

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ШТОРМОВОГО  
ВОЛНЕНИЯ  
В СЕВАСТОПОЛЬСКОЙ БУХТЕ  
10 – 11 НОЯБРЯ 2007 г.**

*Д.В. Алексеев, А.И. Задорожный,  
Е.В. Иванча, В.В. Фомин,  
Л.В. Черкесов*

Морской гидрофизический институт  
НАН Украины  
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2  
E-mail: otw@alpha.mhi.iuf.net

*Выполнено численное моделирование ветрового волнения в Севастопольской бухте во время шторма 10 – 11 ноября 2007 г. Моделирование проведено на вычислительном кластере МГИ НАН Украины. Исследована эволюция полей высот, скоростей и длин волн на разных этапах развития штормовой ситуации. Определены участки побережья, которые в наибольшей степени подверглись воздействию штормовых волн.*

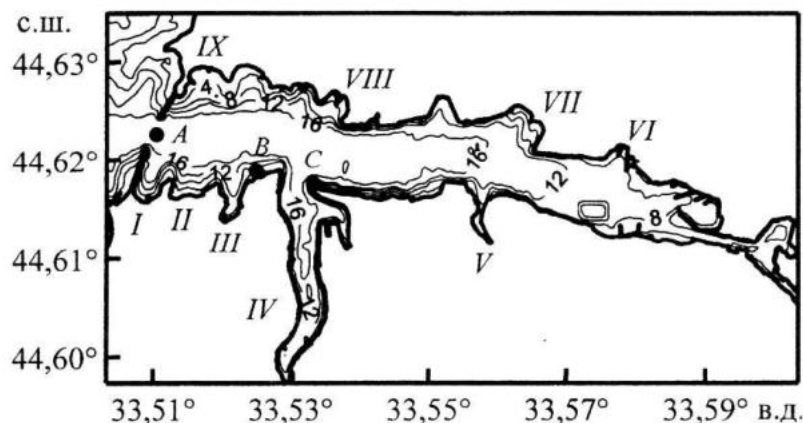
**Введение.** Севастопольская бухта вытянута в зональном направлении с запада на восток, вдаваясь вглубь Крымского полуострова почти на 8 км. Наибольшая ширина бухты близка к 1 км, а глубины постепенно уменьшаются от 20 м на западе до 4 – 5 м на востоке в районе впадения р. Черная [1]. Береговая

линия характеризуется сильной изрезанностью, вследствие наличия бухт и мысов (рис. 1). Вход в Севастопольскую бухту ограничен двумя защитными молами, расстояние между которыми составляет 550 м.

Благодаря выгодному географическому положению, Севастопольская бухта подвержена значительной антропогенной нагрузке. Здесь дислоцируются военно-морские флоты Украины и России. По берегам бухты расположены промышленные предприятия и жилые районы.

Штормовое волнение может нарушать функционирование морехозяйственных комплексов, приводить к обрушению берегов, разрушению береговых построек, значительному материальному ущербу [2].

Примером такого катастрофического развития событий может служить шторм 10 – 11 ноября 2007 г., когда интенсивные волны проникали в Севастопольскую бухту через участок между заградительными молами. Вследствие шторма 11 ноября была разрушена часть набережной между Артиллерийской и Южной бухтами, затонул катер в Артиллерийской бухте и был поврежден ряд военных кораблей.



Р и с. 1. Батиметрия Севастопольской бухты (м). 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. Латинскими буквами обозначены пункты A, B, C

Развитие штормовой ситуации происходило следующим образом [3]. Ночью с 10 на 11 ноября с Балканского региона на акваторию Черного моря вышел

южный циклон и со скоростью 70 км/ч стал перемещаться в сторону Крыма. К началу 11 ноября в районе Крымского полуострова юго-восточный ветер уси-

лился до 10–15 м/с, а к 9 часам он достиг 20–25 м/с и начал менять направление на юго-западное. Его порывы достигали 32 м/с. 12–13 ноября центр циклона сместился с Крымского полуострова на север, а над акваторией моря сохранилась ложбина с дождями, низкой облачностью и скоростью ветра не более 7–12 м/с.

