

С.Ю.Михайличенко, В.В.Фомин

*Морской гидрофизический институт НАН Украины, г.Севастополь*

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ  
В РАЙОНЕ ОСТРОВА КОСА ТУЗЛА  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ВЛОЖЕННЫХ СЕТОК**

На основе модели *SWAN* методом вложенных сеток рассчитаны волновые характеристики в районе о.Коса Тузла для различных типов стационарных полей ветра. Подробно изучены особенности полей высот, направлений, периодов и длин волн. Проведен анализ влияния берегозащитных сооружений на структуру волновых полей у восточной оконечности острова.

В связи с необходимостью проведения работ по защите побережья о.Коса Тузла (ОКТ) от разрушительного влияния штормов возникает потребность в детальном исследовании волнового режима для данного региона. В Морском гидрофизическом институте НАН Украины подобные работы уже выполнялись [1, 2], однако в них при расчете волнения граничные условия на жидких границах реализовывались приближенно и, более того, применялась сетка с горизонтальным разрешением 200 м, что не позволяет детально описывать поля волнения непосредственно вблизи ОКТ.

Настоящее исследование является развитием указанных работ. Для расчета ветрового волнения используется 4-х шаговый метод вложенных сеток, включающий: расчет ветрового волнения для всего Азово-Черноморского бассейна; расчет волнения для Азовского моря, Керченского пролива и северо-восточного шельфа Черного моря с жидкой южной границей; моделирование волнения для Керченского пролива с двумя жидкими зональными границами; моделирование волнения для области с четырьмя жидкими границами, которая включает ОКТ. Численные эксперименты выполнены для 3-х градаций скорости однородного по пространству и постоянного по времени ветра:  $W = 15$  м/с – слабый шторм,  $W = 25$  м/с – сильный шторм,  $W = 35$  м/с – экстремальный шторм. Рассматривались ветры южных румбов, поскольку именно они способствуют проникновению в Керченский пролив интенсивного волнения из открытой части Черного моря. Как и в [1, 2], расчеты волнения проводились на основе спектральной модели *SWAN* (*Simulating Waves Near Shore*) [3, 4], которая базируется на численном решении уравнения баланса волновой энергии, что дает возможность получить оценки ряда спектральных характеристик волнения, в частности, высоту значительных волн, среднее направление распространения волнения и средний период волн.

**Результаты численных экспериментов.** В первом цикле экспериментов определялись наиболее штормоопасные направления ветра. Всего было выполнено 15 численных экспериментов по расчету ветрового волнения в Азово-Черноморском бассейне для разных направлений ветра, в результате которых были получены значения максимальных высот волн на южной границе

© С.Ю.Михайличенко, В.В.Фомин, 2008

северо-восточного шельфа Черного моря. Было установлено, что при всех  $W$  максимумы высот значительных волн на указанной границе соответствуют юго-восточному, юго-юго-восточному и юго-западному направлениям ветра, что связано, в первую очередь, с величинами эффективных разгонов, которые максимальны для вышеперечисленных румбов. Учитывая данную особенность, дальнейшие расчеты волновых полей в Керченском проливе на более мелких сетках проводились только для 3-х указанных направлений ветра.

Опишем реализацию метода вложенных сеток для расчета волнения в районе ОКТ. На начальном шаге определялись поля волнения для всего Азово-Черноморского бассейна. Моделирование проводилось на сетке с разрешением 4780 м по широте и 4690 м по долготе в области  $\sim 27,47 - 41,84^\circ$  в.д. и  $40,91 - 47,13^\circ$  с.ш. с угловым разрешением  $10^\circ$ . По частотной координате использовалась сетка с 25 узлами, покрывающая частотный интервал 0,05 – 1 Гц.

На следующем шаге проводился расчет полей волнения для Азовского моря, Керченского пролива и северо-восточного шельфа Черного моря с жидкой южной зональной границей, расположенной на широте Ялты. Граничные условия определялись путем интерполяции результатов моделирования с начального шага. Использовалась сетка с разрешением 1000 м в области  $33,71 - 39,72^\circ$  в.д. и  $44,5 - 48,0^\circ$  с.ш. Остальные параметры сетки, как на этом, так и на последующих шагах оставались такими же, как на начальном шаге.

