

УДК 656.61.052

## Максимальная динамическая нагрузка аномально высоких волн на корпус и элементы корпусных конструкций судна на глубоком море

**В.М. Дорожко**

*Институт автоматизи и процессов управления ДВО РАН, сектор управления и навигации*

**Аннотация.** Разработана компьютерная технология генерации и выполнено численное моделирование аномально высоких морских волн. Оценена максимальная внешняя динамическая распределённая поверхностная нагрузка, создаваемая аномально высокими морскими волнами на корпусе и элементах конструкции судна, в качестве имитации которых выбраны неподвижные вертикальная и уголкового преграды. Указанная нагрузка многократно превышает расчётные значения, предусмотренные нормами Российского морского регистра судоходства для обеспечения прочности корпуса судна. Полученные результаты могут быть использованы в интересах обеспечения безопасности эксплуатации морского транспорта.

**Abstract.** The computer technology of generation and numerical modeling of abnormal high sea waves have been performed. The maximum of external dynamic distributed surface load has been evaluated. The load has been created by abnormal high sea waves on hull and ship design elements, immovable vertical and corner barriers have been chosen as their imitation. This load is many times higher than the calculated maximum of values provided by norms of the Russian marine register of shipping industry for providing vessel hull strength. The results can be used in interests of marine transport safety operation.

**Ключевые слова:** аномально высокие морские волны, CFD-метод, максимальная внешняя динамическая распределённая поверхностная нагрузка, вертикальная и уголкового преграды

**Key words:** abnormal high sea waves, CFD-method, maximum of external dynamic distributed surface load, vertical and corner barriers

### 1. Введение

Современные суда проектируются с учётом требований Российского морского регистра судоходства (*Правила...*, 2012) к обеспечению прочности корпуса судна при воздействии на него давления морских волн. Вместе с тем, отмечаются случаи повреждения или гибели судов по причине разрушения корпуса при встрече с "волнами-убийцами" – аномально высокими морскими волнами (далее – аномальные волны) высотой до 30 метров (*Пелиновский, Слюняев, 2007*), воздействие которых на судно не учитывается упомянутыми требованиями. Согласно теоретическим оценкам, подобная волна может возникнуть один раз в 20 лет (*Куркин, Пелиновский, 2004*). Тем не менее, наблюдения свидетельствуют о высокой регулярности встречи судов с аномальными волнами. Так, за период с 1969 по 1994 г. 22 супертанкера были потеряны или существенно повреждены (*Куркин, Пелиновский, 2004*) аномальными волнами в Тихом и Атлантическом океанах. По наблюдениям, всего за 5 лет (2006-2010 гг.) зарегистрировано 78 случаев возникновения аномальной волны (*Nikolkina, Didenkulova, 2011*), в которых повреждены суда или погибли, или получили ранения члены экипажей судов. Существует множество гипотез возникновения аномальных волн (*Ruban et al., 2010*). Одной из общепризнанных теорий их возникновения является модуляционная неустойчивость Бенджамена – Фейра – Захарова (*Benjamin, Feir, 1967; Захаров, Шабат, 1972*), согласно которой вероятность появления аномальной волны критическим образом зависит от индекса Бенджамена – Фейра (отношение средней крутизны волнения к средней относительной ширине его спектра). Большие значения указанного параметра соответствуют спектрально узким распределениям волнового воздействия, т.е. достаточно когерентным ветровым волнам.

В результате модуляционной неустойчивости таких волн формируется групповой солитон, под огибающей которого может находиться несколько периодов морских волн с амплитудой  $a$  (далее  $a$  – начальная амплитуда) и начальной крутизной  $S = ak$ ,  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число,  $\lambda$  – длина волны. Аномальная волна представляет собой конечную стадию развития модуляционной неустойчивости, когда за время порядка одного периода в результате нелинейной фокусировки высота волн солитона может резко увеличиться до 30 м (*Пелиновский, Слюняев, 2007*), а крутизна – превысит значение 0,443

(Longuet-Higgins, 1985), после чего аномальная волна начинает обрушаться в виде "ныряющего буруна" (далее – бурун) с выбросом струи из гребня волны. Изучение характеристик аномальных волн выполняется как численно (Слюняев, Сергеева, 2012), так и на экспериментальных установках (Кузнецов, Сапрыкина, 2012). Значительное число работ, например (Афанасьев, Стуколов, 1999), связано с изучением различных аспектов взаимодействия волн с модельными препятствиями. Особенностью указанных работ является исследование коротких волн малой высоты на небольшой глубине, при этом данных об оценках значений динамической нагрузки полномасштабных аномальных волн на суда не предоставлено.

