

# ВОЛНОВОЙ КЛИМАТ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ

Медведева А.Ю.<sup>1,2</sup>, Мысленков С.А.<sup>1,2</sup>, Архипкин В.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Россия

*alisa.bannikova@gmail.com*

*Ключевые слова: Ветровые волны, шторм, Балтийское море, волновой климат, значительная высота волн*

Шторма на Балтийском море в осенне-зимний период - явление частое, происходящее ежегодно. Однако отсутствие инструментальных измерений затрудняет оценку волнения, которая выполняется в основном визуально или по расчету по скорости ветра. Численное моделирование ветрового волнения позволяет обеспечить нехватку данных практически для любого региона с необходимым пространственным разрешением и за интересующий период времени. В настоящей работе рассмотрены результаты численного моделирования полей ветрового волнения Балтийского моря с помощью спектральной волновой модели SWAN. Расчеты производились на нерегулярной и прямоугольной вычислительных сетках высокого пространственного разрешения. В качестве вынуждающей силы задавался приземный ветер из реанализов NCEP/CFRSR и NCEP/NCAR. Сравнение результатов расчетов с данными о высотах ветровых волн с заякоренных буев показало, что использование реанализа нового поколения NCEP/CFRSR существенно улучшает качество воспроизводимых полей ветрового волнения по сравнению с результатами, полученными с использованием реанализа NCEP/NCAR. Поля ветрового волнения одинаково хорошо воспроизводятся как на нерегулярной (триангуляционной), так и на прямоугольной вычислительных сетках. Для оценки точности модели также было проведено сравнение с данными акустического волнографа, установленного на нефтяной платформе Д-6 вблизи юго-восточного побережья Балтийского моря.

**Данные и методы.** Для изучения особенностей пространственно-временной изменчивости полей ветрового волнения была использована спектрально-волновая модель SWAN (Simulating WAVes Nearshore) версии 41.01. На первом этапе работы в качестве вынуждающей силы в модели задавались поля приземного ветра по данным реанализа NCEP/NCAR с 1948 по 2010 гг. Пространственное разрешение полей приземного ветра в этом реанализе составляет  $\sim 1.875^\circ$ , временное - 6 ч. На втором этапе исследования использование другого реанализа последнего поколения NCEP/CFRSR (1979-2010) качественно улучшило воспроизводимые поля ветрового волнения. 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 следующая версия этого реанализа - NCEP/CFRSv2 (Climate Forecast System Version 2), покрывающая временной период с 2011 г. по н.в. и имеющая более высокое пространственное разрешение  $\sim 0.205^\circ \times 0.204^\circ$  и временное разрешение - 1 час. Для оценки качества результатов моделирования было произведено сравнение и подсчитаны стандартные статистические характеристики (см. [Медведева и др, 2015]) с данными измерений с заякоренных буев Шведского метеорологического института и волнографа. Расположение шведских буев показано на рис. 1. Дискретность наблюдений составляла 1 час. Для периода с 16.09.2015 по 14.10.2015 были использованы данные ультразвукового волнографа LOG\_aLevel фирмы «General Acoustics», измеряющего высоту волновой поверхности с частотой 5 Гц ( $20.67^\circ$  в.д.,  $55.28$  с.ш., рис. 1). Он был установлен в юго-восточной части Балтийского моря на нефтяной платформе Д-6. Далее

была подсчитана высота значительных волн (среднее от 1/3 наибольших волн, соответствующее высоте волн 12.5%-ной обеспеченности). В работе было использовано два типа вычислительных сеток, созданных на основе базы данных о рельефе дна GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans): прямоугольная и триангуляционная. Пространственное разрешение прямоугольной сетки составляет  $\sim 0.05^\circ$ . Пространственное разрешение полученной неструктурной триангуляционной расчетной сетки варьировалось от 250 до 10500 м. На рис. 1 показан пример вычислительной нерегулярной триангуляционной сетки в районе нефтедобывающей платформы Д-6, расположенной вблизи Самбийского полуострова.

