

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ В БАЛТИЙСКОМ МОРЕ НА ПРЯМОУГОЛЬНОЙ И НЕСТРУКТУРНОЙ СЕТКАХ НА ОСНОВЕ РЕАНАЛИЗА NCEP/CFSR

*А.Ю. Медведева^{1,2}, С.А. Мысленков^{1,2,3}, И.П. Медведев^{1,2,4},
В.С. Архипкин¹, В.А. Кречик⁵, С.А. Добролюбов¹*

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова;

²Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, г. Москва;

³Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации;

⁴Институт прикладной геофизики им. академика Е.К. Федорова,
г. Москва;

⁵Атлантическое отделение Института океанологии
им. П.П. Ширшова РАН, г. Калининград

*alisa.bannikova@gmail.com, stasocan@gmail.com, medvedev@ocean.ru,
victor.arkhipkin@gmail.com, myemail.gav@gmail.com,
dobroscience@yandex.ru*

Введение

Ветровое волнение оказывает большое влияние на условия для мореплавания, строительства гидросооружений и портовых комплексов, освоения нефтегазоносных районов шельфа. Балтийское море – почти полностью замкнутое, внутриконтинентальное, шельфовое море (максимальная глубина – 453 м). Относительно небольшие размеры акватории практически полностью исключают наличие длиннопериодной зыби. Сложная геометрия бассейна и высокая изменчивость ветровых полей приводят к большому временному и пространственному разнообразию ветровых волн. Режим ветрового волнения в Балтийском море определяется характером общей атмосферной циркуляции в регионе. Наиболее

интенсивная штормовая активность в Балтийском море наблюдается в осенне-зимний период [2].

Для изучения пространственно-временной изменчивости ветрового волнения в океанах и морях широко применяются методы численного моделирования. Глобальные волновые модели, например модель KNMI/ERA-40 [19], дают лишь обобщенное представление о волнении в окраинных морях, вследствие чего для них разрабатываются собственные численные модели, адекватно воспроизводящие поля ветровых волн внутри акватории. Для оперативного прогноза ветровых волн в Балтийском море в настоящее время применяются следующие модели: модель Национальной метеорологической службы Германии (DWD, Deutscher Wetterdienst), модель Финского института морских исследований (FIMR, Finnish Institute of Marine Research) и модель Датского метеорологического института (DMI, Danish Meteorological Institute). В их основу положена спектральная модель ветрового волнения третьего поколения WAM (WAVes Modelling) [21]. Более подробный обзор и оценки сравнения оперативных моделей Балтийского региона представлен в [4].

В основу отечественной модели оперативного прогноза ветрового волнения Балтийского моря положена спектральная модель WAVEWATCH III версии 3.14. По статистическим показателям качество этой прогностической модели выше по сравнению с оперативным глобальным прогнозом волнения по отечественной модели ААНИИ (AARI-PD2) [1].

В [4] для изучения особенностей пространственно-временной изменчивости полей ветрового волнения была использована модель SWAN [9]. В качестве вынуждающей силы в модели задавались поля приземного ветра на высоте 10 м над уровнем моря по данным реанализа NCEP/NCAR с 1948 по 2010 год.

Использование длительных рядов позволило выявить рост штормовой активности в последние десятилетия, что, вероятно, связано со смещением траекторий циклонов, проходящих над акваторией моря [4]. Также во временных рядах были выявлены 10–12-летние циклы изменчивости ветровой активности в различных регионах Балтийского моря.

В настоящей работе была поставлена задача улучшения качества воспроизводимых полей ветрового волнения в Балтийском море при помощи реанализа нового поколения NCEP/CFSR. Использование данных о высотах значительных волн с заякоренных буев позволило оценить качество численного моделирования по данным реанализов NCEP/NCAR и NCEP/CFSR, а также сравнить результаты, полученные на прямоугольной и неструктурной триангуляционной вычислительных сетках.

Данные и методы

Модель. В данной работе для расчета параметров ветрового волнения использовалась спектральная волновая модель третьего поколения SWAN (Simulating WAves Nearshore) версии 41.01. Модель SWAN ориентирована на решение задач для мелководья. Основными отличиями этой волновой модели от других является то, что она учитывает нелинейные взаимодействия трех волн, характерные для закрытых и мелководных акваторий, а также эффекты обрушения и дифракции волн на малых глубинах.