В связи с этим в настоящей работе ставится задача разработки компьютерной технологии и проведения численного исследования воздействия на глубоком море полномасштабных аномальных волн высотой до 30 м на корпус и элементы корпусных конструкций судна, в качестве которых приняты неподвижные вертикальная (имитация наружной обшивки судна) и угловая (имитация мест соединения вертикальных элементов судовых конструкций с палубой) преграды, для оценки максимальных значений внешней динамической распределённой поверхностной нагрузки (далее – максимальная динамическая нагрузка) на судно. Полученные результаты могут быть использованы в интересах обеспечения безопасности эксплуатации морского транспорта.

## 2. Основные представления технологии генерации аномальных волн

Для решения поставленной задачи применён метод вычислительной гидродинамики (CFD – computational fluid dynamics), позволяющий в численной форме создать гидродинамический бассейн (далее – бассейн), в котором численно генерируются аномальные волны, воздействующие на вертикальную и угловую преграды. В основу CFD-метода положены уравнения неразрывности несжимаемой жидкости и сохранения импульса (Reynolds-averaged Navier-Stokes equations) (Роуч, 1980), которые могут быть записаны в тензорном виде:

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{u'_i u'_j}), \quad (2)$$

где  $\{i, j\} = 1, 2, 3$ ;  $x_1, x_2, x_3$  – декартовы координаты в абсолютной системе  $ox_1x_2x_3$  и соответствующие им  $u_1, u_2, u_3$  – мелкомасштабные осреднённые значения абсолютной скорости потока непрерывной среды (газа или жидкости);  $u'_1, u'_2, u'_3$  – флуктуации абсолютной скорости, ответственные за диссипацию энергии;  $\mu$  и  $\rho$  – вязкость и плотность непрерывной среды, соответственно;  $t$  – время;  $p$  – давление; последний член в выражении (2) – напряжение Рейнольдса, полученное осреднением флуктуационных компонент скорости. Единицы измерений всех величин – в системе СИ. Для вычисления напряжения Рейнольдса применена модель турбулентности  $k_\epsilon$ -RNG (renormalization group mathematical technique) (Yakhot, Orszag, 1986), которая позволяет получать расчётные величины гидродинамических полей, близкие к их экспериментальным значениям.

Для формального описания технологии выберем правую декартову систему координат  $oxuz$ , совпадающую с системой  $ox_1x_2x_3$ . В соответствии с поставленной задачей решение системы уравнений (1), (2) выполнено численным способом в расчётной области, имеющей форму прямоугольника в вертикальной плоскости  $oxy$ ; ось  $ox$  системы координат  $oxuz$  лежит на условной поверхности тихой воды (при отсутствии волн); ось  $oy$  направлена вверх; в направлении оси  $oz$  расчётная область имеет толщину один метр.

Процесс зарождения и развития аномальной волны можно условно представить в виде трёх последовательных этапов (Ruban et al., 2010): формирование группового солитона вследствие пространственно-временной фокусировки, обусловленной дисперсией большого числа однонаправленных монохроматических волн в узком диапазоне частот; нелинейная фокусировка спектральных компонент солитона до максимальных высот аномальной волны; обрушение аномальной волны. В соответствии с целями поставленной задачи в данной работе моделируются два последних этапа, длительный процесс формирования группового солитона не рассматривается. Отличие группового солитона от монохроматической волны заключается в наличии в его спектре малых боковых составляющих наряду с основным максимумом (Кузнецов, Сапрыкина, 2012), что позволяет в рассматриваемой модели использовать монохроматическую волну с начальной амплитудой  $a$ . В связи с этим, граничное условие на входе расчётной области (левая вертикальная граница бассейна) сформировано в виде вектора переменной скорости потока жидкости, горизонтальная ( $v_x$ ) и вертикальная ( $v_y$ ) компоненты которого определяются выражениями (Song, Sirviente, 2004)

$$v_x = \frac{gka}{\omega} \frac{\cosh[k(y + H_w)]}{\cosh(kH_w)} \cos(kx_{in} - \omega t + \varphi_0), \quad (3)$$

$$v_y = \frac{gka}{\omega} \frac{\sinh[k(y + H_w)]}{\cosh(kH_w)} \sin(kx_{in} - \omega t + \varphi_0), \quad (4)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения;  $H_w$  – глубина воды в бассейне;  $x_{in}$  – координата входной границы бассейна;  $\omega$  – угловая частота;  $\varphi_0$  – начальная фаза волны.

