

## МЕТОДИКА ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 551.465 (262.5)

А.Ю. Медведева<sup>1</sup>, В.С. Архипкин<sup>2</sup>, С.А. Мысленков<sup>3</sup>, С.С. Зилитинкевич<sup>4</sup>ВОЛНОВОЙ КЛИМАТ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ СПЕКТРАЛЬНОЙ МОДЕЛИ SWAN<sup>5</sup>

Рассмотрено применение модели ветрового волнения SWAN (с входными данными ветра реанализа NCEP/NCAR) для Балтийского моря. Высокое пространственное разрешение для всей акватории и один из самых длительных периодов (более 60 лет), за который получены поля основных характеристик ветрового волнения, отличают исследования от предыдущих работ. Полученные результаты представляют собой хороший фундамент для дальнейшего изучения климатической изменчивости ветрового волнения. Выполнено сравнение натурных данных с заякоренных буев с известными оперативными моделями Балтийского региона и с результатами исследований других авторов [Лопатухин и др., 2006; Jönsson et al., 2003; Kriezi, Broman, 2008; Räämet, 2010; Räämet, Soomere, 2010; Saremi, 2010; Soomere, 2003; Soomere et al., 2008]. Результаты показали, что совпадение измерений и модельных данных высокое, однако модель SWAN в среднем занижает значения значительной высоты волн и пиковые периоды. По оценкам точности модели подсчитанные статистические характеристики (коэффициент корреляции, средняя систематическая, среднеквадратическая и относительная среднеквадратическая ошибки) попадают в средний диапазон по сравнению с другими численными экспериментами. Отдельно был рассмотрен экстремально сильный шторм, вызванный ураганом Гадран (2005). Результаты анализа показали, что модель адекватно отображает реальные условия, т.е. ее применение для Балтийского моря целесообразно. По полученным результатам за 63-летний период выделены штормовые ситуации по критерию превышения значительной высотой волн 2 м, что позволило исследовать климатическую изменчивость ветрового волнения в Балтийском море. За 63 года выявлено 2943 штормовых ситуации, т.е. в среднем около 50 штормов в год. В межгодовом ходе выявлены тенденции усиления штормовой активности и двадцатилетняя периодичность с максимумами в 70-х и 90-х гг. XX в.

*Ключевые слова:* Балтийское море, ветровое волнение, модель SWAN, NCEP/NCAR, волновой климат, ураган Гадран, значительная высота волн, пиковый период.

**Введение.** Морские ветровые волны — одно из наиболее очевидных проявлений взаимодействия океана и атмосферы. Межгодовая изменчивость характеристик ветрового волнения — это отражение климатических изменений на Земле. Ветровое волнение имеет большое значение для судоходства, строительства в прибрежной зоне, проведения морских работ и освоения нефтегазоносных районов шельфа. Одна из основных задач лаборатории оценки природных рисков географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова — изуче-

ние изменчивости режимного и экстремального штормового волнения в морях России [Natural..., 2014].

Для исследования изменчивости ветрового волнения, волнового климата необходимы длительные ряды данных, покрывающие всю акваторию моря. Эта задача решается путем применения численного моделирования с использованием волновой спектральной модели третьего поколения SWAN (Simulating WAVes Nearshore), разработанной в Делфтском университете (Нидерланды) [SWAN...,

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра океанологии, аспирант; ИО РАН, лаборатория цунами, мл. науч. с.; *e-mail:* alisa.bannikova@gmail.com

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра океанологии, доцент, канд. геогр. н.; *e-mail:* victor.archipkin@gmail.com

<sup>3</sup> Метеорологический институт Финляндии, профессор; Университет г. Хельсинки, физический факультет, кафедра атмосферных исследований; Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, радиофизический факультет; Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет; *e-mail:* sergej.zilitinkevich@fmi.fi

<sup>4</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (проект № 11.G34.31.0048; ФЦП “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014–2020 годы” соглашение № 14.578.21.0033 от 05.06.2014 г.), РФФИ (грант № 14-05-91769), Российской федеральной программы развития научно-технологической инфраструктуры России в 2014–2020 гг. (контракт № 14.578.21.0033, 2014–2016); Европейского научно-исследовательского совета ERC-Ideas PoC 632295-INMOST (2014–2015); Финского научного фонда Академии Финляндии: ABVA (contract N 280700, 2014–2017).

2014] для шельфовой зоны Мирового океана. Для каждого моря требуются отдельная проверка и калибровка численных моделей по данным наблюдений.

В ходе работы для всей акватории были рассчитаны поля характеристик ветрового волнения с 1948 по 2010 г. с помощью модели SWAN. Цель исследований — оценка качества полученных результатов на основе сравнения с данными измерений, определение целесообразности применения модели SWAN с использованием полей реанализа NCEP/NCAR (National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research), установление особенностей волнового климата [Earth..., 2014; Kriezi, Broman, 2008] для Балтийского моря.

**Постановка проблемы.** Балтийское море — почти полностью замкнутое внутриконтинентальное шельфовое море с максимальной глубиной до 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 [Leppäranta, Myrberg, 2009]. Глобальные волновые базы данных, такие, как атлас волнения KNMI/ERA-40 (с разрешением  $1,5 \times 1,5^\circ$ ) [Sterl, Caires, 2005], дают лишь обобщенное представление о волнении в Балтийском море. Сложная картина волновых полей требует составления долгосрочного прогноза и изучения общих тенденций и специфических особенностей долгопериодной изменчивости режимных и экстремальных характеристик волнения. Волновые условия здесь значительно изменяются в зависимости от времени года и региона. Шторм в некоторых районах может стать очень сильным всего за 6 ч., поэтому необходимо обладать средствами для его прогноза [Jönsson et al., 2003].

Нами при помощи модели SWAN по данным реанализа NCEP/NCAR были восстановлены поля характеристик ветровых волн для Балтийского моря с 1948 по 2010 г. с пространственным разрешением  $0,05^\circ$ . Полученные результаты позволяют исследовать изменения волнового климата и штормовой активности. Модель SWAN для условий Балтийского моря применяли ранее [Kriezi, Broman, 2008; Saremi, 2010], однако использование в качестве ветрового форсинга реанализа NCEP/NCAR в сочетании с этой моделью за столь длительный период сделано впервые.