Эта спектральная волновая модель была разработана в Делфтском технологическом университете в Нидерландах [9]. В ее основе лежит решение уравнения баланса энергии волнового поля в спектральном пространстве:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\sigma}, \quad (1)$$

где N – удельная спектральная плотность; x, y – пространственные координаты; t – время; σ – волновая частота; θ – волновой угол; c_σ, c_θ – скорости распространения в спектральном пространстве (σ, θ) ; S_{tot} – функция источника, определяется следующим образом:

$$S_{tot} = S_{in} + S_{nl3} + S_{nl4} + S_{ds,w} + S_{ds,b} + S_{ds,br}. \quad (2)$$

Функция источника складывается из шести процессов: генерации волн за счет передачи энергии ветра (S_{in}), нелинейного переноса энергии волн при взаимодействии трех (S_{nl3}) и четырех

(S_{nl4}) волн, уменьшения волн из-за образования пены и брызг ($S_{ds,w}$), трения о дно ($S_{ds,b}$) и обрушения волн из-за глубины ($S_{ds,br}$).

Энергия выражается через нормированную переменную h , эквивалентную квадрату отклонения волнового уровня воды от среднего положения. Помимо геометрических осей x, y, z , присутствует ось волновых частот σ и ось волновых углов θ . Интегрирование уравнения баланса энергии осуществляется с помощью конечно-разностных схем по географическому и спектральному пространствам в предположении стационарности.

Механизм генерации волн. В механизм генерации волн первого поколения GEN1 включены: контроль линейного роста $Cf_{10} = 188$, контроль экспоненциального роста волн $Cf_{20} = 0,59$ и $Cf_{30} = 0,12$, контроль скорости диссипации $Cf_{40} = 250$, максимум спектральной плотности энергии морской части спектра, согласно Пирсону – Московицу $E_{\max} PM = 0,0036$, коэффициент трения $Cf_{drag} = 0,0012$, минимальная скорость ветра $U_{\min} = 1$, коэффициент, определяющий частоту Пирсона – Московица, $\sigma_{PM} = 2\pi g \cdot Cf_{PM} / U_{10}$, где $Cf_{PM} = 0,13$ [20].

В механизм генерации волн второго поколения GEN2 добавлено два коэффициента, контролирующие спектральную энергию: $Cf_{50} = 0,0023$ и $Cf_{60} = -0,223$. Если использовать механизм генерации волн третьего поколения GEN3, то в нем учитываются взаимодействие между четырьмя волнами и процессы обрушения волн с образованием пены и брызг. Взаимодействие между триадами, донное трение и обрушение волн на критических глубинах не включены в него по умолчанию. В самом GEN3 также можно варьировать параметры роста волн, коэффициенты диссипации при образовании пены и брызг, крутизны волн. Более подробно с этим можно ознакомиться в технической документации к модели SWAN [20]. По умолчанию использовался механизм линейного роста «Komen» [13]. В данной работе для двух станций также были проведены расчеты с использованием других механизмов роста волн – «Jansen» и «Westhuysen». При расчетах также были учтены

обрушение, трение о дно, взаимодействие между триадами и дифракция волн, используемые по умолчанию. В данной работе были получены оценки механизмов генерации первого и второго поколений для станций Финнгрундет и Содра Остерсйон. Более подробно все входные параметры приведены в [20].

Рельеф. На основе базы данных о рельефе дна GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans) с пространственным разрешением одна морская миля были созданы оригинальные неструктурная (нерегулярная) триангуляционная и прямоугольная вычислительные сетки для Балтийского моря. Пространственное разрешение прямоугольной сетки составляло $\sim 0,05^\circ$ (количество узлов над акваторией – 23345). Пространственное разрешение полученной неструктурной триангуляционной расчетной сетки варьировалось от 250 м до 10 км. Общее количество узлов составило 34922. На рис. 1 показан пример вычислительной неструктурной триангуляционной сетки в районе нефтедобывающей платформы Д-6 рядом с Куршской косой. Подобные неструктурные сетки уже использовались ранее для моделирования волнения в прибрежной зоне Черного моря [5,7].

Данные о ветре. В качестве вынуждающей силы задавались поля приземного ветра (на высоте 10 м) из двух реанализов: NCEP/NCAR и NCEP/CFSR. Реанализ NCEP/NCAR (National Center for Atmospheric Research) является наиболее распространенным продуктом Национальных центров прогноза окружающей среды США NCEP (National Centers for Environmental Prediction), получившим широкое распространение при решении различных гидрометеорологических задач. Пространственное разрешение полей приземного ветра в этом реанализе составляет $\sim 1,875^\circ$, а временное – 6 ч. Данные реанализа NCEP/NCAR покрывают период с 1948 по 2010 год [12].