Формирование граничных условий на правой вертикальной границе бассейна, включая примыкающую к ней область расчётного пространства, выполнено с помощью введения дополнительного затухания, в результате которого амплитуда волн постепенно снижалась до нулевого значения по мере движения к упомянутой границе, что исключило отражение волн от неё. В итоге, с учётом симметрии солитона, численно моделировалась только его правая половина. Граничное условие на дне и боковых стенках бассейна реализовано с помощью обращения в нуль нормальной производной скорости, при этом дополнительно задано отсутствие прилипания жидкости на боковых стенках. На верхней границе бассейна задано атмосферное давление. Начальные условия уравнений (1), (2) сформированы путем инициализации расчётной области от вектора скорости (3), (4), в результате чего во всем объёме бассейна создавалось распределение амплитуд и скоростей жидкости и воздуха, соответствующее начальному ( $t = 0$ ) состоянию бегущей воды.

Для полномасштабного численного моделирования аномальной волны длиной 100 м выбран бассейн длиной 700 м и высотой 200 м, при этом глубина воды в бассейне составила 100 м, что обеспечило выполнение условий глубокого моря. Начальные амплитуды ( $a$ ) волн для проведения серии вычислений выбраны равными 8, 9, 10 и 11 м. Плотность воды составила  $\rho = 1027$  кг/м<sup>3</sup>, ускорение свободного падения –  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>. Высокая точность вычислений обеспечивалась разбиением пространства бассейна квадратными сеточными элементами со стороной 0,25 м. Кроме того, шаг дискретизации времени нестационарного решателя выбран минимальным и составил 0,00025 с. С целью обеспечения равных условий в отношении точности вычислений при моделировании аномальных волн с разными длинами ( $\lambda_i$ ) в диапазоне 70-150 м применено масштабирование в  $m_i$  раз геометрических размеров базовой сеточной модели, в качестве которой принята сеточная модель бассейна для аномальной волны длиной 100 м. Масштабирующий коэффициент ( $m_i$ ) вычислялся из выражения  $m_i = \lambda_i / \lambda_0$ , где  $\lambda_0 = 100$  м. Соответственно начальные амплитуды 8, 9, 10 и 11 м, выбранные для базовой сеточной модели, также изменяются в  $m_i$  раз для сеточной модели с длиной волны  $\lambda_i$ . На первом этапе моделирования, для исключения искажения поля скорости в процессе формирования аномальной волны, границам преград были назначены свойства гидродинамической прозрачности с заполнением их внутреннего пространства водой. На втором этапе, непосредственно перед достижением аномальной волной максимальной высоты, вертикальной преграде назначались свойства твёрдого тела. Вертикальная преграда высотой 20 м (имитация надводной части борта в зоне максимального удара волны) располагалась нижним концом на уровне ординаты  $y = 0$ . Угловая преграда  $6 \times 6$  м, имитирующая места соединения вертикальных элементов корпусных конструкций с палубой, располагалась горизонтальной плоскостью также на уровне  $y = 0$ . При этом свойства твёрдого тела назначались ей перед достижением струёй буруна уровня ординаты  $y = 0$ . Вертикальная преграда воспринимает удар аномальной волны в тот момент, когда последняя достигает максимальной высоты, при этом горизонтальная компонента скорости в ней также максимальна. На угловую преграду обрушивается струя буруна в тот момент, когда скорость в струе достигает своего максимума, при этом форма угловой преграды обеспечивает концентрацию удара струи в области соединения горизонтальной и вертикальной плоскостей преграды. Следует отметить, что ватерлиния судна для разных длин аномальной волны лежит в диапазоне ординат её подошвы  $y = -8, \dots, -5$  м, тогда ордината палубы, имитируемая горизонтальной плоскостью угловой преграды, доступная удару струи буруна, составляет 5-8 м, соответственно. Элементы конструкции на судах с более высокой ординатой палубы будут подвергаться воздействию аномальной волны так, как это происходит в случае с вертикальной преградой.

С начала удара аномальной волны о преграду для выбранных начальной крутизны и длины волны в течение 0,3 с производилась запись через каждые 0,00025 с в файлы значений вычисленного давления в узлах сетки (через 0,025 м) на поверхности преград. Сглаживание имеющих место выбросов поверхностного давления осуществлялось путём осреднения геометрическим фильтром с маской размером  $1 \times 1$  м, смещение которого вдоль поверхности преград выполнялось методом скользящего окна с шагом 0,25 м. Среди полученного массива осреднённых давлений выбиралось максимальное

значение, которое принималось в качестве максимальной динамической нагрузки на выбранной преграде для заданных начальной крутизны и длины волны.