**Результаты.** Сравнение различных реанализов и типов расчетных сеток. В рамках верификации модели было проведено сравнение полученных модельных данных с инструментальными данными шведских буев [[/rus/event/request/50297/report/](https://rus/event/request/50297/report/) и <https://vk.com/away.php?to>], с данными акустического волнографа, с результатами оперативных моделей и с результатами исследований других авторов [Медведева и др., 2015]. Были подсчитаны такие характеристики, как Bias и RMSE. Они представляют собой среднюю систематическую и среднеквадратическую ошибки, соответственно, и отображают рассеивание разности модельных и наблюдаемых значений случайной величины относительно ее математического ожидания (см. [Медведева и др., 2015]). Характеристика Bias также позволяет оценить общее завышение или занижение модельных расчетов относительно наблюдаемых.

Для всех станций, с которыми осуществлялось сравнение, кроме станции Алмагрудет ( $19.13^\circ$  в.д.,  $59.15^\circ$  с.ш., рис.1), результаты, полученные на регулярной сетке точнее. Вышеупомянутая станция расположена ближе всего к береговой линии в центральной части Балтийского моря, возможно, это свидетельствует о том, что неструктурную сетку для расчетов лучше применять для прибрежных районов. Для этой станции значение коэффициента корреляции составляет 0.90 для неструктурной сетки, 0.83 для прямоугольной сетки и 0.71 для результатов моделирования по NCEP/NCAR. Показатель Bias строго положительный, т.е. модель завышает высоту ветровых волн у побережья, что необычно, поскольку типически SWAN ее занижает [Soomere et al., 2008].

В [Saremi, 2010] было показано, что использование неструктурной сетки не дает существенных преимуществ и создает значительные ошибки в периодах волн. В рамках данного исследования был проведен взаимный статистический анализ рядов наблюдений за периодом волн на станции Содра Остерсйон ( $18.78$  в.д.°,  $55.92$  с.ш.°, на рис.1) и результатов численного моделирования. Для этой станции, располагающейся в глубоководной части Балтийского моря, ошибки в периодах намного более существенны, и для неструктурной сетки они также больше по сравнению с прямоугольной сеткой. Корреляция для нерегулярной сетки составляет 0.85, для регулярной 0.94.

Результаты численного моделирования, полученные в настоящем исследовании, также удалось сравнить с инструментальными данными акустического волнографа LOG\_aLevel, который был установлен на нефтяной платформе Д-6 вблизи Куршской косы (рис. 1) с 16.09.2015 по 14.10.2015 г. На рисунке видно, что при слабом волнении значительная высота волн, рассчитанная при помощи численного моделирования, ниже, чем по данным инструментальных наблюдений. В целом, численная модель достаточно хорошо воспроизвела ветровое волнение вблизи платформы Д-6 (рис. 2). Использование в качестве вынуждающей силы данные о приземном ветре из реанализа NCEP/CFSR существенно улучшают качество воспроизводимых полей ветрового волнения и увеличивают корреляцию с рядами натурных измерений (рис. 2). Волновой климат. Использование длительных рядов реанализа NCEP/NCAR позволило выявить рост штормовой активности в последние десятилетия, что, вероятно, связано со смещением траекторий циклонов, проходящих над

акваторией моря [Медведева и др., 2015]. 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. Типичные периоды интенсификации и ослабления ветрового волнения составляют для Балтики 10-12 лет [Soomere et al., 2008], это подтверждают результаты данной работы. Однако модель SWAN с использованием реанализа NCEP/NCAR занижает значения  $H_s$  [Медведева и др., 2015]. За 63 года (1948-2010 гг.) было выявлено 2943 штормовых ситуации, т.е.  $\sim 50$  штормов в год. Случаи, когда значительная высота волн  $H_s$  (среднее значение от 1/3 наибольших высот волн) достигала 2 м, рассматривались как штормовые ситуации. По полученным результатам четко выделяется однонаправленный линейный тренд усиления штормовой активности в Балтийском море.

