

УДК 551.466.2

Л.В.Харитонов, В.В.Фомин

*Морской гидрофизический институт НАН Украины, г.Севастополь***СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ
В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ ЗАПАДНОГО КРЫМА ПО ДАННЫМ
РЕТРОСПЕКТИВНЫХ РАСЧЕТОВ ЗА 1979 – 2010 ГГ.**

Для прибрежной зоны Западного Крыма с использованием спектральной волновой модели *SWAN* и данных ре-анализа приземного ветра *JRA* за 1979 – 2010 гг. получен 32-тилетний массив полей волнения с пространственным разрешением 600 м и дискретностью по времени 6 ч. На его основе проанализирована повторяемость параметров волнения, проведено сопоставление полученных результатов с данными береговых гидрометеорологических станций. Методом годовых максимумов выполнены оценки экстремальных высот волн в характерных точках побережья.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *Западный Крым, прибрежная зона, ветровое волнение, модель SWAN, ре-анализ.*

Введение. Побережье Западного Крыма является одним из наиболее перспективных районов для курортно-рекреационного использования. Здесь возрастет хозяйственная деятельность, связанная с освоением прибрежных территорий. В настоящее время существуют проекты развития имеющихся и строительства новых курортных комплексов на этом участке берега Крыма. Перечисленные обстоятельства предъявляют повышенные требования к качеству гидрометеорологической информации в рассматриваемом районе, в частности характеристик ветрового волнения в прибрежной зоне.

Основные режимно-климатические особенности Черноморского региона представлены в работах [1, 2] и атласах [3, 4]. Анализу данных наблюдений за ветром и волнением на береговых станциях Западного Крыма посвящены работы [5 – 7].

В работах [5, 7] даны оценки экстремальных высот волн у берегов Крыма по данным наблюдений на морских гидрометеорологических станциях (МГС) на основе экстраполяции режимных функций распределения в область малых обеспеченностей.

Пространственное распределение экстремальных характеристик волнения Черного моря на основе модели *WAM* и данных ре-анализа приземного ветра *ERA40* за 1958 – 1997 гг. приведены в [8]. Там же представлены карты экстремальных значений волновых параметров для всего моря с разрешением ~ 20 км. Вследствие недостаточного пространственного разрешения и ограничений модели *WAM*, полученные в [8] поля не вполне адекватно отражают экстремальные волновые характеристики в прибрежной зоне Западного Крыма.

Целью данной работы является получение более детальной информации о характеристиках ветрового волнения в прибрежной зоне Западного Крыма для современной климатической ситуации.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: на основе математической модели *SWAN* расчет полей ветрового волнения пе-

риод с высоким пространственным разрешением (~ 600 м) за период 1979 – 2010 гг.; получение оценок экстремальных волн в прибрежной зоне Западного Крыма; сопоставление результатов моделирования с данными срочных наблюдений на прибрежных гидрометеорологических станциях.

Материалы и методы исследований. Для моделирования ветрового волнения у западного побережья Крыма использовалась параллельная версия спектральной волновой модели *SWAN* (*Simulating Waves Nearshore*) [9], в основе которой лежит уравнение баланса волновой энергии в спектральной форме

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

где $N = E(t, x, y, \omega, \varphi)/\omega$ – плотность волнового действия; $E(t, x, y, \omega, \varphi)$ – частотно-угловой спектр волнения;

$$c_g = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{g}{k}} \operatorname{th}(kH) \left(1 + \frac{2kH}{\operatorname{sh}(2kH)} \right); \quad \{c_{gx}, c_{gy}\} = c_g \left\{ \frac{k_x}{k}, \frac{k_y}{k} \right\};$$

$\mathbf{k} = \{k_x, k_y\}$ – волновой вектор; $k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$; H – глубина; $\omega = \sqrt{gk \operatorname{th}(kH)}$ – частота волн; φ – направление распространения волн; $c_{\omega} = \partial \omega / \partial H \cdot \partial H / \partial t$; $c_{\varphi} = -1/k \cdot \partial \omega / \partial H \cdot \partial H / \partial m$; 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; S_{nl} – энергия нелинейных взаимодействий спектральных гармоник; S_{wc} – диссипация энергии вследствие обрушения волновых гребней; S_{bf} – диссипация энергии вследствие донного трения; S_{dib} – энергия обрушения волн на критических глубинах.