Реанализ NCEP/CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) – это наиболее современный продукт центра NCEP, реализованный в 2010 г. [15]. Реанализ NCEP/CFSR охватывает период в 32 года с 1979 по 2010 г. Временной шаг реанализа составляет 1 ч, пространственное разрешение $\sim 0,3125^\circ \times 0,3125^\circ$. Для численного моделирования ветрового волнения в 2015 году использовалась более новая

версия реанализа – NCEP/CFSv2 (Climate Forecast System Version 2), покрывающая временной период с 2011 г. по настоящее время и имеющая более высокое пространственное разрешение $\sim 0,205^\circ \times 0,204^\circ$ [16]. Шаг по времени составлял 1 час.

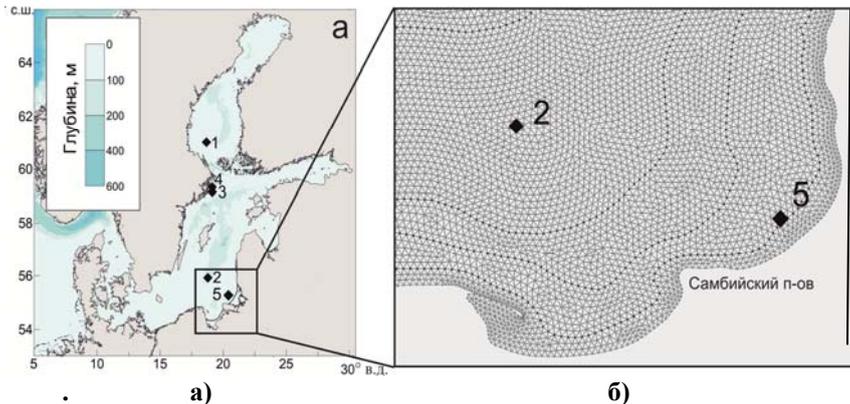


Рис. 1. Расположение самописцев волнения Шведского института (1–4) и волнографа на нефтяной платформе Д-6 (5) в районе Самбийского полуострова (а), пример неструктурной триангуляционной вычислительной сетки для акватории юго-восточной части Балтийского моря (б). Номера станций на карте соответствуют номерам станций в табл. 1.

Данные измерений. Для оценки качества модели полученные результаты сравнивались с инструментальными данными четырех волновых буев с сайта Шведского метеорологического института (SMHI) и с данными волнографа, установленного на нефтяной платформе Д-6. Расположение буев показано на рис. 1. Дискретность наблюдений составляла 1 час.

Для периода с 23.09.2015 по 14.10.2015 г. были использованы данные ультразвукового волнографа LOG_aLevel фирмы «General Acoustics», который был установлен в юго-восточной части Балтийского моря на нефтяной платформе Д-6 (рис. 1, табл. 1). Глубина в месте установки составляла 31 м. Волнограф измеряет флуктуации уровня моря с частотой 5 Гц и ранее в течение нескольких лет использовался для наблюдений за колебаниями уровня

Черного моря [3]. Далее была посчитана высота значительных волн (среднее от 1/3 наибольших волн, соответствующее высоте волн 12,5%-ной обеспеченности).

Таблица 1

Характеристика станций Шведского метеорологического института и волнографа, которые использовались для сравнения с результатами моделирования

№ буя	Название	Оригинальное название	Координаты		Глубина, м	Рассматриваемый период
			°в. д.	°с. ш.		
1	Финнгрундет	Finngundet	18,67	61,00	31	ноябрь 2010 г.
2	Содра Остерсийон	Södra Östersjön	18,78	55,92	112	ноябрь 2010 г.
3	Хувудскар Остерсийон	Huvudskär Östersjön	19,17	58,93	90	январь 1992 г.
4	Алмагрундет	Almagundet	19,13	59,15	40	январь 1992 г.
5	Волнограф LOG_aLevel		20,67	55,28	31	16.09.2015 – 14.10.2015

Результаты

В результате численного моделирования с входными данными реанализа NCEP/CFSR на регулярной и неструктурной сетках были получены поля характеристик ветрового волнения для Балтийского моря за каждые 30 мин (шаг вычислений – 15 мин): высота значительных волн H_S (среднее значение высот от 1/3 наиболее высоких волн в спектре волнения) и средний период волн.

Для оценки адекватности воспроизведения моделью реальных условий для пяти станций были рассчитаны взаимные статистические характеристики [6]: средняя систематическая ошибка (Bias), среднеквадратическая ошибка (RMSE), относительная среднеквадратическая ошибка (показатель рассеяния) (SI) и коэффициент корреляции (R):

$$\text{Bias} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{N} (P_i - O_i), \quad (3)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}, \quad (4)$$

$$\text{SI} = \frac{\text{RMSE}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N O_i}, \quad (5)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N ((P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O}))}{\sqrt{(\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2)(\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2)}}, \quad (6)$$

где N – количество значений; P – модельное значение; O – фактическое значение; \bar{P} – среднее модельное значение; \bar{O} – среднее фактическое.

