



Издается с 2008 г.

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Каган Б.А., Софьина Е.В., Рашиди Э.Х.А.</i> Чувствительность приливной динамики к пространственной изменчивости гидродинамической шероховатости дна на примере Печорского моря	4
<i>Мортиков Е.В.</i> Численное моделирование влияния стратификации на силу сопротивления при движении ледяного киля в двухслойной жидкости	12
<i>Шамин Р.В., Смирнова А.И., Юдин А.В.</i> Вопросы обнаружения и прогнозирования волн-убийц в вычислительных экспериментах	23
<i>Зимин А.В., Пикуль Т.А.</i> Использование вейвлет-преобразования для выделения характеристик внутренних волн	34
<i>Афанасьева С.А., Белов Н.Н., Бураков В.А., Буркин В.В., Зыков Е.Н., Иценко А.Н., Родионов А.А., Симоненко В.Г., Хабибуллин М.В., Югов Н.Т.</i> Расчет высокоскоростного движения инерционной модели при входе в воду и ее взаимодействие с металлической преградой	43
<i>Мальшикин Г.С., Воронина Н.Г., Смирнов А.С., Тимофеев В.Н.</i> К вопросу об оптимизации параметров корабельных бортовых протяженных антенн при неравномерном распределении уровня помехи	56
<i>Голубев А.Г.</i> Об алгоритме квазисогласованной фильтрации тональных эхосигналов	69
<i>Левин И.М., Радомысльская Т.М., Савченко В.В.</i> Видимость нефтяных пленок на поверхности воды из космоса	75
Научные сообщения	
<i>Зимин А.В., Родионов А.А., Здоровеннов Р.Э., Романенков Д.А., Шевчук О.И., Родионов М.А., Жегулин Г.В.</i> Экспедиционные исследования короткопериодной изменчивости гидрофизических полей в Белом море в июле–августе 2012 г. с научно-исследовательского судна «Эколог»	85
<i>Тюгин Д.Ю., Куркин А.А., Пелиновский Е.Н., Куркина О.Е.</i> Повышение производительности программного комплекса для моделирования внутренних гравитационных волн IGW Research с помощью Intel® Parallel Studio XE 2013	89
Рецензия на книгу	
<i>Галиев Ш.У.</i> Геофизические сообщения Чарльза Дарвина как модели теории катастрофических волн...	96
Из истории науки	
<i>Корчагин Н.Н.</i> Андрей Сергеевич Монин	97
Конференции	103
Поздравляем!	106
Хроника	107
Правила представления материалов в редакцию.....	109

CONTENTS

Articles

- Kagan B.A., Sofina E.V., Rashidi E.* Sensitivity of the Tidal Dynamics to the Spatial Variability of Hydrodynamic Roughness of the Bottom as Illustrated by the Pechora Sea Example 4

The results of investigation of the Pechora Sea tidal dynamics sensitivity to variations of the external governing parameters, obtained with the use of the 3D finite-element hydrostatic model QUODDY-4, are considered in this paper. It is shown that the tidal characteristics are weakly sensitive to variations of the critical depth separating the subdomains of rough and incompletely rough bottoms, and are strongly sensitive to variations of hydrodynamic roughness of the bottom.

Key words: hydrodynamically rough and incompletely rough bottoms, modeling, resistance laws, spatial inhomogeneity of the bottom roughness, the Pechora Sea.

- Mortikov E.V.* Numerical Simulation of the Stratification Effect on the Drag Coefficient of a Moving Ice Keel in a Two-Layer Fluid 12

This paper considers numerical simulation of a moving ice keel in a two-layer fluid. The immersed boundary method is used for modeling of the non-stationary complex geometry on the rectangular grids. The results of the drag force computations for various Froude numbers are presented in comparison with the laboratory experiments.

Key words: sea ice, two-layer fluid, drag coefficient, immersed boundary method, graphic processors.

- Shamin R.V., Smirnova A.I., Ydin A.V.* Questions of Detection and Forecasting of Waves-Killers in Numerical Experiments 23

Methods of forecasting and detection of rogue waves in numerical experiments are considered. Methods of operational forecast of freak waves, as well as the methods of remote sensing of the sea surface and application of computing experiments to validation of in-situ measurements, are suggested and analyzed.

Key words: rogue waves, computing experiments, mathematical simulations.

- Zimin A.V., Picul T.A.* Use of Wavelet Transformation for Detection of Internal Waves Characteristics 34

The presence of an internal tidal bar and intensive internal wave packets with the period of 10-20 minutes were detected from the in-situ data obtained on the White Sea shelf. Along with the standard methods the wavelet analysis was applied to describe the internal wave characteristics. A well-grounded choice of a wavelet basis and its construction method was carried out. Different options of wavelet transformation are shown while describing nonlinear waves.

Key words: internal waves, contact sensing, wavelet analysis, the White Sea shelf.

- Afanaseva S.A., Belov N.N., Burakov V.A., Burkin V.V., Zykov E.N., Ishchenko A.N., Rodionov A.A., Simonenko V.G., Khabibullin M.V., Yugov N.T.* Calculations of High-Speed Movement of the Inertial Model Entering the Water, and Its Interaction with the Metal Target 43

An initial stage of high-speed penetration of a needle-shaped metal body into the water and its interaction with the metal target are considered. The calculations are carried out in the frame of the continuum mechanics: for a solid body an elastic-plastic model, with allowance for destruction, is suggested, while for the water fluid mechanics equations are used. Over the considered range of speeds of 1.0–2.5 km/s, when the body is entering the water, a mode of developed cavitation occurs; the plastic deformation of the head part of the striker, and in some cases, its destruction, are observed, which leads to increase of the penetration resistance.

Key words: experimental, mathematical modeling, high-speed interaction, metal, water.

<i>Voronina N.G., Malyshkin G.S., Smirnov A.S., Timofeev V.N.</i> On the Issue of Optimization of Ship Broadside Extended Antennae Parameters, with Non- Uniform Distribution of Noise Level	56
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

The paper considers a way of weight coefficients optimization for a ship broadside extended multi-element antenna, with allowance for a number of requirements for its parameters, with the non- uniform noise level distribution over the antenna elements.

