

Д.В. Алексеев, В.В. Фомин, Е.В. Иванча, Л.В. Харитонова,
Л.В. Черкесов

Математическое моделирование ветрового волнения в Севастопольской бухте

С использованием вычислительного кластера Морского гидрофизического института НАН Украины на основе метода вложенных сеток выполнено численное моделирование ветрового волнения в Севастопольской бухте с высоким пространственным разрешением. Определены направления ветра, вызывающие наиболее интенсивное волнение. Проанализирована возможность ослабления ветровых волн в случае сооружения подводного волнолома вблизи Артиллерийской бухты.

Ключевые слова: Севастопольская бухта, ветровые волны, волнолом, кластер.

Введение. Севастопольская бухта вытянута в зональном направлении с запада на восток, вдаваясь вглубь Крымского п-ова почти на 8 км. Наибольшая ширина бухты близка к 1 км, а глубины постепенно уменьшаются от 20 м на западе до 4 – 5 м на востоке в районе впадения р. Черная [1]. Береговая линия характеризуется значительной изрезанностью вследствие наличия бухт и мысов (рис. 1).

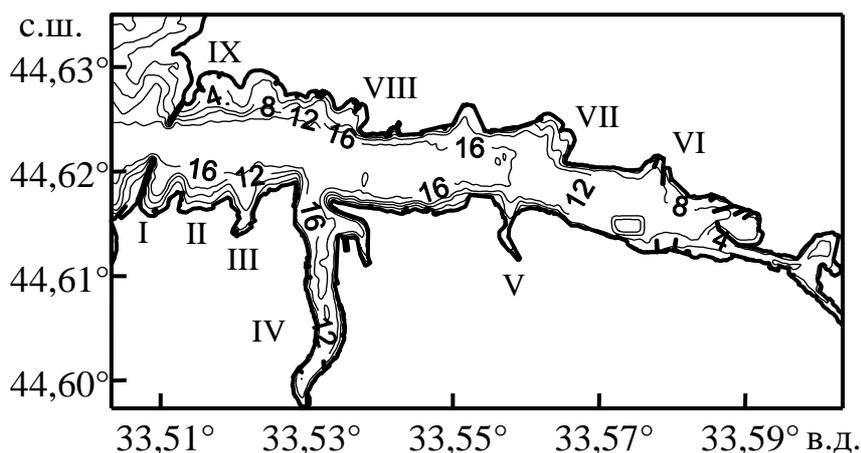


Рис. 1. Батиметрия Севастопольской бухты (м). Римскими цифрами обозначены: I – Мартьянова бухта; II – Александровская бухта; III – Артиллерийская бухта; IV – Южная бухта; V – Килен-бухта; VI – Сухарная бухта; VII – бухта Голландия; VIII – Северная бухта; IX – Константиновская бухта

Севастопольская бухта активно используется как в хозяйственных, так и в военных целях. Здесь расположены торговый и пассажирский порты, судоремонтные заводы, дислоцируются военно-морские флоты Украины и

© Д.В. Алексеев, В.В. Фомин, Е.В. Иванча, Л.В. Харитонова, Л.В. Черкесов, 2012

России [2]. По берегам бухты расположены промышленные предприятия и жилые районы.

Известно, что штормовое волнение нередко нарушает функционирование морехозяйственных комплексов, приводит к обрушению берегов, разрушению береговых построек, значительному материальному ущербу и человеческим жертвам [3]. Например, во время шторма 11 ноября 2007 г. волны, вызываемые северо-западным ветром, проникали в Севастопольскую бухту через участок между заградительными молами. Вследствие этого была разрушена часть набережной между Артиллерийской и Южной бухтами, затонул катер в Артиллерийской бухте и был поврежден ряд военных кораблей. Поэтому знание режима ветрового волнения является одним из необходимых условий для безопасного и устойчивого развития Севастопольского региона, а также для планирования гидротехнических мероприятий, призванных минимизировать разрушительные последствия штормовых ситуаций.

