



УДК 551.465(262.5)

© 2012

Д. В. Алексеев

Численное моделирование влияния гидротехнических сооружений на характеристики ветрового волнения в Севастопольской бухте

(Представлено членом-корреспондентом НАН Украины Л. В. Черкесовым)

С использованием спектральной численной модели SWAN исследована эффективность ослабления штормового волнения защитными молами в Севастопольской бухте. Проанализированы параметры волн, генерируемых ветрами четырех основных румбов. Установлено, что волны из северо-западной части Черного моря интенсивно проникают в Севастопольскую бухту при западном ветре и значительно меньше — при северном и южном ветрах. Защитный эффект молв проявляется только в западной части бухты, причем уменьшение волнения у южного берега значительно сильнее, чем у северного. Полностью защищенным от штормовых волн оказывается участок южного побережья непосредственно за южным молем, а с удалением от мола опасность воздействия интенсивного волнения на берег сохраняется.

Севастопольская бухта — небольшая часть моря, обособленная от открытых вод частями суши. Местные условия определяют гидрологический режим бухты, несколько отличающийся от режима прилегающих к ней вод. Расположена на юго-западной оконечности Крымского полуострова, вытянута в зональном направлении с запада на восток на 7,5 км [1]. Наибольшая ширина бухты близка к 1 км, а ее глубина постепенно уменьшается от 20 м на западе до 4–5 м на востоке (рис. 1). Бухта находится в границах г. Севастополь, служит удобным местом для стоянки судов. Через нее налажено пассажирское сообщение между северной и южной сторонами города.

Проникновение в Севастопольскую бухту штормовых волн, сформировавшихся в северо-западной части Черного моря, может приводить к разрушению береговых построек и набережной, нарушению пассажирского сообщения, авариям морских судов [2]. Для защиты акватории бухты от интенсивного волнения и предотвращения частых закрытий внутреннего рейда в 70-х годах прошлого столетия у ее входа были построены южный и северный защитные молы [3], расстояние между которыми составляет 550 м [2]. Однако до настоящего времени оценки защитного эффекта молв, полученные с использованием современных достижений в области математического моделирования, отсутствуют.

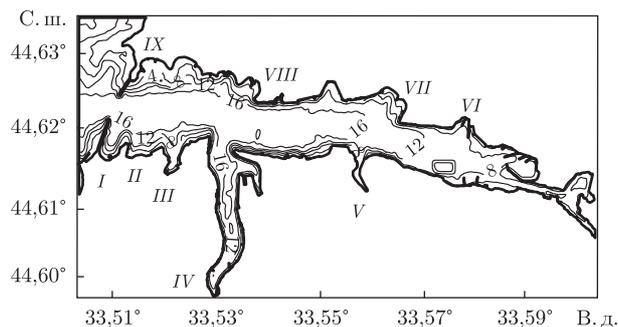


Рис. 1. Батиметрия Севастопольской бухты (в м) при наличии защитных молов. Римскими цифрами обозначены: I — Мартынова бухта; II — Александровская бухта; III — Артиллерийская бухта; IV — Южная бухта; V — Килен бухта; VI — Сухарная бухта; VII — бухта Голландия; VIII — Северная бухта; IX — Константиновская бухта

В данном сообщении представлены результаты моделирования волновых полей в Севастопольской бухте при наличии и отсутствии молов для ветров четырех основных румбов и выполнен их сравнительный анализ.

1. Математическая постановка задачи и метод решения. Для расчета параметров ветрового волнения будем использовать спектральную модель SWAN (Simulating Waves Near Shore) [4], которая базируется на уравнении баланса волновой энергии