**Материалы и методы исследований.** При исследованиях использована спектральная модель ветрового волнения третьего поколения SWAN [SWAN..., 2014]. В ее основе лежит решение уравнения баланса энергии волнового поля:

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

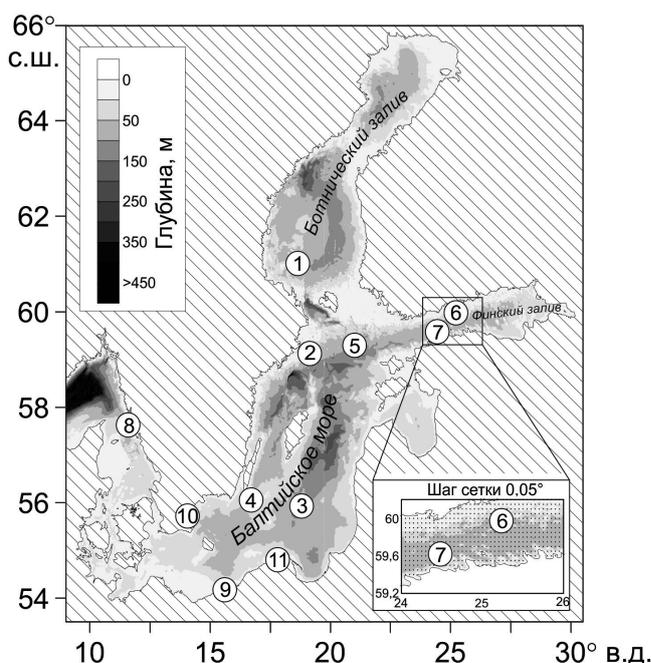


Рис. 1. Батиметрическая карта Балтийского моря с положением буйковых станций. На врезке — пространственное покрытие акватории расчетными узлами

где  $N$  — удельная спектральная плотность;  $x, y$  — пространственные координаты;  $t$  — время;  $\sigma$  — волновая частота;  $\theta$  — волновой угол;  $c_\sigma, c_\theta$  — скорость распространения в спектральном пространстве  $(\sigma, \theta)$ ;  $S_{tot}$  — функция источника, которая включает следующие физические процессы: генерацию волн за счет энергии ветра, нелинейный перенос энергии волн при взаимодействии 3-х и 4-х волн (гармоник), уменьшение волн из-за образования пены и брызг, трение о дно и обрушение волн на критической глубине. Модель SWAN ориентирована на решение задач для шельфовых вод, к которым относится Балтийское море. Основное отличие этой волновой модели от других заключается в том, что она учитывает нелинейные взаимодействия трех волн, характерные для закрытых и мелководных акваторий, а также эффекты обрушения и дифракции волн.

При расчетах использована прямоугольная сетка с шагом  $\sim 0,05^\circ$  (всего 23 345 узлов непосредственно для моря, рис. 1). В результате получены поля характеристик ветрового волнения для Балтийского моря за каждые 3 ч. (шаг вычислений — 15 мин.) с 1948 по 2010 г. (всего 63 года): значительная высота волн  $H_s$  (среднее значение высоты от 1/3 наиболее высоких волн в спектре волнения), среднее направление распространения волн, средний период волн, средняя длина волны, средняя высота зыби, пиковый период волн, перенос энергии.

В качестве вынуждающего воздействия использованы поля ветра на высоте 10 м над уровнем моря по данным реанализа NCEP/NCAR [Earth..., 2014; Kalnay et al., 1996]. Поля реанализа представляют собой компоненты ветра  $u$  и  $v$  с временным

шагом 6 ч. и пространственным разрешением  $\sim 1,875^\circ$  (всего 70 узлов для акватории).

В качестве входных данных о рельефе дна и конфигурации береговой линии Балтийского моря за основу была взята база данных GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans) [General..., 2014] с пространственным разрешением 1 морская миля ( $\sim 0,014^\circ$ ) (рис. 1). Расчеты выполнялись с использованием ресурсов суперкомпьютерного комплекса МГУ имени М.В. Ломоносова [Parallel..., 2014].

Для верификации модели использованы инструментальные данные буев Шведского метеорологического института с дискретностью 1 ч. (табл. 1, № 1–4) [Environment..., 2014] (рис. 1).

Кроме того, сравнение проводилось с данными оперативных моделей Балтийского региона для трех станций (табл. 1, № 5–7 [Soomere et al., 2008]) — моделью Германского института DWD (Deutscher Wetterdienst), моделью Финского института мор-

ских исследований FIMR (Finnish Institute of Marine Research) и моделью Датского метеорологического института DMI (Danish Meteorological Institute) (табл. 2) [Soomere et al., 2008]. В основе всех вышеперечисленных оперативных моделей лежит спектральная модель ветрового волнения третьего поколения WAM (WAVes Modelling) [WAMDI..., 1988], которая отличается от SWAN механизмом генерации волн.

Модели SWAN и DMI не учитывают ледовый покров. Для периода ледостава полученные результаты адекватно отображают ситуацию только для центральной и южной частей Балтийского моря, где лед появляется крайне редко [Kahma et al., 2003]. В моделях DWD и FIMR ледовый покров при расчетах принимается за земную поверхность. Реанализ MESAN Klimat (MESoscale wind field ANalysis) [Häggmark et al., 1997, 2000] основан на традиционном прогнозе погоды и инструментальных из-

Таблица 1

## Используемые в исследовании буйковые и береговые станции

Номер буй	Название	Период наблюдений	С.ш., град.	В.д., град.	Глубина, м
1	Буй “Финнгрундет” [Environment..., 2014]	2010	61,00	18,67	30,6
2	Буй “Алмагрундет” [Environment..., 2014]	1992	59,15	19,13	39,7
3	Буй “Содра Остерсейон” [Environment..., 2014]	2010	55,92	18,78	111,7
4	Буй “Оландс Содра Грунд” [Environment..., 2014]	1992	56,07	16,68	35,9
5	Буй 1 в [Soomere et al., 2008]	07–14.01.2005	59,25	21,00	62,2
6	Буй 2 в [Soomere et al., 2008]	07–14.01.2005	59,98	25,23	56,6
7	Буй 3 в [Soomere et al., 2008]	07–14.01.2005	59,62	24,49	14,4
8	Буй “Трубадурен” [Jönsson et al., 2003]	1990–1999, 2001, 2002, 2008, 2010	57,60	11,63	9,0
9	Колобжег [Blomgren et al., 2001]		54,20	15,63	
10	Косеберг [Blomgren et al., 2001]		55,74	14,00	
11	Любятово [Blomgren et al., 2001]		54,81	17,84	

Примечания. Прочерк — в [Blomgren et al., 2001] не указано.

Таблица 2

## Характеристики модели SWAN и оперативных моделей, с которыми проводилось сравнение

Волновая модель		Атмосферные данные (модель)		
Название	С.ш.?	Название	Временной шаг, ч.	С.ш.?
SWAN	0,05?	NCEP/NCAR	6	1,875?
FIMR [Soomere et al., 2008]	0,08?	FMI-HIRLAM 6.2.1	1	0,08?
DMI [Soomere et al., 2008]	0,17?	DMI-HIRLAM [Källén, 1996]	1	0,05?
DWD [Soomere et al., 2008]	0,1?	Local Model	3	0,06250,0625
WAVAD [Blomgren et al., 2001]	15?	Измерения	3	0,14?
HYPAS [J nsson et al., 2003]	11?	MESAN Klimat [Häggmark et al., 1997, 2000]	3	0,2?