Key words: hydroacoustic, linear extended array-based antenna, broadsides antenna, not uniform noise, compromise optimization on the number of parameters.

<i>Golubev A.G.</i> On Algorithm of the Quasi-Matched Filtration of Tone Echo-Signals	69
---------------------------------------------------------------------------------------------	----

For filtration of the tone echo-signals in the presence of reverberation interference, a narrow-band filter is synthesized, with the AFC being at a low level beyond the passband. The given property of the filter is reached due to introduction of a weighing window in the process of the spectral analysis. A traditional choice of a spectral decomposition interval, as well as the choice of the parameters of a specified window, results in the width of a filter passband being unmatched with duration of an echo-signal. The paper considers a problem of synthesis of an improved filter, with no defect described above.

Key words: filtration, reverberation, echo-signal, window, signal against noise ratio.

<i>Levin I.M., Radomyslskaya T.M., Savchenko V.V.</i> Visibility of Oil Films on the Water Surface From Space	75
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

Algorithms and results of the calculations of the apparent contrast of oil films on the sea surface are given for the case of observations from space in visual, ultraviolet and infrared spectral ranges (300–800 nm). The calculations were carried out for different water types and optical thicknesses of the maritime atmosphere and for various solar altitudes and wind velocities. It is shown that the oil films on the sea surface can be detected if the wind velocity ranges from 6 to 20 m/s and the solar zenith angle varies from 0 to 45 degrees. The greatest values of the contrast correspond to the highest wind velocities and solar zenith angle.

Key words: oil films, sea surface, contrast.

Scientific Messages

<i>Zimin A.V., Rodionov A.A., Zdorovenov R.E., Romanenkov D.A., Shevchuk O.I., Rodionov M.A., Zhegulin G.V.</i> Research of the Short-Term Variability of Hydrophysical Fields in the White Sea in July-August 2012 Onboard the Research Vessel "Ecology"	85
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

The information on the expedition of St. Petersburg branch of the Institute of Oceanology is provided. The purpose of work is accumulation of meteorological data to study variability of the local hydrophysical fields, produced by the tidal variations, in the White Sea areas differing in hydrological conditions.

Key words: internal waves, probing, satellite radar images, White Sea.

<i>Tyugin D., Kurkin A., Pelinovsky E., Kurkina O.</i> Increase of Productivity of the Program Complex for Modeling of Internal Gravity Waves IGW Research with the Help of Intel® Parallel Studio XE 2013	89
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

The new version of the program complex intended for numerical modeling of propagation and transformation of internal gravity waves in the ocean, with a finalized unit calculation of a ray of internal waves and with a paralleling of the program, which can significantly speed up the ongoing computation is presented. As a practical example of the proposed study additive properties of the shelf of the Baltic Sea from the point of view of long internal waves on the basis of the ray approach is offered. The values of the coefficient of capture are calculated and the corresponding maps are constructed.

Key words: numerical modeling, parallel algorithms, wave refraction.

УДК 532.5

© Р.В.Шамин^{1,2,3}, А.И.Смирнова⁴, А.В.Юдин^{3,4}, 2012

¹Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН, Москва

²Новосибирский государственный университет

³Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск

⁴Российский университет дружбы народов, Москва

roman@shamin.ru

ВОПРОСЫ ОБНАРУЖЕНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВОЛН-УБИЙЦ В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ

Рассматриваются методы прогнозирования и обнаружения волн-убийц в вычислительных экспериментах. Построены и проанализированы методы оперативного прогноза волн-убийц, методы дистанционного зондирования морской поверхности, а также применение вычислительных экспериментов к верификации натуральных измерений.

Ключевые слова: волны-убийцы, вычислительные эксперименты, математическое моделирование.

Среди катастрофических явлений в океане волны-убийцы занимают особое место. Это одиночные волны, которые возникают внезапно и могут достигать значительной амплитуды (известны случаи до 30 м). Именно внезапность обуславливает серьезность опасности этих волн для судов и морских сооружений. Проблема предсказания и обнаружения волн-убийц в океане является одной из наиболее актуальных при их исследовании. К сожалению, она еще очень далека от решения. В силу объективных причин изучение аномально больших поверхностных волн с помощью натуральных и лабораторных экспериментов сильно затруднено. Поэтому в последнее время для изучения волн-убийц наибольшую актуальность приобретает вычислительный эксперимент. В этой области были достигнуты значительные успехи [1–9].

Мы рассмотрим такие актуальные проблемы, как обнаружение и предсказание возникновения волн-убийц в обработке вычислительных экспериментов. есть три подхода решения: 1) оперативный прогноз по функционалам, характеризующим волнение с точки зрения возможности образования волн-убийц; 2) дистанционное наблюдение за динамикой распространения волн; 3) сравнение статистики обнаружения волн-убийц по полным записям динамики волн и волнограммам.

В первую очередь мы рассматриваем основные динамические уравнения, описывающие волны на воде и плоское потенциальное течение идеальной жидкости с бесконечно глубоким дном. Затем приводим постановки вычислительных экспериментов, на результатах которых апробируем наши методы прогнозирования волн-убийц, рассматриваем методы оперативного прогноза их возникновения. Эти методы основаны на анализе динамики отношения максимальной амплитуды к значительной высоте волнения в каждый момент времени и максимальной крутизны. На этом построен алгоритм SPRW, который позволяет исследовать возможность непосредственного предсказания волн-убийц. Показано, что их возникновение носит стохастический характер и методы простого предсказания оказываются недостаточно эффективными.

Далее анализируем возможность обнаружения волны-убийцы с помощью дистанционного зондирования поверхностных волн. Рассматривается постановка эксперимента, приближенная к реальной ситуации использования идеального дальномера. Разрабо-

тан алгоритм, который позволяет с помощью этого «прибора» обнаруживать волны-убийцы на расстоянии нескольких километров.

И наконец, проводим сравнительный анализ статистики обнаружения волн-убийц по полной пространственно-временной записи и по огрубленной записи – волнограммам, которые используются в большинстве натуральных экспериментов. Показано, что использование волнограммы приводит к значительным ошибкам.

