

ТРАНСФОРМАЦИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С БЕРЕГОЗАЩИТНЫМИ СООРУЖЕНИЯМИ В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ С РЕАЛЬНЫМ РЕЛЬЕФОМ ДНА

С.Ю. Михайличенко, Д.Ю. Куранов

Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь

liham1984@rambler.ru

Аннотация. С использованием гидродинамической негидростатической модели SWASH и спектральной волновой модели SWAN в работе проведено исследование взаимодействия нерегулярного поверхностного волнения с подводными волноломами в прибрежной зоне заповедника «Херсонес Таврический». Выполнена серия численных экспериментов с различными схемами расположения гидротехнических сооружений в акватории городища. Проанализировано влияние берегозащитных сооружений на характер и структуру формируемых волновых полей. Показано, что при взаимодействии поверхностных волн с волноломами во всех рассмотренных случаях происходит трансформация волнового поля с формированием в бассейне акватории зон как ослабленного, так и усиленного волнения. Рассчитаны величины высот значительных волн и проанализирована эффективность гашения волновой энергии гидротехническими сооружениями. Сделаны выводы о пригодности использования рассмотренных схем расположения волноломов для защиты аварийноопасных участков побережья заповедника.

Ключевые слова: негидростатическая модель SWASH, модель SWAN, нерегулярное поверхностное волнение, волнолом, высота значительных волн, коэффициент трансформации, заповедник «Херсонес Таврический».

Введение. Известно, что наиболее интенсивную нагрузку на береговую зону оказывает поверхностное волнение, которое может вызывать размыв берегов и затопление прибрежных районов, что приводит к значительному материальному ущербу. Поэтому защита берегов от разрушительного волнового воздействия остается одной из наиболее актуальных задач сегодняшнего дня. Территория древнего городища заповедника «Херсонес Таврический» расположена на выступе береговой линии Гераклейского п-ова между бухтами Карантинная и Песочная. Общая протяженность морской границы Херсонесского городища составляет около 1800 м. Разрушение берегов заповедника «Херсонес Таврический» приводит к сокращению площади древнего городища, постепенному уничтожению археологических и исторических памятников, что определяет необходимость проведения комплекса берегозащитных мероприятий. Предлагавшиеся ранее проекты защиты берегов заповедника «Херсонес Таврический» были отклонены в первую очередь по причине предполагаемого существенного изменения внешнего вида берегов, как это, например, предусматривал проект, описание которого приводится в статье [1]. Одним из наиболее распространенных в мировой практике способов защиты побережья от интенсивного поверхностного волнения является строительство волноломов. Исследованию взаимодействия поверхностных волн с волноломами посвящено значительное число научных трудов [2–7]. Использование заглубленных волноломов являет-

ся принципиально новым инженерным решением, позволяющим сохранить исторический ландшафт берегов древнего городища и прилегающей акватории моря.

В данной работе методом численного моделирования исследовалось взаимодействие нерегулярного поверхностного волнения с подводными волноломами в прибрежной зоне заповедника «Херсонес Таврический». Расчеты велись с использованием гидродинамической негидростатической модели SWASH [8], позволяющей проводить моделирование различных нестационарных гидродинамических процессов с быстро изменяющимися потоками, таких как затопление берегов в результате прорыва дамбы или наката цунами, приливов, ветровых нагонов, а также трансформации волн в прибойной зоне.

Работа была разделена на два этапа. На первом этапе с помощью волновой модели SWAN [9] рассчитывались граничные и начальные условия на северной жидкой границе прибрежной акватории Херсонеса для ураганного ветра ($=25$ м/с) северо-северо-западного направления.

Математическая постановка задачи.

Для расчета спектра развитого волнения на северной границе исследуемого региона на первом этапе работы применялась волновая модель SWAN. В работе использовался алгоритм вложенных сеток, описанный в статье [10]. При проведении расчетов применялся параллельный вариант модели SWAN, реализованный на вычислительном кластере Мор-

ского гидрофизического института РАН. По частотной координате задавалась сетка, состоящая из 31 узла и покрывающая интервал 0,02–2 Гц. Угловое разрешение при определении волнового спектра составляло 10° . Донное трение задавалось по модели Гранта – Мадсена с коэффициентом шероховатости донной поверхности m .