мерениях, но, к сожалению, его данные покрывают всего 6 лет. NYPAS и WAVAD — спектральные модели ветрового волнения второго поколения для глубокой и мелкой воды. В отличие от модели SWAN они учитывают взаимодействие между волнами в более упрощенном виде.

Для оценки адекватности воспроизведения моделью реальных условий для 4-х станций были рассчитаны взаимные статистические характеристики [Руководящий..., 2011] — средняя систематическая ошибка (Bias), среднеквадратическая ошибка (RMSE), относительная среднеквадратическая ошибка (SI) и коэффициент корреляции (R):

$$\text{Bias} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{N} (P_i - Q_i), \quad (2)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (P_i - Q_i)^2}, \quad (3)$$

$$\text{SI} = \frac{\text{RMSE}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Q_i}, \quad (4)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N ((P_i - \bar{P})(Q_i - \bar{Q}))}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2\right) \left(\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})^2\right)}}, \quad (5)$$

где  $N$  — число значений,  $P$  — модельное значение,  $Q$  — фактическое значение,  $\bar{P}$  — среднее модельное значение,  $\bar{Q}$  — среднее фактическое.

**Результаты исследований и их обсуждение. Сравнение с данными наблюдений.** На первом этапе исследования проводилась верификация модели: результаты численных расчетов сравнивали с данными инструментальных измерений. Для этого были выбраны станции с длительными непрерывными рядами измерений в разных частях Балтийского моря и на разной глубине. На рис. 2 показаны результаты сравнения модельных расчетов в ближайшем узле и данных измерений со станции № 3 “Содра Остресйон” (табл. 1), расположенной в открытой части Балтийского моря на юго-восток от о. Готланд (рис. 1). Величина  $H_s$ , рассчитанная по результатам численных экспериментов, меньше измеренной (рис. 2), что, вызвано использованием данных реанализа NCEP/NCAR. Локальные флуктуации, наблюдающиеся в данных натуральных измерений, отсутствуют в модельных расчетах. Это связано с относительно низким временным разрешением реанализа (6 ч.).

Значение коэффициента корреляции (5) между измерениями на станции № 3 и результатами моделирования в ближайшем узле расчетной сетки довольно высокое и составляет 0,88 (табл. 3). Для

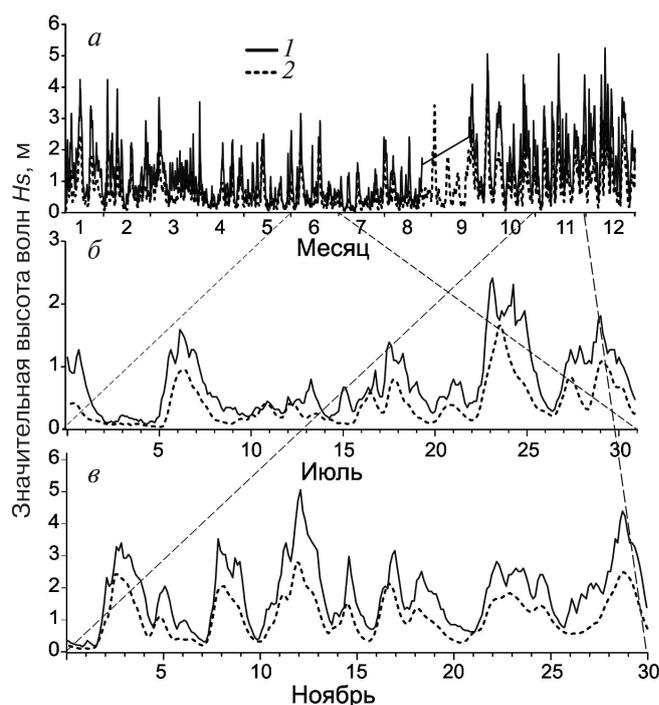


Рис. 2. Значительная высота волн (м) по данным наблюдений со станции № 3 “Содра Остресйон” и по результатам модели SWAN: *a* — для всего 2010 г., *б* — для июля 2010 г., *в* — для ноября 2010 г.; 1 — измеренная  $H_s$ ; 2 — SWAN

оценки полученных результатов для разных сезонов были выбраны отдельные месяцы с развитым волнением (январь, ноябрь) и с более спокойным состоянием морской поверхности (май, июль). В июле и мае значения  $R$ , Bias, RMSE для всех станций (кроме буя № 2) меньше, чем в осенне-зимний период. В целом для “спокойных” месяцев результаты моделирования лучше согласуются с измерениями.

Значение  $R$  для анализируемых рядов изменяется от 0,73 до 0,91, наклон линейного тренда — от 0,69 до 1,39 (рис. 3). Полученные статистические характеристики попадают в средний диапазон разброса значений по сравнению с исследованиями других авторов (табл. 4). Согласно [Bouws et al., 1998], типичная величина SI варьирует в пределах 0,25–0,3. По результатам нашей работы она составила ~0,5. 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, характернее для открытых морей [Pontes et al., 1997]. Определяющим фактором, вероятнее всего, является влияние береговой линии [Jönsson et al., 2003]. Как видно на рис. 3, совпадение рядов достаточно высокое. Для всех использованных в работе станций (кроме станции № 2) модель SWAN в среднем занижает значения  $H_s$ .

Сравнение с другими оперативными моделями на примере экстремального шторма, вызванного циклоном Гадран. В рамках исследования отдельно был рассмотрен экстремальный шторм, вызванный внетропическим циклоном Гадран (Эрвин) со

Таблица 3

Статистические характеристики сравнения значительной высоты волн ( $H_s$ ) по модельным и измеренным данным по формулам (2–5)

Номер буя	Название	Период наблюдений	R	RMSE	Bias	SI
1	“Финнгрундет”	январь–декабрь 2010	0,83	0,51	–0,33	0,53
		ноябрь 2010	0,88	0,64	–0,50	0,45
		июль 2010	0,77	0,33	–0,20	0,48
2	“Алмагрундет”	январь–декабрь 1992	0,81	0,39	0,04	0,45
		январь 1992	0,71	0,59	0,032	0,61
		май 1992	0,83	<b>0,30</b>	<b>0,02</b>	0,45
3	“Содра Остерсейон”	январь–декабрь 2010	0,88	0,72	–0,53	0,58
		ноябрь 2010	<b>0,91</b>	0,89	–0,73	0,49
		июль 2010	0,87	0,44	–0,34	0,60
4	“Оландс Содра Грунд”	январь–декабрь 1992	0,84	0,48	–0,30	0,50
		январь 1992	0,85	0,51	–0,18	<b>0,37</b>
		май 1992	0,83	0,31	–0,14	0,48

Примечания. Полужирным выделены наилучшие значения по статистическому показателю.

