

С.Ю.Михайличенко

Морской гидрофизический институт, г.Севастополь

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ШТОРМОВОГО ВОЛНЕНИЯ В АКВАТОРИИ ХЕРСОНЕСА

На основе численного моделирования с использованием волновой модели SWAN исследованы особенности штормовых режимов прибрежной акватории Херсонеса. Проведен анализ волновой картины ветров четырех румбов (северного, северо-западного, западного, юго-западного) со скоростями 15 и 25 м/с. Путем сравнительного анализа определены наиболее штормоопасные направления ветра для исследуемого региона.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *ветровое волнение, волновая модель SWAN, штормовые ветра, высоты значительных волн.*

Херсонес является важным культурно-историческим и географическим памятником Крымского п-ова. Поэтому задача его сохранности в существующем виде является весьма актуальной. В частности, это связано с необходимостью защиты береговой линии Херсонеса от деструктирующего воздействия интенсивных гидродинамических процессов. К таковым, в первую очередь, относится штормовое волнение. Данное воздействие проявляется во множестве негативных последствий: разрушении береговой инфраструктуры, затоплении прибрежных районов, нарушении их хозяйственной деятельности, а также в значительном материальном, и экологическом ущербе. Достаточно вспомнить ноябрьский шторм 2007 г., который привел к затоплению трех сухогрузов и одного танкера, что стало причиной экологической катастрофы в Керченском проливе. В Севастопольской бухте штормом была разбита набережная, расположенная между Артиллерийской и Южной бухтами.

Задачей работы было исследование режимов штормового волнения в акватории Херсонеса. Для ее реализации было решено провести численное моделирование ветрового волнения в рассматриваемой акватории для штормовых ветров разных направлений.

Математическая постановка задачи. Численное моделирование проводилось с использованием спектральной модели ветрового волнения SWAN [1]. Модель базируется на численном решении уравнения баланса волновой энергии в спектральной форме:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla(c_g N) + \frac{\partial}{\partial \omega}(c_\omega N) + \frac{\partial}{\partial \theta}(c_\theta N) = \frac{S}{\omega}. \quad (1)$$

Здесь S – функция источника, параметризующая механизмы формирования волнового поля:

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{wc} + S_{bf} + S_{dib}, \quad (2)$$

где S_{in} – источник энергоснабжения волн ветром; S_{nl} – нелинейные взаимодействия спектральных гармоник; S_{wc} – диссипация энергии вследствие об-

рушения волновых гребней; S_{bf} – диссипация энергии, обусловленная донным трением; S_{dip} – обрушение волн на критических глубинах.

Волновое уравнение (1) решается с нулевыми значениями N на твердых границах расчетной области. На жидких границах величина N рассчитывается через высоту и направление входящих волн. Зная распределение N , можно определить частотно-угловой спектр поверхностного волнения с помощью соотношения:

$$E = \sigma N, \quad (3)$$

и на его основе получить оценки ряда спектральных характеристик волнения, в частности: высоту значительных волн (*significant wave height*) h_s , среднюю высоту волн h_a , среднее направление волнения θ_a , средний период волн T_a и амплитуду скорости придонных орбитальных течений U_{wb} :

$$h_s = 4\sqrt{\langle E \rangle}, \quad h_a = \frac{\sqrt{2\pi} h_s}{2}, \quad \theta_a = \arctg \left[\frac{\langle E \sin \theta \rangle}{\langle E \cos \theta \rangle} \right], \quad (4)$$