В данной работе исследовались характеристики ветрового волнения в Севастопольской бухте при разных направлениях ветра. Для направлений ветра, вызывающих наиболее интенсивное волнение, рассмотрено влияние расположения и высоты гипотетического подводного препятствия типа подводного волнолома на характеристики ветровых волн.

Математическая постановка задачи и метод решения. Для расчета параметров ветрового волнения будем использовать спектральную модель SWAN (*Simulating Waves Near Shore*) [4], в основе которой лежит уравнение баланса волновой энергии в спектральной форме

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(c_{gx}N)}{\partial x} + \frac{\partial(c_{gy}N)}{\partial y} + \frac{\partial(c_{\omega}N)}{\partial \omega} + \frac{\partial(c_{\varphi}N)}{\partial \varphi} = \frac{S}{\omega}, \quad (1)$$

где $N = E(t, x, y, \omega, \varphi) / \omega$ – плотность волнового действия; $E(t, x, y, \omega, \varphi)$ – частотно-угловой спектр волнения; $c_g = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{g}{k} \operatorname{th}(kH)} \left(1 + \frac{2kH}{\operatorname{sh}(2kH)} \right)$; $\{c_{gx}, c_{gy}\} = c_g \left\{ \frac{k_x}{k}, \frac{k_y}{k} \right\}$; $\mathbf{k} = \{k_x, k_y\}$ – волновой вектор; $k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$; H – глубина; $\omega = \sqrt{gk \operatorname{th}(kH)}$ – частота волн; φ – направление распространения волн; $c_{\omega} = \frac{\partial \omega}{\partial H} \frac{\partial H}{\partial \omega}$; $c_{\varphi} = -\frac{1}{k} \frac{\partial \omega}{\partial H} \frac{\partial H}{\partial \varphi}$; m – координата, отсчитываемая по нормали к направлению распространения волн φ ; $S = S_{in} + S_{nl} + S_{wc} + S_{bf} + S_{dib}$ – функция источника; S_{in} – источник энергоснабжения волн ветром; S_{nl} – энергия нелинейных взаимодействий спектральных гармоник; S_{wc} – диссипация энергии вследствие обрушения волновых гребней; S_{bf} – диссипация энергии вследствие донного трения; S_{dib} – энергия обрушения волн на критических глубинах.

На твердых боковых границах $E = 0$. По угловой переменной используется условие периодичности $E(\varphi=0) = E(\varphi=2\pi)$, по частотной – условие $E(\omega_{\min}) = E(\omega_{\max}) = 0$.

Решение уравнения (1) дает возможность получить ряд спектральных характеристик волнения [4]: высоту значительных волн (далее высота волн)

$$H_s = 4 \sqrt{\int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} E(\omega, \varphi) d\omega d\varphi}, \quad (2)$$

среднеквадратическое значение максимальной придонной орбитальной скорости

$$U_{orb} = \sqrt{\int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \frac{2\omega^2}{g^2 \text{sh}^2(kH)} E(\omega, \varphi) d\omega d\varphi}, \quad (3)$$

среднее направление распространения волн

$$\varphi = \arctg \left[\frac{\int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \sin \varphi E(\omega, \varphi) d\omega d\varphi}{\int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \cos \varphi E(\omega, \varphi) d\omega d\varphi} \right] \quad (4)$$

и среднюю длину волн

$$\lambda = 2\pi \left[\frac{\int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} E(\omega, \varphi) d\omega d\varphi}{\int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} k E(\omega, \varphi) d\omega d\varphi} \right]. \quad (5)$$

Для параметризации процесса прохождения волн над подводным препятствием используется соотношение из работы [4]

$$K_t = \begin{cases} 1, & \frac{d-H}{H_s} < -\beta - \alpha; \\ 0,5 \left\{ 1 - \sin \left[\frac{\pi}{2\alpha} \left(\frac{d-H}{H_s} + \beta \right) \right] \right\}, & -\beta - \alpha \leq \frac{d-H}{H_s} \leq \alpha - \beta; \\ 0, & \frac{d-H}{H_s} > \alpha - \beta. \end{cases} \quad (6)$$

Здесь K_t – отношение высоты волны после прохождения над подводным препятствием к высоте волны до препятствия; d – глубина от поверхности моря до гребня препятствия; H_s – высота волны до препятствия; α, β – постоянные, зависящие от формы препятствия. При расчетах уклон подводного препятствия принимался равным 1:1,5, так что $\alpha = 2,6$ и $\beta = 0,4$ [4].