скоростью ветра  $>33–43$  м/с над Северным морем. Балтийского моря он достиг уже в ослабленном виде со скоростью ветра  $25–27$  м/с. Вызванный им шторм стал для Балтики одним из самых сильных за последние 40 лет. В северной глубоководной части моря максимальная измеренная высота волны составила  $7,2$  м, в Финском заливе —  $4,5$  м [Soomere et al., 2008]. Согласно данным этой работы,  $H_s$  вблизи побережья о. Сааремаа составила  $\sim 9,5$  м, пиковый период в центральной части моря достиг  $12$  с. Согласно расчетам, выполненным нами с помощью модели SWAN, значение  $H_s$  достигло у о. Сааремаа  $8,6$  м (рис. 4, ж), максимальный период —  $8$  с. Скорость ветра на момент максимального развития штормового волнения достигала  $26,5$  м/с в центральной глубоководной части Балтийского моря (рис. 4, з).

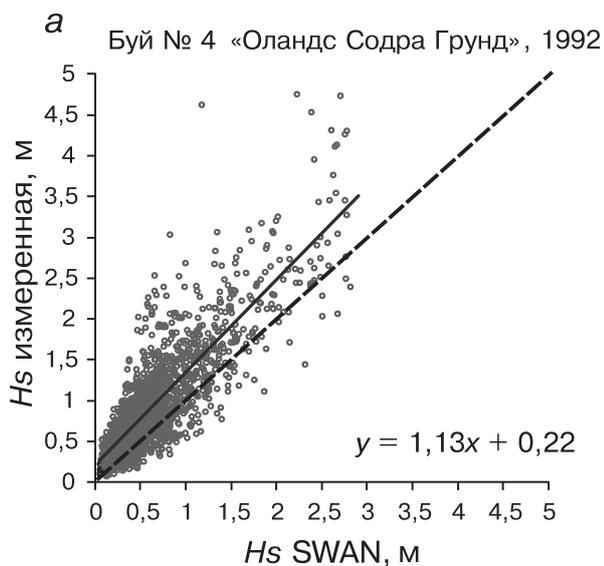
Для штормовой недели с 7 по 14 января 2005 г. проведено сравнение полученных результатов с данными трех буев и с оперативными моделями (рис. 4). Для буя № 5 (рис. 4, а), расположенного в открытой центральной части моря, значение  $H_s$  в начале шторма для первого пика занижено примерно на  $0,8$  м; для момента максимального развития шорма (9 января) оно завышено на  $0,2$  м. В период затишья ветрового волнения модель SWAN занижает значения  $H_s$  в среднем на  $0,5$  м. Разница более существенна для Финского залива (буй № 6), а также для акватории на северо-западе от о. Хьюмаа вблизи Таллина (станция № 7) (рис. 4, б). Внутри залива ошибка более существенна.

Значения пикового периода модель SWAN значительно занижает в моменты затухания волнения (приблизительно на  $2–4$  с) и менее существенно для периодов усиления волнения (примерно на

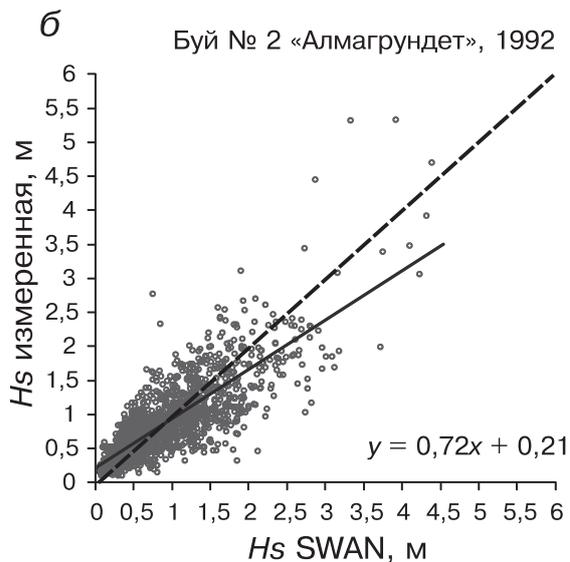
$0,5–2$  с). В реальных условиях волнение морской поверхности ослабевает медленнее, чем по результатам моделирования. Занижение периодов волн — характерная проблема для модели SWAN, которую пытались решить другие авторы [Kriezi, Broman, 2008].

На рис. 4, ж, к приведено распределение  $H_s$  (м) и скорости ветра для всей акватории Балтики, которое соответствует моменту максимального развития шторма Гадран 9 января в 06:00 по Гринвичу (рис. 4, а–в, 2-й пик), а на рис. 4, з, л — другому шторму 13 января в 12:00 по Гринвичу (рис. 4, а–в, 4-й пик). Наиболее сильное волнение обрушилось на западное побережье о-вов Сааремаа и Хийумаа — по результатам модели DMI  $H_s$  в эпицентре достигла  $9$  м (рис. 4, и, м), а по модели SWAN  $\sim 7$  м. Модель DMI [Soomere et al., 2008] показала, что волны с  $H_s \geq 6$  м распространялись намного дальше в глубь Финского залива. В Ботническом заливе, по данным модели DMI, присутствуют локальные области усиленного волнения ( $\sim 4$  м); по нашим данным, максимальное значение  $H_s$  для данного района составило  $2,5$  м. Для всей акватории картина ветрового волнения, полученная с помощью модели SWAN, намного более спокойная.

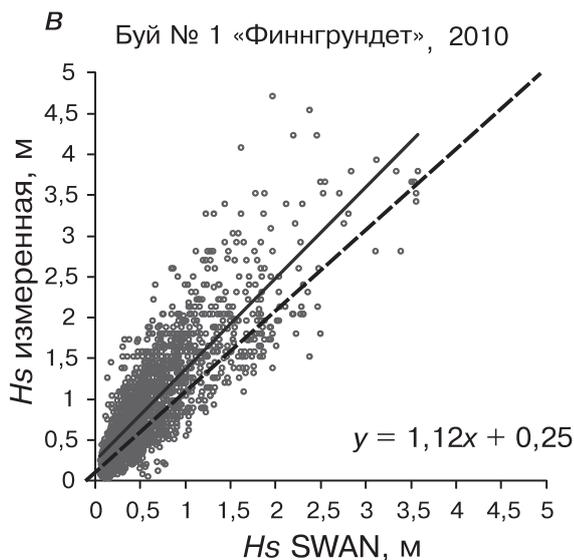
**Сравнение с результатами исследований других авторов.** Существует множество исследований, посвященных изучению волновых условий Балтийского моря [Лопатухин и др., 2006; Jönsson et al., 2003; Kriezi, Broman, 2008; Räämet, 2010; Räämet, Soomere, 2010; Saremi, 2010; Soomere, 2003; Soomere et al., 2008]. Наиболее широко применяется модель ветрового волнения третьего поколения WAM в сочетании с различными входными данными о ветре (табл. 2), спектральная модель SWAN использова-



