

С.В.Федоров

*Морской гидрофизический институт РАН, г.Севастополь*

### **ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ ПРОГНОЗА УДАРНЫХ НАГРУЗОК ОТ ДЕЙСТВИЯ ВОЛН НА БЕРЕГА АЗОВСКОГО МОРЯ**

Приведено описание структуры программного модуля и методики прогноза динамических нагрузок на берега от действия разрушающихся волн, разработанного в рамках единого программного комплекса оперативного прогнозирования опасных природных явлений в Азовском море.

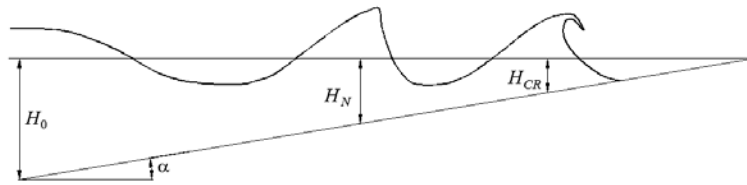
**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** *опасные природные явления, ударные волновые нагрузки на берег, информационные системы*

**Введение.** Экономический урон от воздействия природных катаклизмов огромен и ежегодно (по данным ООН) оценивается в 300 млрд. долларов для всей планеты. Для РФ размеры урона составляют 30 – 60 млрд. руб. Вместе с тем наблюдается значительный рост числа природных катаклизмов, сила которых становится более разрушительной, а масштабы – глобальнее. Поэтому в сложившихся условиях особое внимание уделяется методам оценки рисков возникновения опасных природных явлений и путям предотвращения или минимизации урона при чрезвычайных ситуациях природного характера.

Одним из таких методов является разработка информационных систем прогнозирования и оценки опасных природных явлений. Такие системы основываются на использовании численных моделей, данных спутниковых и натурных наблюдений [1 – 3]. Основное отличие разработанной в рамках проекта Минобрнауки России «Разработка компьютерной системы оперативного прогнозирования опасных природных явлений в бассейне, береговой зоне и акватории Азовского моря» (шифр RFMEFI60414X0050) [4] системы заключается в широком спектре прогнозируемых явлений.

Она включает в себя прогнозирование таких явлений, как изменение уровня воды в реках, возникновение паводков и областей затопления; цветение водорослей в водах водохранилищах; штормовые нагоны и ледовая ситуация в Азовском море; загрязнение нефтепродуктами акватории моря и берегов и других явлений. Разработанная система состоит из набора многофункциональных программных модулей, объединенных в единую ГИС. Для оценки величин ударных волновых нагрузок на участки берега и береговой инфраструктуры, особо подверженные разрушительному действию штормов, был разработан соответствующий программный модуль, описание которого приводится в этой статье.

**Методика расчета ударных волновых нагрузок.** Методика учета трансформации волн на мелководье и определения ударных нагрузок, образующихся при обрушении волн, основывается на положениях, изложенных в [5]. Для расчета ударных волновых нагрузок используются эмпирические соотношения, учитывающие изменение профиля волны и ее обрушение на пологих откосах [6, 7], а для расчета ударных нагрузок – соотношения, приведенные в [8, 9].



Р и с . 1 . К постановке задачи определения ударных нагрузок.

Постановка задачи определения ударных нагрузок от обрушения волн на пологом откосе продемонстрирована на рис.1. Поверхностная гравитационная волна подходит к берегу (глубина  $H_0$ ) с параметрами  $\lambda_0(H_0)$ ,  $h_0(H_0)$ ,  $T_0(H_0)$ ,  $\gamma_0(H_0)$ . При выходе на мелководье (глубина  $H_N$ ), вследствие донного трения, в волне начинают возникать нелинейные эффекты, приводящие к трансформации профиля и направления волны  $\lambda_N(H_N)$ ,  $h_N(H_N)$ ,  $T_N(H_N)$ ,  $\gamma_N(H_N)$ . Крутизна волны увеличивается и достигает максимального значения на критической глубине  $H_{CR}$ , где происходит разрушение волны, сопровождающееся высвобождением энергии и возникновением ударной нагрузки на берег и береговое сооружение.