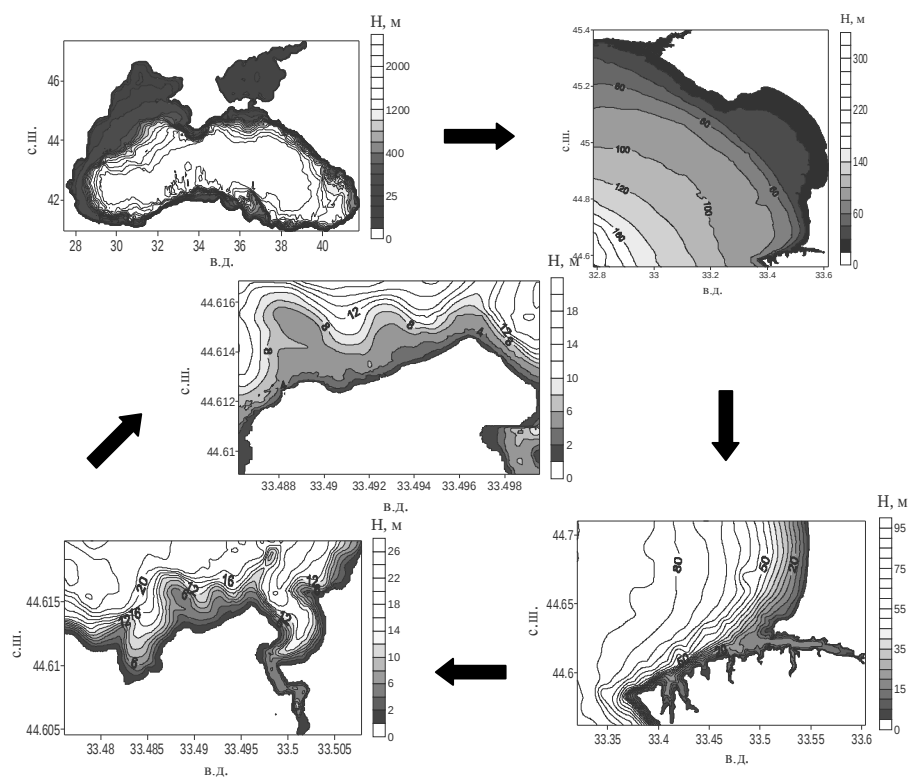
$$T_a = \frac{2\pi \langle E \rangle}{\langle \omega E \rangle}, \quad U_{wb} = \frac{\omega h_s}{2 \operatorname{sh}(kD)}. \quad (5)$$

В этих выражениях угловыми скобками обозначена операция двойного интегрирования по частотной и угловой переменным:

$$\langle \varphi \rangle = \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \varphi(\theta, \omega) d\theta d\omega. \quad (6)$$

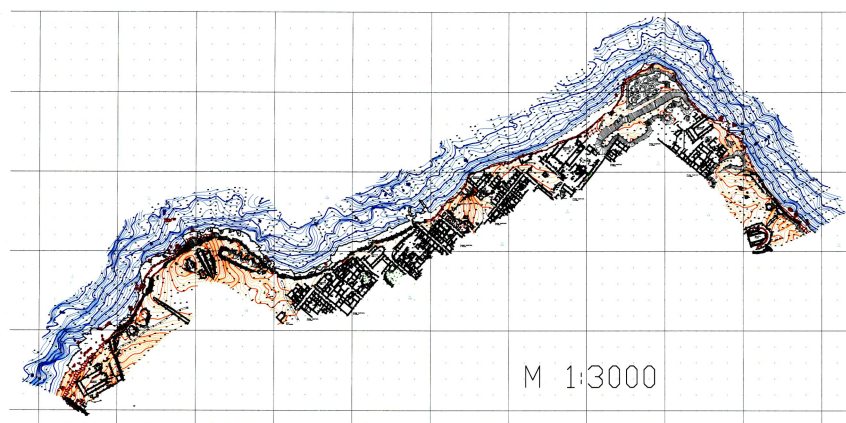
Для расчетов полей волнения в модели использовалась частотная сетка с 31 узлом, покрывающая частотный интервал 0,02 – 2 Гц. Дискретность модели по угловой координате составляла 10°. Ветер во всех вариантах задавался постоянным по времени и однородным по пространству с двумя вариантами скорости $V = 15$ и 25 м/с. Трение в модели задавалось по модели Гранта-Мадсена с коэффициентом шероховатости донной поверхности $k_v = 0,05$ м.