На твердых боковых границах $E = 0$. По угловой переменной используется условие периодичности $E(\varphi = 0) = E(\varphi = 2\pi)$, а по частотной $E(\omega_{min}) = E(\omega_{max}) = 0$.

Расчеты выполнялись на вычислительном кластере Морского гидрофизического института НАН Украины [10]. Моделировалось нестационарное волнение на основе ретроспективных данных о скорости и направлении приводного ветра *JRA* за период 1979 – 2010 гг. [11]. Основываясь на результатах работы [12], где проводилась валидация модели *SWAN* по данным *JRA*, зональная и меридиональная компоненты скорости приводного ветра умножались на поправочный коэффициент 1,3. Применялся 2-х шаговый метод вложенных сеток. На первом шаге рассчитывалось волнение для всего Азово-Черноморского бассейна с горизонтальным разрешением $\sim 4,5$ км (сетка 246×160). Далее проводился расчет волнения для акватории, прилегающей к Западному Крыму, с горизонтальным разрешением ~ 600 м (сетка 217×250). При этом в качестве граничных условий на жидкой границе брались результаты расчетов с предыдущего шага. Разрешение модели по угловой координате составляло 15° , частотный интервал равнялся $0,02 - 2$ Гц. Шаг интегрирования по времени составлял 10 мин. Параметризация донного трения в модели учитывалась на основе аппроксимации Гранта-Мадсена [13]. Весь расчет полей на вычислительном кластере длился около 15 суток.

В результате получен массив полей высот, направлений и периодов ветровых волн у берегов Западного Крыма за период 1979 – 2010 гг. на регулярной сетке с шагом по пространству ~ 600 м и дискретностью по времени 6 ч (всего 43832 поля) [14]. Расчетные данные охватывают 30-ти летний период после климатического сдвига 1976 – 1977 гг. [15], и, следовательно, адекватно характеризует современный волновой режим исследуемой акватории.

Для оценки экстремальных высот ветровых волн применялся метод годовых максимумов, базирующийся на интегральной функции распределения Гумбеля (или Фишера-Типпета I рода) [16]:

$$F(h) = \exp[-\exp(-(h - A_1)/B_1)], \quad (2)$$

где $F(h)$ – вероятность непревышения высоты волны значения h ; A_1 , B_1 – параметры, определяемые для каждой конкретной точки по заданному ряду годовых максимумов высот волн на основе метода наименьших квадратов.

Из (2) следует выражение для высоты волны соответствующей заданной величине квантиля F :

$$h = A_1 + B_1[-\ln(-\ln F)]. \quad (3)$$

С учетом (3), оценка высоты волны, возможной 1 раз в T лет ($T > 1$), определяется как квантиль $(1 - 1/T) \cdot 100$ % – обеспеченности распределения (2), т.е.

$$h_T = A_1 - B_1 \ln[-\ln[1 - 1/T]]. \quad (4)$$

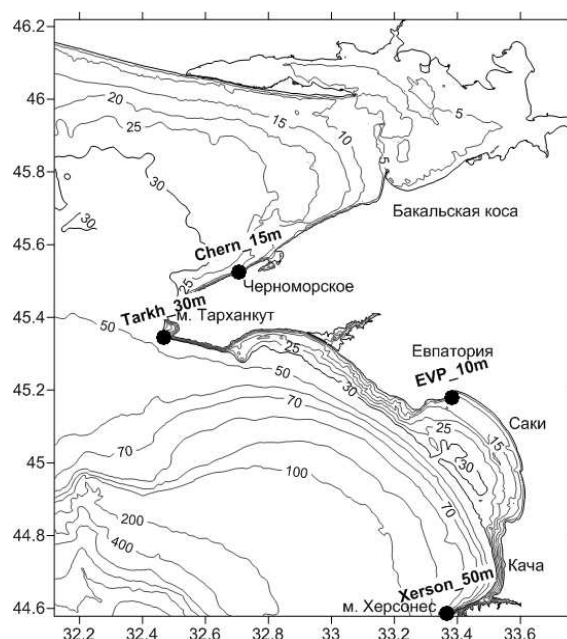
После расчета по соотношению (4) средних оценок волн \bar{h}_T , возможных 1 раз в заданное количество лет, вычисляются высоты волн других обеспеченностей h_p с помощью интегральной функции распределения индивидуальных волн для моря конечной глубины [16]:

$$F(h_p) = 1 - \exp \left[- \frac{\pi}{4(1 + h_T^*/\sqrt{2\pi})} \left(\frac{h_p}{\bar{h}} \right)^{\frac{2}{1 - h_T^*}} \right]. \quad (5)$$

Здесь $h_T^* = \bar{h}_T/H$ – относительная средняя высота волны, возможная 1 раз в T лет, H – глубина моря.

