

С.Ю. Михайличенко, В.В. Фомин

*Морской гидрофизический институт НАН Украины, г. Севастополь***РАСЧЕТЫ НЕСТАЦИОНАРНОГО ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ
В АКВАТОРИИ ГОЛУБОГО ЗАЛИВА НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ SWAN**

С использованием модели *SWAN* на основе 4-х шагового метода вложенных сеток для реальных синоптических ситуаций выполнены расчеты волновых полей в акватории Голубого залива с детализацией в районе экспериментальной платформы. Исследована чувствительность волновой модели к вариациям входных параметров. Проведена валидация *SWAN* по данным измерений на платформе. Изучены особенности полученных волновых полей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *ветровое волнение, высота волн, модель SWAN, метод вложенных сеток, Голубой залив, Южный берег Крыма.*

Одной из перспективных моделей, наиболее полно описывающих процессы формирования и трансформации волнения в прибрежных зонах, является численная модель *SWAN (Simulating WAves Nearshore)* [1]. Имеется цикл исследований [2 – 7], в которых на основе *SWAN* выполнены расчеты ветровых волн для ряда прибрежных акваторий Азово-Черноморского бассейна (Азовское море, Керченский пролив, западное побережье Крыма). В данной работе модель *SWAN* применяется для расчетов ветрового волнения в акватории Голубого залива (район п. Кацивели). Следует отметить, что до настоящего времени модельные расчеты волнения здесь никогда ранее не проводились. Кроме того, наличие экспериментальной океанографической платформы в ЭО (Экспериментальное отделение) МГИ НАН Украины дает возможность проводить валидацию модели и оценивать качество входных полей ветра, а также обеспечивать волновой информацией специализированные натурные эксперименты, которые периодически выполняются на платформе.

В задачи работы входило: изучение чувствительности модели *SWAN* к вариациям ее входных параметров; валидация модели по данным измерений на океанографической платформе; моделирование штормовой ситуации, имевшей место в Черном море 10 – 12 ноября 2007 г. с детализацией в регионе Голубого залива и точке расположения экспериментальной платформы.

Форсингом служили поля приземного ветра разрешением 10 км из моделей *MM5 – Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model* (отдел взаимодействия атмосферы и океана МГИ НАН Украины) и *SKIRON* (<http://forecast.uoa.gr>). Для расчета параметров волн на жидких границах применялся 4-х шаговый алгоритм вложенных сеток. На начальном шаге волнение моделировалось для всего региона Азово-Черноморского бассейна с разрешением 5 км. На следующем шаге волновые поля определялись с разрешением 1 км для прибрежной акватории Крымского полуострова в области с координатами 33,02 – 35,35° в.д. и 43,85 – 45,07° с.ш. Далее с разрешением 200 м волнение рассчитывалось для района ЮБК, расположенного между поселками Кацивели и Партенит. На последнем шаге волновые

поля моделировались для акватории Голубого залива с разрешением 20 м по широте и 15 м по долготе.

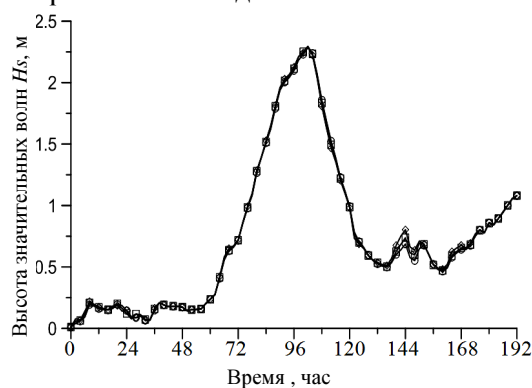


Рис. 1. Зависимость H_s от времени для значений $\Delta t = 5$ (\diamond); 10 (\square); 15 (\circ) мин.