Результаты. Работа была разбита на два этапа. На первом этапе проводились подготовительные к моделированию мероприятия, которые включали в себя создание массивов глубин исследуемой и прилегающих акваторий и их доработку, а также создание пятиколенного алгоритма вложенных сеток для расчета граничных условий на жидких границах рассматриваемого региона. Суть метода заключалась в пошаговом приближении к исследуемому району путем расчета граничных условий для областей внутренних регионов с большим пространственным разрешением. На первом шаге на сетке с 5-ти км разрешением рассчитывалось ветровое волнение для всего Азово-Черноморского бассейна. На втором шаге проводился расчет волновых полей для западной акватории Крымского п-ова с разрешением в 200 м. Дискретность пространственной сетки третьего шага (юго-западная акватория Крыма) составляла 50 м, четвертого шага (Херсонес, Песочная и Карантинная бухты) – 8 м. На последнем шаге ветровое волнение рассчитывалось в прибрежной акватории Херсонеса на сетке с 3-х метровым разрешением. Ниже, на рис.1, представлен пример такого расчета для варианта северо-западного ветра со скоростью 25 м/с.



Р и с . 1 . Пятиколенный нестинг-алгоритм.

Пробные расчеты волновых полей в акватории Херсонеса показали слабую зависимость высот подходящих к береговой черте волн от скорости и направления ветра. Анализ причин данной особенности волновых полей показал, что данная ситуация является следствием неточности массива глубин в прибрежной зоне акватории. Это объясняется тем, что массив глубин для последней вложенной области создавался как гибрид двух массивов – предыдущего шага и уточненной карты промеров глубин прибрежной зоны (рис.2). Из-за разницы в пространственном разрешении массивов глубин



Р и с . 2 . Детализированная батиметрическая карта прибрежной полосы Херсонеса.

Т а б л и ц а 1. Максимальные разности значений высот значительных волн для различных случаев ограничения массивов глубин минимальными величинами.

варианты сравнения, h_{min} , м	0 – 0,3	0,3 – 0,7	0,7 – 1	0 – 1
$\Delta h_{s\ max}$, м	0,64	0,37	0,65	1,32

предпоследнего шага нестинга и прибрежной полосы Херсонеса, полученной по уточненной карте, общий массив глубин акватории Херсонеса получился интерполированным, что снизило его точность, особенно у побережья. Поэтому полученный цифровой массив нуждался в последующей доработке. Решением здесь стало введение в массив глубин исследуемого региона искусственного ограничения по минимальной глубине.

С целью определения наиболее эффективного по точности ограничивающего значения было проведено моделирование ветрового волнения для ветра северо-западного румба со скоростью $V = 25$ м/с для различных вариантов минимальных глубин: 0,3; 0,7 и 1 м. Анализ результатов моделирования проводился путем их сравнения друг с другом. Сравнительным критерием была выбрана высота значительных волн h_s . Результаты сравнения, представленные в табл.1, показали, что наибольшие величины разностей высот значительных волн наблюдаются при сравнении вариантов без ограничения по глубине с ограничением в 0,3 и 1 м, а также при сравнении минимальных глубин в 0,7 и 1 м. Однако, вследствие того, что непосредственно у берега глубины во многих случаях имеют величины, меньшие 0,7 и 1 м, было решено в качестве ограничивающего значения минимальной глубины взять величину в 0,3 м.