На втором этапе с помощью гидродинамической модели SWASH проводился расчет взаимодействия нерегулярного волнения с подводными волноломами в акватории Херсонеса. Основу модели составляют нелинейные уравнения мелкой воды, включающие слагаемое с негидростатическим давлением:

$$\frac{d\zeta}{dt} + \frac{dxu}{dx} + \frac{dxv}{dy} = 0, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{du}{dt} + u \frac{du}{dx} + v \frac{du}{dy} + g \frac{d\zeta}{dx} + \frac{1}{h} \int_{-d}^{\zeta} \frac{dq}{dx} dz + c_f \frac{u \sqrt{u^2 + v^2}}{h} = \\ = \frac{1}{h} \left(\frac{dh\tau_{xx}}{dx} + \frac{dh\tau_{xy}}{dy} \right), \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{dv}{dt} + u \frac{dv}{dx} + v \frac{dv}{dy} + g \frac{d\zeta}{dy} + \frac{1}{h} \int_{-d}^{\zeta} \frac{dq}{dy} dz + c_f \frac{v \sqrt{u^2 + v^2}}{h} = \\ = \frac{1}{h} \left(\frac{dh\tau_{yx}}{dx} + \frac{dh\tau_{yy}}{dy} \right), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\tau_{xx} = 2\nu_t \frac{du}{dx}, \tau_{xy} = \tau_{yx} = \nu_t \left(\frac{du}{dy} + \frac{dv}{dx} \right), \tau_{yy} = 2\nu_t \frac{dv}{dy} \quad (4)$$

где t – время; x, y, z – декартовы координаты; ось z

направлена вверх; $\zeta(x, y, t)$ – отклонение свободной поверхности от невозмущенного уровня; $h = d + \zeta$ – полная глубина, равная сумме уровня свободной поверхности и глубины при невозмущенном состоянии жидкости; u, v – компоненты скорости течения; $q(x, y, z, t)$ – негидростатическая добавка к давлению; g – ускорение свободного падения; c_f – коэффициент донного трения; $\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yx}, \tau_{yy}$ – компоненты тензора горизонтальных турбулентных напряжений; ν_t – коэффициент турбулентной вязкости.

Коэффициент донного трения рассчитывался по формуле Маннинга:

$$c_f = g \frac{n^2}{h^{1/3}}, \quad (5)$$

где n – параметр шероховатости, $n = 0,019 \text{ м}^{-1/3} \cdot \text{с}$ [8].

Коэффициент горизонтальной турбулентной вязкости рассчитывался по гипотезе Прандтля [11];

$$\nu_t = l_m^2 \sqrt{2 \left(\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right)}, \quad (6)$$

где l_m – длина перемешивания, которая пропорциональна высоте волн.

Численные эксперименты проводились в бассейне с реальной геометрией и батиметрией прибрежной акватории заповедника «Херсонес Таврический» (рис. 1).