Модель ветрового волнения реализована на вычислительном кластере Морского гидрофизического института НАН Украины. Для этого использовался параллельный вариант модели SWAN, основанный на технологии MPI для суперкомпьютеров с распределенной памятью [5]. При параметризации донного трения была выбрана аппроксимация Гранта – Мадсена [6]. Угловое

разрешение при определении спектра волнения составляло 10° . По частотной координате использовалась сетка с 32 узлами, охватывающая частотный интервал 0,04 – 2 Гц.

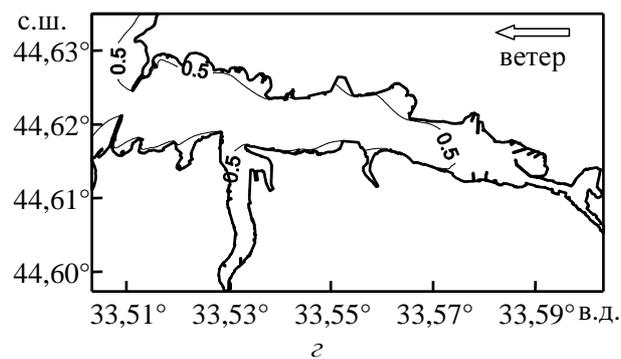
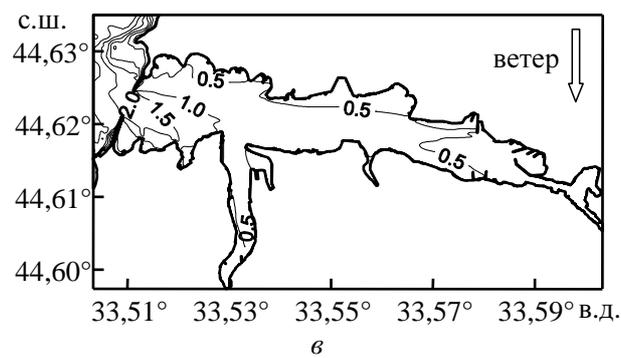
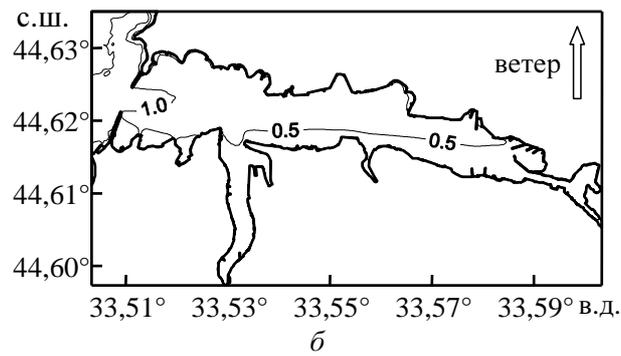
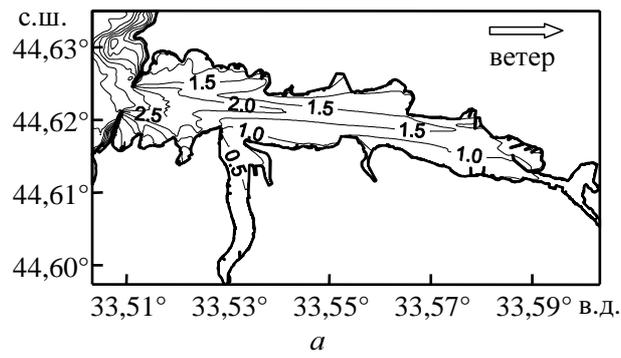
Для повышения пространственного разрешения расчеты волновых полей проводились на четырех вложенных сетках. Первая из них с пространственным разрешением $4,6 \times 4,5$ км покрывала Азово-Черноморский бассейн. Вторая имела разрешение 211×197 м и охватывала западное побережье Крыма. Третья имела разрешение 49×48 м и охватывала юго-западное побережье Крыма. Четвертая сетка покрывала Севастопольскую бухту с разрешением 10×11 м.