Уравнения в конформных переменных, описывающие волны на воде. В настоящей работе моделирование волн-убийц основано на численном решении уравнений, описывающих нестационарное течение идеальной жидкости со свободной поверхностью. Мы рассмотрим плоское течение с бесконечно глубоким дном, по горизонтальной переменной – 2π -периодические условия. Такие предположения являются естественными для моделирования волн-убийц.

Пусть идеальная несжимаемая жидкость занимает область в плоскости (x, y) , ограниченную свободной поверхностью $-\infty < y < \eta(x, t)$, $-\infty < x < \infty$, $t > 0$.

Считая движение жидкости потенциальным, имеем $v(x, y, t) = \nabla\Phi(x, y, t)$, где $v(x, y, t)$ – двумерное поле скоростей, $\Phi(x, y, t)$ – потенциал скоростей. Всюду в данной работе мы считаем, что операторы градиента, дивергенции и Лапласа применяются лишь по пространственным переменным. Из условия несжимаемости жидкости следует, что потенциал скоростей удовлетворяет уравнению Лапласа $\Delta\Phi(x, y, t) = 0$.

С этим уравнением связываются следующие граничные и начальные условия:

$$\begin{aligned}(\eta_t + \Phi_x \eta_x - \Phi_y) |_{y=\eta(x,t)} &= 0, \\(\Phi_t + \frac{1}{2} |\nabla\Phi|^2 + gy) |_{y=\eta(x,t)} &= 0, \\ \Phi_y |_{y=-\infty} &= 0, \\ \eta |_{t=0} &= \eta_0(x), \quad \Phi |_{t=0} = \Phi_0(x, y).\end{aligned}$$

Здесь g – ускорение поля тяжести.

Будем использовать уравнения в конформных переменных. Идея использовать конформные переменные для описания нестационарного течения идеальной жидкости со свободной поверхностью впервые была предложена в работах [10, 11]. Для численного моделирования уравнения в конформных переменных использовались в работах [12–14] и многих других. Мы рассмотрим вариант этих уравнений, предложенный в работе [15]. Пусть идеальная жидкость занимает бесконечную область в переменных (x, y) , ограниченную криволинейной границей. Вводим комплексную плоскость $z = x + iy$. Эту область можно (по теореме Римана) конформно отобразить на нижнюю полуплоскость с переменными $w = u + iv$.

Обратное конформное отображение выражается аналитической функцией $z = z(t, w)$. Эта функция является также функцией времени, поскольку мы рассматриваем нестационарную задачу. Зная функцию $z(t, u)$, можно восстановить профиль свободной поверхности. Для описания потенциального течения идеальной жидкости необходимо также знать потенциал скоростей. Поскольку потенциал является гармонической функцией, то все его значения могут быть описаны значением этого потенциала лишь на границе области. Пусть $\psi(t, x)$ – значение потенциала скоростей на свободной поверхности. Соответственно через $\Phi(t, z)$ обозначим аналитическую в нижней полуплоскости функцию такую, что $\text{Re } \Phi(t, x) = \psi(t, x)$. Будем рассматривать функцию

$\Pi(t, w) = \Phi(t, z(t, w))$, которая также будет аналитичной в нижней полуплоскости. Теперь введем новые переменные:

$$R(t, w) = \frac{1}{z'(t, w)}, \quad V(t, w) = i \frac{\Pi'(t, w)}{z'(t, w)}.$$

Здесь и далее штрихом мы обозначаем производную по переменной w . Эти функции являются аналитическими в нижней полуплоскости и удовлетворяют следующим краевым условиям:

$$\begin{aligned} R(t, w) &\rightarrow 1, \quad \text{Im } w \rightarrow -\infty, \\ V(t, w) &\rightarrow 0, \quad \text{Im } w \rightarrow -\infty. \end{aligned}$$

Поскольку мы рассматриваем поверхностные волны 2π -периодические по переменной x , то и функции R и V также будут 2π -периодическими по переменной u . Тогда функции R и V можно представить в виде рядов Фурье:

$$\begin{aligned} R(w, t) &= 1 + \sum_{k=1}^{\infty} r_k(t) e^{-ikw}, \\ V(w, t) &= \sum_{k=1}^{\infty} v_k(t) e^{-ikw}. \end{aligned}$$

Функции R и V полностью описывают динамику поверхностных волн идеальной жидкости. При этом достаточно знать лишь значения этих функций на вещественной оси (при $v = 0$), поэтому в дальнейшем мы будем рассматривать аргумент u вместо w .

Функции R и V удовлетворяют следующей системе уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{R}(t, u) &= i(U(t, u)R'(t, u) - U'(t, u)R(t, u)), \\ \dot{V}(t, u) &= i(U(t, u)V'(t, u) - B'(t, u)R(t, u)) + g(R(t, u) - 1), \\ 0 < u < 2\pi, \quad 0 < t < T, \\ R(t, 0) &= R(t, 2\pi), \quad V(t, 0) = V(t, 2\pi), \quad 0 < t < T, \\ R(0, u) &= R_0(u), \quad V(0, u) = V_0(u), \quad 0 < u < 2\pi. \end{aligned} \tag{1}$$

Здесь функции U и B вычисляются по формулам

$$U = P(V\bar{R} + \bar{V}R), \quad B = P(V\bar{V}), \quad P = \frac{1}{2}(I + iH).$$

Математическая корректность рассмотренных выше уравнений установлена в цикле работ [16–21], где были выявлены существование и единственность решений уравнений (1), предложены эффективные численные методы и доказана сходимость численных методов.

Вычислительные эксперименты. Мы тестировали наши методы обнаружения волн-убийц на результатах вычислительных экспериментов. Постановка их соответствовала экспериментам из работы [9]. В них рассматривалась динамика поверхностных волн, распространяющихся в одну сторону, что соответствует морской зыби.