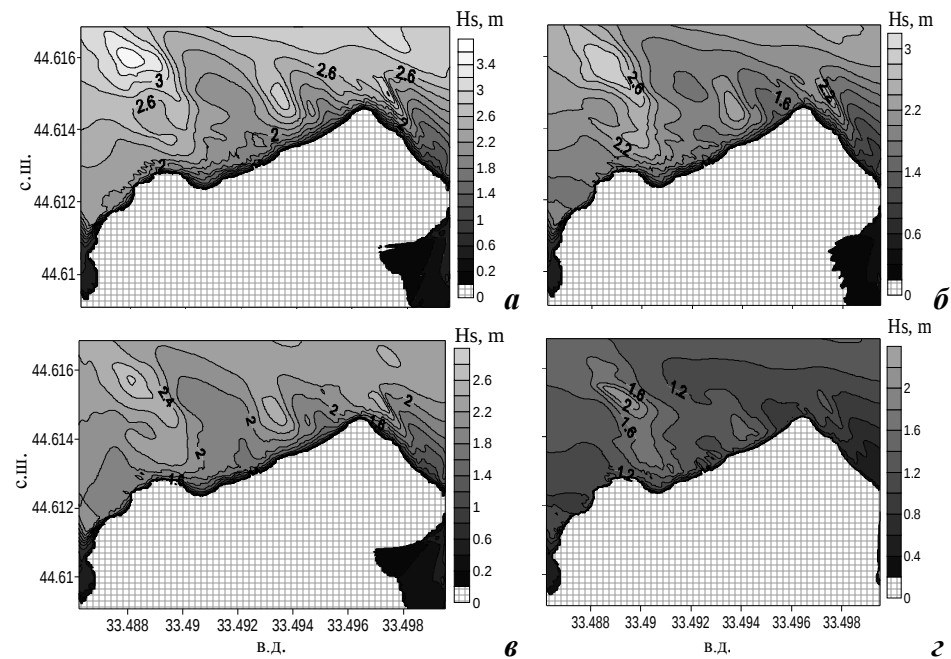
Анализ результатов численных экспериментов. Так как целью численного моделирования ветрового волнения в акватории Херсонеса является исследование штормовых режимов, первоочередной задачей в этом направлении является определение наиболее штормоопасных направлений ветра для исследуемого региона. Здесь нужно учитывать два фактора – повторяемость ветров над исследуемой акваторией и их географическое влияние на формирование развитого волнения в регионе. Определяющую роль во втором случае играет положение бухт Севастопольского региона относительно всего Азово-Черноморского бассейна и особенности их береговой линии. Анализ повторяемости ветров для данного региона показал, что над Севастопольскими бухтами в течение года наибольшую повторяемость имеют ветра пяти следующих румбов: северного, южного, восточного, западного и северо-западного [3 – 5]. Среди них преобладают восточные и южные ветра [4, 5]. Однако они не оказывают заметного влияния на акваторию исследуемого региона [4, 5]. В частности, центральные регионы Севастопольских бухт почти полностью закрыты для разогнанного волнения от ветров юго-западного направления, а северо-восточный ветер генерирует волны внутри исследуемой акватории, что также исключает возможность формирования сильного штормового волнения в рассматриваемом районе. По той же причине в рамках задачи исследования не имеет практического значения рассмотрение ветров других восточных направлений. Западные и юго-западные ветра достаточно редки, но по своему разгонному потенциалу

эти два направления наиболее опасны. Однако акватория Херсонеса закрыта для проникновения разогнанного волнения от юго-западного ветра. Кроме того, нельзя не учитывать ветра северо-западного румба, так как они, с одной стороны, также обладают весьма значительным разгонным потенциалом, а с другой – открытостью центральных регионов Севастопольских бухт (в том числе и в районе Херсонеса) для проникновения разогнанного волнения из северо-западного региона Черного моря. Таким образом, принимая во внимание все вышеописанное, в работе учитывались ветра четырех следующих румбов: северных, северо-западных, западных и юго-западных. По скорости ветра в работе рассматривались два варианта $V = 15$ и 25 м/с, что соответствует сильному и экстремально сильному шторму. Основной исследуемой волновой характеристикой была определена высота значительных волн h_s .