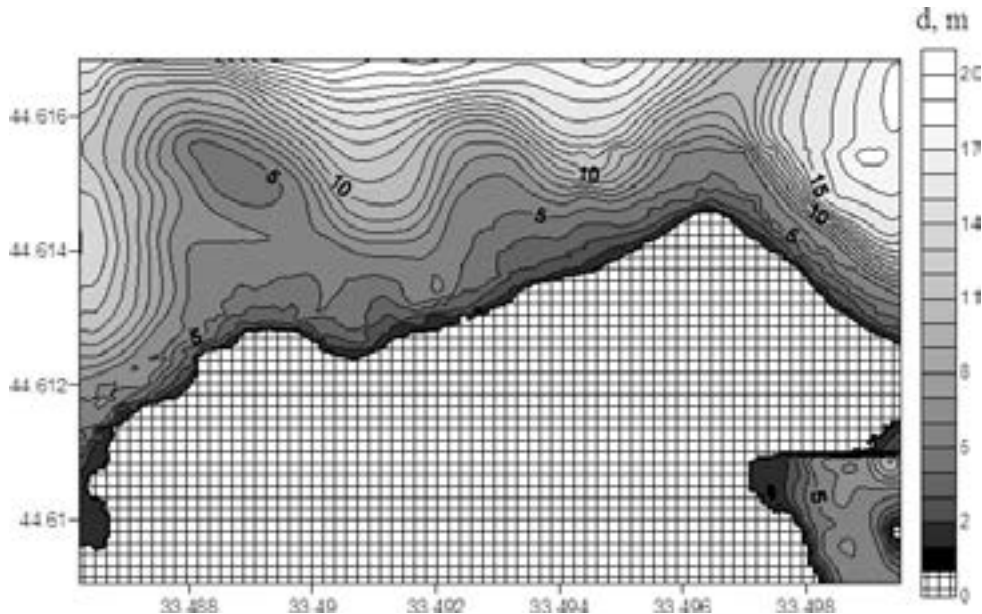


Рис. 1 Батиметрия прибрежной акватории Херсонеса

В расчетах использовалась прямоугольная сетка с шагом по пространственным координатам $\Delta x = \Delta y \approx 3,0 \text{ м}$. Шаг интегрирования по времени составлял $\Delta t = 0,01 \text{ с}$. Моделируемый интервал времени составлял 7 минут.

На боковых жидких границах расчетной области задавались условия свободного прохождения:

$$\frac{du}{dt} + \sqrt{gh} \frac{du}{dx} = 0, \quad (7)$$

На северной жидкой границе в качестве граничных условий использовались значения спектра развитого волнения, рассчитанные с помощью модели SWAN.

Результаты численных экспериментов.

В работе проведено исследование взаимодействия нерегулярного волнения с подводными волноломами прямоугольной формы в прибрежной зоне Херсонеса. Сравнительной характеристикой была выбрана высота значительных волн H_s .

Анализ современного состояния береговой линии

городища показал наличие трех основных аварийных участков побережья: зона расположения средневековой базилики, которая является “визитной карточкой” Херсонеса; район расположения 6-столпного храма (в центральной части побережья) и район Уваровской базилики (рис. 2). Именно эти участки побережья в первую очередь требуют защиты от штормов.



Рис. 2 Аварийные участки береговой линии городища

С этой целью в работе было проведено два численных эксперимента с различным расположением и длиной подводных волноломов. Расстояние от уровня невозмущенной поверхности воды до гребня волнолома в обоих случаях было одинаковым – 0,5 м. Ширина волноломов в обоих случаях была одинакова и составляла 6 м.

В первом эксперименте рассматривался случай размещения одного сплошного волнолома длиной 420 м и шириной 6 метров на расстоянии от 70 до 150 м от уреза воды. Волнолом располагался почти перпендикулярно генеральному распространению волн, параллельно северной границе акватории.

Как показали численные эксперименты, высоты волн, заходящих в расчетную область, имеют значения от 3,2 до 3,8 м (рис. 3). По мере своего распространения к побережью высоты волн постепенно уменьшаются. Подходящие к волнолому волны имеют высоты в 2,0–2,7 м. За волноломом наблюдается формирование зоны обширной волновой тени, покрывающая все три аварийноопасных участка побережья. Здесь высоты волн уменьшаются до 0,6–0,9 м. Непосредственно к берегу в этой области подходят волны с высотами 0,5–0,7 м.

Во втором эксперименте рассматривался случай, когда каждый из трех аварийных участков побережья был экранирован отдельным подводным волноломом. Ориентация всех трех берегозащитных сооружений была аналогичной, как в 1 эксперименте – параллельно северной границе акватории. Длина каждого из волноломов была различной – от 100 до 120 м. Расстояние от берега составляло от 120 до 150 м.

В данном случае за каждым из волноломов наблюдается формирование зоны волновой тени. Высоты волн, подходящих к препятствиям, составляют 1,6–2,5 м (рис. 4). После прохождения препятствия они уменьшаются до 0,7–0,9 м. К участкам берега, расположенным рядом с волноломами подходят волны с высотами 0,5–0,7 м. К остальным участкам побережья подходят волны с высотами 1,0–1,5 м.

Таким образом, из представленных результатов численных экспериментов видно, что применение сплошных протяженным берегозащитных сооружений с незначительным заглублением гребня приводит к заметному ослаблению сильного штормового волнения, подходящего к побережью. Во всех случаях наблюдалось снижение высот волн на 50–75 %, что говорит о наличии заметных волногасящих свойств подобного рода сооружений.