Далее выполнялось моделирование ветровых волн в Керченском проливе на сетке с шагом 200 м. Параметры волн на южной и северной зональных границах определялись с предыдущего шага.

После этого проводились расчеты волновых характеристик для прямоугольной области с разрешением 40 м, включающей ОКТ. Координаты области:  $36,19 - 36,32^\circ$  в.д. и  $45,21 - 45,31^\circ$  с.ш.

Данные последнего шага использовались для моделирования ветрового волнения у восточной оконечности ОКТ. Расчет велся на сетке с горизонтальным шагом 10 м в области:  $36,25 - 36,30^\circ$  в.д. и  $45,24 - 45,27^\circ$  с.ш. Донное трение в *SWAN* определялось по модели Гранта-Мадсена с коэффициентом шероховатости донной поверхности, равным 0,1 м. Также учитывался эффект обрушения волн на критических глубинах.

Было проведено 9 численных экспериментов (для 3-х градаций скорости и 3-х направлений ветра). Изучались особенности полей высот, направлений, периодов и длин волн. Попутно рассматривалась задача влияния берегозащитных сооружений (волноломов) у восточной оконечности ОКТ (проектируемых ГП «Государственным проектно-изыскательским институтом морского транспорта») на структуру волнового поля при разных типах ветрового воздействия. Использовалась возможность *SWAN* учитывать в параметрической форме наличие тонких преград на пути распространения волн [5].

Вследствие мелководности акватории высоты волн у ОКТ существенно меньше высот, наблюдающихся на южной границе пролива, и слабо зависят от величины скорости ветра. Расчеты показали, что величина разности высот волн не превышает значений 0,1 – 0,3 м для скоростей ветра 15 и 25 м/с и 0,1 – 0,25 м для скоростей ветра 25 и 35 м/с.

При учете волноломов наблюдается формирование теневых зон, располагающихся с подветренной стороны берегозащитных сооружений, в которых происходит снижение интенсивности волнения на 50 – 70 %. Само влияние волноломов на поля волнения у восточной оконечности ОКТ носит локальный характер.

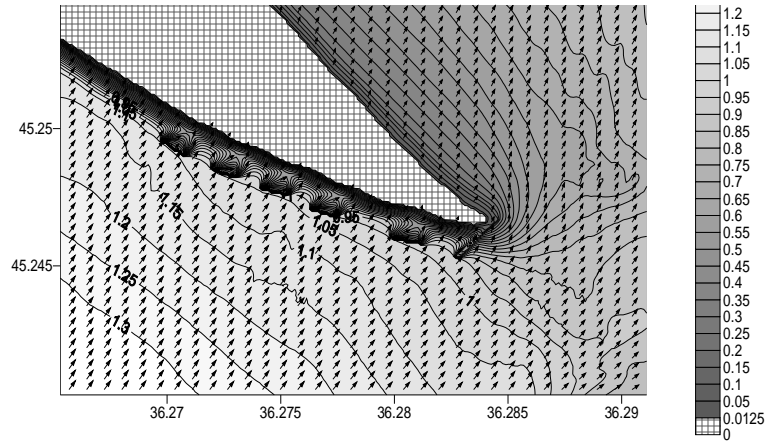
Проведем теперь более детальный анализ волновых характеристик в районе восточной оконечности ОКТ для разных градаций скорости ветра при учете берегозащитных сооружений.

$W = 15$  м/с. Ветры с такими скоростями встречается достаточно часто в акватории Азово-Черноморского бассейна и носят характер сезонно повторяющихся штормов [6]. Как показали расчеты, при юго-западном ветре волны с максимальными высотами формируются на юге акватории (0,7 – 0,85 м). Вблизи волноломов картина волнения меняется. С наветренной стороны берегозащитных сооружений величины высот изменяются в пределах 0,45 – 0,7 м. В теневых зонах интенсивность волнения минимальна (0,2 – 0,35 м). Направление распространения волнения практически на всей площади акватории совпадает с направлением ветра. На севере от косы наблюдаются незначительные эффекты рефракции. При юго-юго-западном ветре характер волнения в целом идентичен предыдущему случаю. Отличие заключается лишь в направлении волнения, которое незначительно отклоняется на север из-за рефракции, которая особенно отчетливо проявляется в северной части региона, где направление волн меняется с северо-северо-восточного на северное и северо-северо-западное.