Анализ результатов численных экспериментов. Согласно анализу наблюдений за направлением ветра на морской гидрометеорологической станции «Севастополь» [3], над Севастопольской бухтой в течение года наибольшую повторяемость имеют ветры основных румбов – северного, южного, восточного и западного, а также северо-восточного. При этом преобладают восточные (23,1%) и южные (19,6%) ветры, причем скорости восточных ветров минимальны. Среди сильных ветров наибольшую повторяемость имеют ветры южных направлений (1%) [3]. Сильные западные и юго-западные ветры достаточно редки, однако во время штормов они могут достигать ураганной силы, как это было во время прохождения тыловой части циклона 11 ноября 2007 г.

Вначале рассмотрим характеристики волнения в Севастопольской бухте, которое возникает под воздействием стационарных и однородных по пространству штормовых ветров четырех основных румбов. Будем полагать скорость ветра равной 20 м/с.

В ходе анализа результатов численных экспериментов установлено, что наиболее интенсивное волнение в Севастопольской бухте возникает при западном ветре (рис. 2, *а*). При этом волны, достигшие высоты в несколько метров вследствие разгона в северо-западной части Черного моря, проникают в акваторию бухты между заградительными молами. Их влияние прослеживается на востоке вплоть до Сухарной бухты. Практически во всей Севастопольской бухте наибольшие высоты волн имеют место вдоль оси бухты, к южному и северному берегам они уменьшаются. Однако между Артиллерийской и Южной бухтами имеется область, где волны с высотами до 1,5 – 2 м приближаются к берегу, создавая опасность его размыва во время штормов. Аналогичная область с несколько менее интенсивным волнением (высоты до 1,5 м) располагается в районе Северной бухты.

При северном и южном ветрах также происходит проникновение волн между молами из северо-западной части Черного моря в Севастопольскую бухту. При южном ветре сказывается экранирующее действие Гераклеийского п-ова, вследствие чего высоты волн на входе в бухту составляют 1 м (рис. 2, *б*), тогда как при северном ветре они достигают 2 м (рис. 2, *в*). В обоих случаях на большей части акватории преобладают высоты волн 0,1 – 1 м. При северном ветре волны, проникающие между молами, образуют область с высотами 1 – 1,5 м на участке до Южной бухты.



Р и с. 2. Высоты (м) волн при разных направлениях ветра скоростью 20 м/с: *a* – при западном ветре; *б* – при южном; *в* – при северном; *г* – при восточном

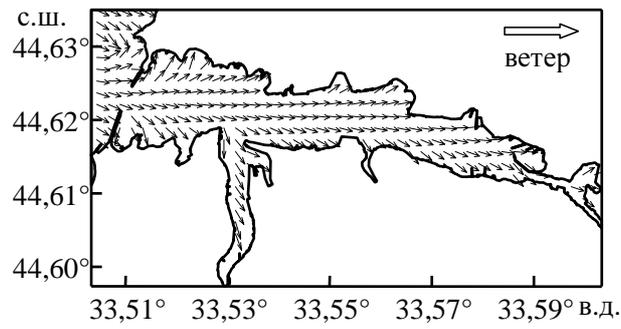
При восточном ветре разгон волн происходит только в пределах Севастопольской бухты, поэтому высоты волн в основной части ее акватории составляют 0,5 – 0,7 м (рис. 2, *з*). Таким образом, при восточном ветре ветровое волнение самое слабое.