### 3. Численное моделирование и обсуждение результатов

На рис. 1 приведён пример визуализации результатов вычисления профиля аномальной волны ( $\lambda = 100$  м) в момент удара струи буруна в месте соединения вертикальной и горизонтальной плоскостей уголкового преграды. Вычисленная кинетическая энергия воды в падающей струе в данном случае составила 5,5 кДж, что, как будет показано далее, приводит к созданию значительного давления на преграде.

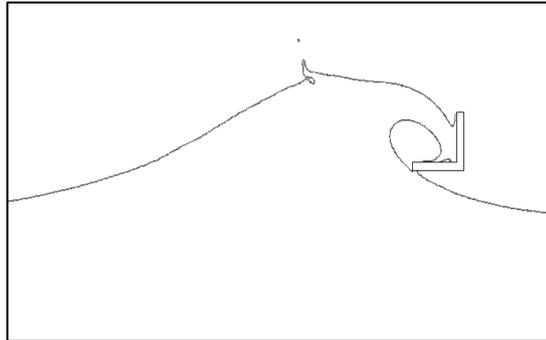


Рис. 1. Иллюстрация обрушения аномальной волны на уголковую преграду

На рис. 2 представлена визуализация вычисленной последовательности профилей аномальной волны длиной 100 м в процессе её формирования. На рисунке видно, как за счёт нелинейных процессов волна дважды увеличивается до максимальных высот (профили 1 и 4), при этом во второй раз (профиль 4) крутизна фронта волны достигает максимального значения, после чего высота волны резко уменьшается, что приводит к образованию струи буруна (профили 5 и 6). Результаты вычислений показали, что максимальное значение (до 25 м/с) горизонтальной компоненты вектора скорости воды на профиле волны имеет место в момент зарождения буруна (профиль 4). В связи с этим вертикальная преграда устанавливалась перед профилем 4.

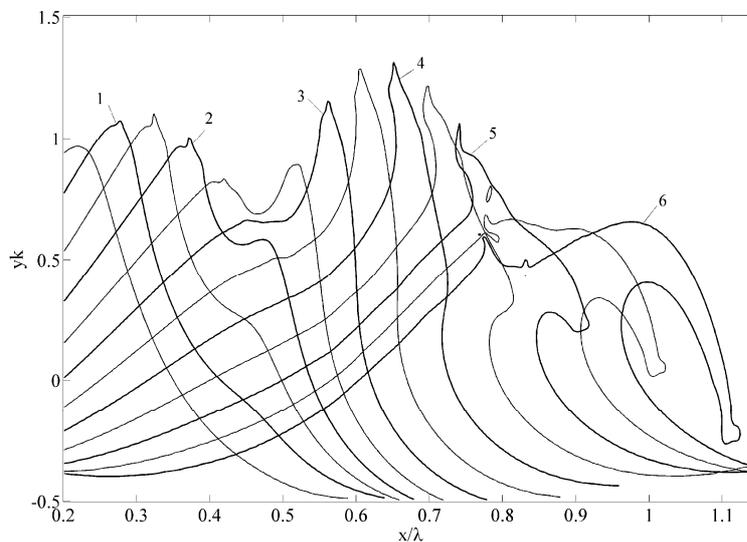


Рис. 2. Типичная временная последовательность профилей через каждые 0,05 нормированного времени  $t/T = 0,125, \dots, 0,675$  аномальной волны с начальной крутизной  $S = 0,628$  и периодом  $T = 8,003$  с

Уголковая преграда устанавливалась перед струёй в момент достижения ею уровня ординаты  $y = 0$  (промежуточный профиль между профилями 5 и 6). Из-за графической насыщенности преграды на рис. 2 не показаны. Вычисления для различных длин волн 70-150 м и начальных значений крутизны в диапазоне 0,5-0,7 показали, что для аномальных волн с одинаковой начальной крутизной имеет место геометрическое подобие: совпадение для одинаковых моментов нормированного времени  $t/T$  их

профилей в осях  $x/\lambda$  и  $yk$ , что явилось основанием для применения, как отмечалось ранее, масштабирующих коэффициентов. При этом установлено, что волны с начальной крутизной менее 0,5 формируют бурун в форме небольших барашков, скатывающихся с вершины волны. Для волн с начальной крутизной свыше 0,7 характерно быстрое образование двух выбросов (подобных профилям 1 и 4, рис. 2), которые увеличиваясь, смыкаются вверху с захватом воздушного пузыря, и, впоследствии, быстро оседают с образованием большого количества брызг. При этом струя буруна формируется в самый последний момент оседания выбросов и направлена вниз. В связи с этим такие волны в данной статье не рассматриваются.