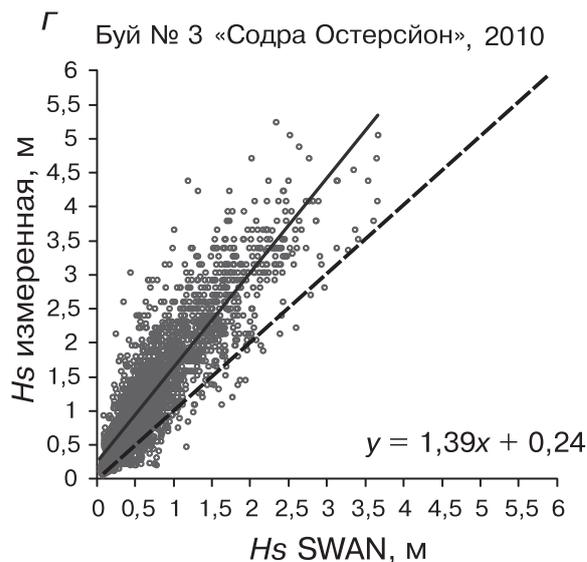
	SWAN	Буй
Число значений	2928	1628
Минимальное	0,05	0,08
Максимальное	2,91	4,76
Среднее	0,67	0,97
Стандартное отклонение	0,51	0,67



	SWAN	Буй
Число значений	2928	1451
Минимальное	0,03	0,10
Максимальное	4,54	5,34
Среднее	0,88	0,87
Стандартное отклонение	0,71	0,58



	SWAN	Буй
Число значений	2920	1825
Минимальное	0,05	0,04
Максимальное	3,57	4,72
Среднее	0,57	0,96
Стандартное отклонение	0,47	0,70



	SWAN	Буй
Число значений	2920	2682
Минимальное	0,04	0,06
Максимальное	3,66	5,25
Среднее	0,72	1,24
Стандартное отклонение	0,58	0,92

Рис. 3. Скаттер-диаграммы по измеренным и по модельным данным для станций: а — № 4 «Оландс Содра Грунд», 1992 г.; б — № 2 «Алмагрундет», 1992 г.; в — № 1 «Финнгрундет», 2010 г.; г — № 3 «Содра Остерсийон», 2010 г. и основные статистические характеристики. Сплошная линия — линейный тренд, штриховая линия (y) — уравнение линии тренда

лась не так часто [Kriezi, Broman, 2008; Saremi, 2010]. В табл. 4 приведены статистические характеристики сравнения результатов моделирования с измерениями различных авторов для Балтийского

моря. Нашу работу от предшествующих отличает более длительный период численных расчетов (63 года), а также входные данные о ветре. В сочетании с реанализом NCEP/NCAR модель SWAN

Таблица 4

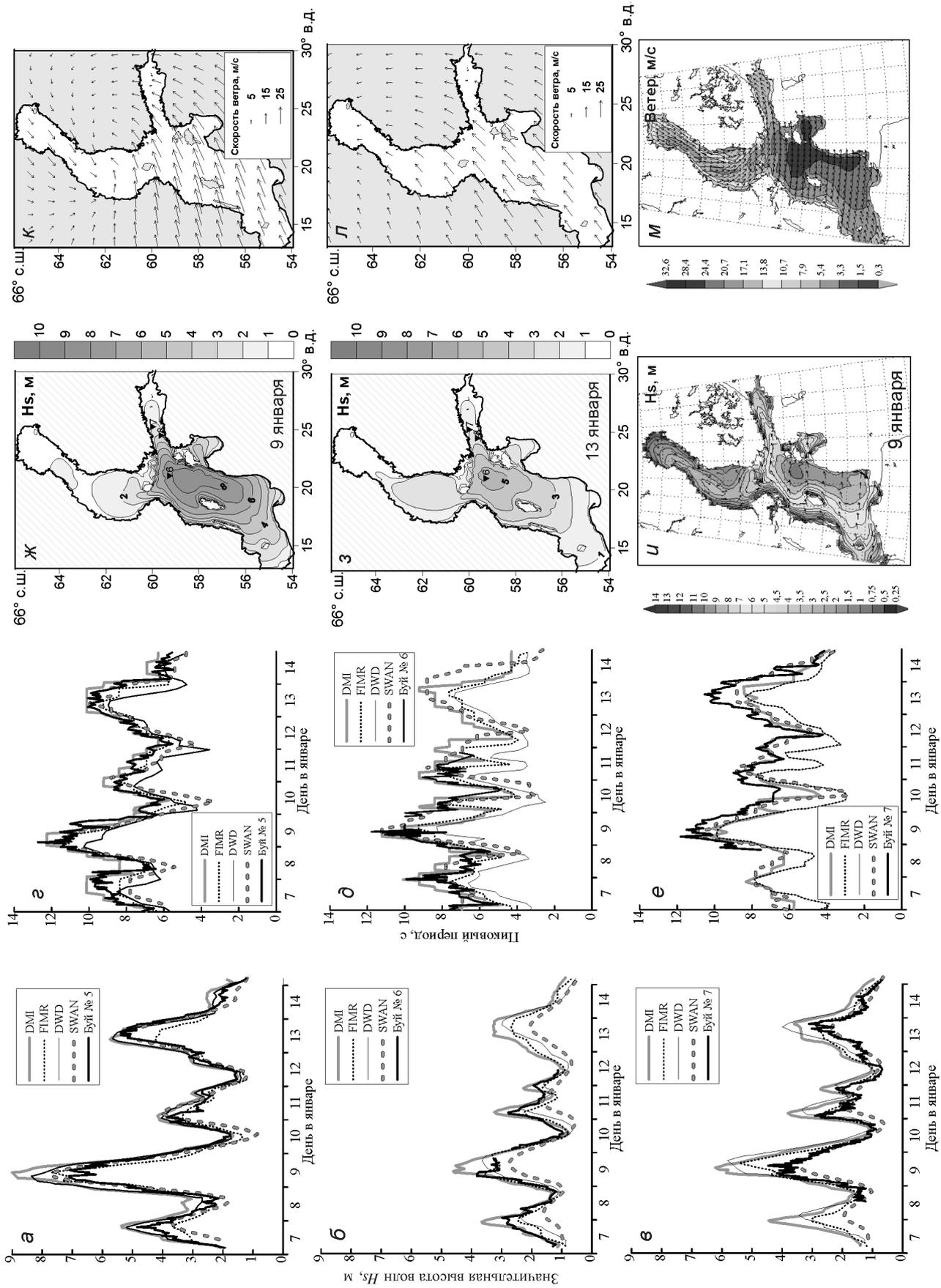
Статистические характеристики по формулам (2–5) для  $H_s$ , м