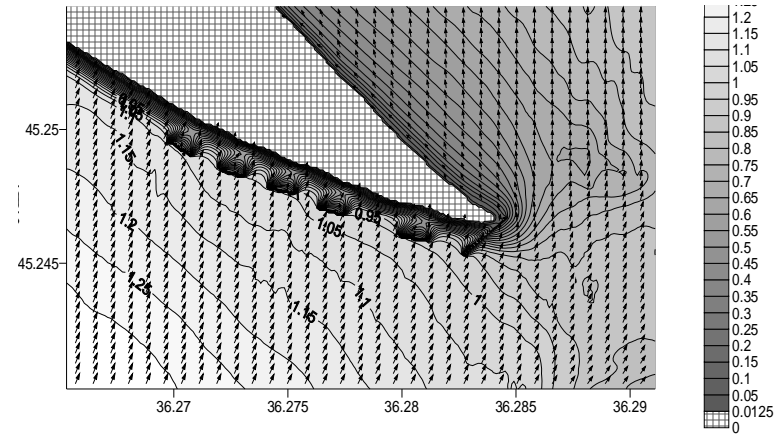
Волновые поля для юго-восточного ветра отличаются по своему виду от первых двух случаев. Зона наиболее интенсивного волнения формируется на юго-западе (0,7 – 0,75 м) и северо-востоке акватории (0,6 – 0,65 м). В средней части высоты волн лежат в пределах от 0,5 м на севере до 0,65 м на юге. Минимальные высоты волн характерны для юго-восточной границы и прибрежной зоны (0,25 – 0,6 м). Направление распространения волн отличается от генерального и на юге меняется с северо-западного на северное, а на севере с северо-западного на северной границе региона, на западное у побережья.

$W = 25$  м/с. Большой практический интерес представляет исследование штормов, генерируемых ветрами с экстремальными величинами скоростей. Хотя их повторяемость невелика (1 – 2 раза за 50 – 100 лет [6]), именно данные типы штормовых ветров приносят наибольший ущерб окружающей среде (примером может служить шторм 11 октября 2007 г.). На рис.1 показаны поля волнений для  $W = 25$  м/с.

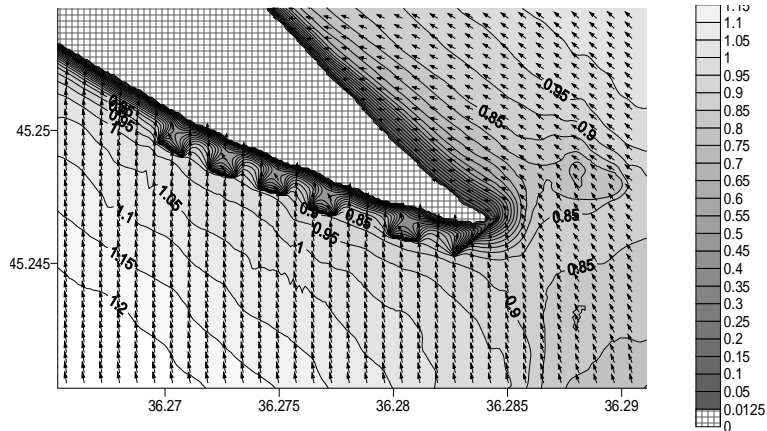
Как и в предыдущих случаях, наиболее интенсивное волнение соответствует юго-западному ветру, который в юго-западном районе акватории генерирует волны с высотами 1,2 – 1,3 м. На севере волнение наименее интенсивное (0,45 – 0,7 м). Вблизи от волноломов высоты волн изменяются в пределах 0,2 – 1,05 м. На севере от косы в прибрежной зоне преобладающая интенсивность волнения не превышает 0,2 – 0,3 м. Для юго-юго-западного направления ветра картина волнового поля близка к вышеописанному случаю. При юго-восточном ветре на преобладающей части акватории высоты волн не превышают величин 0,9 – 1,1 м. Для всех вариантов характерны незначительные эффекты рефракции волнения в северных направлениях.