В данной работе выполнено численное моделирование штормового волнения 10–11 ноября 2007 г. в Севастопольской бухте. Исследована пространственно-временная эволюция основных параметров ветровых волн.

**Математическая модель и метод решения.** Параметры ветрового волнения определялись с использованием спектральной волновой модели SWAN (Simulating WAVes Near shore) [4]. Модель базируется на уравнении баланса волновой энергии в спектральной форме. Приток энергии к волнам осуществляется за счет энергии ветра, а ее диссипация – за счет обрушения волновых гребней, вследствие донного трения и обрушения волн на критических глубинах. Для параметризации донного трения была выбрана аппроксимация Гранта – Мадсена [5]. При рассмотрении нелинейного взаимодействия волновых гармоник в модели учитывалось трехволновое взаимодействие. Модель реализована на вычислительном кластере Морского гидрофизического института НАН Украины. При этом использовался параллельный вариант модели SWAN, основанный на технологии MPI [6].

С целью повышения пространственного разрешения расчеты волновых полей проводились на четырех вложенных сетках. Первая из них с пространственным разрешением 4600×4500 м 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 (рис. 1) с разрешением 10×11 м. По частотной координате использовалась сетка с 70 узлами в диапазоне частот 0,01 – 5 Гц. Угловое разрешение при определении спектра волнения составляло  $10^\circ$ .

При проведении численных экспериментов для задания атмосферного воздействия использовались массивы ветра с пространственным разрешением 10×10 км, полученные из региональной прогностической модели SKIRON [7]. Расчеты проводились с 5 ноября 2007 г. для того, чтобы обеспечить согласование волновых полей с ветровой ситуацией, существовавшей на момент начала шторма.

**Результаты численных экспериментов.** Рассмотрим изменение структуры волновых полей в Севастопольской бухте во время шторма 10–11 ноября 2007 г.

10 ноября над акваторией Севастопольской бухты преобладал юго-восточный ветер, который увеличивался от умеренного (5 м/с), имевшего место в полночь, до свежего (9 м/с), наблюдавшегося с утра до полудня. Вторая половина дня характеризовалась сначала незначительным ослаблением ветра на 1–2 м/с, а затем таким же по величине его усилением. Весь день пространственное изменение скорости ветра над Севастопольской бухтой не превышало 1 м/с, причем значения скорости уменьшались с запада на восток.

В соответствии с развитием ветровой ситуации к утру 10 ноября в акватории бухты сформировалось достаточно устойчивое во времени поле высот значительных волн. Пространственное распределение высот волн характеризовалось увеличением их значений в направлении с юго-востока на северо-запад бухты с наибольшими градиентами у южного берега и наименьшими – у северного. При этом минимальные высоты волн составляли около 0,05 м, а максимальные – не превышали 0,23 м.

Незначительные колебания скорости ветра во второй половине дня при сохранении общей структуры поля высот волн приводили к расширению или сужению областей минимумов на востоке и изменению величин максимумов на западе на 0,03–0,05 м. Направление волн в основной части бухты совпадало с направлением ветра. Однако после полудня у южного берега волны распространялись преимущественно на запад. Придонные скорости практически по

всей акватории Севастопольской бухты 10 ноября были близки к нулевым. Диапазон изменения длин волн был достаточно узким: от 0,5 м на востоке до 1 – 1,5 м на западе.

После полуночи 11 ноября усиление ветра с течением времени начало происходить более интенсивно, что было связано с началом выхода атмосферного циклона на Крымский полуостров. На начальном этапе перемещения атмосферного образования (до 2 ч) преобладающим направлением ветра оставалось юго-восточное с постепенным увеличением южной составляющей. При этом ветер возрос до сильного, его скорость достигла 13 м/с. Вследствие неизменности доминирующего направления ветра сохранились основные черты простран-

ственного распределения высот волн, имевшие место 10 ноября и проявившиеся в увеличении их значений с юго-востока на северо-запад и в наличии значительных градиентов у южного берега.