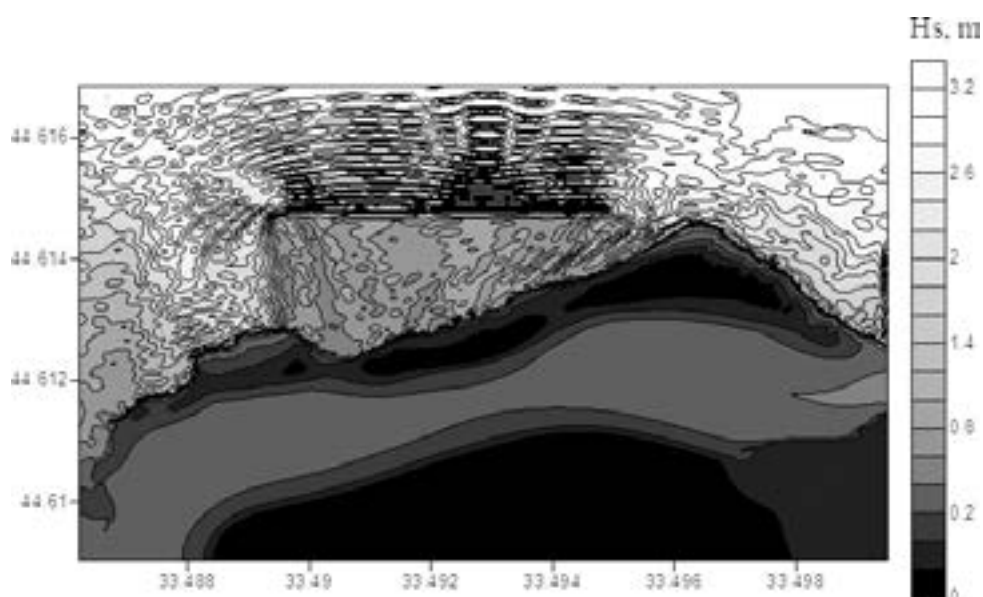


Рис. 3 Поле высот значительных волн в акватории Херсонеса для случая с общим протяженным волноломом

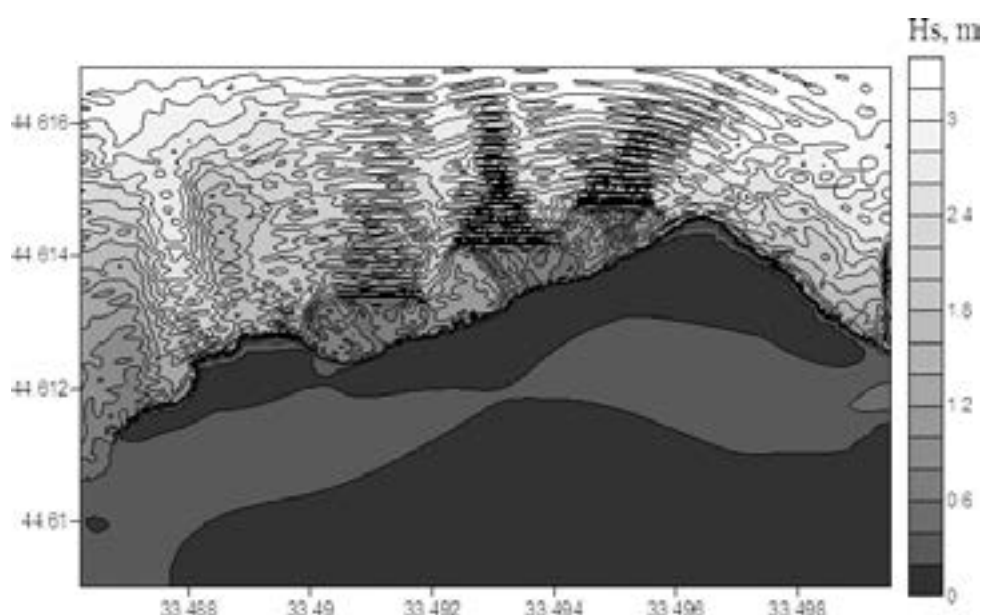


Рис. 4 Поле высот значительных волн в акватории Херсонеса для случая с тремя отдельными волноломами