С использованием метода масштабирования сеточной модели выполнена серия вычислений максимальной высоты аномальных волн различной длины в зависимости от их начальной крутизны. На рис. 3 представлены аппроксимированные результаты вычислений в виде кривых, которые являются геометрическим местом точек с координатами  $(S, H)$ , при этом параметром кривых является длина волны. На рисунке видно, что только волна с длиной 100 м обладает способностью генерировать аномальные волны во всем диапазоне высот 20-30 м "волн-убийц", что и явилось основанием для выбора при масштабировании в качестве  $\lambda_0$  волны длиной 100 м.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что аномальные волны, соответствующие высотам 20-30 м, могут формироваться волнами солитона с начальными значениями крутизны 0,5-0,7 и длинами в диапазоне 70-150 м.

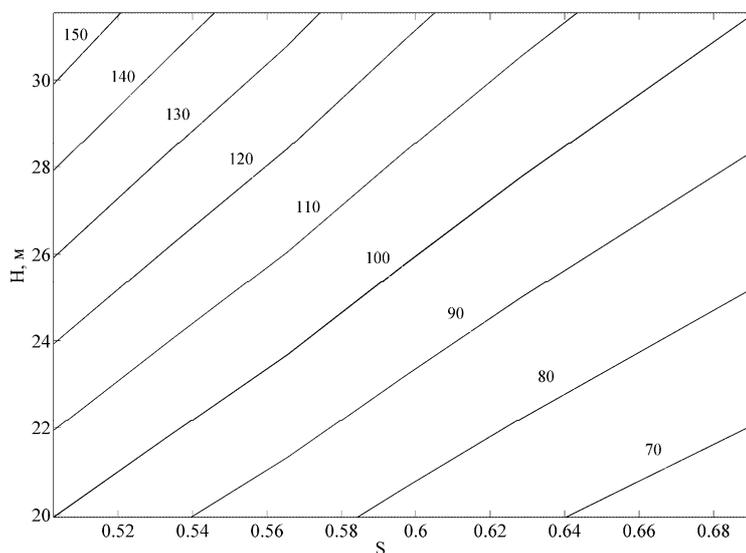


Рис. 3. Диаграмма зависимости максимальной высоты ( $H$ ) аномальной волны от её начальной крутизны ( $S$ ) и длины волны (числа над кривыми)

В соответствии с разработанной технологией выполнены вычисления максимальной динамической нагрузки (максимального давления), создаваемой аномальной волной на преградах.

Наибольший интерес представляют верхняя и нижняя границы диапазона значений указанного давления, поэтому моделировались лишь те аномальные волны, максимальная высота которых была близка к границам диапазона высот "волн-убийц". На рис. 4 приведены графики зависимости от начальной крутизны аппроксимированного максимального давления на вертикальной и уголкового преградах: 1 (3) и 2 (4) – верхняя и нижняя границы максимального давления соответственно; в скобках даны номера кривых для уголкового преграды.

Как следует из рис. 4, верхняя (кривая 1) и нижняя (кривая 4) границы максимального давления формируются на вертикальной и уголкового преградах соответственно. Учитывая то, что выбранные преграды согласно технологии неподвижны, полученные данные о максимальной динамической нагрузке аномальной волны являются минимальными для судов, удерживаемых на курсах носом на волну, и максимальны для судов, идущих на попутном волнении.

Отметим, что весь процесс формирования аномальной волны (от начальной до максимальной высоты) протекает скоротечно и занимает не более 10 с. За это время волна пробегает расстояние менее одной длины волны со скоростью до 15 м/с. Всё это свидетельствует о невозможности осуществления манёвра судна, чтобы избежать встречи с аномальной волной. Следовательно, встреча судна с аномальной волной всегда неожиданна и угрожает, прежде всего, целостности его обшивки.

