

# Экспериментальные и экспедиционные исследования

УДК 551.466

Н.К. Шелковников

## Солитонная версия формирования волн-убийц в океане

Рассматриваются механизмы формирования волн-убийц в океане. На основании лабораторных экспериментов сделан вывод о том, что одной из возможных причин образования волн-убийц в мелком море являются ветровые солитоны. Это особенно ярко проявляется при увеличении скорости ветра и уменьшении глубины жидкости. Показано, что при лобовом столкновении нескольких цугов уединенных волн в прямолинейном канале последовательно возникали одна, две и три укрупненных волны. Сопоставляя данные о волнах-убийцах в океане с процессом развития ветровых солитонов и уединенных волн, возникающих при лобовом столкновении, сделан вывод о реальности еще одного (солитонного) механизма формирования волн-убийц.

**Ключевые слова:** волны ветровые, волны-убийцы, механизм генерации волн-убийц, солитоны, эксперименты лабораторные.

**Введение.** Наиболее полная информация о современном состоянии исследований аномальных ветровых волн, известных как волны-убийцы, содержится в работах [1 – 3] и др. Впервые информация о волнах-убийцах появилась почти 100 лет назад. Считалось, что эти волны обладают огромной высотой, они внезапно появляются ниоткуда и так же быстро исчезают в никуда. Встреча с ними кораблей зачастую приводила к их гибели.

Со временем мифический облик волн-убийц постепенно стал уступать место реальным представлениям об аномальных волнах. Более того, были сделаны попытки увязать максимальное значение высоты волны-убийцы  $h_{\max}$  с параметрами окружающих волн. Один из критериев волны-убийцы – это отношение  $h_{\max}/h_{1/3} \geq 2,2$ , где  $h_{1/3}$  – средняя высота одной третьей части самых высоких волн, окружающих волну-убийцу.

Для выяснения причины гибели судов в 2002 г. в рамках ЕС был реализован проект «*MaxWave*». В результате выполнения этого проекта было показано, что появление одиночных волн-убийц является более частым событием, чем предполагалось ранее.

Делаются попытки теоретического и экспериментального объяснения этого феномена. Существует несколько гипотез относительно механизмов формирования волн-убийц [1 – 3]: фокусировка поверхностных волн, которая может возникать в поле горизонтально-неоднородных течений, в том числе на встречных течениях; дисперсионное сжатие; нелинейное взаимодействие;

модуляционная неустойчивость. Считается, что вышеперечисленные факторы могут приводить к усилению поверхностных гравитационных волн.

На глубокой воде ( $H \gg \lambda$ ) одной из возможных причин возникновения волн-убийц могут быть ветровые солитоны огибающей. Теоретические аспекты этого явления были заложены в работах [4 – 6]. Была установлена применимость для описания волн на поверхности жидкости нелинейного уравнения Шредингера в виде одного комплексного уравнения для амплитудной функции  $A(x, t)$ :

$$i \left[ A_t + \frac{\omega_0}{2k_0} A_x \right] - \frac{\omega_0}{8k_0^2} A_{xx} - \frac{1}{2} \omega_0 k_0^2 |A|^2 A = 0,$$

где  $\omega_0$  и  $k_0$  – постоянные начальные значения несущей частоты и несущего волнового числа;  $A = a \exp(i\theta)$  – комплексная огибающая волны;  $a$  – амплитуда волны; под  $\theta$  понимается отклонение фазы волны от ее начального значения  $\theta_0$ . Из этого уравнения следует, что в этом приближении огибающая волны распространяется с групповой скоростью несущей волны. Эволюция волны определяется балансом дисперсии и нелинейности. Для волн на глубокой воде это уравнение впервые было получено в статье [5], а затем рядом других авторов. Решение нелинейного уравнения Шредингера для слабонелинейного цуга волн, описывающее установившееся распространение огибающей, имеет вид

$$A = a_0 \operatorname{sech} \left[ \sqrt{2} a_0 k_0^2 \left( x - \frac{\omega_0}{2k_0} t \right) \right] \exp \left( -\frac{1}{2} i \omega_0 k_0^2 a_0^2 t \right).$$

Это решение соответствует уединенной волне огибающей в виде локализованного пакета волн, распространяющегося с постоянной скоростью.

