

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА МОДЕЛИРОВАНИЯ СПЕКТРОВ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ ЧЕРНОГО МОРЯ

Мысленков Станислав Александрович^{1,2}, Бадулин Сергей Ильич², Лопатухин Леонид Иосифович³, Архипкин Виктор Семенович¹, Adem Akpınar⁴, Bilal Bingölbali⁴, Mehmet Burak Soran⁴

¹*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва*

²*Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, Москва*

³*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург*

⁴*Uludağ University, Bursa, Turkey*

Введение

Сведения о состоянии и развитии ветрового волнения в морских акваториях являются одними из самых востребованных со стороны многочисленных пользователей морской гидрометеорологической информации (мореплавание, спасательные операции, морской промысел, освоение минеральных ресурсов, экологические приложения и многие другие).

Ранее авторы создали несколько различных реализаций волновых моделей для акватории Черного моря [Бухановский, Лопатухин и др. 2009; Мысленков и др., 2014; Мысленков и др., 2016; Akpınar et al., 2016; Toropov et al., 2012]. В основе реализаций была спектральная волновая модель SWAN с различными настройками на регулярной или неструктурной вычислительной сетке. Оценка качества моделирования производилась для высоты и периода волн на основе данных заякоренных буйев. Также модельная высота волн сравнивалась с данными спутниковых наблюдений. Оценки качества высоты волн при сравнении с данными наблюдений в среднем следующие: среднеквадратическое отклонение (RMSE) = 0.25-0.35 м, систематическая ошибка (R) = 0.85-0.9.

Однако, ранее практически не производилось сопоставлений модельных спектров с измеренными. В 2020 к северо-западу мыса Малый Утриш был установлен волновой буй и получены волновые спектры. В данной работе было произведено сопоставление спектров, полученных по результатам моделирования со спектрами волн по данным измерений. За время измерений наблюдался шторм с высотой значительных волн до 4 м, что позволило произвести сравнение для разных стадий развития шторма.

Данные и методы

Волномерный буй Datawell DWRG-4 (частота опроса 1.25 Гц) был установлен на глубине 18 м (рис. 1). Данные измерений охватывают период с 31.01.2020 по 21.02.2020. По данным буя был получен массив данных о высоте значительных волн, периоде T02 (zero-crossing) и волновых спектрах с шагом по времени 1 час.

Расчеты ветрового волнения были выполнены по спектральной волновой модели SWAN в нескольких реализациях, с разной вычислительной сеткой. Шаг неструктурной сетки разных реализаций для прибрежной зоны Черного моря варьировался от 120 до 1700 м. Для открытой части Черного и Азовского морей шаг изменялся от 5 до 15 км (рис. 2). Благодаря высокому пространственному разрешению некоторых реализаций стало возможным произвести сопоставление с данными буя, расположенного на расстоянии всего 1 км от берега.

При запуске модели использовался режим «GEN3», и стандартные настройки, рекомендуемые разработчиками. При расчете спектров, дискретизация по направлению осуществлялась на равномерной сетке с шагом 5°, а дискретная зависимость от частоты представлялась на логарифмической сетке (31 частота от 0.04 до 1.0 Гц). При моделировании волнения использовались данные о ветре из реанализа NCEP/CFSv2 (2011–2020) с разрешением ~0.2°. Выдача результатов моделирования (стандартных параметров волн и спектров) производилась с шагом 30 мин. Более подробное описание модели, вычислительных сеток и полученных ранее оценок качества приведено в работах [Мысленков и др., 2014; Мысленков и др., 2016; Akpınar et al., 2016].

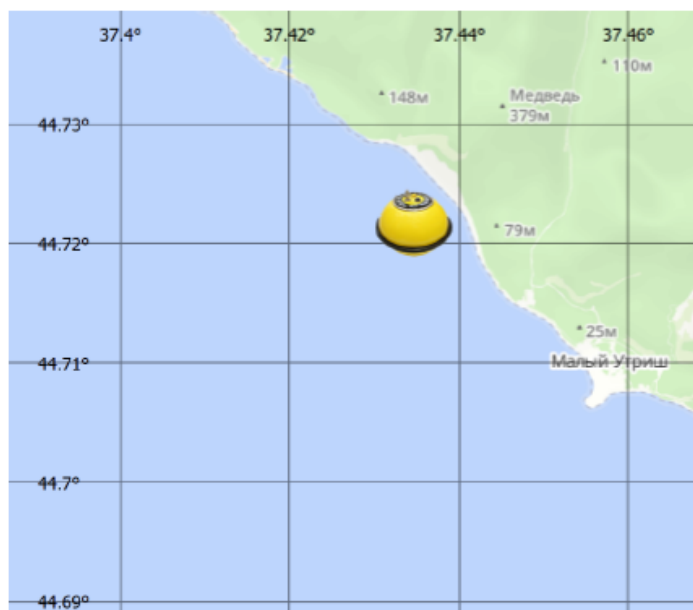


Рис 1. Расположение волнового буя в прибрежной зоне Черного моря.