Однако усиление ветра привело к небольшому росту максимальных значений высот волн до 0,34 м на северо-западе в районе Константиновской бухты и минимальных значений – до 0,1 м у восточной оконечности бухты (рис. 2, а), а также к тому, что волны от южного берега начали распространяться на северо-запад, как и в большей части акватории (рис. 3, а). У северного берега Севастопольской бухты длины волн достигли 2 м, а придонные волновые скорости в Константиновской бухте начали превышать 0,01 м/с.

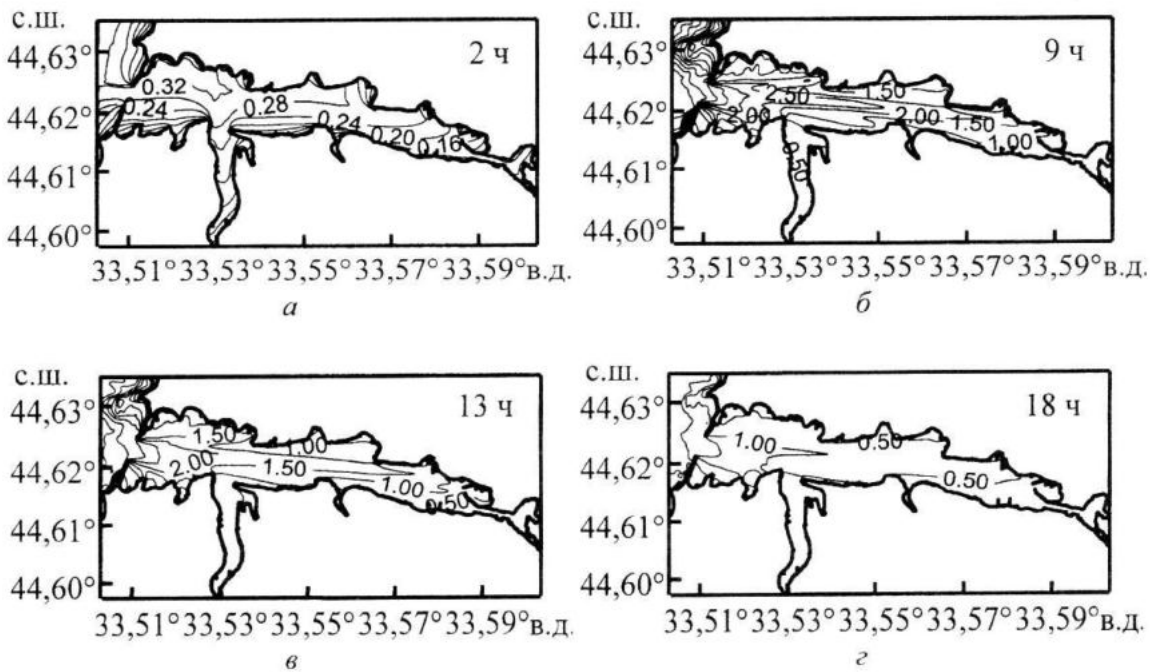


Рис. 2. Высоты значительных (м) волн 11 ноября 2007 г. в 2 ч – а, в 9 ч – б, в 13 ч – в и в 18 ч – г