Таким образом, расчеты сводятся к определению глубин  $H_N$  и  $H_{CR}$ , параметров волн на этих глубинах, при этом параметры волны  $\lambda_{CR}(H_{CR})$ ,  $h_{CR}(H_{CR})$ ,  $T_{CR}(H_{CR})$ ,  $\gamma_{CR}(H_{CR})$  служат исходными данными для определения ударных нагрузок на берег. Приведенные обозначения  $\lambda$ ,  $h$ ,  $T$ ,  $\gamma$  соответствуют длине, высоте, периоду и направлению распространения волны, а индексы «0», «N», «CR» – параметрам недеформированной волны, деформированной волны вследствие донного трения и волны в момент ее обрушения соответственно.

В рамках всей системы прогнозирования опасных явлений модуль расчета ударных волновых нагрузок взаимодействует с волновым модулем, включающим в себя адаптированную к условиям Азовского моря спектральную волновую модель SWAN [10]. Из него в качестве входных данных поступают параметры недеформированной волны и рельеф дна. Параметры недеформированной волны средняя длина волны  $\lambda_0$ , значительная высота  $h_0$ , средний период  $T_0$ , среднее направление волн  $\gamma_0$  берутся из ближайшего (по направлению нормали) к берегу узла расчетной сетки SWAN. Рельеф дна использовался для определения угла наклона дна, координат узлов береговой линии и угла направления нормали к берегу.

Подобный подход использовался для определения волновых полей при проектировании комплекса берегозащитных сооружений в береговой зоне Имеретинской низменности (Олимпийский комплекс, г.Сочи) [11]. В этой работе параметры волн вначале рассчитывались по модели SWAN, а затем задавались в качестве граничных условий в модели HWAVE [12] для более точного расчета волнения в прибрежной зоне с учетом трансформации волн на мелководье. В [13] определение давления (удельной нагрузки) вследствие наката и обрушения поверхностных волн осуществляется путем решения системы уравнений Навье-Стокса.

Глубина  $H_N$ , при которой начинает возникать неустойчивость, и параметры волны на этой глубине  $\lambda_N$ ,  $h_N$  определялись из закона сохранения энергии и эмпирических соотношений, учитывающих трансформацию про-

филя волны на пологом откосе [6, 7]:

$$h_0^2 \lambda_0 \cos \gamma_{0n} = h_N^2 \lambda_N, \quad (1)$$

$$h_N = C_H h_0 (\lambda_0 / H_N)^{1/4}, \quad (2)$$

$$\lambda_N = C_\lambda (\lambda_0^2 \cdot H_N)^{1/3}, \quad (3)$$

где  $\gamma_{0n}$  – проекция угла распространения волн на нормаль к берегу;  $C_H, C_\lambda$  – коэффициенты ( $C_H = (\lambda_0/H_N)^{-1/4}$ ,  $C_\lambda = (\lambda_0/H_N)^{1/3}$ ).

Т.к. условие развития неустойчивости в волне наблюдается при соотношении  $7 \cdot h_N = \lambda_N$ , то высота волны  $h_N$  может быть просто выражена из (1), а длина волны  $\lambda_N$  и глубина  $H_N$  – из уравнений (2), (3):

$$h_N = \frac{1}{7} (h_0^2 \lambda_0 \cos \gamma_{0n})^{1/3}, \quad (4)$$

Полное разрушение волны происходит на глубине  $H_{CR}$ , при этом длина  $\lambda_{CR}$  и высота волны  $h_{CR}$  описываются следующим соотношением:

$$H_{CR} = 4,368 \cdot h_N^{1,714} \lambda_N^{0,714}, \quad (5)$$

Для получения замкнутой системы уравнений к (5) добавим соотношения (2) и (3), заменив в них индексы:

$$h_{CR} = C_H h_N (\lambda_N / H_{CR})^{1/4}, \quad (6)$$

$$\lambda_{CR} = C_\lambda (\lambda_N^2 \cdot H_{CR})^{1/3}, \quad (7)$$

Расчет ударных волновых нагрузок ( $\tau/\text{м}^2$ ) осуществляется по ряду соотношений, приведенных в [8, 9]:

$$p_1 = 3\pi\rho \cdot h_{CR}^2 / (4\lambda_{CR}) + \rho \cdot h_{CR} / 2, \quad (8)$$

$$p_2 = 0,09 \cdot T^2, \quad (9)$$

$$p_3 = 0,6h_{CR}, \quad (10)$$

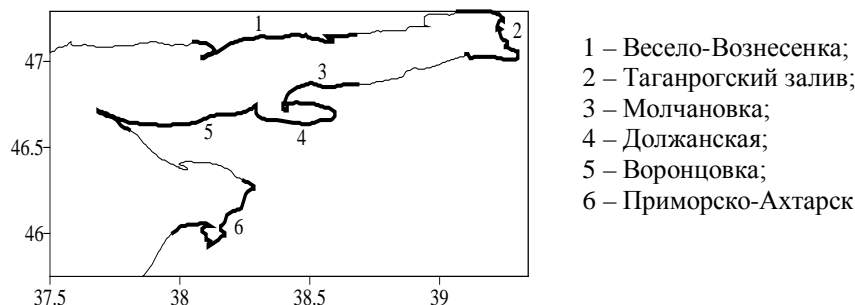
$$p_4 = \rho v^2 = \rho(H_{CR} + 0,5h_{CR}), \quad (11)$$

$$p_5 = \frac{\rho}{2l_0} \cdot \int_{-b}^b \eta^2 d\eta, \quad (12)$$

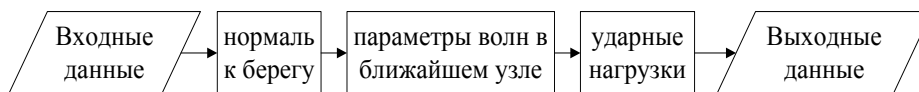
где  $T$  – период волны в момент разрушения;  $\eta$  – профиль волны, удовлетворяющий уравнению Кортевега-де Фризе;  $v$  – скорость гребня разрушающейся волны;  $l_0$  – путь, который проходит гребень волны.

**Структура программного модуля.** В информационной системе прогнозирования опасных явлений модуль расчета ударных волновых нагрузок используется для определения ударных нагрузок на побережье Таганрогского залива и Ейского лимана, сел Весело-Вознесенка, Воронцовка, хутора Молчановка, г.Приморско-Ахтарск, Керченского пролива, где расположены важные рекреационные и гидротехнические объекты Ростовской области и Краснодарского края (рис.2).

Структура модуля показана на рис.3. В качестве входных данных используются параметры поверхностных волн, батиметрия и координаты береговой линии. В каждом узле береговой линии определяется направление нормали (рис.4). Для этого в окрестности узла (узел 3 на рис.4), в котором оп-



Р и с . 2 . Участки береговой линии Азовского моря, для которых осуществляется оценка ударных волновых нагрузок.



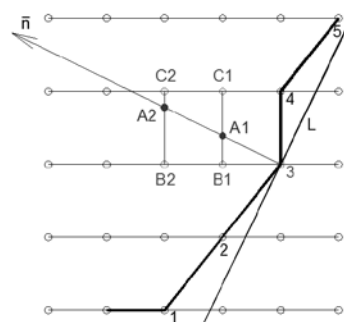
Р и с . 3 . Структура модуля расчета ударных волновых нагрузок.

ределяется направление нормали, береговая линия (ломаная линия, соединяющая узлы 1 – 5) аппроксимируется прямолинейным участком (линия L). Для L составляется уравнение прямой с угловым коэффициентом  $y = a \cdot x + b$ . Коэффициенты  $a$  и  $b$  определяются методом наименьших квадратов по координатам пяти соседних узлов береговой линии (узлы 1 – 5). Зная коэффициент  $a$ , величина которого равна тангенсу угла наклона береговой линии в узле, можно определить направление нормали.