Проводилось сравнение данных ре-анализа с данными наблюдений на МГС Черноморское, Тарханкутский маяк, Евпатория и Херсонесский маяк. Наблюдения за волнением на МГС производились регулярно на протяжении длительных периодов времени. Для анализа был выбран период с 1979 по 2010 гг., соответствующий расчетному. На МГС Тарханкутский маяк наблюдения осуществлялись только до 1995 г., поэтому сопоставление данных осуществлялось за период 1979 – 1995 гг.

Для получения статистической информации о характеристиках волнения в прибрежных районах Западного Крыма и сравнения модельных и натурных данных, из 32-ти летнего массива волновых полей выбирались временные ряды с 6-ти часовой дискретностью для нескольких характерных точек, расположенных вблизи МГС (рис.1 и табл.1): на изобате 15 м на траверзе бухты Узкая (п.Черноморское) (1); к западу от м.Тарханкут на изобате



Р и с . 1 . Карта-схема рельефа дна у Западного Крыма с обозначением точек расчета статистических характеристик волнения.

30 м (2); в Евпаторийской бухте на изобате 10 м (3); у м.Херсонес на изобате 50 м (4).

Анализ результатов. На рис.2 для характерных точек представлена повторяемость различных градаций высот волн по месяцам года. Градации волн выбраны на основании стандартной шкалы степени волнения и соответствуют баллам волнения. Внутригодовое распределение величин суммарной повторяемости волнения ≥ 3 баллов

($> 0,75$ м), а также штормового волнения ≥ 4 баллов ($> 1,25$ м) (рис.2), рассчитанные по данным SWAN хорошо отражают сезонные различия характеристик ветрового волнения. В соответствии с особенностями режима ветра, максимальная интенсивность ветрового волнения приходится на холодный период года – с октября по март.

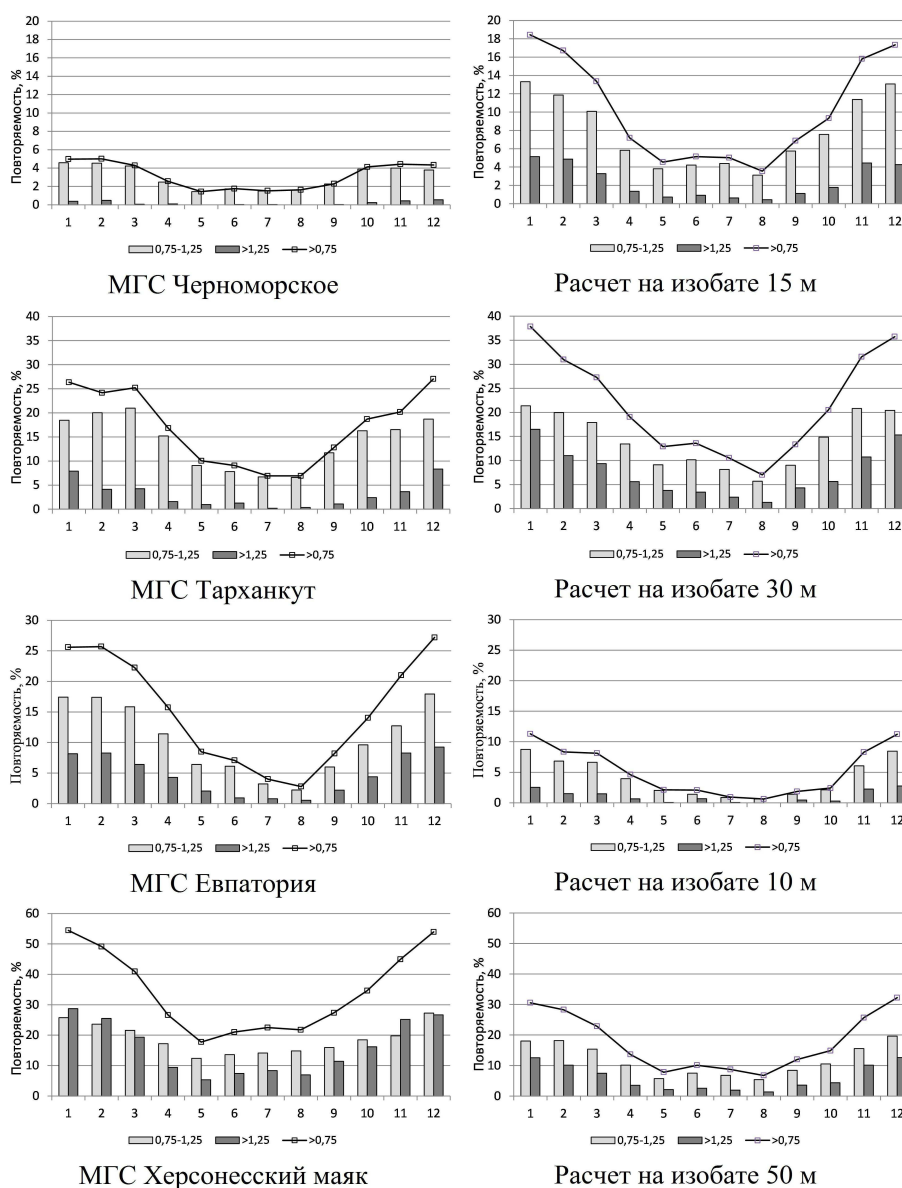
Однако при сравнении значений повторяемости волнения ре-анализа с натурными данными наблюдаются некоторые различия.