В качестве динамической модели мы использовали приведенную выше систему уравнений. Начальные условия определялись как ансамбль бегущих в одну сторону волн со средним значением волнового числа $K_0 = 25$. Мы предполагали, что начальное возмущение поверхности задается суммой гармоник со случайными фазами:

$$\eta_0(x) = \sum_{-\frac{1}{2}K_{\max}}^{\frac{1}{2}K_{\max}} \varphi(k - K_0) \cos(kx - \xi_k),$$

где K_{\max} – полное число спектральных мод, ξ_k – случайная величина, равномерно распределенная на интервале $-\frac{1}{2}K_{\max} < k < \frac{1}{2}K_{\max}$. Начальные значения поля скоростей предполагались связанными с формулами линейной теории. Функция $\varphi(k)$ определялась по формуле

$$\varphi(k) = \begin{cases} \delta_k, & |k| > K_w; \\ \kappa \exp(-\alpha k^2) + \delta_k, & |k| \leq K_w. \end{cases}$$

Здесь δ_k – независимые случайные параметры, равномерно распределенные на интервале $-\frac{1}{2}K_{\max} < k < \frac{1}{2}K_{\max}$. Число $1 \leq K_w \leq 10$ – спектральная ширина; κ , α – «внутренние» параметры спектра, определенные так, чтобы «внешние» параметры – квадрат средней крутизны $\mu^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \eta_x^2 dx$ и дисперсия $D = \left(\int_{-K_w}^{K_w} k^2 e^{-\alpha k^2} dk \right) / \left(\int_{-K_w}^{K_w} e^{-\alpha k^2} dk \right)$ – принимали заданные значения. Вклад в полную энергию случайного шума составлял не более 3 %.

В каждом эксперименте время менялось до 10^4 , что соответствовало приблизительно 500 периодам волн. В расчетах полное число гармоник было $K_{\max} = 2048$ или $K_{\max} = 4096$ в зависимости от квадрата средней крутизны. Регистрация волн-убийц производилась с помощью амплитудного критерия $\nu(t) = \frac{H_{\max}(t)}{H_s(t)} > 2.1$, $\mu(t) = \max_{x \in [0, 2\pi]} |\eta_x(x, t)| > 0.3$, где H_{\max} – амплитуда самой высокой волны, а H_s – существенная высота волн, т.е. средняя амплитуда одной трети самых высоких волн.

В работе [9] были получены оценки вероятностей возникновения волн-убийц в зависимости от параметров начального волнения.

Оперативный прогноз волн-убийц. Поскольку в ходе вычислительных экспериментов мы наблюдаем поведение функций $\nu(t)$ и $\mu(t)$, можно построить метод оперативного предсказания возникновения волн-убийц на основе изменения этих функций.

Нами был разработан алгоритм SPRW (Simple Predictor of Rogue Waves), который заключается в следующей схеме. Сигнал о предсказании возникновения волны-убийцы выдается в случае, когда одновременно выполнены следующие условия:

$$\frac{\nu(t + \Delta) - \nu(t)}{\Delta} \geq \alpha,$$

$$\frac{\mu(t + \Delta) - \mu(t)}{\Delta} \geq \beta,$$

где $\Delta > 0$, $\alpha > 0$, $\beta > 0$ суть параметры алгоритма. На основе анализа большого банка данных вычислительных экспериментов наилучший выбор параметров алгоритма SPRW показал точность предсказания, равную 68.94 %, с учетом ошибок первого и второго ро-

да. Под ошибками первого рода понимается несрабатывание критерия при возникшей волне-убийце, а ошибки второго рода, наоборот, есть ложное срабатывание критерия.

На рис.1 приведен рабочий экран программы реализации алгоритма SPRW.

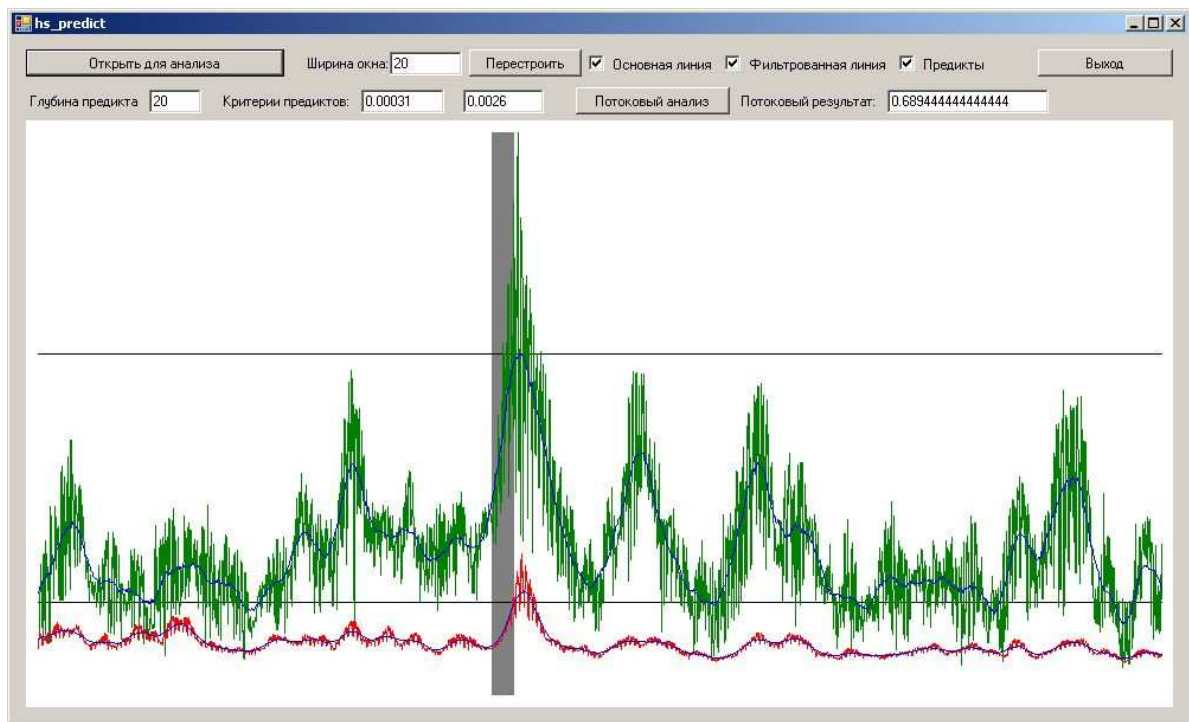


Рис.1. Рабочий экран программы SPRW.