Направление распространения волн определяется направлением ветра и взаимодействием волн с неоднородностями береговой линии и дна. При западном и восточном ветрах вблизи оси бухты волны распространяются в направлении ветра (рис. 3, *а, з*). Ближе к берегу они начинают отклоняться в сторону уменьшения глубин: к северу у северного берега и к югу – у южного. Поскольку глубины в Севастопольской бухте уменьшаются с запада на восток, то направление распространения волн при северном ветре (рис. 3, *в*) отклоняется к востоку от направления ветра практически по всей акватории, а при южном (рис. 3, *б*) – вплоть до Килен-бухты.

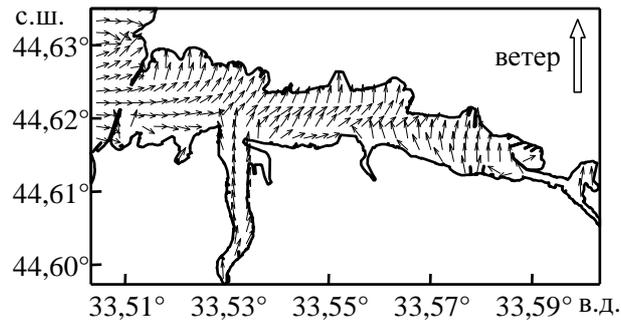
Наибольшие придонные волновые скорости имеют место при интенсивном волнении, возникающем под действием западного ветра. Их значения превышают 0,3 м/с в области, занимающей район акватории от защитных моллов до Южной бухты, включая Артиллерийскую бухту и часть южного побережья восточнее нее. В большей части Севастопольской бухты волновые скорости составляют 0,1 – 0,2 м/с. При восточном ветре и наименее интенсивном волнении в Севастопольской бухте волновые возмущения практически не достигают дна. Только у северного побережья в Константиновской бухте волновые скорости превышают 0,1 м/с. Волнение, создаваемое южным и северным ветрами, характеризуется придонными скоростями менее 0,1 м/с по всей акватории бухты, за исключением некоторых районов ее западной части. При южном ветре скорости более 0,1 м/с наблюдаются вдоль северо-западного побережья до Северной бухты, при северном – от участка между молами до побережья между Артиллерийской и Южной бухтами.

Каждому из рассмотренных направлений ветра соответствует свое пространственное распределение длин волн. При западном ветре диапазон их изменения наибольший: от 30 м на западе до 5 м на востоке. При этом волны с длинами до 20 м достигают побережья восточнее Артиллерийской бухты, а с длинами до 10 м – Сухарной бухты. Менее интенсивное волнение при других рассматриваемых направлениях ветра характеризуется меньшими длинами волн. Так, при северном ветре диапазон их изменения сокращается до 2 – 20 м, а побережья между Артиллерийской и Южной бухтами достигают волны с длинами до 10 м. При южном и восточном ветрах происходит постепенное уменьшение длин волн с запада на восток от 10 до 1 м и от 6 до 1 м соответственно.

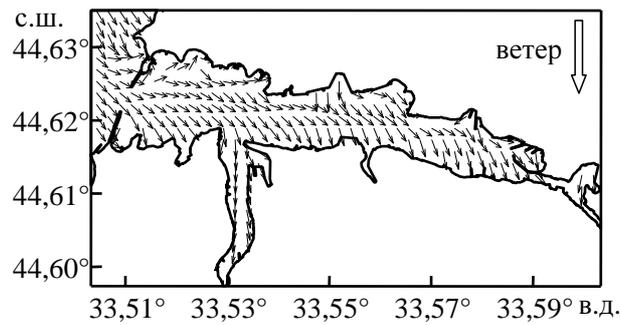
Таким образом, анализ результатов численных экспериментов показал, что самым опасным с точки зрения образования штормовых волн является западное направление ветра. При этом наиболее подверженным воздействию интенсивного волнения оказывается участок побережья от Артиллерийской бухты до входа в Южную бухту, что подтверждается разрушением набережной на данном участке во время шторма 11 ноября 2007 г.