Сравнение внутригодовых повторяемостей высот волн по модельным и натурным данным для выбранных точек показало, что для Евпатории и м.Херсонес модель занижает повторяемость высот волн в 2 раза. Кроме того, для районов м.Тарханкут и п.Черноморское результаты расчетов дают завышенные в 2 и 4 раза значения повторяемости ветрового волнения соответственно. При этом для м.Тарханкут эта разница проявляется за счет увеличение штормового волнения ($> 1,25$ м).

Указанные несоответствия могут быть обусловлены как мелкими неоднородностями реальных полей ветра, которые не воспроизводятся в ре-анализе JRA, так и трансформацией волнения при подходе к берегу. Возмож-

Т а б л и ц а 1 . Координаты точек у западного берега Крыма, для которых рассчитаны волновые характеристики.

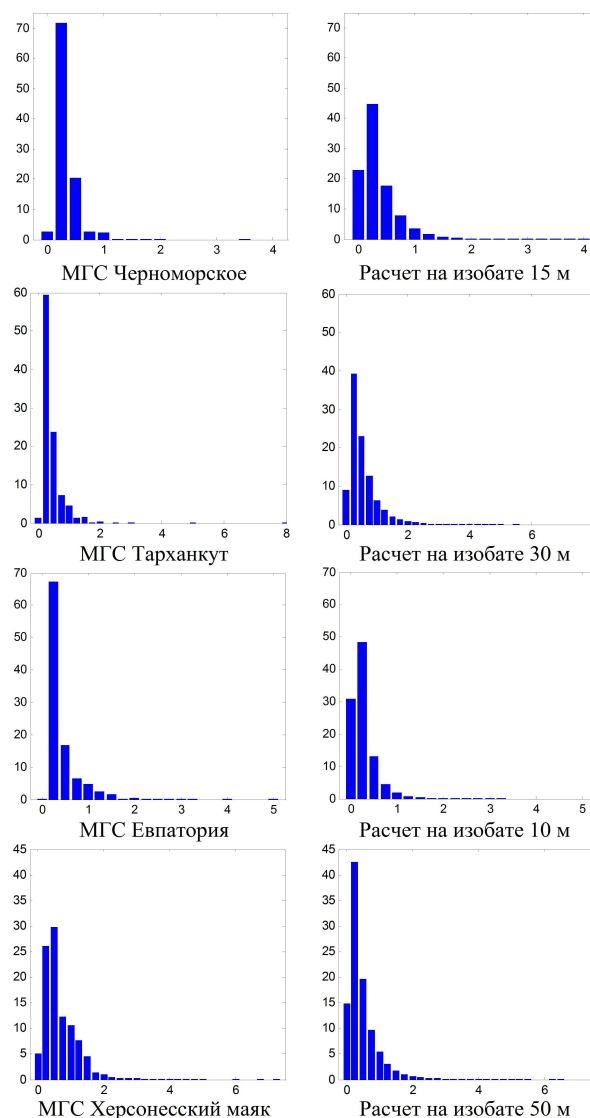
№	район моря	координаты,		шифр
		в.д.	с.ш.	
1	п.Черноморское	32,70485	45,52403	Chern_15m
2	м.Тарханкут	32,46888	45,34538	Tarkh_30m
3	Евпатория	33,38336	45,17882	EVP_10m
4	м.Херсонес	33,3662	44,5859	Xerson-1-50m



Р и с . 2 . Повторяемость (%) различных градаций высот волн (м) по месяцам на береговых станциях и по данным ре-анализа. Градации волн выбраны на основании стандартной шкалы степени волнения и соответствуют баллам волнения.