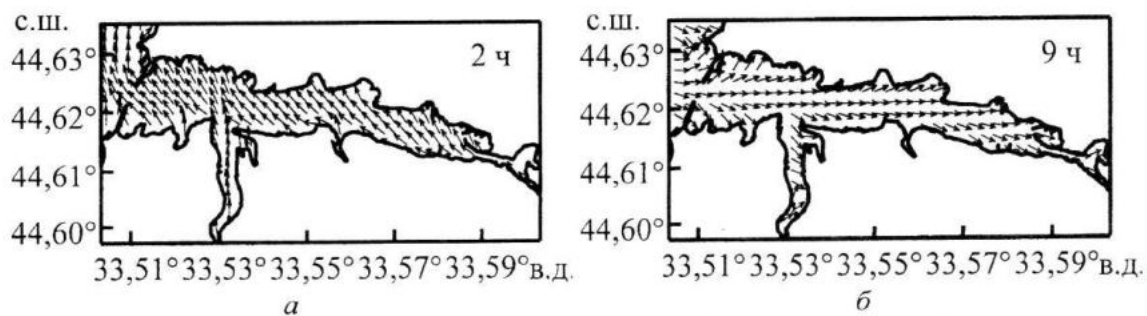


Рис. 3. Направления волн 11 ноября 2007 г. в 2 ч – а и в 9 ч – б

С 3 до 4 ч направление ветра стало практически южным, что свидетельствовало о прохождении западнее Севастопольской бухты центральной части циклона с минимальными ветрами. При этом над бухтой сила ветра ослабла незначительно (до 11 м/с), изменяясь менее чем на 1 м/с с юга на север акватории. Краткосрочное доминирование южных ветров проявилось в расширении области значительных градиентов высот волн от южного берега к центру бухты и в увеличении меридиональной составляющей в поле скоростей волн.

После 4 ч Севастопольская бухта оказалась под воздействием переходящего в штормовой юго-западного ветра с преобладанием западной составляющей. К 8 ч ветер достиг максимальной скорости 25 м/с, причем по пространству имел место незначительный рост скорости ветра с запада на восток. Это наиболее опасный этап развития штормовой ситуации, связанный с прохождением тыловой части циклона. На данном этапе произошла существенная перестройка поля высот волн. Наиболее высокие волны наблюдались вдоль оси бухты, причем они достигали берега только между Артиллерийской и Южной бухтами, а также в несколько меньшей степени в Северной бухте.

По времени процесс развития волнения выглядел следующим образом: сначала область с наибольшими на определенный момент времени высотами волн появлялась между молами у входа в бухту, затем она расширялась преимущественно вдоль оси Севастопольской бухты в направлении Сухарной бухты. Так, в 6 ч между молами имели место волны высотой 1,5 м, а у Сухарной бухты – высотой 0,5 м. В 8 ч эти значения составляли 3,5 и 1,5 м соответственно. В силу некоторой инерционности процесса развития волн по отношению к изменениям ветра, максимальное по интенсивности волнение имело место в 9 ч, когда юго-западный ветер несколько ослаб до 23 м/с (рис. 2, б).

В силу совместного эффекта ветра, профиля береговой линии и батиметрии, начиная с 6 ч, волны на некотором удалении от берегов распространялись с запада на восток. У северного и южного

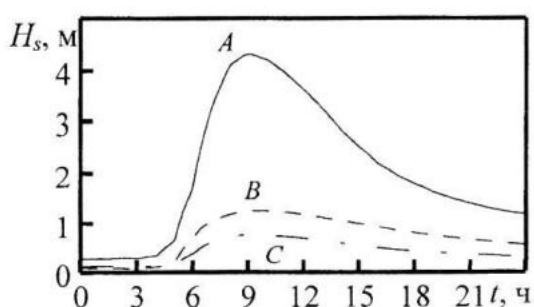
берегов волновые скорости отклонялись к северу и югу соответственно (рис. 3, б). У дна к 9 ч на участке от моллов до входа в Южную бухту волновые скорости превышали 0,3 – 0,4 м/с, далее на восток, вдоль оси бухты, их значения составляли 0,1 – 0,2 м/с, а у берегов – более 0,05 м/с. Диапазон изменения длин волн существенно увеличился с усилением ветра. Например, в 9 ч длины волн изменялись от 5 м на востоке до 40 м на западе.