Для объяснения возможного механизма формирования волн-убийц в условиях мелкого моря может быть использована солитонная теория. Как известно, понятие уединенной волны заложил Джон Скотт Рассел. Теоретическое обоснование этого явления предложено в работах [7, 8]. Уравнение Кортевега – де Вриза (КдВ) можно получить исходя из уравнений длинных волн, распространяющихся по поверхности идеальной жидкости, путем разложения их по двум малым параметрам: нелинейности  $\alpha = h/H$  и дисперсии  $\beta = H^2/\lambda^2$ , где  $h$  – высота волны;  $\lambda$  – длина волны;  $H$  – глубина жидкости. В первом приближении уравнение КдВ имеет следующий вид:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + c_0 \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{3}{2} \frac{c_0}{H} \eta \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{6} c_0 H^2 \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} = 0,$$

где  $\eta$  – возмущение поверхности;  $c_0 = \sqrt{gH}$  – лагранжева скорость длинных волн на воде. Уравнение допускает решение в форме уединенной волны, движущейся в положительном направлении оси  $x$  с постоянной скоростью  $c$ . Это так называемое односолитонное решение уравнения КдВ:

$$\eta = h \operatorname{sech}^2 \left[ \left( \frac{3h}{4H^3} \right)^{1/2} (x - ct) \right],$$

где  $c = c_0(1 + h/H)^{1/2}$ ,  $h$  – максимальная высота солитона.

Для описания ветрового солитона в вязкой жидкости (в лабораторных условиях) с помощью уравнения КдВ необходимо в последнее включить тангенциальное напряжение трения ветра, а также действующие в противоположном направлении трение о дно и стенки канала. Они компенсируют друг друга, а солитон будет сохранять свои форму и скорость движения. В этом случае для определения параметров солитона, с некоторым приближением, можно использовать обычное уравнение КдВ.

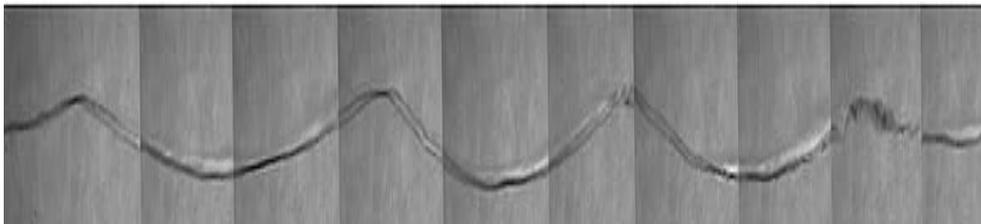
**Постановка задачи.** В настоящее время нет ясности о механизмах формирования волн-убийц. Поэтому для более полного представления о процессах образования волн-убийц в мелком море необходимо иметь данные о пространственно-временной изменчивости ветровых волн на огромных территориях морской поверхности. Это позволило бы проследить за процессом развития волн-убийц от зарождения и до исчезновения, обусловленных разными причинами. В океанических условиях такие измерения очень затратны и связаны с большими трудностями, особенно в штормовых условиях, даже при использовании дистанционных измерений. В этом смысле могут быть полезны достаточно экономичные лабораторные эксперименты.

**Результаты экспериментов и их обсуждение.** Для экспериментального подтверждения механизма солитонной версии формирования волн-убийц на мелкой воде нами были проведены измерения в кольцевом и прямолинейном каналах. Внешний и внутренний диаметры кольцевого канала составляли соответственно 202 и 165 см, высота – 40 см [9].

Процесс образования солитонов проходил следующие стадии [10]. После включения вентилятора образовывалась рябь, затем появлялись гравитационные волны, близкие к гармоническим, амплитуда и длина которых постепенно увеличивались. Возникали длинные волны ( $\lambda \gg H$ ), которые выстраивались соразмерно их значениям  $h$  и  $\lambda$ , так что впереди были более длинные из них. Со временем, в силу замкнутой траектории движения волны в кольцевом канале, они догоняли меньшие волны и проходили через них. В итоге общее число длинных волн в канале уменьшалось. Далее, после того как дрейфовое течение достигало дна, формировалось от 1 до 4 солитонов, в зависимости от условий на поверхности жидкости (наличие ПАВ или флотации), а также от глубины бассейна и скорости ветра.

