

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕТРОВОГО ВОЛННЕНИЯ В БУХТАХ ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ КРЫМСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ

Д.В. Алексеев, В.А. Иванов,  
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

С использованием вычислительного кластера МГИ НАНУ выполнено моделирование ветрового волнения с высоким пространственным разрешением в бухтах юго-западной части Крыма. Применялся параллельный вариант спектральной модели ветрового волнения SWAN. Определены параметры ветровых волн, вызываемых ветрами четырех основных румбов со скоростью 10 м/с.

**Введение.** Режим ветрового волнения является одной из важнейших характеристик прибрежных районов моря. От данного режима зависят безопасность мореплавания, устойчивое хозяйственное развитие региона, возможность использования прибрежной зоны для туризма.

Бухты юго-западной части Крымского полуострова активно используются как в хозяйственных, так и в военных целях. Здесь расположены торговые, пассажирские и рыбные порты, судоремонтные заводы, а также дислоцируются военно-морские флоты Украины и России. Штормовое волнение нередко нарушает функционирование морехозяйственных комплексов, приводит к подтоплению, а иногда и к обрушению берегов, разрушению береговых построек, значительному материальному ущербу и человеческим жертвам [1]. Поэтому изучение волнового режима данного региона представляет первоочередной научный и практический интерес.

В данной работе исследовалось пространственное распределение параметров ветровых волн вдоль юго-западного побережья Крыма при различных направлениях ветра. Особое внимание уделялось локальным особенностям ветрового волнения в Севастопольской бухте.

**Математическая модель.** Параметры ветрового волнения (высоты значительных волн, придонные орбитальные скорости, направление распространения и длины волн) определялись с использованием спектральной волновой модели SWAN (Simulating WAves Near shore) [2]. Модель базируется на уравнении баланса волновой энергии в спектральной форме. Приток энергии к волнам осуществляется за счет энергии ветра, а ее диссиляция – за счет обрушения волновых гребней, вследствие донного трения и обрушения волн на критических глубинах. Для параметризации донного трения была выбрана аппроксимация Гранта-Мадсена [3]. При рассмотрении нелинейного взаимодействия волновых гармоник в модели учитывается трехволновое взаимодействие. Модель реализована на вычислительном кластере Морского гидрофизического института НАН Украины. Для этого использовался параллельный вариант модели SWAN, основанный на технологии MPI для компьютеров с распределенной памятью [4].

Для повышения пространственного разрешения расчеты волновых полей проводились на четырех вложенных сетках. Первая из них с пространственным разрешением  $4,6 \times 4,5$  км покрывает Азово-Черноморский бассейн. Вторая имеет разрешение  $211 \times 197$  м и охватывает западное побережье Крыма. Третья имеет разрешение  $49 \times 48$  м и охватывает юго-западное побережье Крыма (рис. 1). Четвертая сетка покрывает Севастопольскую бухту с разрешением  $10 \times 11$  м.

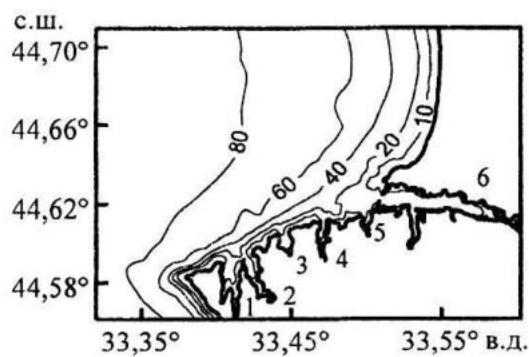


Рис. 1. Батиметрия юго-западного побережья Крыма (м). Бухты: 1 – Казачья, 2 – Камышовая, 3 – Круглая, 4 – Стрелецкая, 5 – Карантинная, 6 – Севастопольская

**Результаты численных экспериментов.** Ограничимся рассмотрением установившегося волнения, вызываемого стационарными однородными по пространству ветрами четырех основных румбов. При расчетах скорость ветра принималась равной 10 м/с, что близко к среднемесячному максимуму для юго-западного побережья Крыма.