Сравнение результатов численных расчетов с данными инструментальных наблюдений показало, что модель SWAN с данными о ветре из реанализа NCEP/CFSR очень хорошо воспроизводит ветровое волнение в Балтийском море (рис. 2).

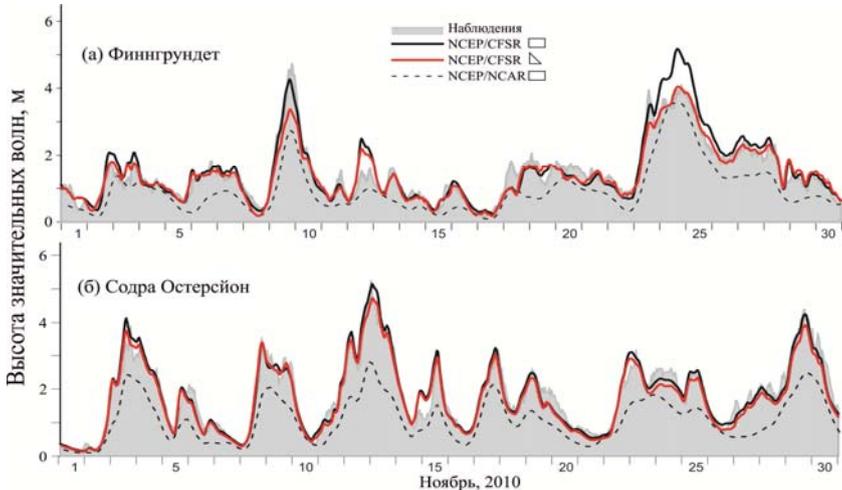


Рис. 2. Высота значительных волн H_s для станций Финнgrundет (а) и Содра Остергйсион (б) за ноябрь 2010 г.

Так, коэффициент корреляции между рядом наблюдений по станции Финнгрундет и результатами моделирования в ближайшей точке составляет 0,95 для прямоугольной сетки с шагом вычислений 15 мин и с использованием режима генерации волн GEN3 (табл. 2). Для станций Содра Остерсейон и Хувудскар Остерсейон коэффициент корреляции между инструментальными данными и модельными с такими же параметрами при вычислениях (15 мин и GEN3) составляет 0,97. При использовании неструктурной сетки с такими же входными параметрами (NCEP/CFSR, 15 мин и GEN3) полученные коэффициенты корреляции были немного ниже: на станции Финнгрундет – 0,93 и на станции Содра Остерсейон – 0,95. Коэффициент корреляции при расчетах с входными данными о ветре из реанализа NCEP/NCAR ниже – от 0,80 до 0,91 (табл. 2).

Характеристики Bias и RMSE представляют собой, соответственно, среднюю систематическую и среднеквадратическую ошибки и отображают рассеивание разности модельных и наблюдаемых значений случайной величины относительно ее математического ожидания. Характеристика Bias также позволяет оценить общее завышение или занижение модельных расчетов относительно наблюдаемых. Так, для станции Финнгрундет лучшие характеристики (Bias = -0,025 и RMSE = 0,27) были получены при использовании режима генерации волн GEN1 (табл. 2).

Данный механизм не учитывает взаимодействие четырех волн. Таким образом, можно предположить, что для Ботнического залива эти взаимодействия незначительны. Для станции Содра Остерсейон лучшие характеристики (Bias = -0,003 и RMSE = 0,27) были получены при использовании другого режима генерации волн GEN3 и с шагом вычислений 15 мин.

Результаты расчетов по прямоугольной сетке по данным из реанализа NCEP/CFSR для станции Финнгрундет дают Bias от -0,083 до +0,083 и RMSE от 0,27 до 0,46; для станции Содра Остерсейон Bias от -0,003 до -0,180 и RMSE от 0,27 до 0,44. При расчетах на неструктурной сетке Bias и RMSE имеют средние показатели (табл. 2). Рассматриваемые выше станции располагаются в открытой части акватории Балтийского моря, вдали от побережья. Для этих станций использование прямоугольной сетки дает заметно лучшие результаты по сравнению с расчетами по неструктурной сетке.