но, что такие различия существуют также и в результате того, что данные моделирования выбраны в точках, расположенных мористее точек, в которых производились измерения.

Для каждого ряда натурных и расчетных данных были построены гистограммы распределения высот значительных волн (рис.3). Анализ их показал, что гистограммы по данным МГС и ре-анализа сопоставимы по форме и значениям (рис.3). Однако данные ре-анализа дают завышенные до 30 % значения повторяемости штилей (высота волн < 0,25 м), которые компенси-



Р и с . 3 . Гистограммы распределения (%) высот значительных волн (м) у западного берега Крыма за 1979 – 2010 гг. (Тарханкут – за 1979 – 1995 гг.).

можных 1 раз в заданное количество лет, рассчитанные методом годовых максимумов по данным модели *SWAN*, представлены в табл.2. С прикладной точки зрения наиболее важными являются величины высот волн 0,1 % обеспеченности, применяемые в проектировании защитных сооружений 1-го класса [7].

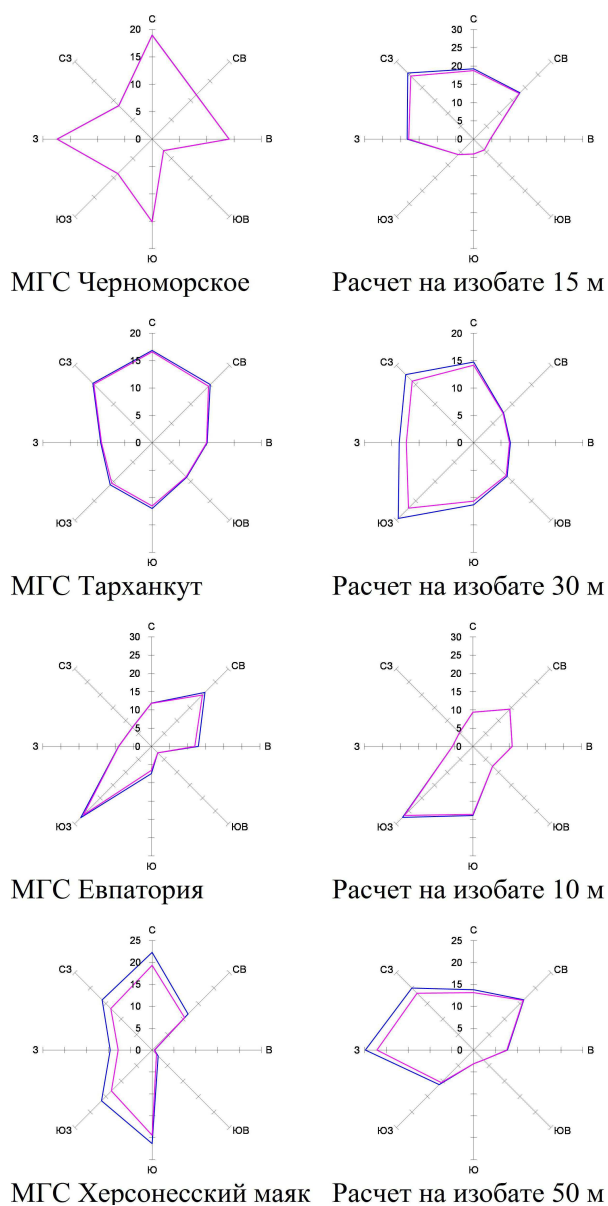
Наиболее интенсивное волнение развивается в районе мысов Херсонес и Тарханкут и высоты волн 0,1 % обеспеченности возможные 1 раз в 100 лет равны 10,95 и 9,95 м соответственно. За весь период наблюдений (56 лет для МГС Херсонесский маяк и 41 год для МГС Тарханкут) были зафиксированы максимальные высоты волн 7,7 и 8 м соответственно.