Верхний график – значения функции $v(t)$, нижний – значения функции $\mu(t)$. Горизонтальные линии – критические линии: $v = 2.1$, $\mu = 0.3$, одновременное пересечение которых означает факт возникновения волны-убийцы в вычислительном эксперименте. Широкая вертикальная линия – это момент времени, в течение которого был выдан сигнал о предсказании волны-убийцы.

Типичная ситуация – когда сигнал выдается в непосредственный момент перед возникновением волны-убийцы, что следует из самого алгоритма SPRW. Из опыта применения этого алгоритма, построенного на анализе поведения функций $v(t)$, $\mu(t)$, можно сделать вывод о стохастичности поведения индикаторных функций и соответственно появлению волн-убийц в ходе нелинейной динамики поверхностных волн на воде. Данный вывод во многом совпадает с выводами об отсутствии четких предикторов волн-убийц [1, 22].

Возможности дистанционного обнаружения волн-убийц. В предыдущих разделах мы рассматривали предсказание волн-убийц на основе анализа решений дифференциальных уравнений, описывающих динамику волн на воде. Однако важным является вопрос о возможности дистанционного обнаружения волн-убийц. Мы моделируем ситуацию, когда оперативное наблюдение за волнением ведется с помощью идеального точечного дальномера. Основной вопрос, рассматриваемый здесь, заключается в том, каким образом можно обнаружить появление волн-убийц по показаниям данного «прибора».

Итак, пусть на высоте H установлен неподвижный «прибор», который дает показания о расстоянии от прибора до поверхности волны по лучу, исходящему от прибора под фиксированном углом ($0 < \alpha < \pi/2$) от оси абсцисс. Описанную схему проиллюстрируем на рис.2.

Пусть в фиксированный момент времени t имеем показание, равное R_t , тогда возвышение поверхности в точке пересечения с лучом над нулевым уровнем y_t выразится по формуле

$$y_t = H - R_t \sin \alpha .$$

В дальнейшем удобнее работать с величинами y_t . Будем рассматривать записи вычислительных экспериментов, в которых возникают волны-убийцы. Типичный пример записи показаний прибора приведен на рис.3.

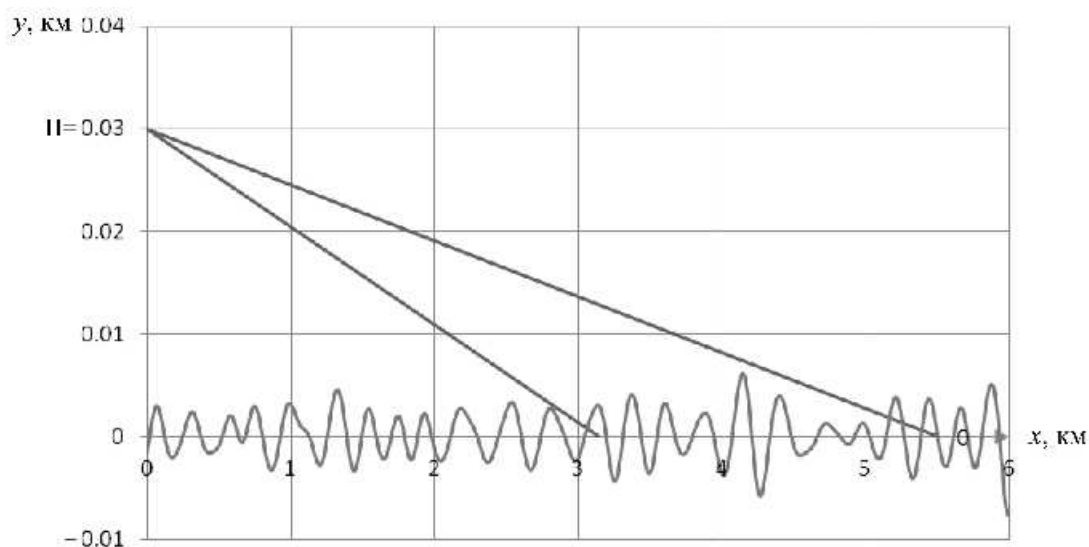


Рис.2. Схема установки прибора.

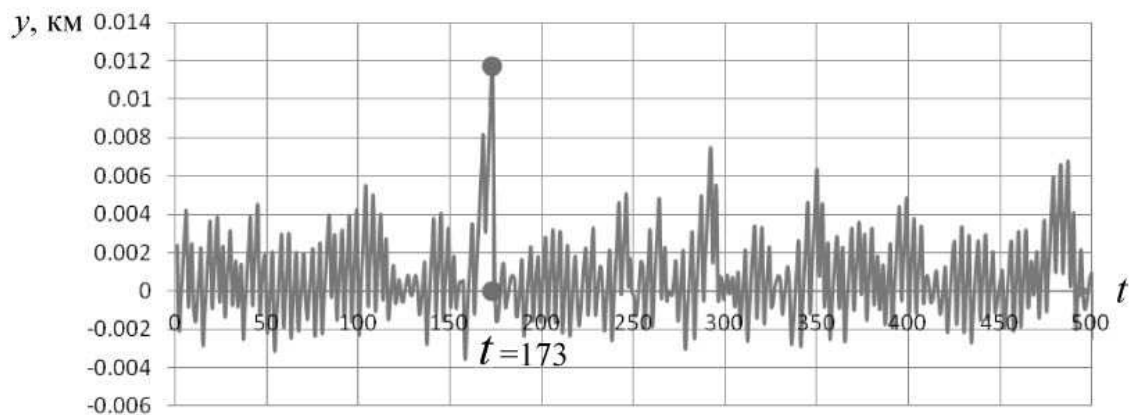


Рис.3. Показания «прибора». При $t = 173$ обнаружена волна-убийца.

На этом рисунке мы можем определить момент возникновения волны-убийцы по резкому возрастанию графика y_t . Для реализации автоматического метода обнаружения волны-убийцы мы будем работать не с функцией y_t , а с функцией квадрата среднего отклонения этой функции от своего среднего значения. Будем считать, что наш прибор дает показания в дискретные моменты времени $t_n = (\Delta t)n, n = 0, 1, \dots, N$.