Таблица 2

**Сравнение инструментальных и модельных данных.
Полужирным шрифтом выделены наилучшие полученные
показатели для каждой станции**

Реанализ	Механизм генерации волн	R	Bias	RMSE	SI	N
Финнгрундет, ноябрь 2010 (30,6 м)						
NCAR	GEN3/1 час	0,884	-0,498	0,65	0,45	240
CFSR	GEN3/15 мин	0,953	0,083	0,34	0,23	720
	GEN3/30 мин	0,944	0,047	0,34	0,24	
	GEN3/1 час	0,878	-0,047	0,46	0,32	
	GEN3/15 мин Jansen	0,947	0,313	0,63	0,44	
	GEN3/15 мин Westhuysen	0,951	-0,037	0,32	0,22	
	GEN2/15 мин	0,950	0,069	0,29	0,20	
	GEN1/15 мин	0,949	-0,025	0,27	0,19	
	GEN3/15 мин нестр.	0,933	-0,083	0,35	0,24	
Содра Остерсейон, ноябрь 2010 (111,7 м)						
NCAR	GEN3/1 час	0,91	-0,730	0,89	0,49	240
CFSR	GEN3/15 мин	0,967	-0,003	0,27	0,15	720
	GEN3/30 мин	0,96	-0,060	0,30	0,17	
	GEN3/1 час	0,92	-0,180	0,44	0,24	
	GEN2/15 мин	0,94	-0,041	0,35	0,19	
	GEN1/15 мин	0,95	-0,157	0,37	0,20	
	GEN3/15 мин Jansen	0,96	0,258	0,53	0,29	
	GEN3/15 мин Westhuysen	0,965	-0,148	0,31	0,17	
	GEN3/15 мин нестр.	0,95	-0,102	0,32	0,18	
Хувудскар Остерсейон, ноябрь 2010 (90,2 м)						
NCAR	GEN3/1 час	0,80	-0,374	0,737	0,46	240
CFSR	GEN3/15 мин	0,97	0,075	0,264	0,17	720
	GEN3/30 мин	0,95	0,002	0,326	0,20	
	GEN3/1 час	0,81	-0,171	0,666	0,42	
	GEN2/15 мин	0,97	0,084	0,293	0,18	
	GEN1/15 мин	0,96	-0,025	0,302	0,19	
Алмагрундет, январь 1992 (39,6 м)						
NCAR	GEN3/1 час	0,71	0,326	0,590	0,62	240
CFSR	GEN3/15 мин	0,83	0,396	0,588	0,60	639
	GEN3/15 мин нестр.	0,90	0,311	0,455	0,47	
Волнограф Д-6, сентябрь-октябрь 2015 (31 м)						
CFSR	GEN3/15 мин нестр.	0,92	0,42	0,27	0,35	1005

Так, по станции Содра Остерсейон статистические характеристики для результатов с использованием режима генерации волн GEN3 и с шагом вычислений 15 мин по прямоугольной и неструктурной сеткам существенно различаются: Bias = -0,003 для прямоугольной сетки и -0,104 для неструктурной, RMSE равен 0,27 и 0,35 соответственно. Схожие тенденции наблюдаются и для показателя рассеяния SI, который меняется от 0,15 до 0,32.

Для оценки качества воспроизведения ветрового волнения вблизи побережья проводился анализ результатов моделирования с инструментальными данными по станции Алмагрудет (табл. 2). Для этой станции наилучшие взаимные статистические характеристики были получены при сравнении результатов моделирования на неструктурной сетке и наблюдений. Вблизи побережья уменьшается значение коэффициента корреляции (0,90 – для неструктурной сетки, 0,83 – для прямоугольной и 0,71 – для результатов моделирования по NCEP/NCAR). Также существенно увеличиваются такие характеристики, как Bias, RMSE и SI. Вероятно, это вызвано малым пространственным разрешением расчетной сетки вблизи побережья. Показатель Bias строго положительный, т. е. разрабатываемая в рамках настоящего исследования модель для данной станции завышает среднюю значительную высоту волн.

Обсуждение

На основании результатов расчетов можно сделать вывод, что использование неструктурной сетки снижает качество воспроизведения ветрового волнения в открытой, глубоководной части Балтийского моря по сравнению с расчетами по прямоугольной сетке. Вблизи побережья моделирование на неструктурной сетке, напротив, позволяет получить более качественные результаты относительно прямоугольной сетки, что подтверждается результатами статистического анализа (см. табл. 2). При этом результаты показывают, что модель SWAN занижает высоты значительных волн (Bias < 0) в открытой части Балтийского моря и завышает (Bias > 0) вблизи побережья.