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

где $N = E(t, x, y, \omega, \varphi)/\omega$ — плотность волнового действия ($E(t, x, y, \omega, \varphi)$ — частотно-угловой спектр волнения, t — время, x и y — горизонтальные координаты, отсчитываемые на восток и север соответственно, $\omega = \sqrt{gk \operatorname{th}(kD)}$ — частота волн, φ — направление распространения волн); $\{c_{gx}, c_{gy}\} = c_g \{k_x/k, k_y/k\}$; $c_g = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{g}{k} \operatorname{th}(kD)} \left(1 + \frac{2kD}{\operatorname{sh}(2kD)}\right)$; $\{k_x, k_y\}$ — компоненты волнового вектора; $k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$; $D(x, y)$ — глубина моря; g — ускорение свободного падения; $c_{\omega} = \frac{\partial \omega}{\partial D} \frac{\partial D}{\partial t}$; $c_{\varphi} = -\frac{1}{k} \frac{\partial \omega}{\partial D} \frac{\partial D}{\partial m}$ (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 [5], S_{nl} — энергия нелинейных взаимодействий спектральных гармоник, складывающаяся из энергий трех- и четырехволновых взаимодействий [6, 7], S_{wc} — диссипация энергии вследствие обрушения волновых гребней [5], S_{bf} — диссипация энергии вследствие донного трения [8], S_{dib} — энергия обрушения волн на критических глубинах [9]).

При решении уравнения (1) на твердых боковых границах полагается $E = 0$. По угловой переменной используется условие периодичности $E(\varphi = 0) = E(\varphi = 2\pi)$, по частотной переменной для минимальной ω_{\min} и максимальной ω_{\max} частот — условие $E(\omega_{\min}) = E(\omega_{\max}) = 0$.

Зная плотность волнового действия $N(\omega, \varphi)$, а значит, и частотно-угловой спектр $E(\omega, \varphi)$, получаем оценки ряда спектральных характеристик волнения [4]:

высоту значительных волн (далее — высота волн)

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

среднеквадратичное значение придонной орбитальной скорости

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

и среднее направление распространения волн

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

Параллельный вариант модели SWAN был инсталлирован на вычислительном кластере Морского гидрофизического института НАН Украины. Для повышения пространственного разрешения расчеты волновых полей проводились на четырех вложенных сетках, покрывавших Азово-Черноморский бассейн, западное побережье Крыма, юго-западное побережье Крыма и Севастопольскую бухту с разрешением $4,6 \times 4,5$ км, 211×197 м, 49×48 м и 10×11 м соответственно. На последнем этапе расчетов в SWAN учитывался эффект дифракции. Угловое разрешение модели составляло 10° . По частотной координате использовалась сетка с 32 узлами в диапазоне частот от 0,04 до 2,00 Гц.

2. Анализ результатов численных экспериментов. Согласно анализу наблюдений за направлением ветра на морской гидрометеорологической станции “Севастополь” [2], над Севастопольской бухтой в течение года наибольшую повторяемость имеют ветры основных румбов: северного, южного, восточного и западного, а также северо-восточного. При этом скорости восточных ветров минимальны. Среди сильных ветров наибольшую повторяемость имеют ветры южных направлений [2]. Сильные западные и юго-западные ветры достаточно редки, однако во время штормов они могут достигать ураганной силы.

Оценим защитный эффект молов для волн, генерируемых штормовыми ветрами (20 м/с) четырех основных румбов: северного, южного, западного и восточного. Интенсивность ветрового волнения, помимо силы ветра, определяется величиной разгона волн и географическими особенностями акватории.

При западном ветре разгон волн происходит во всей акватории северо-западной части Черного моря. Далее волны свободно проникают в Севастопольскую бухту вдоль ее оси, уменьшаясь по высоте с запада на восток от 4 до 1 м (рис. 2, а, б) как при наличии, так и при отсутствии молов. Наличие защитных молов оказывает заметное влияние на характеристики волнового поля только от западной части Севастопольской бухты до бухты Голландия (расположение бухт здесь и далее см. на рис. 1). Особенно существенно это влияние у южного побережья за молотом. Действительно, при отсутствии молов волны высотой 2–3 м проникают в Мартынову бухту, высотой 1–2 м — в Александровскую и Артиллерийскую бухты, а на участок побережья между Артиллерийской и Южной бухтами воздействуют волны высотой 2–2,5 м (см. а на рис. 2). Наличие молов приводит к уменьшению