Введем следующие величины:

$$\bar{y}_N = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^N y_{t_n}, \quad \sigma_N^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{n=0}^N (y_{t_n} - \bar{y}_N)^2$$

(N – количество обрабатываемых отсчетов).

Анализируя изменения σ_N^2 при увеличении N , можно обнаружить возникновение волны-убийцы. Приведем график этой величины для вычислительного эксперимента, рассмотренного на рис.3.

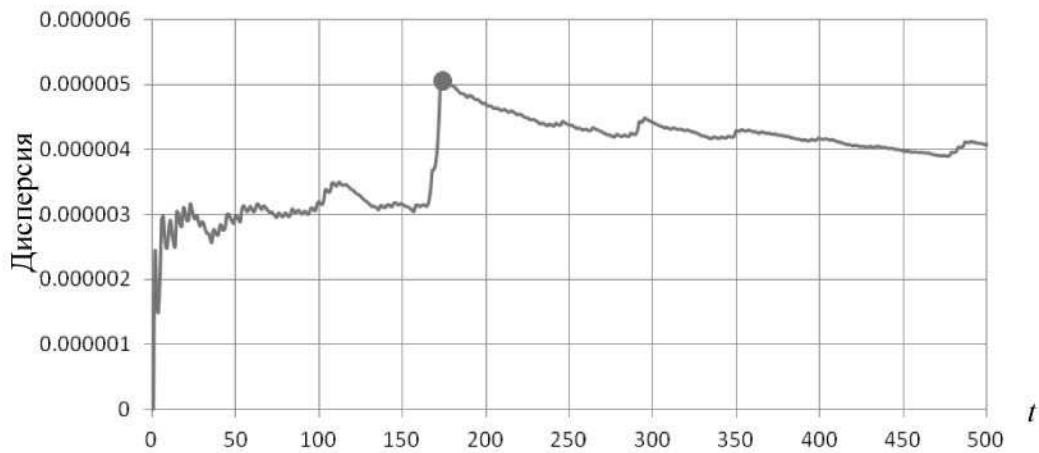


Рис.4. График величины σ_N^2 .

Для обнаружения возникновения волны-убийцы по графику величины σ_N^2 необходимо определять моменты резкого возрастания этой величины. С этой целью проанализируем поведение конечных разностей величины σ_N^2 :

$$d_{N,\tau} = \sigma_N^2 - \sigma_{N-\tau}^2.$$

График величины $d_{N,\tau}$ приведен на рис.5.

Горизонтальной линией на рис.5 обозначено критическое значение величины $d_{N,\tau}$, при достижении которого регистрируется волна-убийца. При этом следует рассматривать данную индикаторную функцию после первых 50 отсчетов.

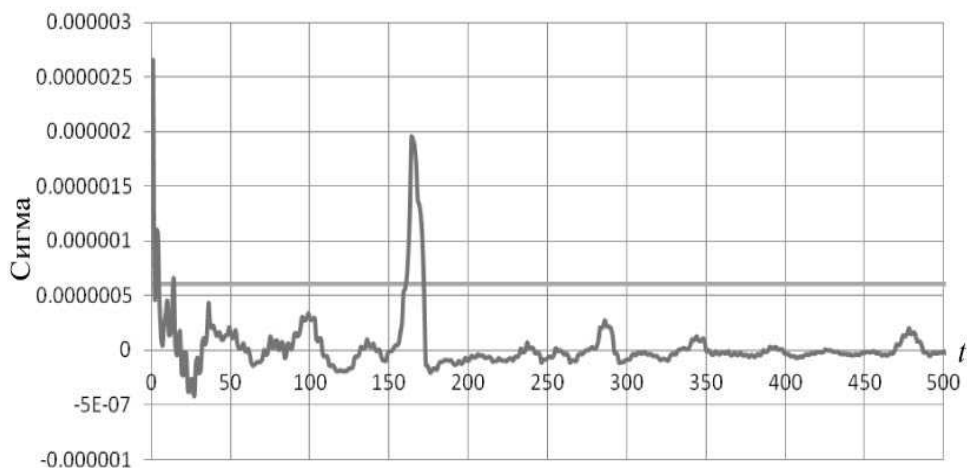


Рис.5. График величины $d_{N,\tau}$, $\tau = 10$.

Уровень критической линии устанавливается эмпирически. Проведенные вычислительные эксперименты по обнаружению волны-убийцы показали свою состоятельность, поскольку позволяют обнаруживать волну-убийцу на расстоянии 4–6 км от регистрирующего прибора.

Вопросы обнаружения волн-убийц с помощью волнограмм. В натуральных экспериментах, посвященных обнаружению волн-убийц, часто используется анализ волнограмм – временная запись возвышения поверхности свободной поверхности в фиксированной точке. С помощью наших экспериментов покажем, что обнаружение аномально больших поверхностных волн только по волнограмме возможно лишь небольшую часть волн-убийц, возникающих в данном районе.

В вычислительных экспериментах мы наблюдаем динамику свободной поверхности – функцию $y = y(x, t)$. На основании этой функции, используя амплитудный критерий, можно обнаруживать экстремальные волны. И в то же время по этой функции построим функцию – волнограмму, получаемую, например, с помощью донного датчика

$$A_s(t) = y(x_0, t), \quad t \in [0, T].$$

Здесь точка x_0 есть место, в котором установлен датчик возвышения поверхности.

Схема этих экспериментов представлена на рис.6, где через S обозначен донный датчик, по показаниям которого вычисляется возвышение поверхности.

По функции $A_s(t)$ также будем обнаруживать волны-убийцы по амплитудному критерию.