*a*

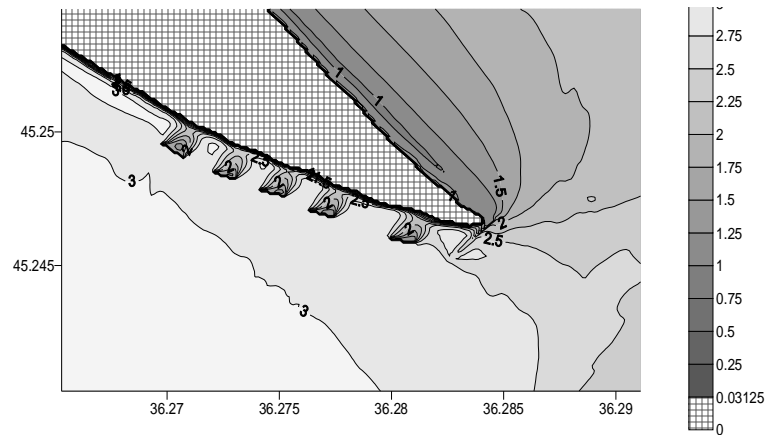


*б*

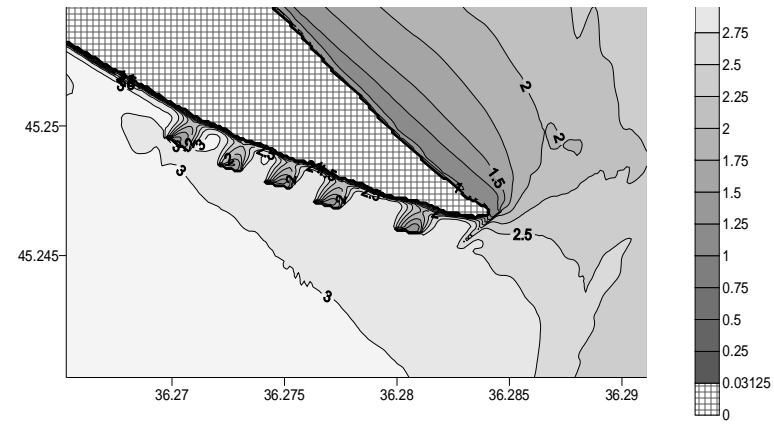


*в*

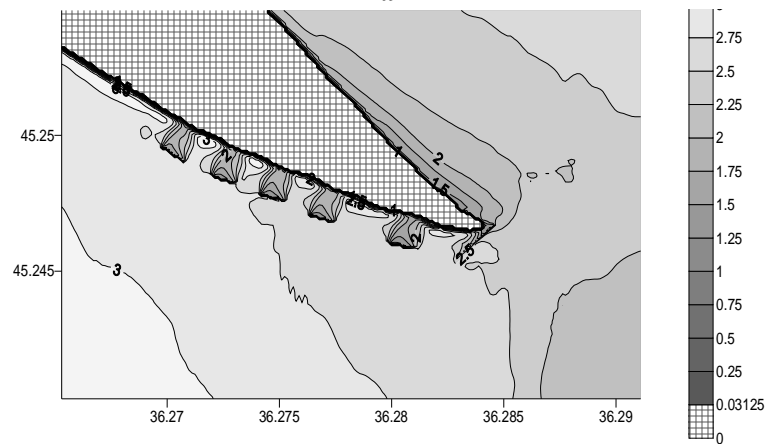
Рис. 1. Высота волн (м) и среднее направление волнения у восточной оконечности ОКТ для ветров юго-западного (*a*), юго-юго-западного (*б*), юго-восточного (*в*) направлений.