Использование данных о ветре из реанализа NCEP/NCAR существенно ухудшает качество прогноза: Bias увеличивается

В [4] был проведен обзор исследований по численному моделированию ветрового волнения в Балтийском море и рассмотрены полученные другими авторами статистические характеристики. Так, в [8, 11, 14, 17, 18, 22] R составляет около 0,69–0,8; SI – 0,49–0,76; $RMSE$ – 0,33–0,79; $Bias$ – $\pm 0,24$ –0,39.

Вопрос о том, какой механизм генерации ветровых волн больше подходит для шельфового Балтийского моря, остается дискуссионным. Так, статистические ошибки, рассчитанные для станции Содра Остерсейон с глубиной ~ 112 м меньше с использованием механизма генерации волн GEN3, а для станции Финнгрундет с глубиной $\sim 30,6$ м ошибки меньше с использованием другого алгоритма GEN1 (см. табл. 2). Эти механизмы генерации отличаются тем, что в GEN1 не учитываются взаимодействия четырех волн. Отсюда можно предположить, что для Ботнического залива, где и располагается станция Финнгрундет, они не столь значимы, как для открытой, центральной и юго-восточной частей Балтийского моря.

Согласно [10], типичная величина SI для замкнутых и полузамкнутых морей варьирует в пределах 0,25–0,3. Для Средиземного моря, почти полностью замкнутого, как и Балтийское море, SI также выше типичных значений, а значения SI , лежащие в пределах 0,25–0,3 более характерны для открытых морей. Определяющим фактором, вероятнее всего, является влияние береговой линии. По результатам данной работы SI попадает в диапазон характерных для замкнутых и полузамкнутых морей значений 0,2–0,5.

В [17] было показано, что использование неструктурной сетки не дает существенных преимуществ и создает значительные ошибки в периодах волн. В рамках нашего исследования был проведен взаимный статистический анализ рядов наблюдений за периодом волн на станции Содра Остерсейон и результатов численного моделирования (табл. 3).

Для этой станции, располагающейся в глубоководной части Балтийского моря, ошибки в периодах более существенны для неструктурной сетки (рис. 4) по сравнению с прямоугольной. Корреляция для неструктурной сетки составляет 0,85, для регулярной – 0,94, показатель рассеяния SI также лучше при применении регулярной сетки, однако $Bias$, наоборот, меньше для неструктурной.

**Сравнение периодов волн, рассчитанных с использованием
реанализа NCEP/CFSR, ноябрь 2010, Содра Остерсейон**

Сетка	R	Bias	RMSE	SI	Количество значений
регулярная	0,94	0,41	0,71	0,15	718
неструктурная	0,85	0,31	0,84	0,18	

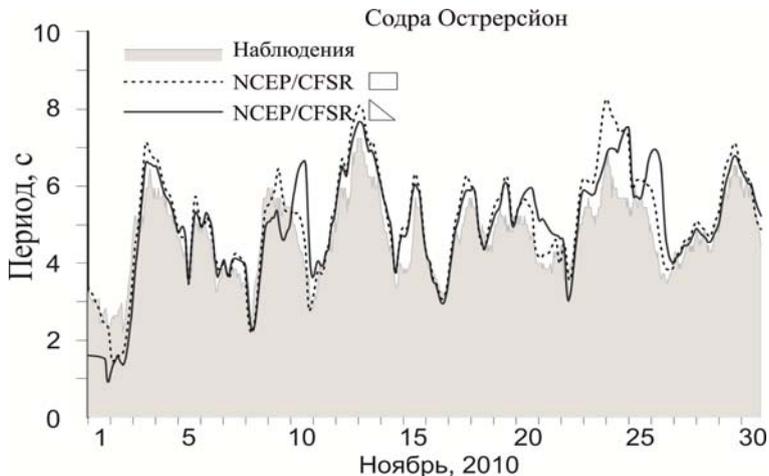


Рис. 4. Период ветровых волн по инструментальным данным и результатам моделирования с использованием реанализа CFSR на прямоугольной и неструктурной сетках в период с 01.11.2010 по 30.11.2010 г.

В [17] автор приходит к выводу, что для Балтийского моря с его сложной геометрией оптимально использовать прямоугольные сетки с пространственным разрешением около трех морских миль. По оценкам автора, для неструктурной сетки R составляет 0,74, а SI для высот значительных волн – 0,48, для прямоугольной регулярной сетки – 0,78 и 0,49 соответственно.