руются занижением значений повторяемости высот волн $> 0,25$ м на 20 – 25 % на всех точках, кроме Херсонесского маяка. Повторяемости волн высотой более 0,5 м в значительной мере согласуются.

Сравнение роз повторяемости ветрового волнения на МГС и данных реанализа в точках (рис.4) показало, что как по порядку величин, так и по форме розы волнения схожи. Наиболее хорошо сопоставимыми являются направления в точках Евпатория и Херсонесский маяк.

В целом, модельные данные для всех рассматриваемых точек довольно хорошо отражают повторяемость волн от волноопасных направлений, наиболее существенные отличия от натурных данных проявились в том, что по данным МГС значимый процент волн направлен с берега, причину чего (систематическая ошибка, волны зыби или др.) на данный момент установить не представляется возможным.

Оценки высот волн разной обеспеченности, воз-



Р и с . 4 . Розы повторяемости (%) ветрового волнения у западного берега Крыма по данным береговых станций (слева) и ре-анализа (справа) за 1979 – 2010 гг. (Тарханкут – за 1979 – 1995 гг.).

Сравним полученные по данным *SWAN* режимные параметры волн (табл.2) с высотами волн, рассчитанными по данным МГС [4, 5]. Так как волны 13 % обеспеченности ближе всего к данным визуальных и полуинструментальных наблюдений, то анализировать будем именно эти величины.

Для м.Херсонес, Евпатории и Черноморского высоты волн, возможные 1 раз в T лет, полученные по натурным данным (1 раз в 100 лет возможны вы-

Т а б л и ц а 2. Высоты волн 50, 13, 3, 1, 0,1 % обеспеченности (м), возможные 1 раз в 5, 10, 25, 50 и 100 лет у побережья Западного Крыма, рассчитанные методом годовых максимумов по данным модели SWAN.

T -лет	$h_{\text{ср.}}$	50 %	13 %	3 %	1 %	0,1 %
м.Херсонес (на изобате 50 м)						
5	2,7	2,6	4,3	5,6	6,3	7,7
10	3,0	2,9	4,8	6,2	7,0	8,5
25	3,4	3,3	5,4	6,9	7,9	9,5
50	3,7	3,5	5,8	7,5	8,5	10,2
100	4,0	3,8	6,2	8,0	9,1	11,0
г.Евпатория (на изобате 10 м)						
5	1,5	1,5	2,4	3,0	3,3	4,0
10	1,7	1,7	2,6	3,2	3,6	4,3
25	2,0	1,9	2,9	3,6	4,0	4,7
50	2,1	2,0	3,1	3,8	4,3	5,0
100	2,2	2,2	3,3	4,1	4,6	5,3
м.Тарханкут (на изобате 30 м)						
5	2,7	2,6	4,2	5,4	6,1	7,4
10	3,0	2,8	4,6	5,9	6,7	8,0
25	3,3	3,2	5,1	6,5	7,4	8,8
50	3,5	3,4	5,5	7,0	7,9	9,4
100	3,8	3,6	5,8	7,4	8,3	10,0
п. Черноморское (на изобате 15 м)						
5	1,7	1,7	2,7	3,4	3,8	4,6
10	1,9	1,8	2,9	3,7	4,2	5,0
25	2,1	2,0	3,2	4,1	4,6	5,4
50	2,2	2,2	3,4	4,3	4,9	5,8
100	2,4	2,3	3,7	4,6	5,1	6,1

соты волн 7,7; 5,2; 4 м соответственно) несколько больше, чем аналогичные, рассчитанные по данным ре-анализа (6,24; 3,31; 3,65 м). Для м.Тарханкут наблюдается обратная ситуация, в этом районе высоты волн, возможные 1 раз в 100 лет составляют 5,4 м по натурным данным и 5,84 м – по модельным. Разница в рассчитанных высотах волн составляет от 0,45 до 1,46 м.

Заключение. С использованием спектральной модели SWAN и метода вложенных сеток выполнен расчет полей волнения в прибрежной зоне Западного Крыма для современного климатического периода (1979 – 2010 гг.). В результате сформирован климатический массив полей высот, направлений и периодов у западного побережья Крыма на регулярной сетке с дискретностью 600 м по пространству и 6 ч по времени.