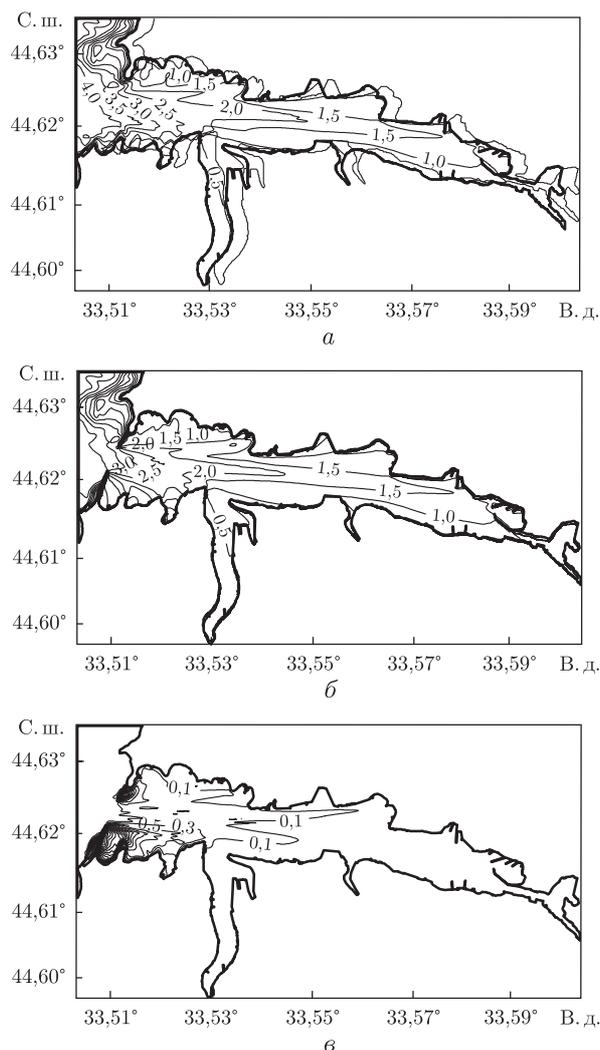


Рис. 2. Поле высот волн (в м) в Севастопольской бухте в случае стационарного западного ветра скоростью 20 м/с при отсутствии (а) и наличии (б) защитных молов, а также разность данных высот волн (в)

высот волн в Мартыновой бухте более чем на 1,5 м, в Александровской бухте — на 0,5–1 м, в Артиллерийской бухте — на 0,1–0,4 м, а у побережья между Артиллерийской и Южной бухтами — на 0,3–0,5 м (см. б, в на рис. 2). Северное побережье защищено естественным образом Константиновским мысом, к которому примыкает северный мол, и отмелью, расположенной западнее него. Поэтому при отсутствии молов высоты волн в бухтах северного побережья не превышают 1 м и только в Северной бухте они достигают 1,5 м. Ослабление волнения за счет наличия молов здесь оказывается менее существенным и составляет 0,1 м. Непосредственно в Северной бухте интенсивность волнения практически не изменяется.

В случае отсутствия молов направление распространения волн при западном ветре вблизи оси Севастопольской бухты совпадает с направлением ветра, а у берегов отклоняется в сторону меньших глубин, т. е. к северу — у северного побережья и к югу — у южного (рис. 3, а). Наличие молов приводит к увеличению данного отклонения в западной части акватории (за исключением Александровской, Артиллерийской и Южной бухт). В Мар-