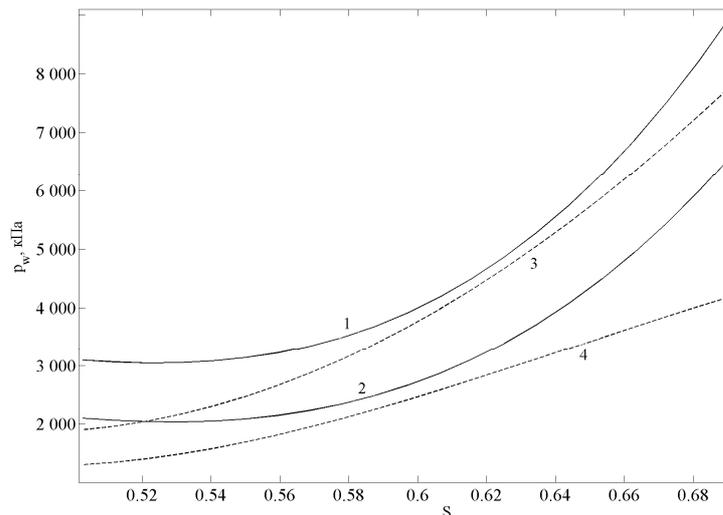


Рис. 4. Максимальное давление ( $p_w$ ), создаваемое аномальной волной, на неподвижных вертикальной (сплошные кривые) и уголковой (штриховые) преградах: 1, 3 и 2, 4 – высоты волн 30 м и 20 м, соответственно

#### 4. Заключение

Поставленная задача исследований решена полностью: разработана компьютерная технология генерации аномально высоких морских волн. Выполнены численные исследования и оценены максимальные значения динамической нагрузки аномальных волн на имитаторах корпуса и корпусных конструкций судна. Вычисленные значения максимального давления, создаваемого аномальной волной, более чем на два порядка превышают максимальные значения расчётной нагрузки, получаемой в соответствии с Правилами классификации и постройки морских судов Российского морского регистра судоходства. В целях обеспечения безопасности мореплавания судоводителям рекомендуется избегать плавания в районах с повышенной вероятностью появления "волн-убийц". Полученные результаты могут способствовать дальнейшей актуализации вопроса об организации мониторинга за величиной индекса Бенджамена – Фейра и информирования судоводителей о районах с повышенным значением вероятности появления аномальных волн.

#### Литература

- Benjamin T.B., Feir J.E.** The disintegration of wave trains in deep water. *J. Fluid Mech.*, N 27, p. 417-430, 1967.
- Longuet-Higgins M.S.** The asymptotic behavior of the coefficients in Stokes's series for surface gravity waves. *Journal of applied mathematics*, v. 34, p. 269-277, 1985.
- Nikolkina I., Didenkulova I.** Rogue waves in 2006-2010. *Natural hazards and Earth system sciences*, v. 11, p. 2913-2924, 2011.
- Ruban V., Kodama Y., Ruderman M. et al.** Rogue waves – towards a unifying concept: Discussions and debates. *The European physical journal special topics*, N 185, p. 5-15, 2010.
- Song C., Sirviente A.I.** A numerical study of breaking waves. *Physics of Fluids*, v. 16, N 7, p. 2649-2667, 2004.
- Yakhov V., Orszag S.A.** Renormalization group analysis of turbulence: Basic theory. *Journal of scientific computing*, v. 1, N 1, p. 1-51, 1986.
- Афанасьев К.Е., Стуколов С.В.** Численное моделирование взаимодействия уединённых волн с препятствиями. *Вычислительные технологии*, т. 4, № 6, с. 3-16, 1999.
- Захаров В.Е., Шабат А.Б.** Точная теория двумерной самофокусировки и одномерной автомодуляции волн в нелинейных средах. *Журнал экспериментальной и теоретической физики*, т. 61, вып. 1, с. 118-134, 1972.
- Кузнецов С.Ю., Сапрыкина Я.В.** Экспериментальные исследования возникновения "волн-убийц" при эволюции узкого спектра крутых волн. *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*, т. 5, № 1, с. 52-63, 2012.
- Куркин А.А., Пелиновский Е.Н.** "Волны-убийцы": факты, теория и моделирование. *Н.Новгород, ННГУ*, 157 с., 2004.
- Пелиновский Е.Н., Слюняев А.В.** "Фрики" – морские волны-убийцы. *Природа*, № 3, с. 14-23, 2007.
- Правила классификации и постройки морских судов. Т. 1. СПб., *Российский морской регистр судоходства*, 466 с., 2012
- Роуч П.** Вычислительная гидродинамика. М., Мир, 618 с., 1980.
- Слюняев А.В., Сергеева А.В.** Численное моделирование и анализ пространственно-временных полей аномальных морских волн. *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*, т. 5, № 1, с. 24-36, 2012.