Модель волновая/атмосферная	Буй № 2		Буй № 4		Буй № 8		Период
	R	RMSE	R	RMSE	R	RMSE	
	Bias	SI	Bias	SI	Bias	SI	
SWAN/MESAN [Kriezi, Broman, 2008]	—	0,5	—	—	—	—	1999
	0,13	0,13	—	—	—	—	
SWAN/RCA* [Kriezi, Broman, 2008]	—	0,79	—	0,63	—	0,5	21.11–12.12.1999
	0,27	0,45	0,09	0,09	0,09	0,09	
HYPAS/MESAN [Kriezi, Broman, 2008]	0,88	0,45	0,87	0,40	0,90	0,26	1999
	—	0,44	—	0,42	—	0,37	
WAVAD/Измерения [Blomgren et al., 2001]	Станция № 9		Станция № 10		Станция № 11		—
	0,85	0,32	0,94	0,32	0,86	0,32	
	—	0,52	—	0,41	—	0,31	
Модель волновая/атмосферная	Буй № 2		Буй № 4		Буй № 8		Период
	R	SI	R	SI	R	SI	
SWAN (0,1×0,1°)/RCA [Saremi, 2010]	0,69	0,53	0,49	0,67	0,65	0,64	2008
SWAN (0,05×0,05°)/RCA [Saremi, 2010]	0,78	0,49	0,51	0,65	0,66	0,63	1990/2001/ 2002, для каждого буя соответственно
	0,72	0,49	0,51	0,65	0,66	0,63	1999/2010/ 2010, для каждого буя соответственно
WAM/FIMR (HIRLAM) [Soomere et al., 2008]	Буй № 5		Буй № 6		Буй № 7		Период
	Bias	RMSE	Bias	RMSE	Bias	RMSE	
	−0,36	0,53	−0,23	0,33	0,32	0,49	7–14.01.2005
	−0,35	0,66	0	0,22	0,66	0,86	9.01.2005
WAM/DMI (HIRLAM) [Soomere et al., 2008]	0,39	0,59	0,16	0,42	0,71	0,86	7–14.01.2005
	0,87	1,06	0,4	0,64	1,12	1,31	9.01.2005
WAM/DWD (Local Model) [Soomere et al., 2008]	0,24	0,46	−0,26	0,39	0,59	0,83	7–14.01.2005
	0,7	0,83	−0,05	0,38	1,12	1,33	9.01.2005
Модель волновая/атмосферная	Сетка, град.						Период
SWAN/RCA [Saremi, 2010] (Буй № 2)	0,033×0,033		0,01×0,01		Неструктурная сетка		
	R	SI	R	SI	R	SI	
	0,78	0,49	0,64	0,76	0,74	0,48	1990

\* RCA (Rossby Centre Regional Atmospheric Climate model) — региональная атмосферная климатическая модель, покрывающая большую часть Европы с пространственным разрешением 25 или 50 км.

Рис. 4. Сравнение результатов, полученных с помощью модели SWAN, с оперативными моделями и данными измерений:  $a, e$  — для буя № 5;  $b, d$  — для буя № 6;  $c, e$  — для буя № 7 [23] по  $H_s$  ( $a, b, c$ ) и пиковому периоду ( $d, e$ ).

Момент максимального развития шторма в 06:00 по Гринвичу 9 января, вызванного ураганом Гадран, по результатам модели SWAN: распределение значительных высот волн ( $ж$ ) и скорости ветра ( $к$ ) и по результатам модели DMI: распределение значительных высот волн ( $и$ ) и скорости ветра ( $м$ ); шторм 13 января в 12:00 по Гринвичу по модели SWAN: распределение значительных волн ( $з$ ) и скорости ветра ( $л$ )



не применялась для воспроизведения столь длительного периода для Балтийского моря. До этого максимально анализируемый период составил около 40 лет [Soomere, Räämet, 2014].

Наиболее высокое значение коэффициента корреляции (0,94) получено по результатам моделирования с помощью модели WAVAD (станция № 10) (табл. 4) [Blomgren et al., 2001]. Хорошее совпадение показывает также модель NYPAS/MESAN Klimat [Jönsson et al., 2003]. Для этой же модели выявлена наименьшая RMSE (для станции “Оскарсгундет”). Изучение постоянных ветров показало, что если их направление станет северо-восточным, то в некоторых районах волны будут сильнее, чем при нынешнем ветровом режиме [Soomere et al., 2008].

В целом лучшее совпадение с натурными данными показывают модели NYPAS/MESAN и SWAN/RCA (Rossby Centre Regional Atmospheric Climate model) с откалиброванными метеоданными. Авторы работы [Kriezi, Broman, 2008] эмпирически подбирали ветровой коэффициент при параметризации ветра [Gill, 1969]. В рамках нашей работы такой подбор не осуществлялся, в будущем планируется провести численные эксперименты с разными эмпирическими коэффициентами. Исследования других авторов отличаются входными данными о ветре и обладают меньшим пространственным разрешением. Используемый в них ветровой форсинг, адаптированный специально для европейского региона, достовернее отображает реальные условия для акватории Балтийского моря, чем реанализ NCEP/NCAR. Однако для исследования межгодовой изменчивости штормовой активности достаточно высокая корреляция и относительно небольшие

статистические ошибки показывают целесообразность использования полученных полей характеристик ветрового волнения. Преимущество реанализа NCEP/NCAR заключается в том, что он наиболее продолжительный среди существующих (более 60 лет), что больше подходит для изучения климатических особенностей ветрового волнения.

**Волновой климат.** Волновой климат Балтийского моря характеризуется: локализацией периода сильных штормов в осенне-зимние месяцы, значительной пространственной и временной неоднородностью свойств полей ветровых волн, преобладанием относительно коротких и крутых волн, наличием волн с такой высотой, как в гораздо большем Средиземном море. Месяцы с наиболее сильными ветрами необязательно совпадают с месяцами наиболее мощной волновой активности Балтийского моря, существует некий период “запаздывания” [Räämet, 2010; Räämet, Soomere, 2010].