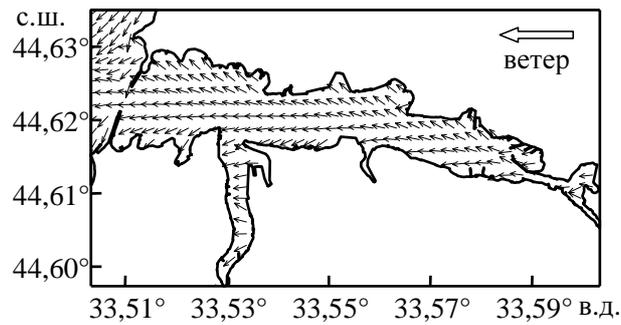
a



б



в

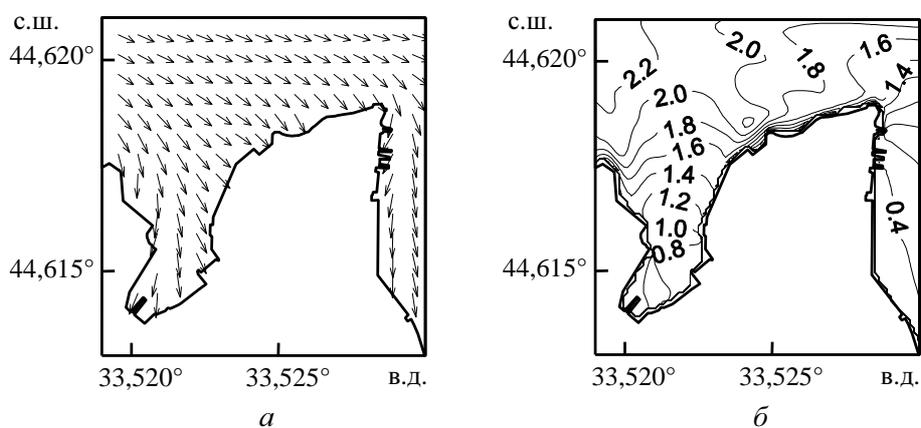


г

Рис. 3. Направление распространения ветровых волн при разных направлениях ветра скоростью 20 м/с: *a* – при западном ветре; *б* – при южном; *в* – при северном; *г* – при восточном

Рассмотрим возможность уменьшения катастрофических последствий штормовых ситуаций, вызываемых западным ветром, в случае сооружения подводного препятствия типа подводного волнолома к востоку от Артиллерийской бухты.

Очевидно, что для обеспечения экранирующего эффекта подводное препятствие должно располагаться, по отношению к направлению распространения волн, перед участком побережья, на которое волны воздействуют. Далее, как показали предварительные численные эксперименты, чтобы экранирующий эффект был максимальным, угол между нормалью к подводному препятствию и направлением распространения волн должен быть меньше 90° . Из рис. 4, *а* следует, что волны при приближении к берегу отклоняются от направления ветра к юго-востоку. Само же побережье ориентировано с юго-запада на северо-восток. Таким образом, приведенным выше условиям удовлетворяет диапазон ориентаций препятствия от нормального к направлению ветра до параллельного береговой линии. В дальнейшем ограничимся двумя этими предельными случаями.