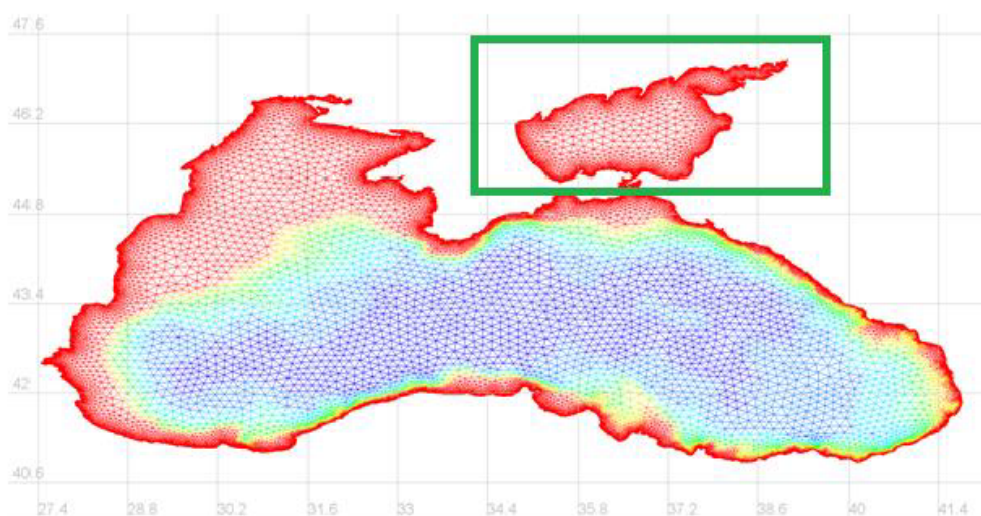


Рис 2. Вычислительная неструктурная сетка для расчетов ветрового волнения в Черном и Азовском морях.

Результаты

Данные измерений высот значительных волн и средних периодов были сопоставлены с результатами моделирования (рис. 3). В целом по высоте волн основные события модель воспроизводит, однако, имеются завышения и занижения модельных оценок высот волн по сравнению с измерениями. Коэффициент корреляции составляет 0,8, а систематическая ошибка 0,1 м. По среднему периоду ситуация похожа. Коэффициент корреляции составляет 0,89, а систематическая ошибка -0,09 с. Максимальное значение высоты волн по данным

измерений за исследуемый период было зафиксировано 11 февраля в 14:43 и составило 4.03 м. По данным моделирования для этого срока высота волн составила 3.2 м.

Во время шторма 10-15 февраля было выбрано нескольких сроков, для которых были проанализированы волновые спектры (рис. 3). Первый срок выбран на этапе роста волны, второй для развитого волнения и третий при затухании волн финальной стадии шторма. В эти сроки высота значительных волн по данным измерений и моделирования практически полностью совпадает, следовательно, интегралы по спектрам должны соответствовать друг другу.

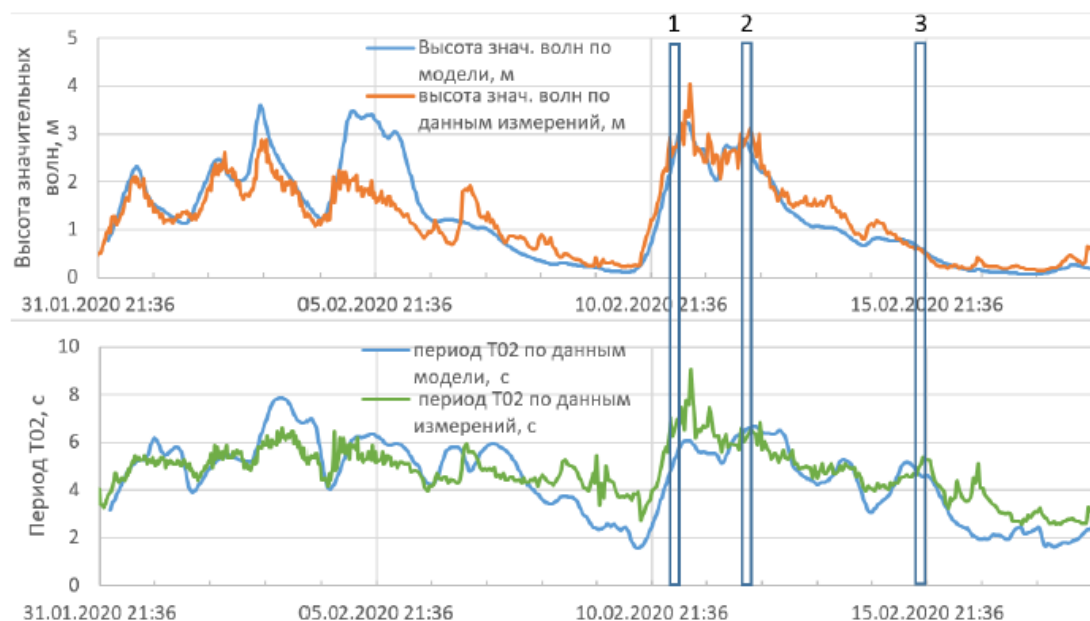


Рис.3. Высота значительных волн и средний период T02 по данным моделирования и измерений. Цифрами 1, 2, 3 обозначены сроки, для которых анализировались волновые спектры.