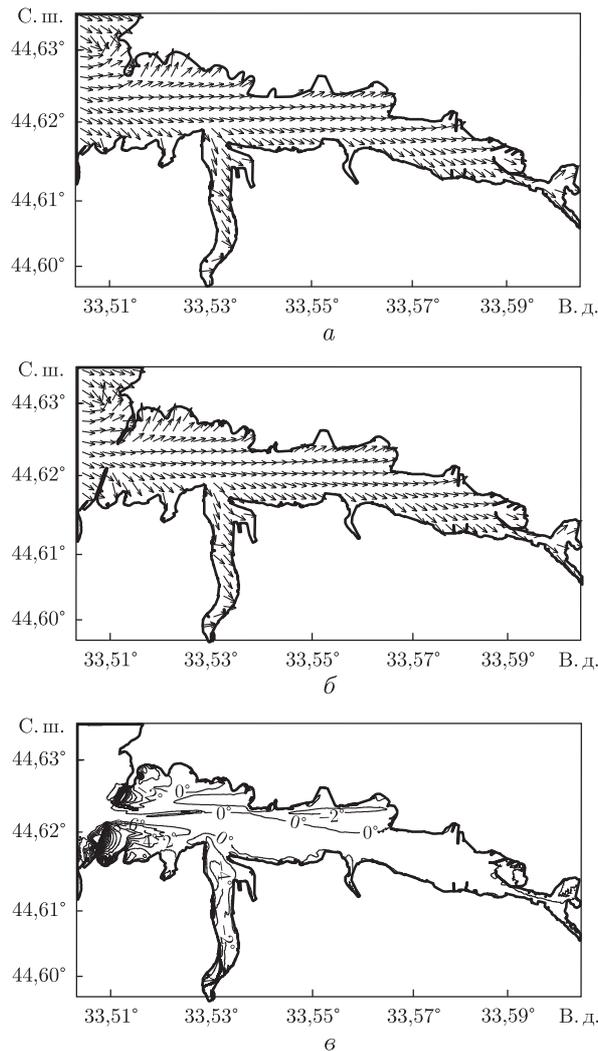


Рис. 3. Направления волн (срелки на схемах) в Севастопольской бухте в случае стационарного западного ветра скоростью 20 м/с при отсутствии (а) и наличии (б) защитных молов, а также разность данных направлений волн (в град), отсчитываемых от направления на восток против часовой стрелки (в)

тыновой бухте изменение направления волн составляет более 10° , а в остальной части акватории оно значительно меньше и не превышает $1-2^\circ$ (см. б, в на рис. 3).

При северном и южном ветрах в северо-западной части Черного моря генерируются волны соответствующих направлений. В прибрежной зоне направление волн отклоняется от направления ветра в сторону меньших глубин, поэтому в Севастопольскую бухту проникают волны, распространяющиеся на юго-восток в случае северного ветра и на северо-восток в случае южного. При отсутствии молов высоты волн на входе в бухту составляют 2,5 и 1,2 м при северном и южном ветрах соответственно. Такая разница значений обусловлена экранирующим эффектом юго-западной оконечности Крымского полуострова для волн, генерируемых южным ветром. При северном ветре волны наиболее интенсивно воздействуют на участок южного побережья западнее Южной бухты, тогда как при южном ветре интенсивность волнения у южного и северного берегов западной части Севастопольской бухты

практически одинакова. Наличие молов приводит к тому, что при северном ветре волны высотой более 2 м не проникают в Севастопольскую бухту. В Мартыновой бухте уменьшение высот волн составляет более 1 м, в Александровской и Константиновской бухтах — около 0,2 м, на участке побережья между Артиллерийской и Южной бухтами — 0,1 м. В Северной бухте ослабления волнения не происходит. При южном ветре уменьшение высот волн прослеживается только у южного побережья и составляет 0,1–0,8 м. В восточной части Севастопольской бухты в случаях северного и южного ветров преобладают волны высотой 0,4–0,6 м вне зависимости от наличия молов.

При отсутствии молов проникновение волн из северо-западной части Черного моря и влияние особенностей береговой линии и дна приводят к тому, что в случае северного ветра направление волн в Севастопольской бухте существенно отклоняется к востоку от направления ветра практически во всей акватории, а в случае южного ветра — в области, западнее Килен бухты. В последнем случае на входе в Севастопольскую бухту волны распространяются в направлении, близком к зональному. Наличие молов приводит к меньшему проникновению волн из северо-западной части моря и, как следствие, к меньшему отклонению их направления к востоку от направления ветра. При южном ветре уменьшение указанного отклонения достигает 20° , а при северном — 10° в области между Южной и Килен бухтами.

При восточном ветре волны из северо-западной части Черного моря не проникают в Севастопольскую бухту. Интенсивность волнения, образующегося в самой бухте, определяется длиной разгона, которая ограничена размерами акватории. В этом случае высоты волн оказываются наименьшими и составляют 0,2 м на востоке бухты и 0,8 м на западе. При данном направлении ветра молы не оказывают заметного влияния на характеристики волнового поля к востоку от них. Направление распространения волн вблизи оси бухты соответствует направлению ветра, а около северного и южного берегов отклоняется к северу и югу соответственно.