На рис. 1 показаны четыре солитона в кольцевом канале. Видно, что высота солитонов постепенно увеличивалась по мере их движения. В результате попарного нелинейного взаимодействия двух последних уединенных волн в канале оставалось всего два солитона. В случае, когда впереди находился солитон с большей амплитудой, а за ним следовал меньший по высоте, под действием ветра последний увеличивал свои скорость и высоту. Увеличение размеров приводило к экранированию первого импульса. В итоге второй солитон (с большей скоростью) постепенно догонял первый импульс, при этом их высоты выравнивались. Существенно то, что солитоны не сливались, а

взаимодействовали на некотором расстоянии их центров друг от друга. Это расстояние в среднем составляло около 70 см. В результате такого «дальнего» взаимодействия солитоны отталкивались друг от друга, при этом первый уходил вперед, а второй – отставал. Такой процесс сближения двух импульсов и их расхождения с последующим сближением повторялся несколько раз в зависимости от глубины и скорости ветра. Это происходило до тех пор, пока задний солитон, после очередного взаимодействия, отставал настолько, что оказывался впереди большего солитона; в этом случае последний проходил через меньший. В итоге в канале оставался один солитон, который существовал до тех пор, пока действовал ветер.

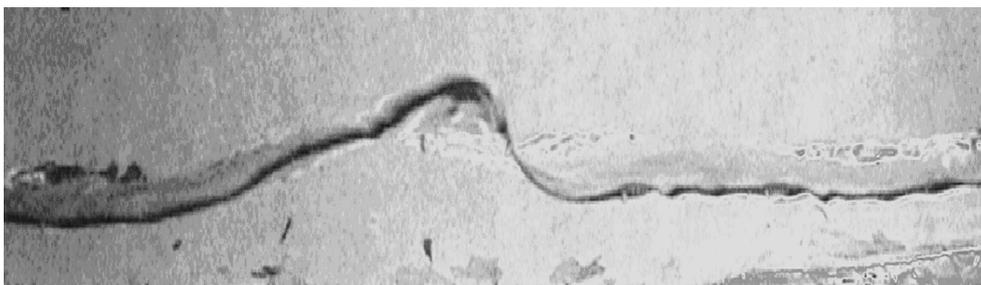


Р и с. 1. Четыре солитона в кольцевом аэрогидроканале (движение – слева направо)

По результатам измерений нами были определены амплитуды, длины, скорости распространения, параметры нелинейности и дисперсии и числа Урседа солитонов. Длина волны  $\lambda$ , в соответствии с принятой методикой, определялась как ширина волны на высоте полуамплитуды. Параметр Урседа  $Ur = \alpha / \beta$  принимал значения в диапазоне от 2 до 6. Скорость  $c$  наблюдавшихся в экспериментах солитонов приближенно может быть найдена по формуле, следующей из приведенного выше фрагмента теории КдВ. Отличие реальной скорости волны от теоретической во всех экспериментах не превышало 10%. Экспериментальная скорость всегда превосходила теоретическую. Это может быть обусловлено тем, что солитоны распространялись по течению. Под действием ветра профиль солитона деформировался: подветренный склон был несколько укрупнен, а наветренный – растянут. Эта деформация была тем сильнее, чем больше значение скорости ветра и меньше глубина жидкости. В этом случае профиль импульса был близок к бору (рис. 2). При движении солитона в канале за ним всегда, в начальный момент, оставалась гладкая водная поверхность, но под действием постоянно дующего ветра в промежутках времени между последующими прохождениями солитона возникали короткие волны, которые исчезали на его подветренном склоне (рис. 3).

Как уже отмечалось выше, одной из причин формирования волн-убийц является процесс взаимодействия поверхностных гравитационных волн с встречным течением. В этом смысле представляется важным выяснить возможность влияния встречного течения на уже сформировавшийся солитон. С этой целью нами были проведены измерения в прямолинейном канале с раз-

мерами  $15 \times 16 \times 350$  см. Солитоны создавались с помощью плунжера вблизи одного из торцов канала. При распространении они сталкивались с течением, скорость которого составляла 25 см/с. На рис. 4 представлены данные трех волнографов, расположенных от волнопродуктора на расстоянии 15, 30 и 55 см; последний волнограф находился в области столкновения солитона с встречным течением. В итоге было показано, что высота волнового импульса, созданного на спокойной воде, при встрече с течением увеличилась на  $\sim 3 - 4\%$ , что находится в пределах точности измерения. Разница в показаниях первого и второго волнографов свидетельствует о степени затухания уединенной волны на расстоянии 15 см в спокойной воде. В общем случае характер взаимодействия уединенных волн с встречным течением существенно зависит от размеров и скорости распространения волны, а также от вертикальной структуры течения и его скорости.