Волновые спектры для 1, 2 и 3 срока приведены на рис. 4. Для первого срока максимальные значения спектральной энергии приходятся на частоту 0.13 Гц (7.7 сек) и по модели, и по измерениям. По данным измерений на частоте 0.16 наблюдается небольшой высокочастотный пик, который отсутствует в модельном спектре. Для второго срока максимум спектральной энергии по данным измерений приходится на частоту 0.12 Гц, а по модели 0.116, в низкочастотной области модельный спектр обладает большей энергией, чем спектр по данным измерений. Это расхождение прежде всего связано с низким частотным разрешением в модели. Для третьего срока абсолютные значения спектральной плотности невелики, так как высота значительных волн составляет 0.7 м. По данным измерений в спектре присутствует 2 пика на частотах 0.135 Гц и 0.16 Гц. По результатам моделирования присутствует один пик на частоте 0.16 Гц, что вызывает вопросы к модели, хотя смещение энергии в низкочастотную часть в модели должно работать корректно.

Полученные результаты позволяют считать, что в ряде случаев спектральная волновая модель SWAN вполне корректно рассчитывает форму спектра. Для тех случаев, когда высота значительных волн существенно отличается, форма спектров по измерениям и моделированию также различается.

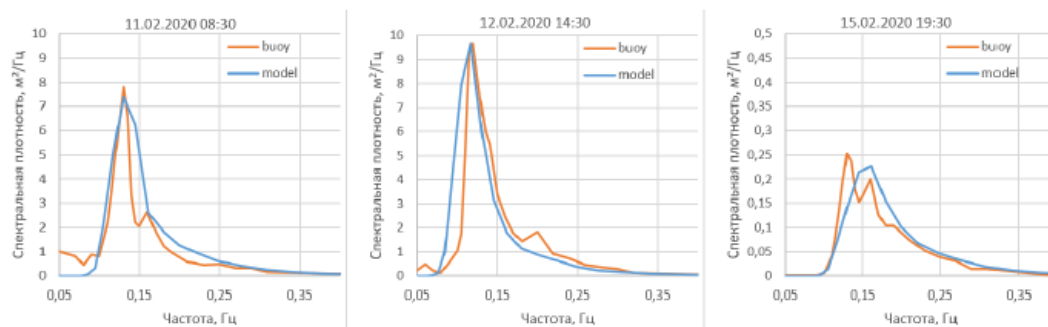


Рис.4. Волновые спектры по данным моделирования и измерений для трех сроков: 1) - 11.02 08:30, 2) - 12.02 14:30, 3) - 15.02 19:30.

Заключение

На основе результатов моделирования ветрового волнения в прибрежной зоне Черного моря произведена оценка качества спектра ветровых волн. Моделирование волнения выполнено использованием спектральной модели SWAN с высоким пространственным разрешением в прибрежной зоне Черного моря. Результаты моделирования были сопоставлены с данными измерений. В целом по высоте волн основные события модель воспроизводит, однако, присутствуют факты завышения и занижения значений моделью. Коэффициент корреляции составляет 0,8, а систематическая ошибка 0,1 м. Полученные результаты позволяют считать, что как правило спектральная волновая модель SWAN вполне корректно рассчитывает форму спектра. Причины расхождений являются предметом наших будущих исследований.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-55-46007. The work was also supported by TUBITAK (The Scientific and Technological Research Council of Turkey) under grant number 119N480.

Список литературы

- Бухановский А. В., Лопатухин Л.И., Чернышева Е.С., Колесов А.М.* Шторм на Черном море 11 ноября 2007 и статистики экстремальных штормов моря. //Известия русского географического обществ. 2009. Вып. 2. – С. 71-84.
- Мысленков С.А., Архипкин В.С.* Система регионального прогноза ветрового волнения в Цемесской бухте Черного моря // Труды Государственного океанографического института. 2014. № 215. С. 117-125.
- Мысленков С.А., Столярова Е.В.* Прогноз ветрового волнения в Черном море с использованием прогностических полей ветра различного пространственного разрешения // Труды Гидрометцентра России. - 2016. - № 362. - С. 55-65.
- Akrınar, A., Bingölbali, B., Van vledder, G.Ph.* Wind and wave characteristics in the Black Sea based on the SWAN wave model forced with the CFSR winds // Ocean Engineering, 126 (2016) 276–298.
- Toropov P.A., Myslenkov S.A., Shestakova A.A.* Numerical simulation of Novorossiysk bora and related wind waves using the WRF-ARW and SWAN models // Russian Journal of Earth Sciences. 2012. T. 12. № 6. С. ES6001.