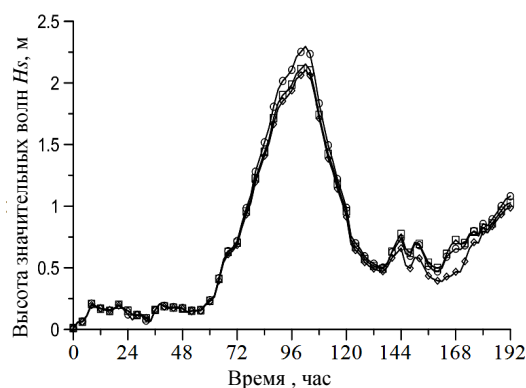


Рис. 2. Зависимость H_s от времени для значений $\Delta\omega = 20$ (\diamond); 15 (\square); 10° (\circ).

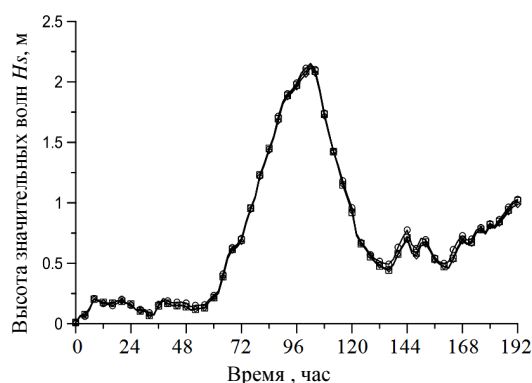


Рис. 3. Зависимость H_s от времени при частотных диапазонах $\Delta\omega = 0,02$ (\diamond); 0,04 – 2 (\square); 0,05 – 1 (\circ) Гц.

Результаты численных экспериментов. Тестовые расчеты нестационарных ветровых волн в Голубом заливе при разном частотно-угловом и временном разрешении. Исследование чувствительности модели SWAN к вариациям временного (Δt) и частотно-углового ($\Delta\omega$, $\Delta\theta$) разрешения проводилось путем сравнения результатов моделирования волнения в точке расположения экспериментальной платформы за период с 7 по 15 сентября 2010 г. Выбор временного интервала продиктован наличием экспериментальных данных (с платформы) по ветровому волнению за указанный период, а также необходимостью «разгона» модели. Ветер задавался по данным атмосферной модели ММ5. Рассматривалось по три значения каждого параметра: $\Delta t = 5$; 10 и 15 мин; $\Delta\omega = 0,02 - 2$; 0,04 – 2 и 0,05 – 1 Гц; $\Delta\theta = 10$; 15 и 20°. В качестве сравнительной характеристики была определена высота значительных волн H_s . Сопоставление высот волн осуществлялось на основе расчетов среднеквадратичных отклонений (СКО). Численные эксперименты показали следующее:

- прослеживается слабая зависимость величин высот волн от значений варьируемых параметров (Δt , $\Delta\theta$, $\Delta\omega$) (см. рис. 1 – 3). Во всех случаях величины СКО не превышали 0,011 – 0,05 м (см. табл. 1);

- сравнение времени счета показало значительный его рост (от 1 до 6 ч) при увеличении разрешения модели по каждому из параметров.

Таблица 1. СКО высот волн для разных Δt , $\Delta\theta$, $\Delta\omega$.

Параметр	Сопоставление	СКО
шаг по времени Δt , мин	5, 10	0,018
	10, 15	0,015
	5, 15	0,031
шаг по угловой координате $\Delta\theta$, °	20, 15	0,069
	15, 10	0,05
	20, 10	0,087
частотный диапазон $\Delta\omega$, Гц	0,02 – 2,	0,011
	0,04 – 2	
	0,04 – 2,	0,025
	0,05 – 1	
	0,02 – 2,	0,031
	0,05 – 1	

этим наблюдается постоянное превышение модельных величин над измеренными значениями. Предположительно указанная тенденция возникла вследствие неточных оценок атмосферной моделью *MM5* скорости и направления приводного ветра из-за грубого пространственного разрешения (10 км). Также сказывается близость исследуемой акватории к горной местности, что приводит к возникновению здесь орографических эффектов, которые не достаточно полно учитываются атмосферной моделью при разрешении 10 км. Таким образом, для расчета ветрового волнения в исследуемом районе необходимы более точные модельные данные по приземному ветру.