Однако для моделирования ветрового волнения в прибрежных мелководных акваториях расчеты лучше проводить на

неструктурной сетке с высоким пространственным разрешением, как это было сделано для Керченского пролива в [5, 7]. В этих работах расчеты ветрового волнения для Черного моря проводились на неструктурной сетке с использованием модели SWAN и данных о ветре реанализа NCEP/CFSR. Качество моделирования в [7] оценивалось по данным наблюдений; среднеквадратическая ошибка составила 0,3 м, коэффициент корреляции – 0,8.

Результаты численного моделирования, полученные в настоящем исследовании, также сравнивались с инструментальными данными акустического волнографа LOG_aLevel, который был установлен на нефтяной платформе Д-6 вблизи Куршской косы (рис. 1). На рис. 5 показано изменение значительной высоты волн в период с 23 сентября по 14 октября 2015 г. по данным численного моделирования и акустического волнографа. На рисунке видно, что в целом, численная модель достаточно хорошо воспроизводит ветровое волнение вблизи платформы Д-6, что подтверждается результатами статистического анализа (см. табл. 2). Так, коэффициент корреляции между рядами составил 0,92, Bias – 0,42 м, RMSE – 0,27 м, а параметр рассеяния SI – 0,35.

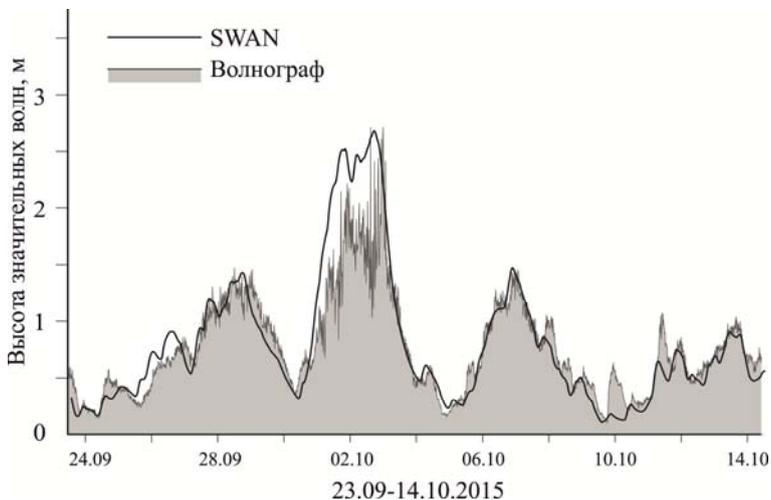


Рис. 5. Высота значительных волн по данным волнографа и по результатам моделирования в период с 23.09.2015 по 14.10.2015 г.

Заключение

Оценка качества моделирования на основе инструментальных данных наблюдений показала, что коэффициент корреляции для анализируемых рядов достаточно высокий, а статистические ошибки в среднем незначительны. Таким образом, качество полученных полей ветрового волнения отвечает поставленным задачам и в рамках исследования особенностей ветрового волнения Балтийского моря применение спектральной модели для шельфовых вод SWAN в сочетании с реанализом NCEP/CFSR более целесообразно, чем использование NCEP/NCAR. Полученные статистические характеристики попадают в средний диапазон значений по сравнению с другими исследованиями различных авторов. Модель SWAN в сочетании с реанализом NCEP/NCAR существенно *занижает* значения высот и пиковых периодов волн, расчеты же с использованием NCEP/CFAR на прямоугольной сетке в среднем, наоборот, *завышают* эти показатели. Статистический анализ показал, что при использовании триангуляционной сетки для Балтийского моря ошибки несколько больше (как в целом, так и для отдельных штормов), чем при моделировании на прямоугольной сетке с пространственным шагом $0,05^\circ$.

Участие А.Ю. Медведевой, С.А. Мысленкова, В.С. Архипкина и С.А. Добролюбова осуществлялось при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 14-05-91769 и 16-35-00338). Участие И.П. Медведева в исследовании поддерживалось грантом РНФ № 14-50-00095.

Список использованных источников

1. Зеленько А.А., Струков Б.С., Реснянский Ю.Д., Мартынов С.Л. Система прогнозирования ветрового волнения в Мировом океане и морях России // Труды ГОИН. – 2014. – Т. 215. – С. 90–101.
2. Лопатухин Л.И., Бухановский А.В., Иванов С.В., Чернышова Е.С. Справочные данные по режиму ветра и волнения Балтийского, Северного, Черного, Азовского и Средиземного морей // Рос. морской регистр судоходства. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2006. – 450 с.
3. Медведев И.П., Архипкин В.С. Колебания уровня моря в Голубой бухте (Геленджик) // Вестник МГУ. Серия 5. География. – 2015. – № 3. – С. 70–78.