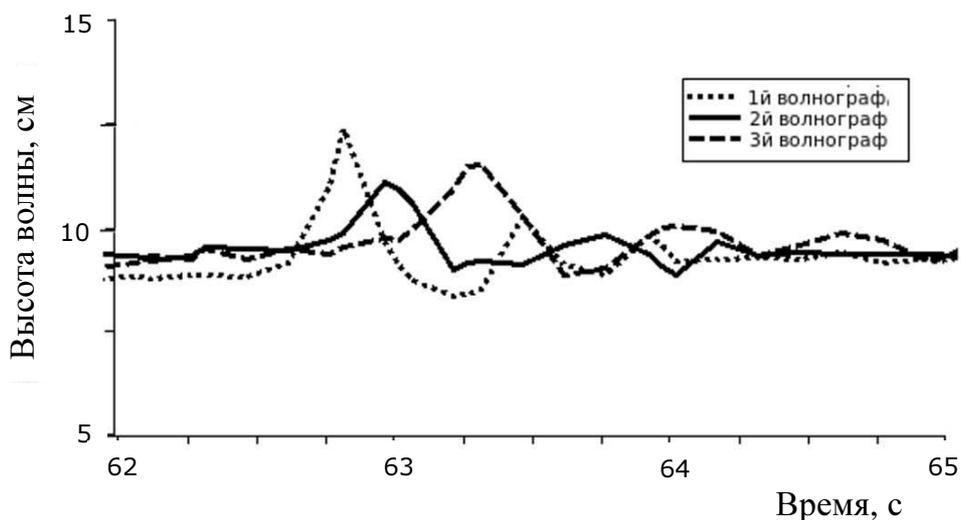


**Р и с. 2.** Ветровой солитон с укрученным передним фронтом (бор)

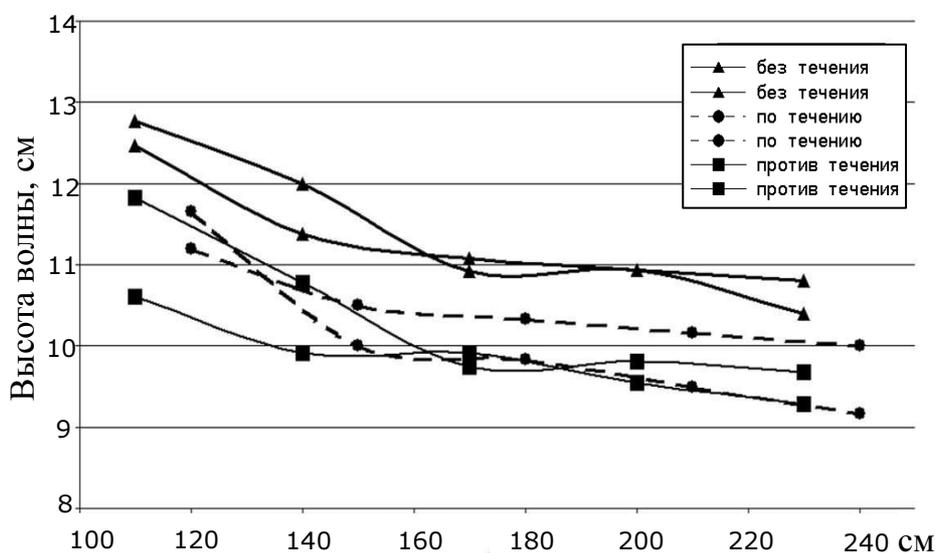


**Р и с. 3.** Ветровой солитон в кольцевом аэрогидроканале (на подветренном склоне видно затухание развивающихся волн; движение – слева направо)

Для определения влияния разнонаправленных течений на уединенные волны, в том числе образовавшиеся в области течения (это наблюдается в случае обрушения скал или при взрывах в тех местах, где есть течение), были проведены специальные измерения в прямолинейном канале. Показано, что уединенные волны на встречном течении затухают быстрее, чем при распространении по течению или без него (рис. 5). Сам факт влияния встречного течения на солитон в этом случае более заметен в момент его возникновения.