Моделирование ноябрьского шторма 2007 г. в акватории Голубого залива. На последнем этапе был проведен расчет волновых полей ноябрьского шторма 2007 г. для акватории Голубого залива с детализацией в точке расположения океанографической экспериментальной платформы. Для численного эксперимента был выбран четырехдневный интервал (с 8 по 12 ноября). Ветер задавался на основе данных модели *SKIRON*. Волновые параметры на жидких границах определялись на основе 4-х шагового метода вложенных сеток.

Анализ результатов показал, что оптимальными по обоим критериям (время счета и точность) являются следующие значения параметров ($\Delta t = 10$ мин, $\Delta\theta = 15^\circ$, $\Delta\omega = 0,04 - 2$). Они использовались при моделировании на последующих этапах работы.

Валидация модели по данным измерений на экспериментальной платформе. Для валидации волновой модели использовались данные измерений H_s на океанографической платформе за период с 11 по 12 сентября 2010 г. (информация любезно предоставлена В.А. Дуловым¹). Анализ результатов сопоставления рассчитанных и экспериментальных высот волн показал наличие сходной эволюции во времени (рис. 4). Наряду с

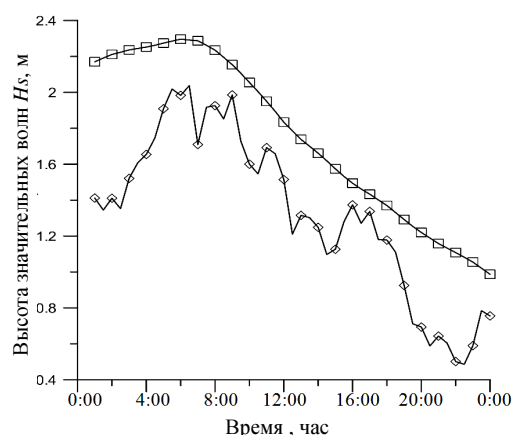


Рис. 4. Расчетные (\square) и измеренные (\diamond) значения высот волн в районе экспериментальной платформы для 11 – 12 сентября 2010 г.

¹ В.А. Дулов – доктор физ.-мат. наук, заведующий лабораторией в МГИ НАН Украины – *Техн. ред.*

Как показали расчеты, шторм в Голубом заливе длился с 10 по 12 ноября. Анализ изменчивости волновых полей позволил выявить ряд общих особенностей:

- период с 03:00 GMT 10 ноября по 15:00 GMT 11 ноября характеризуется усилением шторма, которое сопровождалось постоянным ростом высот волн по всей акватории;

- распределение волн по высотам в регионе носило равномерный характер, при приближении к берегу высоты волн постепенно снижались из-за обрушений;

- в целом по акватории направление волн с течением времени менялось с северо-западного в начале шторма на северное и северо-восточное к его окончанию;

- направление волн в приграничных районах совпадало с направлением генерировавшего их ветра. Вблизи берега, а также в центральной части залива в течение всего периода наблюдались ярко выраженные эффекты рефракции вследствие преобладания в регионе длинных волн;

Условно эволюцию исследуемого шторма можно разделить на три этапа: развитие, интенсификацию и затухание. Подробнее рассмотрим каждый из них.

