (1965).  
 [2] *Benjamin T.B., Feir J.E.* J. Fluid Mech. **27**. P. 417. (1967).  
 [3] *Benney D.J., Newell A.C.* J. Math. Phys. **46**. P. 133. (1967).  
 [4] *Юэн Г., Лэйк Б.* Нелинейная динамика гравитационных волн на глубокой воде. (М.: «Мир», 1987).  
 [5] *Anderson P.A.* Opt. Letters. **18**. P. 16. (1993).

- [6] *Ахманов С. А., Дьяков Ю. Е., Чиркин А. С.* Статистическая радиофизика и оптика. Случайные колебания и волны в линейных системах. (М.: Физматлит, 2010).  
 [7] *Захаров В. Е., Шамин Р. В.* Письма в ЖЭТФ. **91**, вып. 2. С. 68. (2010).  
 [8] *Шелковников Н. К.* Письма в ЖЭТФ. **82**, вып. 10. С. 720. (2005).

## Extreme waves in ocean conditions

**N. K. Shelkovnikov**

*Department of physics of seas and land-water, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University  
 Moscow 119991, Russia  
 E-mail: shelkovnikov@phys.msu.ru*

The questions related to possible mechanisms of rogue waves formation in the ocean by the wind. Presents data on the formation of solitary waves (rogue waves) in the annular aerobasin.

PACS:

Keywords: rogue waves, deep ocean, shallow ocean.

Received 27.07.2015.

### Сведения об авторе

Шелковников Николай Константинович — докт. физ.-мат. наук, профессор, главный научный сотрудник; тел.: (495) 939-33-08, e-mail: shelkovnikov@phys.msu.ru.