Далее определяются координаты точки ближайшей к расчетному узлу A1. Фактически определяются два ближайших узла A1 и A2, т.к. в местах с высокой кривизной береговой линии в точке A1 в расчетах SWAN может быть не рассчитаны волны. В этом случае за ближайший будет принят узел A2. Пара узлов C1; B1 и C2; B2, которые являются узлами ячейки сетки SWAN, служат для интерполяции параметров волн и глубины моря в узлах A1 и A2.

Параметры волн в ближайших узлах далее используются в соотношениях (1) – (12) для расчета параметров волны при выходе на мелководье и величин ударных волновых нагрузок. Рассчитанные параметры передаются для визуализации и анализа в управляющую информационную систему.

На рис.5 представлены результаты вычисления ударных нагрузок для участка Весело-Вознесенка, параметры волн рассчитаны для скорости ветра 15 м/с. Как видно, оценки нагрузок, полученные по (8) – (12), отличаются по величине. При этом формулы (8) – (10) дают близкие результаты (рис.6, а), а формула (11) дает величины нагрузок примерно в два раза больше, чем однопараметрические формулы (9) – (10). Формула (12) дает величины меньшие в 4 – 5 раз, при этом их взаимосвязь характеризуется четко выраженной степенной зависимостью (рис.6, б).



Р и с . 4 . К определению нормали к берегу и интерполяции результатов SWAN.

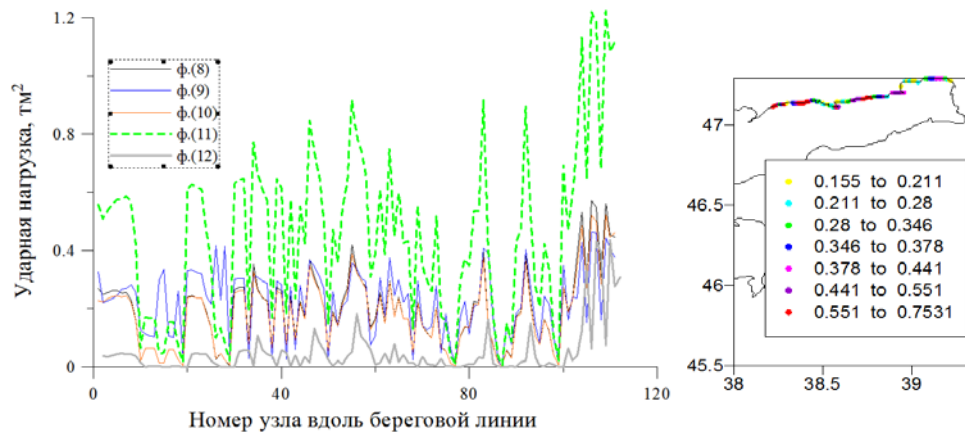


Рис. 5. Пример визуализации результатов расчетов (график и цветные пиксели вдоль береговой линии).

Разработанная система прогноза в настоящее время находится на стадии тестирования, поэтому детальный анализ результатов расчетов ударных нагрузок может быть выполнен только после завершения тестов и накопления достаточного материала.

**Заключение и выводы.** Разработанный программный модуль позволяет рассчитывать волновые нагрузки на берег и береговые сооружения, формирующиеся при разрушении волны на мелководье, по известному полю ветровых волн, глубинах моря и координатах береговой линии. Файл параметров, через который осуществляется управление и настройка модуля, позволяет использовать модуль для берегов любых акваторий.

Работа выполнена при поддержке проекта Минобрнауки России «Разработка компьютерной системы оперативного прогнозирования опасных природных явлений в бассейне, береговой зоне и акватории Азовского моря» ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы» (RFMEFI60414X0050).