Сопоставление данных климатического массива с данными срочных наблюдений на прибрежных гидрометеорологических станциях показало, что модельные расчеты согласуются с повторяемостью высот волн по направ-

лениям и адекватно характеризуют современный режим волнения исследуемой акватории.

На основе метода годовых максимумов, базирующегося на интегральной функции распределения Гумбеля, получены оценки экстремальных высот волн в характерных точках исследуемой акватории. Установлено, что высота максимальных волн возможных 1 раз в 100 лет у берегов Западного Крыма составляет около 11 м.

Полученный в работе климатический массив волновых характеристик может быть использован при комплексном гидрометеорологическом обеспечении проектирования берегозащитных сооружений в прибрежной зоне Западного Крыма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Климат Украины* / Под ред. В.М. Липинского, В.А. Дячука, В.Н. Бабиченко. – Киев: Изд-во Раевского, 2003. – 343 с.
2. *Справочник по климату Черного моря*. – М.: Гидрометеиздат, 1974. – 405 с.
3. *Атлас волнения и ветра Черного моря* / Под ред. Г.В. Ржеплинского. – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 111 с.
4. *Горячкин Ю.Н., Репетин Л.Н.* Штормовой ветро-волновой режим у Черноморского побережья Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. – вып.23. – С.56-69.
5. *Репетин Л.Н., Белокопытов В.Н.* Режим ветра северо-западной части Черного моря и его климатические изменения // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. – вып.21. – С.225-243.
6. *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.
7. *Технические указания по проектированию морских берегозащитных сооружений*. ВСН 183-74. – М.: Минтрансстрой, 1975.
8. *Ефимов В.В., Комаровская О.И.* Атлас экстремального ветрового волнения Черного моря. – Севастополь: МГИ НАНУ, 2009. – 59 с.
9. *SWAN Cycle III version 40.85, User Manual*, Delft University of Technology, Netherlands, 2011. – 119 p. (<http://www.swan.tudelft.nl>).
10. *Фомин В.В., Бородин Д.В., Иванов В.А.* Вычислительный кластер Морского гидрофизического института НАН Украины // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010. – С.121-123.
11. *Onogi K., Tsutsui J., Koide H. et al.* The JRA-25 Reanalysis // J. Meteor. Soc. Japan. – 2007. – v.85. – P.369-432.
12. *Полонский А.Б., Фомин В.В., Гармашов А.В.* Характеристики ветрового волнения Черного моря // Доповіді НАН України. – 2011. – № 8. – С.108-112.
13. *Madsen O.S., Poon Y.-K., Graber H.C.* Spectral wave attenuation by bottom friction: Theory / Proc. 21 Internat. Conf. Coastal Eng. – ASCE: 1988. – P.492-504.
14. *Харитонов Л.В., Фомин В.В.* Численное моделирование ветрового волнения у западного побережья Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и

шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011.– вып.25, т.1.– С.26-37.

15. Полонский А.Б., Башарин Д.В. Влияние климатического сдвига 1976 – 1977 гг. на крупномасштабную структуру приземных метеорологических полей Евразии // Метеорология и гидрология.– 2008.– № 5.– С.16-30.
16. Lopatoukhin L.J., Rozhkov V.A., Ryabinin V.E., Swail V.R, Boukhanovsky A.V., Degtyarev A.B. Estimation of extreme wind wave heights // World Meteorological Organisation. JCOMM Technical Report WMO/TD-No. 1041.– 2000.

Материал поступил в редакцию 27.11.2012 г.

АНОТАЦІЯ. Для прибережної зони Західного Криму з використанням спектральної хвильової моделі *SWAN* і даних ре-аналізу приземного вітру *JRA* за 1979 – 2010 рр. отриманий 32-ти річний масив полів хвилювання з просторовим дозволом 600 м і дискретністю за часом 6 ч. На його основі проаналізовано повторюваність параметрів хвилювання, проведено зіставлення отриманих результатів з даними берегових гідрометеорологічних станцій. Методом річних максимумів виконані оцінки екстремальних висот хвиль в характерних точках узбережжя.

ABSTRACT. For the coastal zone of Western Crimea, a spectral wave model *SWAN* and data re-analysis of surface wind *JRA* in 1979 – 2010 was used. 32-year wind wave field array with a spatial resolution of 600 m and a time-discrete 6 h was created. On the basis of the array the repeatability of wind wave parameters is analysed, the received results are compared with data of coastal meteorological stations. In the characteristic points of the coast the extreme wave heights are estimated by method of annual maxima.