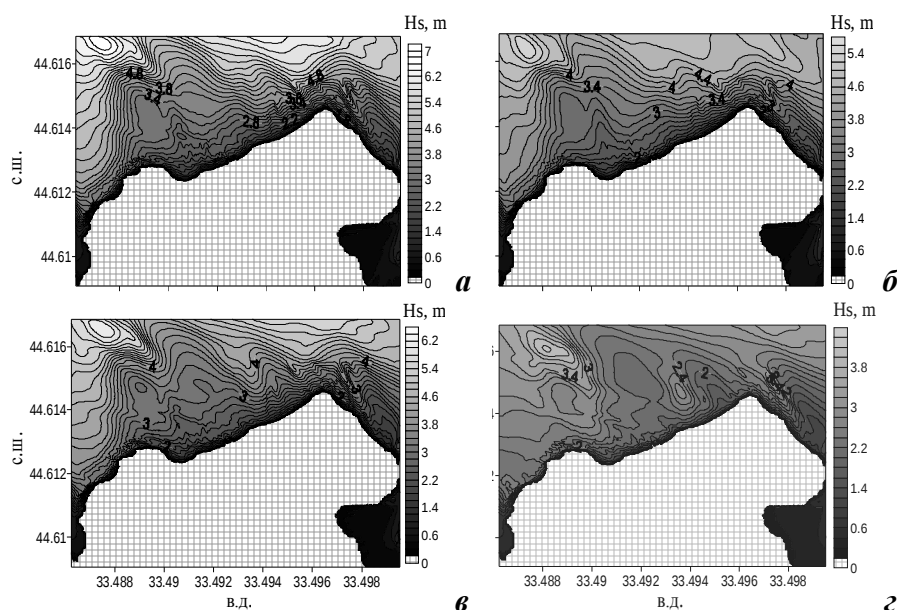
Всего было проведено 8 численных экспериментов по моделированию волновых режимов для акватории Херсонеса. Общей чертой всех рассмотренных случаев являются следующие особенности волновых полей:

- при распространении волн в центральной и прибрежной частях акватории Херсонеса наблюдаются заметные эффекты рефракции. В остальных частях региона, особенно вблизи западной границы, направление волн близко к направлению генерирующего их ветра;

- характер распределения величин высот волн во всех случаях одинаков. Акватория делится на две примерно равные по площади зоны. Первая расположена на севере и представляет собой зону более интенсивного волнения. Вторая – на юге и является зоной более слабого волнения, которое постепенно и плавно ослабляется при приближении к берегу вследствие обрушений (рис.3, 4).



Р и с . 3 . Поля высот волн для ветров северо-западных (а), западных (б), северных (в) и юго-западных (з) румбов при скорости ветра $V = 15$ м/с.



Р и с . 4 . Поля высот волн для ветров северо-западных (а), западных (б), северных (в) и юго-западных (г) румбов при скорости ветра $V = 25$ м/с.

Еще одной характерной чертой волновых полей является формирование вблизи северо-западной границы акватории, перед банкой, а также в центре и на западе у побережья, в местах сгущения изолиний глубин, зон особо сильного ветрового волнения, которое формируется вследствие эффекта шоалинга. Над самой банкой усиленное большими градиентами глубин волнение частично обрушается, что приводит к тому, что зона ослабленного волнения сильно вдается в центр региона. Ниже представлено детальное описание особенностей волновых режимов для каждого отдельного случая.