Таким образом, наиболее интенсивное волнение проникает в Севастопольскую бухту из северо-западной части Черного моря при западном ветре. При южном и северном ветрах волны меньшей интенсивности проникают в бухту вследствие отклонения их направления от направления ветра при рефракции на мелководье. При восточном ветре волнение в Севастопольской бухте достаточно слабое, так как развивается только в пределах ее акватории. В случае отсутствия молов при западном, северном и южном ветрах наибольшее воздействие волны оказывают на южное побережье Севастопольской бухты к западу от Южной бухты. Северное побережье в значительной степени защищено естественными особенностями береговой линии и дна. Существенному воздействию волнения здесь подвергается только Северная бухта при западном и южном ветрах. При западном ветре штормовой силы защитный эффект молов оказывается максимальным в Мартыновой и Александровской бухтах, расположенных непосредственно за южным молотом. Уменьшение интенсивности волнения в Артиллерийской бухте и на участке побережья от Артиллерийской до Южной бухт происходит в меньшей степени. На характеристики волнения в Северной бухте наличие молов практически не оказывает влияния. При северном и южном ветрах защитный эффект молов менее существенен, а при восточном ветре он отсутствует.

1. Овсянный 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: Сб. науч. тр. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2000. – С. 79–103.

2. 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: Сб. науч. тр. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. – Вып. 9. – С. 13–28.
3. Соловьева О. В. Эффективность гидротехнических сооружений в процессах самоочищения прибрежных вод // Экология моря. – 2008. – Вып. 76. – С. 90–95.
4. <http://www.swan.tudelft.nl>.
5. Komen G. J., Hasselmann S., Hasselmann K. On the existence of a fully developed wind-sea spectrum // J. Phys. Oceanogr. – 1984. – **14**. – P. 1271–1285.
6. Hasselmann S., Hasselmann K., Allender J. H., Barnett T. P. Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity wave spectrum. Part II: Parameterizations of the nonlinear transfer for application in wave models // Ibid. – 1985. – **15**. – P. 1378–1391.
7. Eldeberky Y. Nonlinear transformation of wave spectra in the nearshore zone: Ph. D. thesis. – Delft: Delft Univ. Technol., 1996.
8. Madsen O. S., Poon Y.-K., Graber H. C. Spectral wave attenuation by bottom friction: Theory: Proc. of the 21th Intern. conf. Coastal Engineering, 20–25 June, 1988. – Spain, Costa del Sol-Malaga. – New York: ASCE, 1988. – P. 492–504.
9. Battjes J. A., Janssen J. P. F. M. Energy loss and set-up due to breaking of random waves: Proc. of the 16th Intern. conf. Coastal Engineering, 27 Aug. – 03 Sep., 1978. – Hamburg. – New York: ASCE, 1978. – P. 569–587.

Морской гидрофизический институт
НАН Украины, Севастополь

Поступило в редакцию 09.04.2012

Д. В. Алексеєв

Чисельне моделювання впливу гідротехнічних споруд на характеристики вітрового хвилювання в Севастопольській бухті

З використанням спектральної чисельної моделі SWAN досліджено ефективність послаблення штормового хвилювання захисними молами в Севастопольській бухті. Проаналізовано параметри хвиль, що генеруються вітрами чотирьох основних румбів. Встановлено, що хвилі з північно-західної частини Чорного моря інтенсивно проникають у Севастопольську бухту при західному вітрі та значно меншою мірою – при північному й південному вітрах. Захисний ефект молів проявляється тільки в західній частині бухти, причому зменшення хвилювання біля південного берега значно сильніше, ніж біля північного. Повністю захищеною від штормових хвиль виявляється ділянка південного узбережжя безпосередньо за південним молем, а з віддаленням від молу небезпека впливу інтенсивного хвилювання на берег зберігається.

D. V. Alekseev

Numerical simulation of the effect of hydrotechnical structures on wind wave parameters in the Sevastopol Bay

Effectiveness of the storm wave attenuation by the protective piers in the Sevastopol Bay is studied by using the SWAN spectral numerical model. Parameters of waves generated by winds of four main points are analyzed. It is obtained that the waves from the north-west part of the Black Sea intensively penetrate into the Sevastopol Bay in the case of west winds and to a lesser degree in the case of north and south winds. The protective effect of the piers occurs only in the west part of the bay, and the wave attenuation near the south coast is more significant than that near the north one. The area of the south coast directly behind the south pier is completely protected from the storm waves, but the danger of the intensive wave effect on the coast remains at the distance from the pier.