Наиболее интенсивное волнение у юго-западного побережья Крыма вызывается ветрами западного направления (рис. 2 $\alpha$ ), поскольку в этом случае для волн обеспечивается наибольшая длина разгона. Высоты значительных волн достигают 1,7 м в открытой части акватории и 1,3 м вблизи берега. При восточном ветре длина разгона волн наименьшая,

вследствие чего их максимальные высоты уменьшаются более чем в два раза (до 0,8 м), по сравнению со случаем западного ветра, и волнение оказывается наименее интенсивным (рис. 2 $\delta$ ). В основной части рассматриваемой акватории высоты волн при западном вете мало меняются, а при восточном – они характеризуются значительной пространственной изменчивостью. При южном и северном ветрах максимальные значения высот волн близки и составляют 1,6 м и 1,4 м соответственно (рис. 2 $\beta$ ,  $\gamma$ ). Но при северном ветре у входов в бухты высоты волн достигают 1 м, а при южном, вследствие экранирующего эффекта Гераклейского полуострова, они не превышают 0,5 м, как и при восточном ветре.

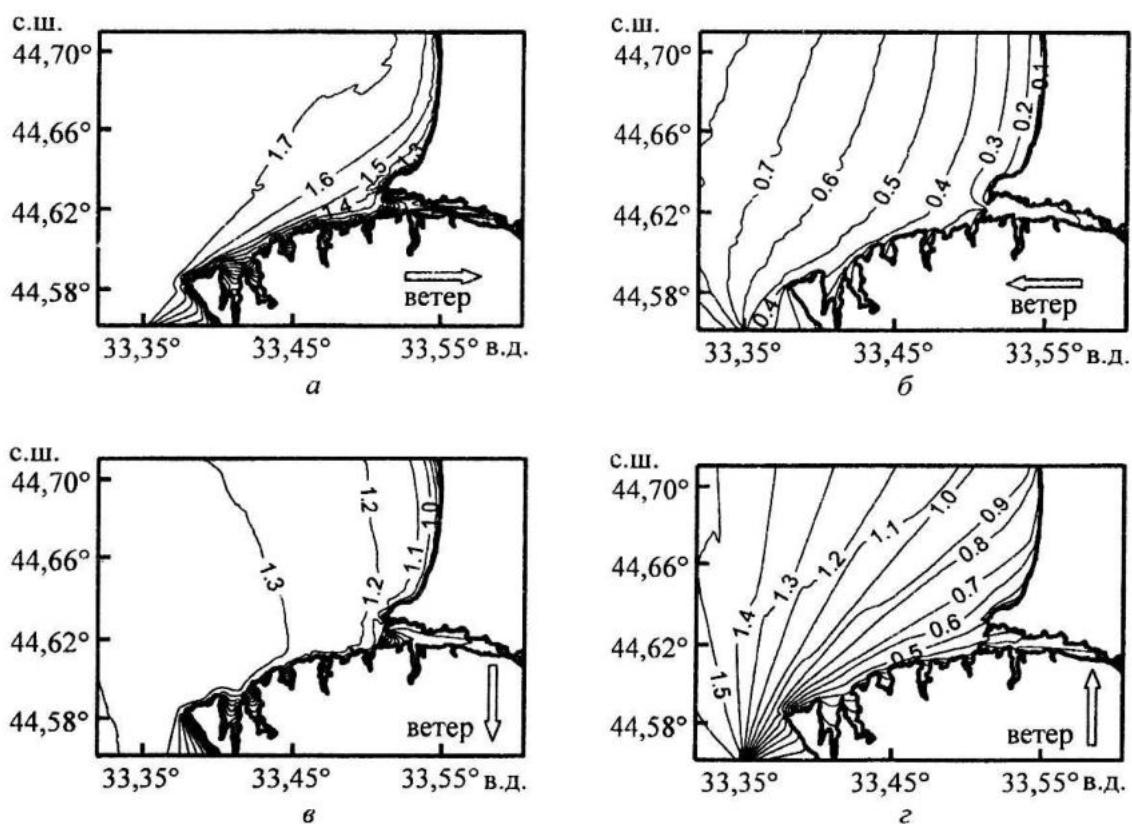


Рис. 2. Высоты значительных волн (м) у юго-западного побережья Крыма при западном ( $\alpha$ ), восточном ( $\delta$ ), северном ( $\beta$ ) и южном ( $\gamma$ ) ветрах

Направление волнения определяется направлением ветра и процессом взаимодействием волн с особенностями береговой линии и рельефа дна. Совпадение направлений ветра и волн по всей рассматриваемой акватории имеет место только при западном ветре (рис. 3 $\alpha$ ). В

случае восточного ветра на большей части акватории направление волнения также совпадает с направлением ветра, и только у Гераклейского полуострова, вследствие рефракции на мелководье, направление распространения волн отклоняется к югу, следуя за очертаниями

береговой линии (рис. 3б). При северном и южном ветрах (рис. 3в, г) по всей рассматриваемой акватории волны отклоняются на восток в сторону более мелководных районов, причем при южном

ветре это отклонение существеннее, чем при северном. Интенсивное проникновение волн в Севастопольскую бухту происходит при западном ветре, а в остальные бухты – при северном.