4. *Медведева А.Ю., Архипкин В.С., Мысленков С.А., Зилитинкевич С.С.* Волновой климат Балтийского моря на основе результатов, полученных с помощью спектральной модели SWAN // Вестник МГУ. Серия 5. География. – 2015. – № 1. – С. 12–22.

5. *Мысленков С.А., Столярова Е.В., Архипкин В.С.* Прогноз ветрового волнения высокого пространственного разрешения для Керченского пролива, Цемесской бухты и района Сочи // Комплексные исследования морей России: оперативная океанография и экспедиционные исследования: Материалы молодежной научной конференции, Севастополь, 25-29 апреля 2016 г. [Электронный ресурс]. – Севастополь: ФГБУН МГИ, 2016. – С. 327–331.

6. РД 52.27.759-2011. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть III. Служба морских гидрологических прогнозов. – М.: Триада, лтд, 2011. – 194 с.

7. *Столярова Е.В., Мысленков С.А.* Прогноз ветрового волнения высокого пространственного разрешения в Керченском проливе // Труды Гидрометцентра России. – 2015. – Вып. 354. – С. 24–35.

8. *Blomgren S., Larson M., Hanson H.* Numerical Modeling of the Wave Climate in the Southern Baltic Sea // J. Coastal Res. – 2001. – Vol. 17, No. 2. – P. 342–352.

9. *Booij N., Ris R.C., Holthuijsen L.H.* A third-generation wave model for coastal regions. Part 1. Model description and validation // J. Geoph. Res. – 1999. – Vol. 140, No. C4. – P. 7649–7666.

10. *Bouws E., Draper L., Laing A.K. et al.* Guide to Wave Analysis and Forecasting // WMO-No. 702. – Geneva: WMO, 1998. – 159 p.

11. *Broman B., Hammarklint T., Rannat K. et al.* Trends and extremes of wave fields in the north-eastern part of the Baltic Proper // Oceanologia. – 2006. – Vol. 48 (S). – P. 165–184.

12. *Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R. et al.* The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // Bull. Amer. Meteorol. Soc. – 1996. – Vol. 77, No 3. – P. 437–471.

13. *Komen G.J., Hasselmann S., Hasselmann K.* On the existence of a fully developed wind-sea spectrum // J. Phys. Oceanogr. – 1984. – Vol. 14, No. 8. – P. 1271–1285.

14. *Kriezi E.E., Broman B.* Past and future wave climate in the Baltic Sea produced by the SWAN model with forcing from the regional climate model RCA of the Rossby Centre // US/EU-Baltic International Symposium, 2008 IEEE/OES. – IEEE. – 2008. – P. 1–7.

15. *Saha S. et al.* The NCEP climate forecast system reanalysis // Bull. Am. Meteorol. Soc. – 2010. – Vol. 91, No. 8. – P. 1015–1057.

16. *Saha S. et al.* The NCEP Climate Forecast System Version 2 // *J. Climate*. – 2014. – Vol. 27. – P. 2185–2208. – doi: 10.1175/JCLI-D-12-00823.1.
17. *Saremi S.* Development of a wave database in coastal areas around Sweden using the SWAN wave model: evaluation of the influence of grid resolutions and bathymetric data. *Dis. Phys.-math. Sci.* Gothenburg: Chalmers University of Technology. – 2010.
18. *Soomere T., Behrens A., Tuomi L., Nielsen J.W.* Wave conditions in the Baltic Proper and in the Gulf of Finland during windstorm Gudrun // *Natural Hazards & Earth System Sci.* – 2008. – Vol. 8, No. 1. – P. 37–46.
19. *Sterl A., Caires S.* Climatology, variability and extrema of ocean waves: The Web-based KNMI/ERA-40 wave atlas // *Int. J. Climatol.* – 2005. – Vol. 25, No. 7. – P. 963–977.
20. SWAN – Scientific and Technical documentation. Delft University of Technology, Environmental Fluid Mechanics Section, available from <http://www.swan.tudelft.nl> (Version 41.01, April 2014).
21. *WAMDI Group: Hasselmann S., Hasselmann K., Bauer E. et al.* The WAM Model – a Third Generation Ocean Wave Prediction Model // *J. Phys. Oceanogr.* – 1988. – Vol. 18. – P. 1775–1810.
22. *Zaitseva-Pärnaste I., Suursaar Ü., Kullas T. et al.* Seasonal and long-term variations of wave conditions in the northern Baltic Sea // *J. Coast. Res.* – 2009. – Vol. SI 56. – P. 277–281.

Поступила в редакцию 05.09.2016 г.