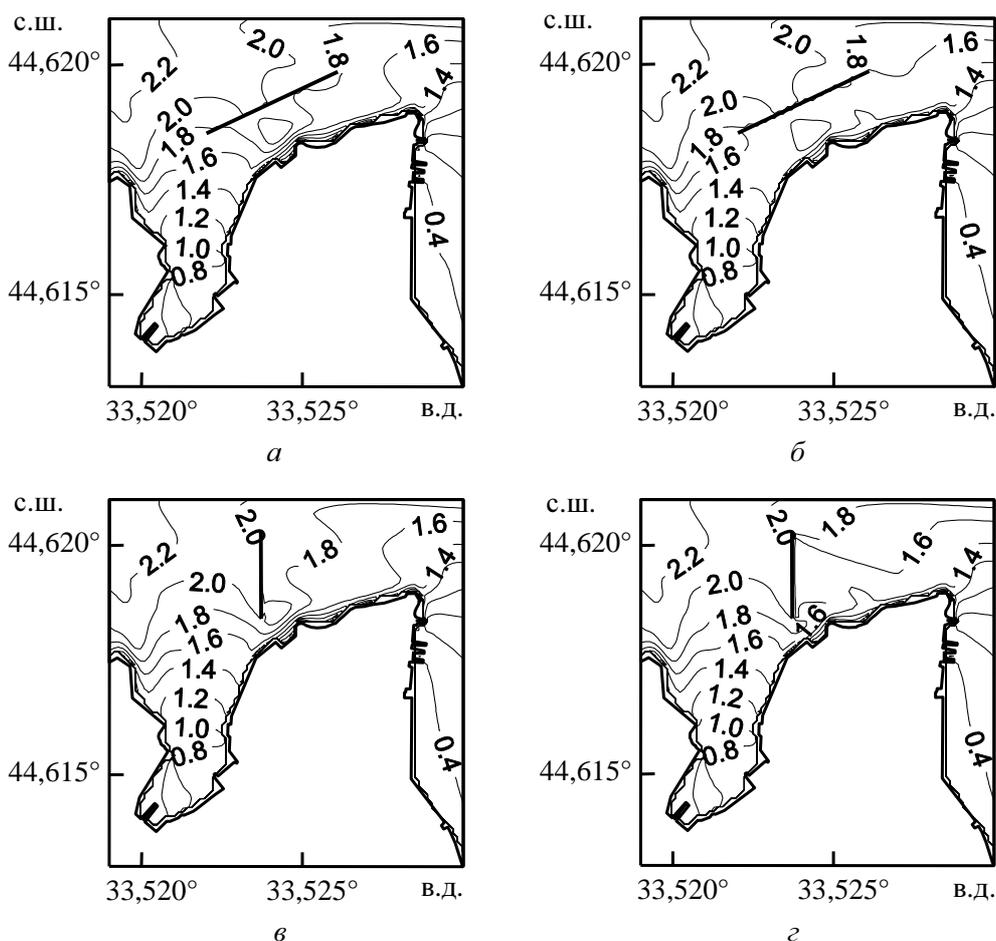


Р и с. 4. Направление распространения – *а* и высоты (м) волн – *б* в районе Артиллерийской бухты при западном ветре скоростью 20 м/с

Как показали численные эксперименты, влияние подводного препятствия на ветровое волнение начинает проявляться, когда глубина над ним становится близкой к удвоенной высоте волн. Поскольку в районе Артиллерийской бухты высоты волн составляют 1,5 – 2 м (рис. 4, *б*), глубина от гребня препятствия до поверхности моря в этом случае должна быть не более 4 м.

Если глубина над препятствием равна 4 м, то за ним область с высотами волн более 2 м сокращается в размерах (рис. 5, *а, в*). Уменьшение глубины до 3 м приводит к полному исчезновению за препятствием волн с такими высотами и уменьшению площади области волнения с высотами более 1,8 м. Увеличение высоты гребня волнолома на каждый последующий метр приводит к уменьшению максимальных высот волн за ним на 0,2 м (рис. 5, *б, г*). В пределе, доведя глубину над препятствием до 1 м, можно добиться уменьшения высоты волн на 0,8 м. Это справедливо для волнолома, расположенного как параллельно береговой линии, так и нормально к направлению ветра. Однако

в последнем случае площадь области, на которой прослеживается экранирующий эффект, несколько больше.