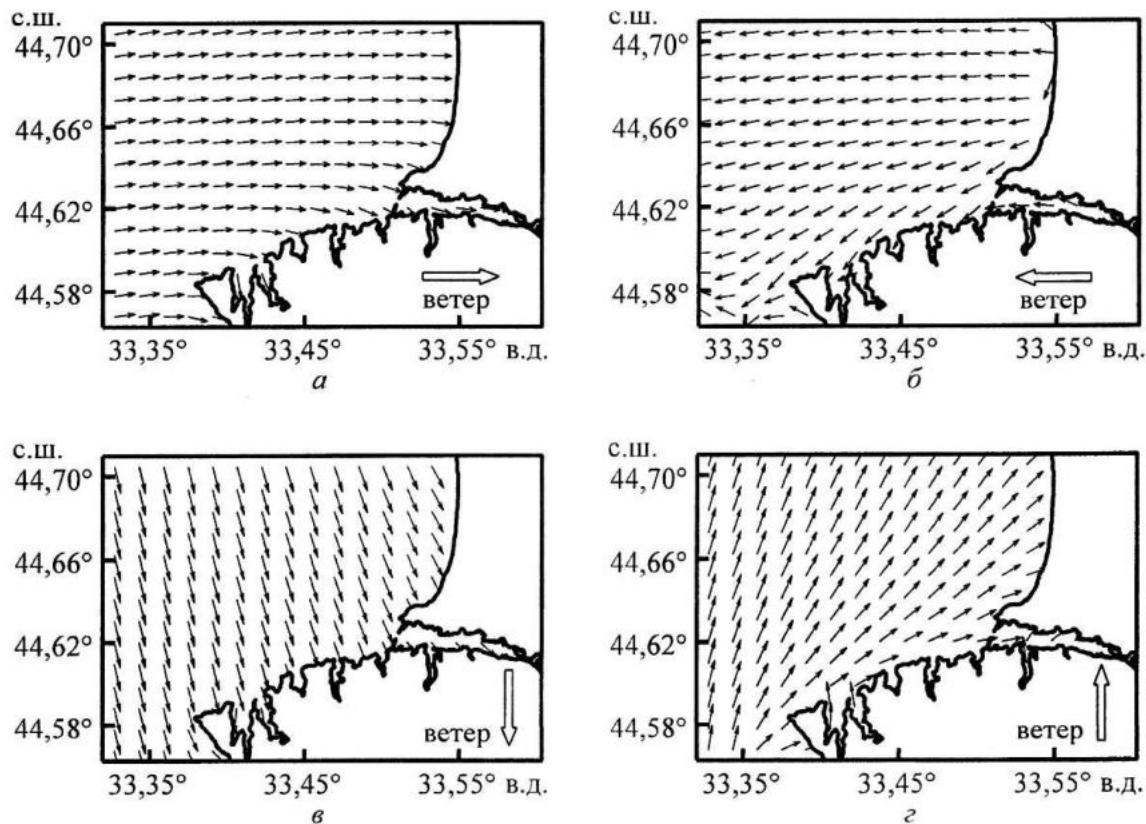


Рис. 3. Направления волн у юго-западного побережья Крыма при западном (а), восточном (б), северном (в) и южном (г) ветрах

При западном и северном ветрах районы, где придонные волновые скорости превышают 0,1 м/с, располагаются вдоль всего юго-западного побережья Крыма за исключением Севастопольской бухты, что обусловлено наличием в ней защитных молов. При западном ветре прибрежные области со скоростями более 0,1 м/с в основном шире, чем при северном, но в Казачьей и Камышовой бухтах наблюдается обратная ситуация, поскольку эти бухты более открыты для северного волнения. Круглая и Карантинная бухты при этих ветрах в одинаковой степени подвержены влиянию волнения, а Стрелецкая – достаточно хорошо от него защищена. В случае южного ветра придонные волновые скорости достигают 0,1 м/с только севернее входа в Севастопольскую бухту. В ос-

тальных бухтах преобладают скорости порядка нескольких сантиметров в секунду, хотя в центральных областях Казачьей и Камышовой бухт они не достигают и 0,01 м/с. При восточном ветре придонные волновые скорости являются наименьшими из всех рассмотренных случаев и по всей акватории не превосходят 0,01 м/с.