Возникновение и развитие. Промежуток времени с 03:00 GMT 10 ноября по 03:00 GMT 11 ноября характеризуется зарождением и дальнейшим развитием штормовой ситуации (см. рис. 5, а). Преобладающие высоты волн в этот период менялись в пределах от 0,5 м у побережья до 2,65 м в центре и у южной границы акватории. Волны с максимальными высотами наблюдались в центре и на юге региона (0,7 – 2,6 м). На севере преобладали волны с высотами 0,6 – 2,3 м. У берега высоты волн менялись в пределах от 0,3 до

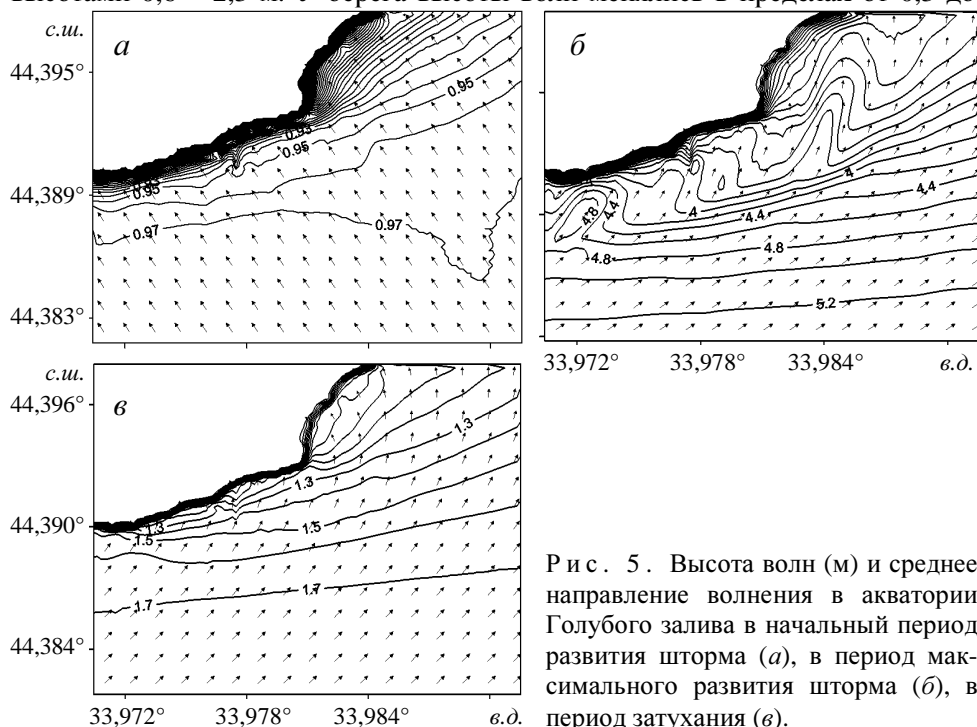


Рис. 5. Высота волн (м) и среднее направление волнения в акватории Голубого залива в начальный период развития шторма (а), в период максимального развития шторма (б), в период затухания (в).

2 м. В точке расположения океанографической платформы прослеживался постоянный рост высот волн: от 0,6 до 2,5 м (см. рис. 5, б). Направление волн в регионе постепенно менялось с северо-западного на северное и северо-восточное. По мере изменения направления входящих в залив волн, в центре, на севере и около берега стали проявляться заметные эффекты рефракции.

Период максимальной интенсификации. Промежуток времени с 03:00 по 12:00 GMT 11 ноября характеризуется значительной интенсификацией волнового режима (см. рис. 5, б). В этот период по всей акватории высоты волн достигали своих наибольших величин (от 1 м у побережья до 5,4 м на юге региона). В центре, на востоке и на юге залива сформировалась область с максимальной интенсивностью волнения (2,5 – 5,4 м). Волны со средними значениями высот генерировались на севере залива (2 – 3,5 м). В прибрежной зоне картина волнения была неоднозначна. По мере продвижения на север высоты волн снижались с 3,5 – 3,8 до 2 – 1 м. Вблизи платформы в течение этого периода преобладали волны с высотами 2,5 – 3,7 м (см. рис. 5, б). Направление волн характеризовалось устойчивостью по времени и в дальнейшем не менялось. По мере продвижения волн на север и северо-восток оно постепенно изменялось вследствие рефракции с северо-восточного на северное.