*a*

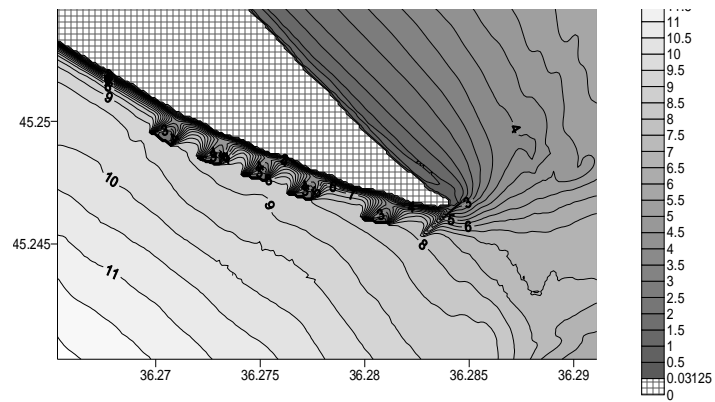


*б*

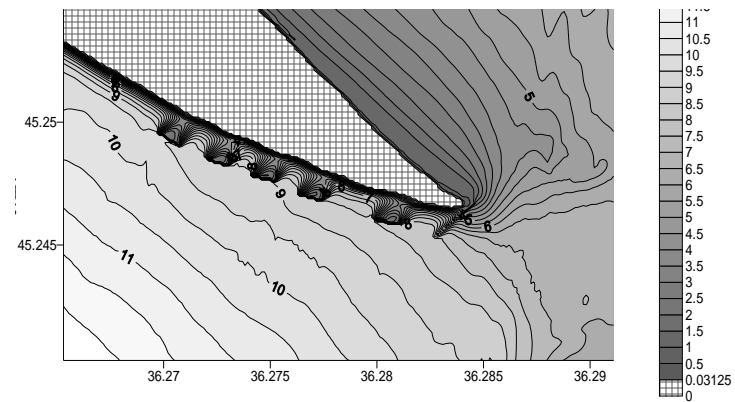


*в*

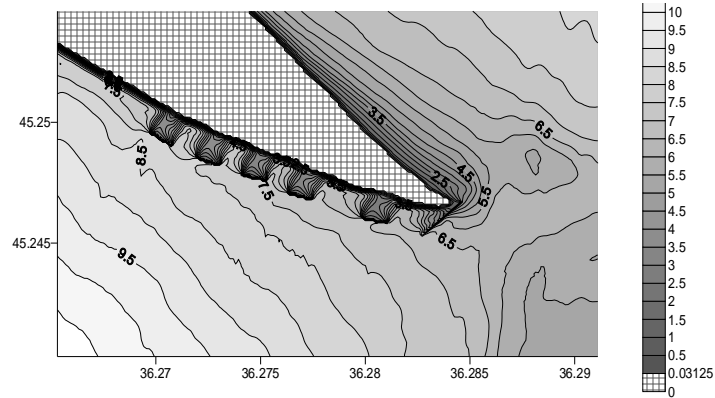
Р и с . 2 . Средние периоды волн ( $\tau$ ) у восточной оконечности ОКТ для ветров юго-западного (*a*), юго-юго-западного (*б*), юго-восточного (*в*) направлений.



***a***



***б***



***в***

Р и с. 3. Средние длины волн (с) у восточной оконечности ОКТ для ветров  $W = 25$  м/с юго-западного (*a*), юго-юго-западного (*б*), юго-восточного (*в*) направлений.

$W = 35$  м/с. Картины волновых полей качественно схожи с вышеописанными. Для ветра юго-западного и юго-юго-западного направлений наиболее интенсивное волнение отмечается на юго-востоке и юге района ОКТ (1,30 – 1,45 м). На севере высоты волн лежат в пределах 0,5 – 1,25 м. У побережья картина ветрового волнения изменяется и становится двойкой. С наружной стороны волноломов подходящие с юга волны имеют высоты 0,85 – 1,25 м, в зоне тени не превышают величин 0,5 – 0,7 м. У северного и северо-западного побережья косы преобладающие высоты волн составляют 0,3 – 0,5 м. Случай с юго-восточным ветром идентичен вышеописанным вариантам.