Наиболее длинные волны в открытой части акватории (до 26 м) генерируются западными ветрами. В бухтах при этих ветрах длины волн варьируются от 6 до 16 м. При северном ветре вдали от берега возникают более короткие волны (до 20 м), а в бухтах (за исключением Севастопольской) – более длинные (10–18 м). При южном ветре максимальные длины волн такие же, как и при северном, но диапазон их изменения более

широкий (4–20 м). Восточный ветер приводит к возникновению самых коротких волн (2–10 м).

Опишем теперь локальные особенности ветрового волнения в Севастопольской бухте. Так же как и в открытой части юго-западного побережья Крыма, максимальное волнение здесь возникает при западных ветрах (рис. 4а), а мини-

мальное – при восточных (рис. 4б). Причем при западном ветре интенсивные волны проникают вдоль оси бухты вплоть до ее восточной оконечности. При северном ветре (рис. 4в) максимальные высоты волн имеют место у юго-западного побережья бухты, при южном ветре (рис. 4г) – у северо-западного берега Севастопольской бухты.

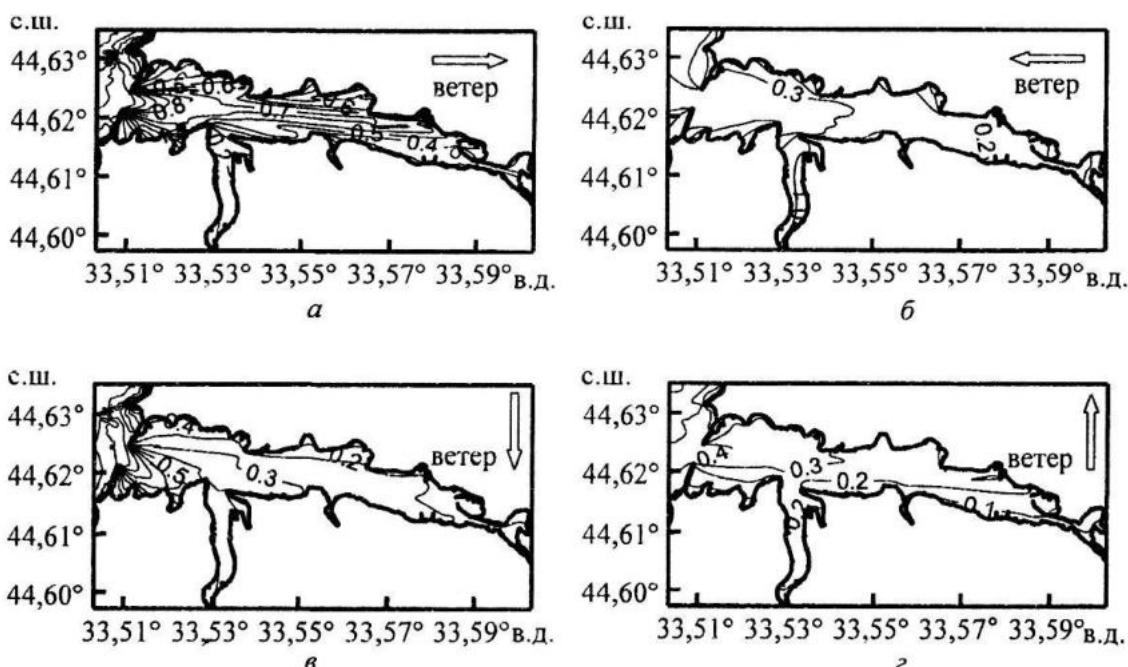


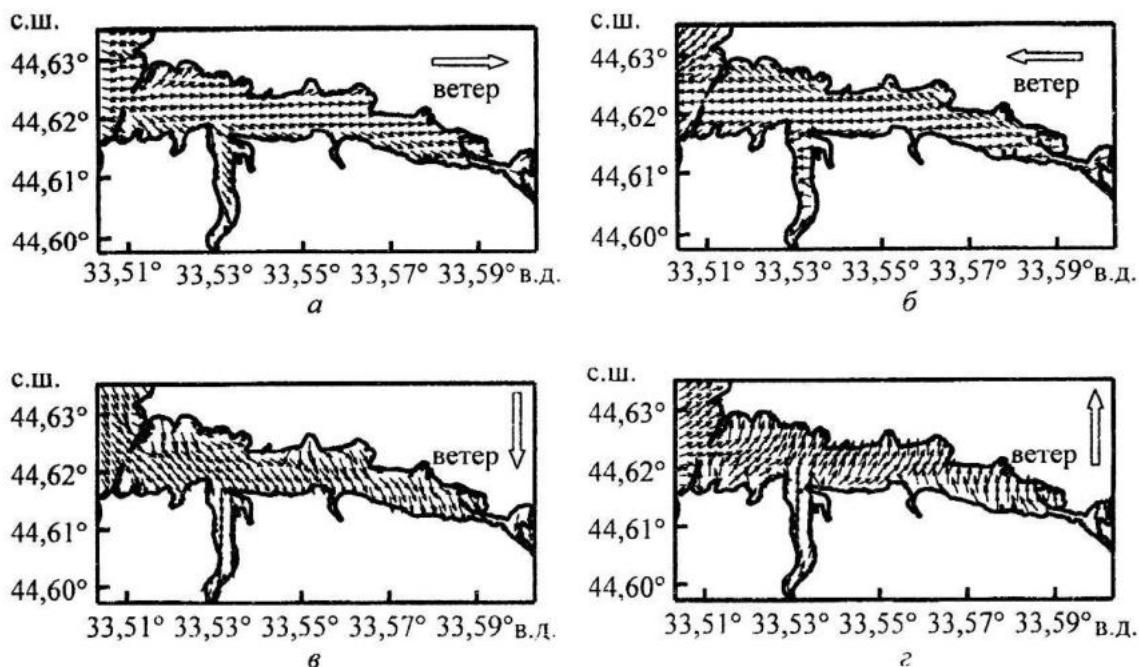
Рис. 4. Высоты значительных волн (м) в Севастопольской бухте при западном (а), восточном (б), северном (в) и южном (г) ветрах

При западном и восточном ветрах в Севастопольской бухте направления волн в основном совпадают с направлением ветра. Отклонения к северу и югу имеют место только у северного и южного берегов бухты соответственно (рис. 5а, б). Вследствие общего уменьшения глубин с запада на восток, направления распространения волн при северном и южном ветрах (рис. 5в, г) отклоняются к востоку от направления ветра практически по всей акватории бухты.

Наибольшие придонные волновые скорости имеют место при интенсивном волнении, возникающем под действием западного ветра. Их значения изменяются от 0,07 м/с на участке между молами до 0,02 м/с у восточной оконечности бухты. При южном и восточном ветрах волновые скорости не превышают

0,01 м/с на всем протяжении Севастопольской бухты. Исключение составляют небольшие бухты на северо-западе акватории. При северном ветре интенсивные волновые движения сосредоточены только у входа в бухту, в основной ее части скорости не превышают 0,01–0,02 м/с.