Выводы. С использованием гидродинамической негидростатической модели SWASH и спектральной волновой модели SWAN в работе проведено исследование взаимодействия нерегулярного поверхностного волнения с подводными волноломами в прибрежной зоне заповедника «Херсонес Таврический». Во всех случаях ширина волнолома (6,0 м) и глубина до гребня (0,5 м) не менялись. Варьировалось только количество и длина берегозащитных сооружений. Было проведено 2 численных эксперимента – с одним общим протяженным

волноломом длиной 420 м и тремя отдельными с длинами от 100 до 120 м. В обоих случаях за берегозащитными сооружениями наблюдалось формирование зоны волновой тени протяженностью, сопоставимой с длиной препятствия, где высоты волн снижались на 50–75 %. Таким образом, проведенные эксперименты показали возможность эффективного гашения энергии штормовых волн при использовании непроницаемых подводных берегозащитных сооружений с незначительным заглублением гребня.

Список литературы

1. Ромащенко М.И., Ляшевский В.И., Войтович И.В. та ін. Берегоукріплення древнього городища «Херсонес Таврійський» // Екологічна безпека прибережної і шельфової зон і комплексне використання ресурсів шельфа. – Севастополь: ЕКОСИ-Гідрофізика, 2011. – Вип. 25. – С. 111–116.
2. Mellink B.A. Numerical and experimental research of wave interaction with a porous breakwater / Master's thesis. A basis for numerical modelling of the notional permeability P.– Netherlands: Delft University of Technology, 2012. – 106 p.
3. Liang, B., Wu G., Liu F., Fan H., Li H. Numerical study of wave transmission over double submerged breakwaters using non-hydrostatic wave model // Oceanologia. – 2015. – v.57. – P.308–317.
4. Losada I.J., Lara J.L., Guanche R., Gonzalez-Ondina J.M. Numerical analysis of wave overtopping of rubble mound breakwaters // Coastal Engineering. – 2008. – v.55. – P.47–62.
5. Briganti R., Van der Meer J.W., Buccino M., Calabrese M. Wave transmission behind lowcrested structures // Coastal Structures. – 2003. – P.580–592.
6. Lara J.L., Losada I.J., Guanche R. Wave interaction with low-mound breakwaters using a RANS model // Ocean Engineering. – 2008. – v.35. – P.1388–1400.
7. Корзинин Д.В. Трансформація волн над поглинуваним баром по даним фізичного і математичного моделювання // Екологічна безпека прибережної і шельфової зон і комплексне використання ресурсів шельфа. – 2017. – № 4. – С. 14–21.
8. SWASH User Manual / The SWASH team. – Netherlands: Delft University of Technology, 2012. – v.1.10A. – 91 p.
9. SWAN Cycle III version 40.85, User Manual, Delft University of Technology, Netherlands. – 2012. – 119 p. – (<http://swan.ct.tudef.nl>).
10. Михайличенко С.Ю. Исследование режимов штормового волнения в акватории Херсонеса // Экологическая безопасность прибережної і шельфової зон моря. – 2014. – № 29. – С. 22–30.
11. Доронин Ю.П. Физика океана. – Л.: Гидрометеиздат, 1978. – 294 с.

TRANSFORMATION OF SURFACE GRAVITATIONAL WAVES AT INTERACTION WITH SHORE-PROTECTIVE STRUCTURES IN A COASTAL ZONE WITH REAL BORDER RELIEF

S.Ju. Mihajlichenko, D.Yu. Kuranov

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol

Abstract. Using the hydrodynamic non-hydrostatic SWASH model and the SWAN spectral wave model, the study of the interaction of irregular surface waves with submerged breakwaters in the coastal zone of the reserve “Tauric Chersonesos” was conducted. A series of numerical experiments with various layouts of hydraulic engineering structures in the area of the ancient settlement was carried out. The influence of bank protection structures on the nature and structure of wave fields formed is analyzed. It is shown that in the interaction of surface waves with breakwaters, in all considered cases, the wave field transforms with the formation of zones of both weakened and enhanced waves in the water area. The heights of significant waves were calculated and the efficiency of damping the wave energy by hydraulic structures was analyzed. Conclusions are made about the suitability of using the considered schemes for the location of breakwaters to protect the emergency areas of the reserve coast.

Key words: non-hydrostatic SWASH model, SWAN model, irregular surface wave, breakwater, height of significant waves, preserve “Tauric Chersonesos”.