За 63 года (1948–2010) выявлено 2943 штормовых ситуации, т.е. ~50 штормов в год. Случаи, когда  $H_s$  достигала 2 м, рассматривались как штормовые ситуации. По полученным результатам четко выделяется однонаправленный линейный тренд усиления штормовой активности в Балтийском море (рис. 5). В межгодовой изменчивости штормовой активности выявляется двадцатилетняя периодичность с увеличением числа штормов в конце 1970-х и в 1990-х гг. и уменьшением в конце 1980-х, середине 2000-х гг. Типичные периоды интенсификации и ослабления ветрового волнения составляют для Балтики 10–12 лет [Soomere, 2005], что подтверждается полученными результатами. Для разных районов Балтийского моря характерно несоответ-

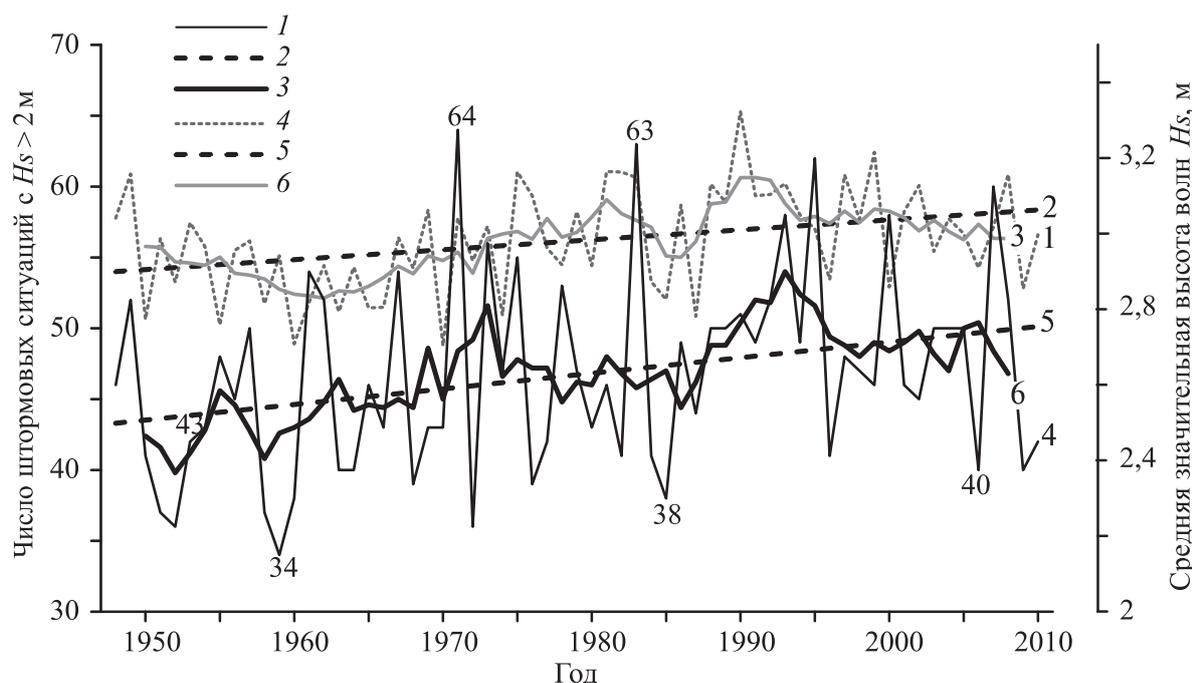


Рис. 5. Средняя за год значительная высота волн  $H_s$  (1), линейный тренд (2) и скользящее среднее (3) по  $H_s$ , число штормовых ситуаций с 1948 по 2010 г., отобранных по критерию  $H_s > 2$  м (4), линейный тренд (5) и скользящее среднее (6) по ним

ствие между трендами десятилетней изменчивости. Отметим также стремительный характер изменения спадов и усиления волновой активности в течение одного десятилетия [Broman et al., 2006; Soomere, 2008; Soomere, Räämet, 2014; Zaitseva-Pärnaste et al., 2009]. Причина этого может заключаться в чувствительности волновых полей Балтийского моря к изменению траекторий циклонов.

Среднегодовая величина  $H_s$  также возрастает во второй половине XX в. (рис. 5), ее значения колеблются от 2,4 до 3,3 м, но такая четкая периодичность, как для штормовых ситуаций, не проявляется. При этом наблюдается межгодовое смещение области максимальных значений  $H_s$ .

Согласно аналогичным исследованиям для других западных морей России, которые проводятся в лаборатории оценки природных рисков [Arkhipkin et al., 2014] такими же методами, двадцатилетняя периодичность подобного рода выявлена для Каспийского и Азовского морей. Однако в них в отличие от Балтийского моря, штормовая активность снижается.

В наших исследованиях ледовый фактор при расчетах полей ветрового волнения не учитывался, но это планируется сделать в будущем. Для периодов ледостава полученные результаты адекватно отображают только центральную глубоководную, юго-восточную и южную части моря. Увеличение пространственного разрешения при расчетах и использование неструктурной сетки не всегда улучшают качество результатов (табл. 4) [Saremi, 2010]. В дальнейшем предполагается в качестве вынуждающей силы использовать базы данных о ветре с более высоким пространственным и временным

разрешением, осуществить подбор калибровочных коэффициентов для этих данных, а также выполнить ряд численных экспериментов на неструктурной сетке.

#### Выводы:

— спектральная модель SWAN была применена для Балтийского моря. Оценка качества моделирования на основе инструментальных данных наблюдений показала, что значения коэффициента корреляции для анализируемых рядов достаточно высокие, а статистические ошибки в среднем незначительны. Таким образом, качество полученных полей ветрового волнения отвечает поставленным задачам. В рамках исследования волнового климата Балтийского моря целесообразно применять спектральную модель для шельфовых вод SWAN в сочетании с реанализом NCEP/NCAR. Полученные статистические характеристики попадают в средний диапазон значений по сравнению с исследованиями других авторов. Однако модель SWAN в большинстве случаев занижает пиковые значения высот и пиковых периодов волн;

— за более чем 60-летний период выявлено более 2900 штормовых ситуаций, т.е. в среднем 50 штормов в год. Штормовая активность в Балтийском море за исследованный период возрастает согласно линейному тренду. В ее межгодовой изменчивости обнаружена 20-летняя периодичность с увеличением числа штормов в конце 1970-х и в 1990-х гг., четкая периодичность в среднегодовых значениях  $H_s$  не проявляется. Подобная периодичность, но на фоне снижения штормовой активности, характерна для Каспийского и Азовского морей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ REFERENCES

Лопатухин Л.И., Бухановский А.В., Иванов С.В., Чернышева Е.С. Справочные данные по режиму ветра и волнения Балтийского, Северного, Черного, Азовского и Средиземного морей // Российский морской регистр судоходства. СПб., 2006. 450 с.

Lopatoukhin L.I., Boukhanovsky A.V., Ivanov S.V., Tchernysheva E.S. Spravochnye dannye po rezhimu vetra i volneniya Baltijskogo, Severnogo, Chernogo, Azovskogo i Sredizemnogo morej [Reference data about wind and wave regimes of the Baltic, North, Black, Azov and Mediterranean Seas], Saint-Petersburg, Russian maritime register of shipping, 2006, 450 p.