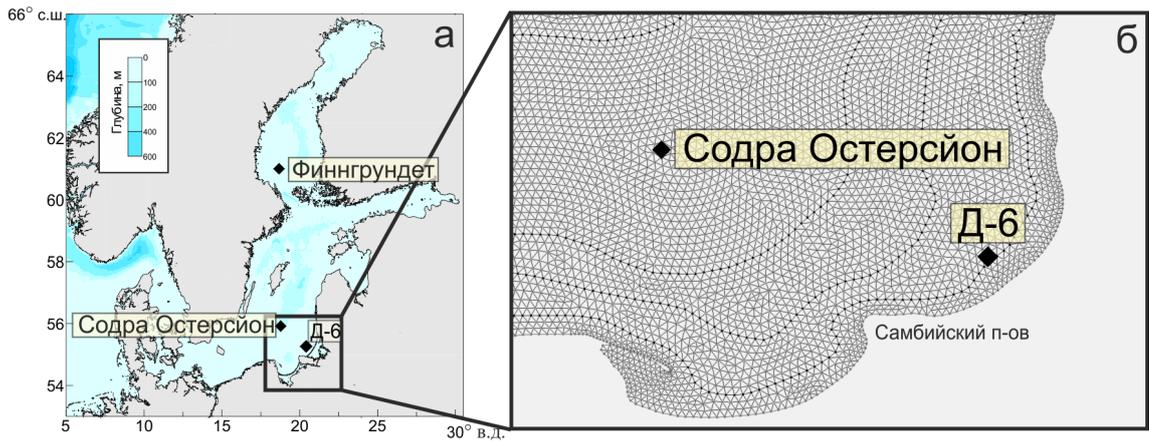
**Заключение.** На основании результатов расчетов можно сделать вывод, что использование неструктурной сетки снижает качество воспроизведения ветрового волнения в открытой, относительно глубоководной части Балтийского моря по сравнению с расчетами по простой прямоугольной сетке с пространственным шагом  $0.05^\circ$ . Вблизи побережья, напротив, моделирование на неструктурной сетке позволяет получить более качественные результаты. При этом модель SWAN занижает высоты значительных волн ( $\text{Bias} < 0$ ) в открытой части Балтийского моря и завышает ( $\text{Bias} > 0$ ) вблизи побережья.

Использование данных о ветре из реанализа NCEP/CFSR существенно улучшает качество прогноза: Bias уменьшается практически в 10 раз, RMSE - в 2-3 раза. Таким образом, в рамках исследования особенностей ветрового волнения Балтийского моря применение спектральной модели для мелководья SWAN в сочетании с реанализом NCEP/CFSR более целесообразно, чем использование NCEP/NCAR. В последние десятилетия наблюдается рост штормовой активности, связанный со смещением траекторий циклонов. Также стоит отметить, что периоды интенсификации и ослабления ветрового волнения в Балтийском море составляют 10-12 лет и имеют цикличность.