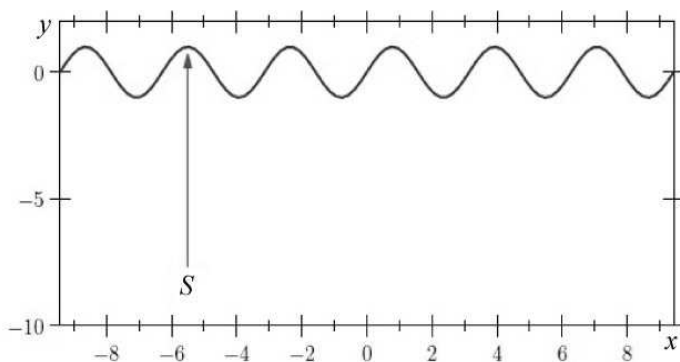


Рис.6. Схема натуральных экспериментов.

Методика моделирования натуральных экспериментов. Для сравнения возможностей натуральных экспериментов с вычислительными используется следующая методика.

1. Проводится большая серия вычислительных экспериментов с различными параметрами начальных волн.

2. В результатах вычислительных экспериментов обнаруживаются волны-убийцы.

3. По полным записям результатов строятся волнограммы – функции $A_s(t)$.

4. По функциям $A_s(t)$ обнаруживаются волны-убийцы согласно правилам обработки данных натуральных.

5. Вычисляется процент совпадения обнаружения волны-убийцы в результате обработки вычислительных экспериментов и обработки волнограмм.

Рассмотрим теперь полученные результаты.

Мы провели эксперименты, в результате которых обнаруживаются волны-убийцы. Постановки наших вычислительных оптов соответствовали, описанным выше. Всего было проведено 1056 элементарных экспериментов. Квадрат средней крутизны принимал значения $\mu^2 = 2.06 \cdot 10^{-3}$, $\mu^2 = 3.08 \cdot 10^{-3}$, $\mu^2 = 4.10 \cdot 10^{-3}$, дисперсия $D \in \{0.07, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21\}$. Для каждого фиксированного значения квадрата средней крутизны и дисперсии проводилось по 32 однотипных численных опыта.

Далее по полным записям результатов вычислительных экспериментов были построены волнограммы, которые затем были проанализированы на предмет обнаружения волн-убийц согласно правилам обработки данных натуральных.

Для каждого значения квадрата средней крутизны и спектральной ширины процент совпадения обнаружения волны-убийцы в результате обработки вычислительных экспериментов и в результате обработки волнограмм представлен на рис.7. Значения по оси

абсцисс соответствуют 11 значениям спектральной ширины, а значения по оси ординат – проценту совпадений обнаружения волны-убийцы в результате обработки вычислительных экспериментов и в результате обработки волнограмм.

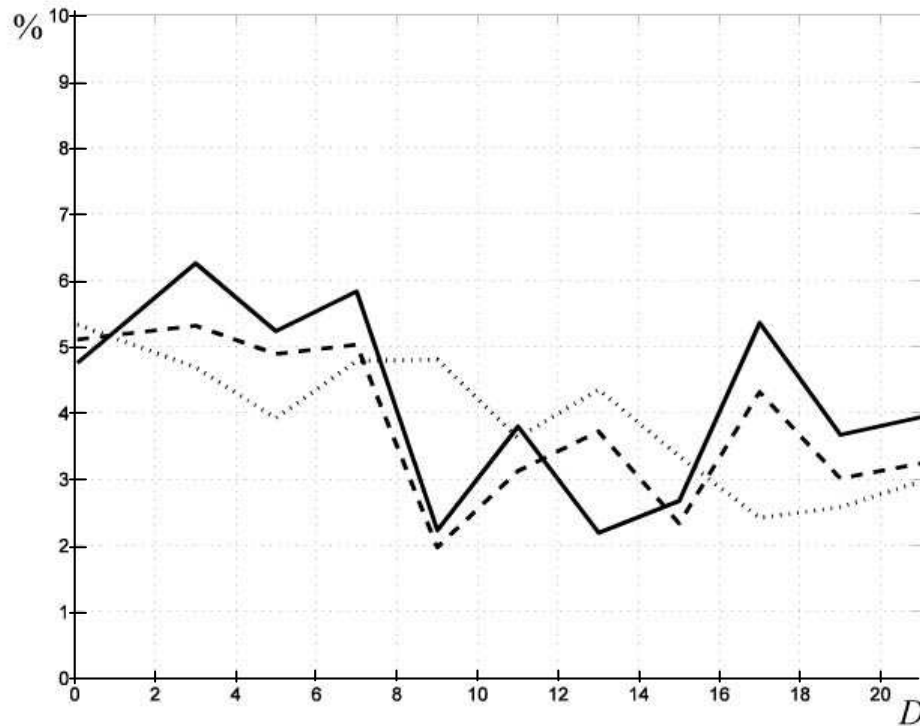


Рис.7. Процент совпадения обнаружения волны-убийцы в результате обработки вычислительных экспериментов и в результате обработки волнограмм.

Мы видим, что вероятность обнаружения волн-убийц по волнограмме оказывается равной 2–6 % в случае наших опытов. При этом использовалась непрерывная запись волнограммы. В реальных экспериментах, как правило, датчики работают с определенной частотой, которая может весьма существенно изменить возможность обнаружения волн-убийц. Сравним теперь результаты обнаружения волн-убийц в вычислительных экспериментах и по прореженным волнограммам (см. таблицу). Будем использовать волнограммы с десятикратным прореживанием (верхняя строчка – дисперсия D).

μ^2	0.07	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21
$2.06 \cdot 10^{-3}$	0.35	1.36	1.00	0.65	0.37	0.67	0	0	1.07	1.41	1.57
$3.08 \cdot 10^{-3}$	0.10	0.39	0.33	1.23	0.33	0.60	0.30	0.21	0.42	0	0.81
$4.10 \cdot 10^{-3}$	0.19	1.18	0.45	0.65	0.28	0.75	0.93	0	0.48	0	0

Мы видим, что вероятность обнаружения волн-убийц по прореженным волнограммам редко превышает 1 %.