Руководящий документ 52.27.759–2011, Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Ч. III. Служба морских гидрологических прогнозов. М.: Триада ЛТД, 2011. 194 с.

Rukovodjashhij dokument 52.27.759–2011. Nastavlenie po sluzhbe prognozov. Razdel 3. Ch. III. Sluzhba morskih gidrologicheskikh prognozov [Management directive 52.27.759–2011, Forecast service manual, pt 3, chpt III. Maritime hydrological forecast service], Moscow: Triada LTD, 2011, 194 p.

Arkhipkin V.S., Gippius F.N., Koltermann K.P., Surkova G.V. Wind waves in the Black Sea: results of a hindcast study. Nat. Hazards and Earth System Scie. Discuss., 2014, V. 14, pp. 2883–2897.

Blomgren S., Larson M., Hanson H. Numerical Modeling of the Wave Climate in the Southern Baltic Sea, J. Coastal Res., 2001. V. 17, no 2, pp. 342–352.

Bouws E., Draper L., Laing A.K. et al. Guide to Wave Analysis and Forecasting. WMO–No 702, World Meteorological Organization. Geneva, 1998, 159 p.

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, V. 48 (S), pp. 165–184.

Earth system research laboratory. URL: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/reanalysis/reanalysis.shtml> (Accessed: 14.05.2014).

Environment climate data Sweden. URL: <http://www.smhi.se/ecds> (Accessed: 23.03.2014).

General bathymetric chart of the oceans (GEBCO). URL: <http://www.gebco.net> (Accessed: 13.01.2014).

Gill G.C. Comments on “The variation of Gust Factors with Mean wind Speed and with Height”, J. Appl. Meteorology, 1969, V. 8, no 1, pp. 167–167.

Häggmark L., Ivarsson K.I., Olofsson P.O. MESAN—Mesoscale analysis, SMHI Rapp., Meteorol. och Klimatol. (Sweden), 1997, ser.: RMK 75.

Häggmark L., Ivarsson K.-I., Gollvik S., Olofsson P.O. Mesan, an operational mesoscale analysis system, Tellus A, 2000, V. 52, no 1, pp. 2–20.

- Jönsson A., Broman B., Rahm L.* Variations in the Baltic Sea wave fields, *Ocean Engineering*, 2003, V. 30, no 1, pp. 107–126.
- Kahma K., Pettersson H., Tuomi L.* Scatter diagram wave statistics from the northern Baltic Sea, MERI—Report Series of the Finnish Institute of Marine Res., 2003, V. 49, pp. 15–32.
- Källén E.* Hirlam documentation manual system 2.5, The Swedish Meteorological and Hydrological Institute (Available from SMHI, S-60176 Norrköping, Sweden), 1996. 243 p.
- Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R.* et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 1996, V. 77, no 3, pp. 437–471.
- Kriezj 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, 2008, pp. 1–7.
- Leppäranta M., Myrberg K.* Physical oceanography of the Baltic Sea, Berlin: Springer, 2009, 378 p.
- Natural Risk Assessment Laboratory. URL: <http://www.nral.org/ru> (Accessed: 20.06.2014).
- Parallel.ru. URL: <http://parallel.ru> (Accessed: 27.05.2014).
- Pontes M.T., Barstow S., Bertotti L.* et al. Use of numerical wind-wave models for assessment of the offshore wave energy resource, *J. Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 1997, V. 119, no 3, pp. 184–190.
- Räämet A.* Spatio-temporal variability of the Baltic Sea wave fields, Thesis on Civil Engineering, Tallin: TUT Press, 2010.
- Räämet A., Soomere T.* The wave climate and its seasonal variability in the northeastern Baltic Sea, *Eston. J. Earth Sci.*, 2010, V. 59, no 1, pp. 100–113.
- 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, Gothenburg: Chalmers University of Technology, 2010.
- Soomere T.* Anisotropy of wind and wave regimes in the Baltic Proper, *J. Sea Res.*, 2003, V. 49, no 4, pp. 305–316.
- Soomere T.* Extremes and decadal variations of the northern Baltic Sea wave conditions, *Extreme Ocean Waves*, Amsterdam: Springer Netherlands, 2008, pp. 139–157.
- Soomere T.* Wind wave statistics in Tallinn Bay, *Boreal Env. Res.*, 2005, V. 10, no 2, pp. 103–118.
- 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, V. 8, no 1, pp. 37–46.
- Soomere T., Räämet A.* Decadal changes in the Baltic Sea wave heights, *J. Mar. Syst.*, 2014, V. 129, pp. 86–95.
- Sterl A., Caires S.* Climatology, variability and extrema of ocean waves: The Web-based KNMI/ERA-40 wave atlas, *Int. J. Climatol.*, 2005, V. 25, no 7, pp. 963–977.
- SWAN SourceForge. URL: <http://swanmodel.sourceforge.net> (Accessed: 04.01.2014).
- WAMDI Group: Hasselmann S., Hasselmann K., Bauer E. et al. The WAM Model — a Third Generation Ocean Wave Prediction Model, *J. Phys. Oceanogr.*, 1988, no 18, pp. 1775–1810.
- 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, V. SI 56, pp. 277–281.

Поступила в редакцию  
21.07.2014

**A.Yu. Medvedeva, V.S. Arkhipkin, S.A. Myslenkov, S.S. Zilitinkevich**

#### **WAVE CLIMATE OF THE BALTIC SEA FOLLOWING THE RESULTS OF THE SWAN SPECTRAL MODEL APPLICATION**

Application of the SWAN wind wave model (with input data Reanalysis NCEP/NCAR) for the Baltic Sea is discussed. High spatial resolution for the whole area of the sea and a longest period (over 60 years) of calculated wind wave parameters are characteristic of the study. The results of simulation are a good basis for further investigation of the climatic variability of wind waves. The results were compared with the data from the anchored buoys, available operative models of the Baltic Sea and the results of other researchers. High correlation of simulated and observed values was revealed, however the SWAN model on the average undervalued maximum wave height and peak periods. Statistical characteristics, such as correlation, mean regular error and standard deviation) were calculated to validate the model; their values are similar to those of other numerical experiments. The extremely severe storm caused by the Gudrun hurricane of 2005 is discussed more in detail. It was shown that the SWAN model adequately represents the real conditions, thus it is applicable for the shallow Baltic Sea. The storm situations were identified for the 63-year period, allowing the analysis of the climate variability of wind waves in the Baltic Sea. The overall trend of increasing storm intensity was revealed, as well as the 20-year periodicity with maxima in the 1970-s and 1990-s.

*Key words:* Baltic Sea, wind waves, wave simulation, SWAN, model validation, wave climate, Gudrun hurricane, high waves.