При последующем продвижении циклона (после 9 ч) ветер продолжал ослабевать, но до 11 ч его скорость превышала 20 м/с. Область с высотами волн более 2 м до 13 ч еще занимала значительную часть акватории от моллов до Артиллерийской бухты (рис. 2, в). При этом побережье между Артиллерийской и Южной бухтами испытывало воздействие волн высотой до 1,5 м, а между Северной и Сухарной бухтами – до 1 м. Пространственное распределение направлений волновых скоростей сохранилось практически неизменным, по сравнению с приведенным на рис. 3, б, и оставалось таким до утра 12 ноября. Только в Южной бухте направление распространения волн со временем постепенно отклонялось к югу. Придонные волновые скорости в 13 ч во всей западной части Севастопольской бухты превышали 0,1 – 0,2 м/с, тогда как в восточной части они превышали значение 0,1 м/с преимущественно вдоль оси бухты. Диапазон изменения длин волн в силу ослабления ветра существенно сократился и к рассматриваемому моменту времени составил 3 – 25 м.

После 14 ч ветер перешел в категорию сильных (13 м/с), а его направление стало практически западным. Такое направление сохранилось до 22 ч, тогда как скорость ветра монотонно уменьшалась до 6 м/с. Изменения ветровой ситуации не привели к качественной перестройке полей высот и направлений волн. Происходило лишь уменьшение значений высот и скоростей волн. Интенсивные волны с высотами до 1 м в 18 ч еще достигали берега восточнее Артиллерийской бухты (рис. 2, г), позже воздействие волнения на побережье становилось все более слабым, и к 22 ч у

берега волны выше 0,6 м уже не наблюдались. Волновые скорости в основной части акватории находились в диапазоне 0,01 – 0,1 м/с. Максимальная длина волн в 22 ч составляла 10 м и имела место только у входа в Севастопольскую бухту.

Для более детального представления о развитии шторма 11 ноября на рис. 4 представлены временные зависимости высот волн в трех пунктах (рис. 1), расположенных на входе в Севастопольскую бухту между молами (А), у набережной между Артиллерийской и Южной бухтами (В) и у Павловского мыса (С). Для всех пунктов характерен резкий рост высот волн после 4 ч, то есть после начала перемещения над бухтой тыловой части циклона, и значительно более медленное их уменьшение после 9 ч, когда ветер над акваторией начал ослабевать. Максимальные значения высот волн, достигаемые около 9 ч, уменьшались с увеличением расстояния до входа в бухту и составляли 4,3 м для пункта А, 1,3 м для пункта В и 0,8 м для пункта С.



Р и с. 4. Зависимости от времени высот (м) волн 11 ноября 2007 г. в пунктах, расположенных на входе в Севастопольскую бухту между молами (А), у набережной между Артиллерийской и Южной бухтами (В) и у Павловского мыса (С)

**Заключение.** Сформулируем в заключение основные выводы работы. Прохождение передней части атмосферного циклона после полуночи 11 ноября 2007 г. с преобладающими сильными юго-восточными ветрами привело к генерации в Севастопольской бухте слабого волнения с высотами, не превышающими 0,4 м.

Волны максимальной высоты имели место в 9 ч 11 ноября 2007 г. во время

прохождения тыловой части циклона со штормовыми юго-западными ветрами, в которых преобладала западная составляющая. При этом высоты волн у входа в бухту достигали 4 м.

Наиболее подверженным воздействию штормовых волн, вызываемых западными ветрами, являлся участок побережья между Артиллерийской и Южной бухтами, что подтверждалось разрушением набережной на этом участке 11 ноября 2007 г.

## 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. – 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. – 2003. – Вып. 9. – С. 13 – 28.
3. Матишов Г.Г., Бердников С.В., Савицкий Р.М. Экосистемный мониторинг и оценка воздействия разливов нефтепродуктов в Керченском проливе. Аварии судов в ноябре 2007 г. – Ростов-на-Дону: Издательство ЮНЦ РАН, 2008. – 79 с.
4. SWAN technical documentation. – Netherlands: Delft University of Technology, 2007. – 98 p.
5. Madsen O.S., Poon Y.-K., Graber H.C. Spectral wave attenuation by bottom friction: Theory // Proceedings of 21 International Conference of Coastal Engineering. – ASCE: 1988. – P. 492 – 504.
6. Антонов А.С. Параллельное программирование с использованием технологии MPI. – М.: Издательство Московского университета, 2004. – 72 с.
7. <http://forecast.uoa.gr>.