Таким образом, обнаружение волн-убийц только по волнограммам приводит к существенно искаженным результатам. Отметим, что Специальным конструкторским бюро автоматизации морских явлений ДВО РАН и Институтом морской геологии и геофизики ДВО РАН, начиная с 2009 г., проводятся серии натурных экспериментов на мысах зал. Анива. Измерения осуществляются с помощью автономных донных регистраторов гидростатического давления, изготовленных в КБ г. Углич. Описание прибора и проводимых экспериментов можно найти в работе [23]. При их проведении было обнаружено возникновение волн-убийц. Однако частота их появления оказывалась значительно

меньшей, чем это предсказывается теорией. Одним из объяснений такого расхождения является тот факт, что в данных экспериментах волны-убийцы обнаруживались по волнограммам. Как было показано выше, при этом удается распознать лишь небольшую часть волн-убийц. В настоящее время ведутся разработки по модификации методики проведения натурных экспериментов.

В данной статье рассмотрены методы обнаружения и предсказания волн-убийц на основании вычислительных экспериментов. Основной вывод, который можно сделать состоит в том, что возникновение волн-убийц, носит стохастический характер. Это совпадает с выводами других авторов. Следовательно, для построения методов прогноза возникновения волн-убийц необходимо использовать методы, основанные на теории случайных процессов и имитационного моделирования. Результаты исследований волн-убийц на основе анализа волнограмм показывают, что имитационное моделирование натурных экспериментов приводит к значительному искажению статистики волн-убийц.

Авторы благодарят акад. В.Е.Захарова за постановку задачи и постоянное внимание к работе.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта НШ-7550.2006.2 и Программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Математические методы в нелинейной динамике», а также гранта Правительства РФ для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных учреждениях высшего профессионального образования (договор № 11.G34.31.0035 от 25 ноября 2010 г. между Минобрнауки РФ, НГУ и ведущим ученым).

Литература

1. *Kharif C., Pelinovsky E., Slunyaev A.* Rogue Waves in the Ocean. Springer, 2009. 216 p.
2. *Henderson K.L., Pelegrine D.H., Dold J.W.* Unsteady water wave modulations: fully nonlinear solutions and comparison with the nonlinear Schrodinger equation // *Wave Motion*. 1999. V.29. P.341–361.
3. *Bateman W.J.D., Swan C., Taylor P.H.* On the efficient numerical simulation of directionally spread surface water waves // *J. comput. Physics*. 2001. V.174. P.277–305.
4. *Chalikov D.* Freak waves: Their occurrence and probability // *Phys. Fluids*. 2009. V.21. Issue 7. P.076602-1–076602-18.
5. *Dyachenko A.I., Zakharov V.E.* On the Formation of Freak Waves on the Surface of Deep Water // *Письма в ЖЭТФ*. 2008. Т.88, № 5. С.356–359.
6. *Захаров В.Е., Шамин Р.В.* О вероятности возникновения волн-убийц // *Письма в ЖЭТФ*. 2010. Т.91, вып.2. С.68–71.
7. *Бухановский А.В., Лопатухин Л.И., Рожков В.А.* Физика и статистика необычных морских ветровых волн // *Изв. Рус. геогр. об-ва*. 2005. Т.137, вып.6. С.19–28.
8. *Lopatoukhin L.J., Boukhanovhky A.V.* Freak wave generation and their probability // *Int. Shipbuild. Progr.* 2004. V.51, N 2/3. P.157–171.
9. *Дивинский Б.В., Левин Б.В., Лопатухин Л.И., Пелиновский Е.Н., Слюняев А.В.* Аномально высокая волна в Черном море: наблюдения и моделирование // *ДАН*. 2004. Т.395, № 5. С.690–695.
10. *Whitney J. C.* The numerical solution of unsteady free-surface flows by conformal mapping // *Proc. Second Inter. Conf. on Numer. Fluid Dynamics* (ed. M.Holt). Springer-Verlag, 1971. P.458–462.
11. *Овсянников Л.В.* К обоснованию теории мелкой воды // *Динамика сплошной среды: сб. науч. тр. АН СССР, СО, Ин-т гидродинамики*. Новосибирск, 1973. Вып.15. С.104–125.
12. *Дьяченко А.И.* О динамике идеальной жидкости со свободной поверхностью // *ДАН*. 2001. Т.376, № 1. С.27–29.
13. *Chalikov D., Sheinin D.* Modeling of Extreme Waves Based on Equations of Potential Flow with a Free Surface // *J. Comp. Phys*. 2005. V.210. P.247–273.
14. *Ruban V.P.* Water waves over a time-dependent bottom: Exact description for 2D potential flows // *Phys. Let. A*. 2005. V.340, N 1–4. P.194–200.
15. *Zakharov V.E., Dyachenko A.I., Vasilyev O.A.* New method for numerical simulation of a nonstationary potential flow of incompressible fluid with a free surface // *Eur. J.-Mech. B Fluids*. 2002. V.21. P.283–291.
16. *Шамин Р.В.* Описание динамики волн на воде на основе дифференциальных включений // *ДАН*. 2011. Т.438, № 4. С.453–455.

17. *Шамин Р.В.* Об одном численном методе в задаче о движении идеальной жидкости со свободной поверхностью // Сиб. журн. вычисл. мат. 2006. Т.9, № 4. С.379–389.
18. *Шамин Р.В.* К вопросу об оценке времени существования решений системы Коши–Ковалевской с примерами в гидродинамике со свободной поверхностью // Совр. математика. Фунд. направления. 2007. Т.21. С.133–148.
19. *Шамин Р.В.* Вычислительные эксперименты в моделировании поверхностных волн в океане. М.: Наука, 2008. 133 с.
20. *Шамин Р.В.* Динамика идеальной жидкости со свободной поверхностью в конформных переменных // Совр. математика. Фунд. направления. 2008. Т.28. С.3–144.
21. *Шамин Р.В.* Поверхностные волны на воде минимальной гладкости // Там же. 2010. Т.35. С.126–140.
22. *Чаликов Д.В.* Статистика экстремальных ветровых волн // Фунд. и прикл. гидрофизика. 2009. Т.5, вып.3. С.4–24.
23. *Зайцев А.И., Малашенко А.Е., Пелиновский Е.Н.* Аномально большие волны вблизи Южного побережья о.Сахалин // Там же. 2011. Т.4, № 4. С.35–42.

Статья поступила в редакцию 24.01.2012 г.