Р и с. 5. Высоты волн в районе Артиллерийской бухты при наличии гипотетического подводного препятствия, расположенного параллельно береговой линии (глубина над препятствием 4 м – *а* и 2 м – *б*) и нормально к направлению западного ветра (глубина над препятствием 4 м – *в* и 2 м – *г*)

Придонные волновые скорости при приближении к рассматриваемому участку побережья изменяются от 0,4 до 1,0 м/с. Увеличение высоты подводного препятствия приводит к достаточно медленному уменьшению интенсивности придонных движений. В предельном случае, когда глубина над волноломом составляет 1 м, диапазон изменения придонных волновых скоростей становится равным 0,4 – 0,8 м/с.

Длины волн восточнее входа в Артиллерийскую бухту локально возрастают при приближении к берегу от 20 до 25 м. Постепенное уменьшение глубины над подводным препятствием сначала приводит к прекращению роста длин волн, а затем и к их локальному уменьшению до 15 м.

Выводы. В заключение кратко сформулируем основные результаты работы.

Наиболее интенсивное ветровое волнение в Севастопольской бухте вызывается западными ветрами, наименее интенсивное – восточными. При южных ветрах интенсивность волнения меньше, чем при северных вследствие экранирующего действия Гераклеийского п-ова.

Влияние подводного волнолома, расположенного в районе Артиллерийской бухты, на ветровое волнение начинает проявляться, когда глубина над волноломом составляет менее двух высот волн.

Защитный эффект волнолома существует только в тех случаях, когда направление распространения волн составляет острый угол с нормалью к подводному препятствию.

Увеличение высоты волнолома на 1 м приводит в среднем к уменьшению высот волн за волноломом на 0,2 м.

Максимальное уменьшение высот волн, вызванных западным ветром силой 20 м/с, в районе Артиллерийской бухты при наличии подводного волнолома не превышает 1 м (высоты волн без волнолома более 2 м).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Овсяный Е.И., Кемп Р.Б., Репетин Л.Н., Романов А.С.* Гидролого-гидрохимический режим Севастопольской бухты в условиях антропогенного воздействия (по наблюдениям 1998 – 1999 гг.) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2000. – С. 79 – 103.
2. <http://ru.wikipedia.org/wiki/Севастополь>.
3. *Репетин Л.Н., Белокопытов В.Н., Липченко М.М.* Ветры и волнение в прибрежной зоне юго-западной части Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. – Вып. 9. – С. 13 – 28.
4. *SWAN technical documentation.* – Netherlands: Delft University of Technology, 2007. – 98 p.
5. *Антонов А.С.* Параллельное программирование с использованием технологии MPI. – М.: Изд-во Московского ун-та, 2004. – 72 с.
6. *Madsen O.S., Poon Y.-K., Graber H.C.* Spectral wave attenuation by bottom friction: Theory // Proceedings 21st International Conference of Coastal Engineering. – Torremolinos: ASCE, 1988. – 1. – P. 492 – 504.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь
E-mail: otw@alpha.mhi.iuf.net

Материал поступил
в редакцию 18.11.10

АНОТАЦІЯ З використанням обчислювального кластера Морського гідрофізичного інституту НАН України на основі методу вкладених сіток виконано чисельне моделювання вітрового хвилювання в Севастопольській бухті з високою просторовою роздільною здатністю. Визначені напрямки вітру, які викликають найбільш інтенсивне хвилювання. Проаналізовано можливість ослаблення вітрових хвиль у випадку спорудження підводного хвилелому поблизу Артилерійської бухти.

Ключові слова: Севастопольська бухта, вітрові хвилі, хвилелом, кластер.

ABSTRACT Using the computer cluster of Marine Hydrophysical Institute, NAS of Ukraine and based on the nested grid technique, wind waves in the Sevastopol bay were numerically simulated with high spatial resolution. The wind directions generating the most intensive waves are defined. Analyzed is the possibility of wind wave attenuation in case an underwater breakwater is constructed near the Artilleriyskaya bay.

Keywords: Sevastopol bay, wind waves, breakwater, cluster.