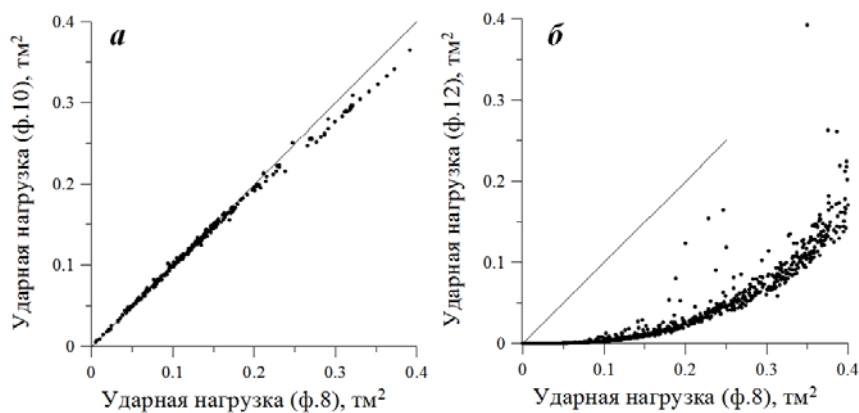


Рис. 6. Результаты сопоставления ударных нагрузок, вычисленных по разным формулам.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зеленько А.А.* и др. Система прогнозирования ветрового волнения в Мировом океане и морях России // Труды ГОИН. Исследования океанов и морей.– 2014. – вып.215.– С.90-101.
2. *Разработка* прогноза развития аккумулятивных берегов бесприливных морей России. Отчет.– ИО РАН, 2015.– 141 с.
3. *Холод А.Л.* и др. Автоматическая система мониторинга морской среды Севастопольского региона Черного моря // Морской гидрофизический журнал.– 2015.– № 4(184).– С.75-87.
4. *Матишов Г.Г.* и др. О проекте «Разработка компьютерной системы оперативного прогнозирования опасных природных явлений в бассейне, береговой зоне и акватории Азовского моря» // Экология. Экономика. Информатика. Т.1. «Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем». – 2014.– С.56-61.
5. *Кушнир В.М., Душко В.Р., Крамарь В.А.* Воздействие поверхностных гравитационных волн на прибрежные океанотехнические сооружения // Восточно-европейский журнал передовых технологий.– 2013.– № 6/5 (66).– С.36-41.
6. *Смирнов А.А.* Изменение высоты и длины волны на пологих откосах // Волновые исследования.– М.: Госстройиздат, 1962.– С.37-60.
7. *Смирнов А.А.* Глубина обрушения волны на пологих откосах / Волновые исследования.– М.: Госстройиздат, 1962.– С.177-184.
8. *Шулейкин В.В.* Физика моря.– М.: Изд. АН СССР, 1953.– 989 с.
9. СНиП 2.06.04-82. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов).
10. SWAN. Technical documentation. - Delft University of Technology, Faculty of Civil Eng. and Geosciences, Environmental Fluid Mechanics Section. – 2006. – 88 p.
11. *Кантаржи И.Г., Кузнецов К.И.* Натурные изменения волнения при определении нагрузок на морские гидротехнические сооружения // Инженерно-строительный журнал.– 2004.– № 4.– С.49-62.
12. *Демченко Р.И., Железняк М.И.* Гиперболическая аппроксимация трансформации волн на течениях прибрежной зоны // Прикладная гидромеханика.– 2012.– т.4(76), № 2.– С.23-29.
13. *Аббасов И.Б.* Трехмерная модель наката нелинейных поверхностных гравитационных волн на берег мелководья // Вычислительная механика сплошных сред.– 2013.– т.6, № 4.– С.403-409.

Материал поступил в редакцию 09.02.2016 г.  
После доработки 25.06.2016 г.

S. V. Fedorov

#### **SOFTWARE MODULE FOR FORECAST OF DYNAMIC WAVE LOADS ON THE SEA OF AZOV'S SHORE**

It is given a description of the structure and methodology of a software module for forecast of the dynamic wave loads on the banks due to waves collapsing. Software is developed in the framework of a software complex for operational forecasting of natural hazards in the Sea of Azov.

KEYWORDS: natural hazards, dynamic wave loads on the shore, information systems