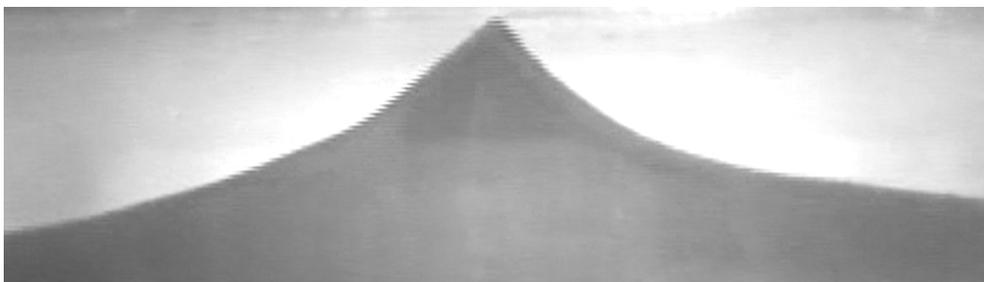
Р и с. 4. Графики изменения уединенной волны (волнографы 1 и 2 расположены в спокойной воде, волнограф 3 – на встречном течении)



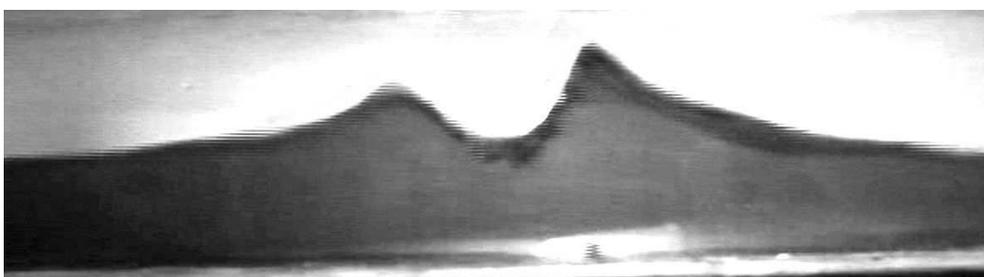
Р и с. 5. Изменение высоты уединенных волн, образовавшихся в поле течения в прямолинейном канале при встречном и спутном течениях, а также в спокойной воде

Для исследования механизма лобового столкновения уединенных волн на некотором расстоянии от торцов канала создавались два основных встречных импульса и два побочных, направленных в противоположные стороны. В результате взаимодействия только двух основных волн в канале возникала уединенная волна (рис. 6), которая затем распадалась на два разнонаправленных импульса, тем самым демонстрируя частицеподобность уединенных волн. Далее в результате взаимодействия всех четырех волн сначала возника-

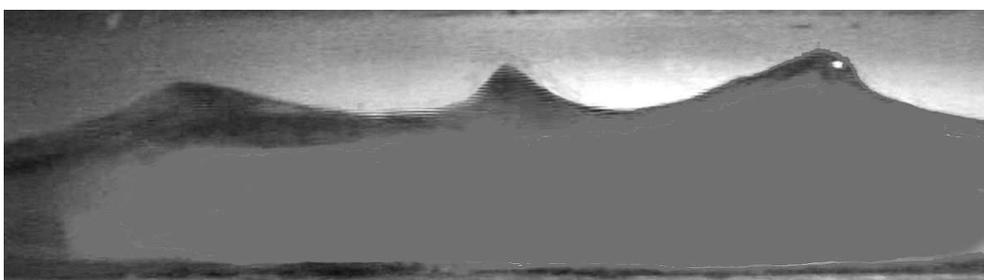
ли два импульса большой крутизны (рис. 7), а затем формировался цуг из трех волн, представленный на рис. 8. В океанских условиях подобная ситуация может быть при резком изменении направления действия ветра и столкновении разнонаправленных уединенных волн, что может привести к формированию волн-убийц, обладающих укрупненной фронтальной частью (водяная стена) или иногда представляющих собой аномальное образование из трех волн («три сестры») [1, 3].