Затухание. С 12:00 GMT 11 ноября шторм идет на спад и завершается 12 ноября. Этот период характеризовался снижением интенсивности волнения по всему региону (см. рис. 5, в). В это время на юге и в центре залива преобладали волны с высотами 4,8 – 1,5 м, на севере 3 – 1 м, у береговой линии 3,2 – 0,8 м, вблизи платформы 3,5 – 1,5 м (см. рис. 5, в). Направление волн оставалось неизменным по всей акватории.

Заключение. Реализован алгоритм расчета нестационарных полей ветрового волнения в акватории Голубого залива с дискретностью ~ 20 м на основе спектральной модели SWAN и 4-х шагового метода вложенных сеток. Проанализирована чувствительность к вариациям шага по времени и частотно-углового разрешения и выбраны оптимальные значения этих параметров.

Выполнена валидация модели SWAN по данным измерений на океанографической платформе ЭО МГИ НАН Украины 11 – 12 сентября 2010 г. Сравнение рассчитанных и экспериментальных высот волн показало наличие сходной эволюции во времени. Наряду с этим наблюдалось систематическое завышение модельных высот волн над экспериментальными значениями, что, по-видимому, связано с грубым (10 км) горизонтальным разрешением атмосферной модели.

Проведен расчет волновых полей ноябрьского шторма 2007 г. для акватории Голубого залива. Численные эксперименты показали соответствие общим представлениям об эволюции штормового волнения. Основываясь на результатах проведенных численных экспериментов можно сделать вывод о пригодности предложенного алгоритма для расчета ветрового волнения в исследуемом регионе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. SWAN Cycle III version 40.85. User Manual.– Netherlands: Delft University of Technology, 2011. – 119 p. <http://www.swan.tudelft.nl>
2. Фомин В.В., Иванов В.А. Численное моделирование ветрового волнения в районе острова Коса Тузла // Экологическая безопасность прибрежной и шельфо-

вой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2004. – вып. 10. – С. 233-242.

3. *Фомин В.В., Иванов В.А.* Совместное моделирование течений и поверхностного волнения в Керченском проливе // *Морской гидрофизический журнал*. – 2007. – № 5. – С. 3-22.
4. *Михайличенко С.Ю., Фомин В.В.* Численное моделирование ветрового волнения в районе острова Коса Тузла с использованием метода вложенных сеток // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2008. – вып. 17. – С. 176-184.
5. *Михайличенко С.Ю.* Ветровое волнение у восточной оконечности о. Коса Тузла // *Моделирование динамики вод в Керченском проливе и предпроливных зонах* / Под ред. Иванова В.А. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2010. – С. 170-180.
6. *Фомин В.В., Дьяков Н.Н.* Ветровое волнение и транспорт наносов в Азовском море // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2003. – вып. 8. – С. 175-181.
7. *Михайличенко С.Ю., Фомин В.В., Иванов В.А.* Моделирование штормовых ситуаций в Азовском море на основе волновой модели SWAN // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2007. – вып. 15. – С. 299-304.

Материал поступил в редакцию 25.10.2011 г.

АНОТАЦІЯ З використанням моделі SWAN на основі 4-х крокового методу вкладених сіток для реальних синоптичних ситуацій виконані розрахунки хвильових полів в акваторії Блакитної затоки з деталізацією в районі експериментальної платформи. Досліджено чутливість хвильової моделі до варіацій вхідних параметрів. Проведена валідація моделі SWAN за даними вимірів на платформі. Вивчено особливості отриманих хвильових полів.

ABSTRACT SWAN model and 4-step method of the inset grids for real synoptical situations were used to calculate the wave fields in Blue Bay area; the experimental platform area is shown in greater detail. The sensitivity of the wave model to the input parameters variations has been researched. SWAN validation has been validated according to the measurement data on the platform. Features of the obtained wave fields have been researched.