Скорость ветра $W = 15$ м/с. Ветра с такими скоростями встречаются достаточно часто в акватории Азово-Черноморского бассейна и носят характер сезонно повторяющихся штормов [6]. Из всех рассмотренных случаев наиболее интенсивное волнение формируется при северо-западном ветре (рис.3, а), что, с одной стороны, объясняется большой величиной разгона волн (~ 270 км), а с другой – открытостью Севастопольских бухт для разогнанного волнения из северо-западной части акватории Черного моря. Своего максимума оно достигает на северо-западе и северо-востоке региона (3 – 3,5 м). На севере в центральной части акватории, а также по всему югу волнение носит менее интенсивный характер (2 – 3 м). Наиболее слабое волнение наблюдается в прибрежной зоне (0,5 – 1,5 м). Перед банкой высоты волн наибольшие (3,5 – 3,7 м). Промежуточное по своей интенсивности волнение характерно для ветров западного и северного направлений. Характер распределения высот волн здесь почти одинаков. Максимально развитое волнение наблюдается на северо-западе (2 – 3,5 м), на небольшом участке центральной акватории (2 – 3 м) и на северо-востоке (2 – 3,2 м). Средние величины высот волн характерны для южной части региона, а также в зоне значительного изгиба изолиний глубин центральной части аква-

тории (рис.3, б – в) (1 – 2 м). У побережья волнение минимально. Здесь высоты волн не превышают значений в 1 – 1,5 м. Особо стоит отметить вариант юго-западного ветра (рис.3, з). В этом случае наблюдается сравнительно сильное ослабление волнового поля и его равномерный характер в распределении высот волн по всему региону. Это объясняется тем, что рассматриваемый район закрыт для проникновения разогнанного ветрового волнения, формируемого юго-западным штормовым ветром. Поэтому здесь преобладают в основном волны, разогнанные в пределах Севастопольской бухты. Высоты волн в данном случае не превышают значений 1 – 1,5 м по всей площади акватории, кроме района, расположенного перед банкой. Здесь они резко возрастают до 2 – 2,3 м. У береговой линии волнение слабо отличается от остальной части акватории (0,5 – 1 м).

Скорость ветра $W = 25$ м/с. Немаловажный 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. Характер волновых полей для данного случая мало чем отличается от аналогичных вариантов для ветров со скоростью $V = 15$ м/с. Максимально интенсивное волнение характерно для северо-западного ветра (рис.4, а). Высоты волн здесь распределены по трем основным зонам: 4 – 6,5 м на севере, 2,5 – 3 м в центре и 1 – 2 м у берега. Западный и северный ветра (рис.4, б – в) формируют в акватории волновые поля средней интенсивности: 4 – 6 м на севере, 2,5 – 4 м в центре и от 1 до 2 м у берега. Как и в предыдущем случае, особо выделяется вариант с юго-восточным ветром (рис.4, з). Здесь волнение минимально. На большей части акватории высоты волн лежат в пределах от 2 до 3 м. Лишь перед банкой и частично на северо-востоке они увеличиваются до 4 – 4,5 м. В данном случае волны с высотами в 2 м подходят практически к самому берегу.

На заключительном этапе работы была решена задача определения двух наиболее штормоопасных направлений ветра. Для этого было проведено сравнение волновых полей рассчитанных вариантов. Сравнивались величины высот значительных волн. Были построены поля абсолютных величин разностей между базовым вариантом и остальными, а также были рассчитаны средние величины разностей высот значительных волн (табл.2).

В качестве базового варианта был выбран случай с западным ветром. Результаты сравнения показали, что наибольшие величины разностей высот значительных волн (Δh_s) характерны для юго-западного и северо-западного направлений. В первом случае величины разностей имели положительные, во втором – отрицательные значения. Это говорит о том, что двумя наиболее штормоопасными направлениями ветра, при которых формируется макси-

Т а б л и ц а 2. Средние разности высот значительных волн Δh_s , м.

скорость ветра V , м/с	сравниваемые варианты направлений ветра, $\theta_1 - \theta_2$, °		
	0 – 45	0 – 270	0 – 315
15	0,310	0,129	– 0,212
25	0,540	0,256	– 0,380

мально интенсивное волнение, являются западные и северо-западные румбы. Именно эти направления, как наиболее опасные, и следует учитывать в дальнейшем при решении задач защиты побережья Херсонеса от разрушительного влияния штормового волнения.