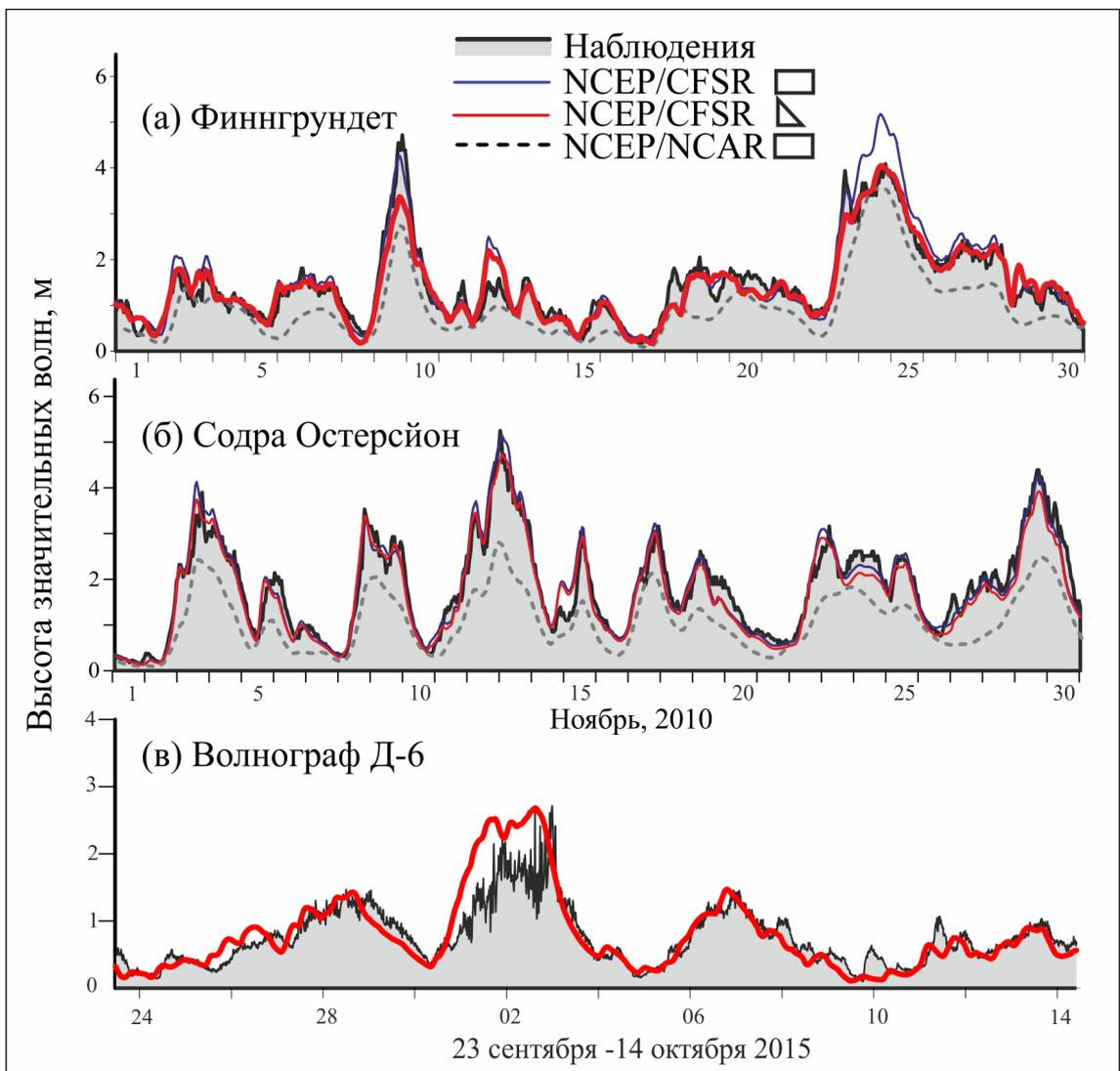
Работа выполнена при поддержке РФФИ грант № 16-35-00338 и РНФ грант № 14-50-00095.

### Список литературы

- 1) Медведева А.Ю. и др. Волновой климат Балтийского моря на основе результатов, полученных с помощью спектральной модели SWAN // Вестник Московского университета. – 2015. – Сер.5 География. – № 1. – С.12–22.
- 2) Arkhipkin V.S. et al. Wind waves on the Black Sea: results of a hindcast study // Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions. – 2014. – Vol. 2. – №. 2. – P. 1193–1221.
- 3) 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 [U+F02D] 7666.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) <http://www.smhi.se/ecds>



**Рис. 1.** (а) Расположение шведских буев (1-4) и волнографа (5). (б) участок расчетной триангуляционной сетки вблизи Самбийского полуострова.



**Рис. 2.** Высота значительных волн NS для станций Финнгрундет (а), Содра Остерсийон (б), Д-6, волнограф (в).