*Периоды и длины волн.* Как показали расчеты для юго-западного ветра, при  $W = 15$  м/с преобладающие значения периодов волн изменяются в пределах 2,25 – 2,75 с на юге и юго-западе акватории. На севере акватории они минимальны: 1,25 – 2 с. В районах теневых зон периоды волн снижаются до величин 1,5 – 1,75 с. При  $W = 25$  м/с картина распределения поля периодов волн аналогична предыдущему варианту (рис.2). На юге и в центре их величины не превышают значений 2,5 – 3 с, на севере 1,25 – 2,25 с, с внутренней стороны волноломов 1,4 – 2,15 с. Для  $W = 35$  м/с на юге 2,5 – 3,25 с; на севере 1,25 – 2,5 с; в прибрежных акваториях 1 – 2,2 с.

Эксперименты показали (рис.3), что для всех рассматриваемых градаций скорости ветра волны с максимальными длинами генерируются в южной части акватории (7,5 – 12 м). При подходе к южному побережью косы их величины постепенно снижаются от 6,5 – 9 м в центре района ОКТ до 5,5 – 8 м у береговой черты и с внутренней стороны берегозащитных сооружений. Следуя в северо-северо-восточном направлении, волны, огибая косу, поворачивают на север и северо-запад, где их длины становятся минимальными.

**Выводы.** С использованием метода вложенных сеток выполнено численное моделирование ветрового волнения у восточной оконечности ОКТ для трех градаций скорости ветра (15; 25 и 35 м/с) с горизонтальным разрешением 10 м. Анализ результатов моделирования показал, что для данного района наиболее волноопасными являются ветры юго-западного и юго-юго-западного направлений. Характерной чертой формируемых волновых полей является их слабая зависимость от величины скорости штормовых ветров, что связано с мелководностью акватории. Поля высот волн имеют существенную пространственную неоднородность, обусловленную особенностями рельефа дна. Наиболее интенсивное волнение (0,85 – 1,45 м) развивается в юго-западной части акватории при юго-западном и юго-юго-западном ветрах. При юго-восточном ветре формируются две области интенсификации волнения: на северо-востоке (0,7 – 1,45 м) и на юго-западе (0,75 – 1,55 м). Наименее интенсивное волнение формируется на севере акватории (0,5 – 1,25 м). Также в работе было исследовано влияние берегозащитных сооружений, проектируемых ГП «Государственным проектно-изыскательским институтом морского транспорта» на характеристики генерируемых волновых полей. В частности, было отмечено, что эти сооружения частично меняют картину волнения в акватории, однако их влияние носит локальный характер, который проявляется в формировании вблизи от волноломов тене-

вых зон. В этих зонах высоты волн снижаются в 2 – 2,5 раза. В отношении периодов и длин волн наблюдается следующая закономерность: прослеживается монотонная изменчивость данных характеристик по всей площади исследуемой акватории с формированием зон максимумов в акваториях с наибольшими глубинами и зон минимумов в прибрежных районах. В целом, величины периодов волн не превышают 2,75 – 3,25 с, длин 10 – 12 м.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Фомин В.В., Иванов В.А.* Численное моделирование ветрового волнения в районе острова Коса Тузла // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2004.– вып.10.– С.233-242.
2. *Фомин В.В., Иванов В.А.* Совместное моделирование течений и поверхностного волнения в Керченском проливе // Морской гидрофизический журнал.–2007.– № 5.– С.3-22.
3. *SWAN Cycle III version 40.51. User Manual.*– Netherlands: Delft University of Technology, 2006.– 119 p. (<http://swan.ct.tudelft.nl>)
4. *Booij N., Ris R., Holthuijsen L.* A third-generation wave model for coastal regions. Model description and validation // J. Geophys. Res.– 1999.– v.104, № C4.– P.7649-7666.
5. *SWAN Technical Documentation SWAN Cycle III. Version 40.51A.*– Netherlands: Delft University of Technology, 2007.– 99 p.
6. *Горячкин Ю.Н., Иванов В.А., Репетин Л.Н.* Гидрометеорологические условия Феодосийского залива / Препринт.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2004.– 64 с.

Материал поступил в редакцию 28.11.2008 г.