Выводы. В работе решена задача исследования особенностей волновых режимов в акватории Херсонеса для ситуаций сильных и экстремально сильных штормовых ветров четырех румбов – северного, северо-западного, западного, юго-западного. Работа включала в себя два этапа. На первом этапе были проведены подготовительные к моделированию мероприятия: созданы массивы глубин исследуемой и прилегающих акваторий, а также 5-ти коленный нестинг-алгоритм для расчета граничных условий на жидких границах региона. На втором этапе работы было проведено численное моделирование ветрового волнения в прибрежной зоне Херсонеса для двух вариантов скорости ($V = 15$ и 25 м/с) и четырех наиболее значимых направлений ветра (северного, северо-западного, западного, юго-западного). Основной волновой характеристикой для исследования была выбрана высота значительных волн h_s . Результаты расчетов показали, что наиболее интенсивное ветровое волнение формируется при северо-западном и западном ветрах. Распределение высот волн для обоих вариантов скорости ветра было одинаковым. Волнение максимальной интенсивности формировалось на севере акватории ($h_s = 2,8 - 3,5$ м для $V = 15$ м/с и $h_s = 5,5 - 7,0$ м для $V = 25$ м/с). Средней по своей интенсивности ветровое волнение было характерно для центральной части акватории. Здесь высоты волн не превышали значений $3 - 4$ м. Наиболее слабое волнение формировалось у побережья вследствие обрушений волн ($h_s = 0,5 - 1,5$ м для $V = 15$ м/с и $h_s = 1,0 - 2,0$ м для $V = 25$ м/с). Кроме этого было проведено численное сравнение рассчитанных вариантов друг с другом. Сравнивались величины высот значительных волн. Сравнение проводилось путем расчетов величин абсолютных разностей высот волн сравниваемых волновых полей, графическим отображением полученных массивов и нахождением средних значений этих массивов разностей. Результаты сравнения показали, что ветер юго-западного направления оказывает минимальное влияние на исследуемую акваторию. Наиболее интенсивное волнение формируется при ветрах западного и северо-западного направлений, которые и были определены как наиболее штормоопасные для региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. SWAN Cycle III version 40.85. User Manual.– Delft University of Technology, Netherlands, 2011.– 121 p.
2. Филипп О.М. Динамика верхнего слоя океана.– Л.: Гидрометеиздат, 1980.– 319 с.
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. Алексеев Д.В., Фомин В.В., Иванча Е.В., Харитонова Л.В., Черкесов Л.В. Математическое моделирование ветрового волнения в Севастопольской бухте // Морской гидрофизический журнал.– 2012.– № 1.– С.75-84.

5. *Алексеев Д.В., Иванов В.А., Иванча Е.В., Фомин В.В., Черкесов Л.В.* Оценка влияния защитных молов на характеристики ветрового волнения в Севастопольской бухте // *Метеорология и гидрология*.– 2013.– № 4.– С.47-57.
6. *Горячкин Ю.Н., Иванов В.А., Репетин Л.Н.* Гидрометеорологические условия Феодосийского залива / *Препринт*.– Севастополь: МГИ НАНУ, 2004.– 64 с.

Материал поступил в редакцию 12.11.2014 г.

АНОТАЦІЯ На основі чисельного моделювання з використанням хвильової моделі *SWAN* досліджено особливості штормових режимів прибережній акваторії Херсонеса. Проведено аналіз хвильової картини вітрів чотирьох румбів (північного, північно-західного, західного, південно-західного) зі швидкостями 15 і 25 м/с. Шляхом порівняльного аналізу визначено найбільш штормоопасні напрямку вітру для досліджуваного регіону.

ABSTRACT Using numerical simulations on the base on wave model *SWAN* the peculiarities of storm regime in the coastal area of Hersonissos are studied. The wave patterns for winds of four rhumbs (north, north-west, west, south-west) at 15 and 25 m/s are analyzed. Through a comparative analysis the most storm dangerous wind directions are identified in the region under study.