**Р и с. 6.** Уединенная волна, возникшая после столкновения двух встречных солитонов



**Р и с. 7.** Две уединенных волны большой крутизны, сформировавшиеся в процессе взаимодействия двух основных и двух побочных волн (прямолинейный канал)



**Р и с. 8.** Три волны («три сестры») в прямолинейном канале, образовавшиеся после взаимодействия четырех волновых импульсов

**Выводы.** На основании проведенных лабораторных исследований делается вывод о том, что ветровые волны-убийцы в мелком море можно иногда рассматривать как ветровые солитоны. При усилении ветра и уменьшении глубины бассейна они укрупняются и напоминают водяную стену, свойст-

венную волнам-убийцам. Последовательное лобовое столкновение нескольких цугов волн также приводит к развитию уединенной волны с укрученным передним фронтом, которая может быть близка по форме к волне-убийце. Для описания волн-убийц в глубоком океане использована теория «солитона огибающей» [5].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куркин А.А., Пелиновский Е.Н. Волны-убийцы: факты, теория и моделирование. – Н. Новгород: Нижегородский гос. техн. ун-т, 2004. – 158 с.
2. Доценко С.Ф., Иванов В.А. Волны-убийцы. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2006. – 42 с.
3. Kharif C., Pelinovsky E., Slunyaev A. Rogue waves in the ocean. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. – 216 p.
4. Lighthill M.J. Contributions to the theory of waves in non-linear dispersive system // J. Inst. Math. Appl. – 1965. – 1. – P. 269 – 306.
5. Захаров В.Е. Устойчивость периодических волн конечной амплитуды на поверхности глубокой жидкости // ПМТФ. – 1968. – № 2. – С. 86 – 94.
6. Юэн Г., Лэйк Б. Нелинейная динамика гравитационных волн на глубокой воде. – М.: Мир, 1987. – 179 с.
7. Boussinesq M.J. Theorie de l'íntumescence liquide appelee onde solitaire ou de translation, se propageant dans un canal rectanguliere. – Paris, 1871. – P. 575 – 579.
8. Kortevég D.J., de Vries G. On the change of long waves advancing in a rectangular canal and on new type of long stationary waves // Phil. Mag. Ser. 5. – 1895. – 39. – P. 197 – 212.
9. Мочулин П.В., Шелковников Н.К. Исследование ветровых уединенных волн в кольцевом аэрогидроканале // Морской гидрофизический журнал. – 2006. – № 5. – С. 53 – 62.
10. Шелковников Н.К. Вынужденный солитон в жидкости // Письма в ЖЭТФ. – 2005. – 82, вып. 10. – С. 720 – 723.

Московский государственный университет  
им. М.В. Ломоносова,  
Москва

Материал поступил  
в редакцию 06.05.11

**АНОТАЦІЯ** Розглядаються механізми формування хвиль-вбивць в океані. На підставі лабораторних експериментів зроблено висновок про те, що однією з можливих причин утворення хвиль-вбивць в мілкому морі є вітрові солітони. Це особливо яскраво проявляється при збільшенні швидкості вітру та зменшенні глибини рідини. Показано, що при лобовому зіткненні декількох цугів відокремлених хвиль у прямолінійному каналі послідовно виникали одна, дві та три закручені хвилі. Зіставляючи дані про хвилі-вбивці в океані з процесом розвитку вітрових солітонів і відокремлених хвиль, які виникають при лобовому зіткненні, зроблено висновок про реальність ще одного (солітонного) механізму формування хвиль-вбивць.

**Ключові слова:** хвилі вітрові, хвилі-вбивці, механізм генерації хвиль-вбивць, солітони, експерименти лабораторні.

**ABSTRACT** Mechanisms of rogue waves' formation in the ocean are considered. Based on laboratory experiments, the conclusion is made that one of possible reasons of freak waves' formation in a shallow sea consists in wind solitons. It is especially evident at increase of wind speed and decrease of the fluid depth. It is shown that at frontal collision of a few trains of solitary waves, in a rectilinear channel one, two and three steeped waves occur subsequently. Comparison of the data on freak waves in the ocean with the process of development of wind solitons and solitary waves arising at a frontal collision, resulted in the conclusion on actual existence of one more (soliton) mechanism of freak waves' formation.

**Keywords:** wind waves, freak waves, mechanism of freak waves' generation, solitons, laboratory experiments.