В Севастопольской бухте длины волн меньше, чем в открытой части юго-западного побережья Крыма. При западном ветре имеет место заметное изменение длин волн в меридиональном направлении от 14 до 3 м на протяжении всей бухты, тогда как при северном ветре изменения длин волн в диапазоне 10–3 м наблюдаются у входа в бухту. При восточном и южном ветрах длины волн в акватории Севастопольской бухты лежат в диапазоне 1–3 м и мало меняются по пространству.



Р и с. 5. Направления волн в Севастопольской бухте при западном (а), восточном (б), северном (в) и южном (г) ветрах

**Заключение.** Сформулируем в заключении основные выводы работы.

Наиболее интенсивное ветровое волнение у юго-западного побережья Крыма и в Севастопольской бухте вызывается западными ветрами, наименее интенсивное – восточными.

Направление распространения волн у юго-западного побережья Крыма совпадает с направлением ветра по всей акватории только при западном ветре. При восточном ветре направление распространения волн отклоняется к югу у побережья Гераклейского полуострова, а при северном и южном ветрах происходит отклонение волн к востоку в сторону меньших глубин по всей акватории, а также в Севастопольской бухте. При западном и восточном ветрах в Севастопольской бухте имеет место отклонение направления волн от направления ветра к северу и югу у северного и южного берегов соответственно.

Каждому из рассмотренных направлений ветра соответствует свое пространственное распределение длин волн. Волны наибольших длин возникают у юго-западного побережья Крыма и в Севастопольской бухте при западном ветре, наименьших – при восточном. Наи-

большая пространственная изменчивость длин волн у юго-западного побережья Крыма имеет место при южном ветре, а в Севастопольской бухте – при западном.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. SWAN technical documentation. – Netherlands: Delft University of Technology, 2007. – 98 p.
3. Madsen O.S., Poon Y.-K., Gruber H.C Spectral wave attenuation by bottom friction: Theory / Proceedings of 21 International Conference of Coastal Engineering. – ASCE: 1988. – Р. 492–504.
4. Антонов А.С. Параллельное программирование с использованием технологий MPI. – М.: Издательство Московского университета, 2004. – 72 с.