

С.А. Мысленков, Е.В. Столярова, В.С. Архипкин

СИСТЕМА ПРОГНОЗА ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ В ЧЕРНОМ МОРЕ С ДЕТАЛИЗАЦИЕЙ В ШЕЛЬФОВЫХ ЗОНАХ

Введение

В наши дни уделяется большое внимание прогнозу ветрового волнения в морях, омывающих берега России. В ФГБУ «Гидрометцентр России» в оперативном режиме работает система прогнозирования ветрового волнения в Мировом океане [1, 2] и в морях России [12]. В [12] приводятся результаты испытания этой системы для акваторий Азовского, Черного и Каспийского морей. Однако не менее важным для потребителей представляется прогнозирование параметров ветрового волнения с высоким пространственным разрешением для отдельных сравнительно небольших акваторий (бухт, гаваней, портов и др.).

Для исследования климатических характеристик ветрового волнения и его прогнозирования в Черном море существует несколько подходов использования современных ветро-волновых моделей [4, 5, 7, 12, 13, 19]. В этих работах приводится информация об основных достижениях в моделировании ветрового волнения, описание моделей и оценки их качества. Можно отметить [5], где для составления морского регистра использовалась модель SWAN.

В данной статье описывается технология прогноза ветрового волнения в Черном море с детализацией в шельфовых зонах. Прогноз волнения осуществляется с использованием спектральной волновой модели SWAN на нерегулярной вычислительной сетке и прогностических полей ветра GFS. Приводятся результаты сравнения прогнозов высоты волн с данными прямых измерений для глубокой воды и для прибрежной зоны.

Используемые данные и методы прогноза

В работе использовалась технология прогноза параметров ветрового волнения в Черном море с использованием спектральной волновой модели SWAN [14, 20] на нерегулярной вычислительной сетке, включающей в себя Черное и Азовское моря с шагом по пространству 6–12 км, а также Керченский пролив, Цемесскую бухту и район Сочи с шагом до 200 м (рис. 1). Общее количество узлов сетки в рассматриваемой зоне – 12131. Качественная батиметрическая основа является обязательным условием для успешного моделирования ветрового волнения в прибрежной зоне. Для решения поставленной задачи были использованы карты прибрежной зоны Черного моря, изданные Главным управлением навигации и океанографии Министерства обороны России. Благодаря специальной нерегулярной вычислительной сетке, эта система более приспособлена для прогноза ветрового волнения в прибрежных и мелководных районах. Более подробное описание модели, вычислительной сетки и оценки качества приводятся в [6–11].

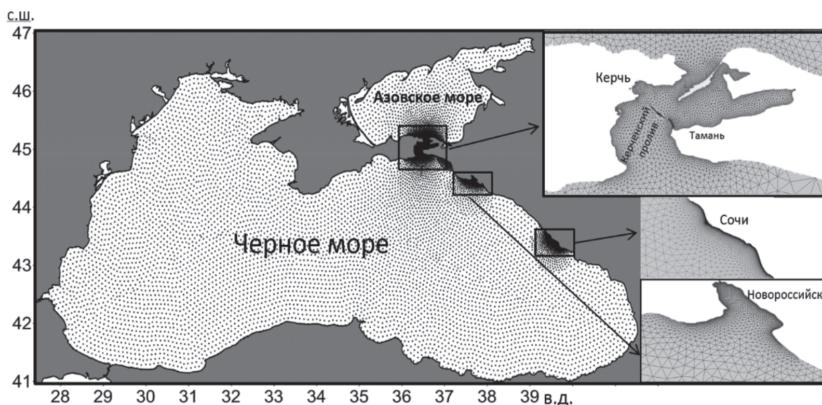


Рис. 1. Вычислительная сетка для системы прогноза ветрового волнения в шельфовых зонах Черного моря.

Для прогноза ветрового волнения использовались данные о полях ветра системы GFS (Global Forecasting System), функционирующей в метеорологическом центре NCEP/NOAA. Пространственное разрешение системы GFS оставляет $0,5^\circ$, временной шаг 3 часа [18]. Начиная с 2015 года доступны прогнозы GFS на сетке $0,25^\circ$.

Созданная система обеспечивает прогнозирование на срок до трех суток следующих характеристик ветрового волнения: высоты значительных волн (англ. significant wave height), среднего направления распространения, средней длины и среднего периода.

Для оценки качества прогностических расчетов модели на мелкой воде проводились сравнения результатов прогнозов с данными прямых измерений в Цемесской бухте для периода январь–апрель и сентябрь 2010 г. Данные измерений получены при помощи лазерного уровнемера Riegl, установленного в Цемесской бухте на конце нефтепроводного терминала нефтепорта «Шесхарис». Глубина моря в точке измерений составляет 22 м. Частота измерений – 3 Гц, а заявленная точность измерения волнения – 2 см. В работе использованы данные о высоте значительных волн с временной дискретностью 15 мин. Результаты сравнения данных измерений в Цемесской бухте с данными моделирования волнения на основе ветра из реанализа NCEP/CFSR приведены в [6, 10, 17].

На основе архивных данных прогнозов ветра GFS был выполнен прогноз ветрового волнения на всей вычислительной сетке. Далее из результатов моделирования были выбраны данные для точки в Цемесской бухте, соответствующей расположению лазерного уровнемера. Всего было рассчитано 149 ежедневных прогнозов с заблаговременностью до 72 часов (для периода 1 января – 31 апреля и сентябрь 2010 года) с шагом 3 часа.

Для оценки качества прогнозов ветра и ветрового волнения на глубокой воде использовались спутниковые данные альтиметра AltiKa, находящегося на борту спутника SARAL. Данные о высоте значительных волн и скорости ветра имеют пространственное разрешение около 7 км и доступны на сайте [21]. За период с 7.02. по 1.03.2015 г. были получены спутниковые данные для 4500 точек, находящихся на удалении не более чем в 10 км от узлов расчетной сетки модели SWAN (рис. 2). Среднеквадратическая ошибка (СКО) вычисления высоты значительных волн альтиметрами обычно оценивается примерно в 0,3 м [16]. В [15] приводятся результаты оценки качества альтиметра AltiKa и показано, что для высоты волн СКО составляет 0,21 м, систематическая ошибка – 0,04 м, для скорости ветра 1,75 м/с и 0,25 м/с соответственно.

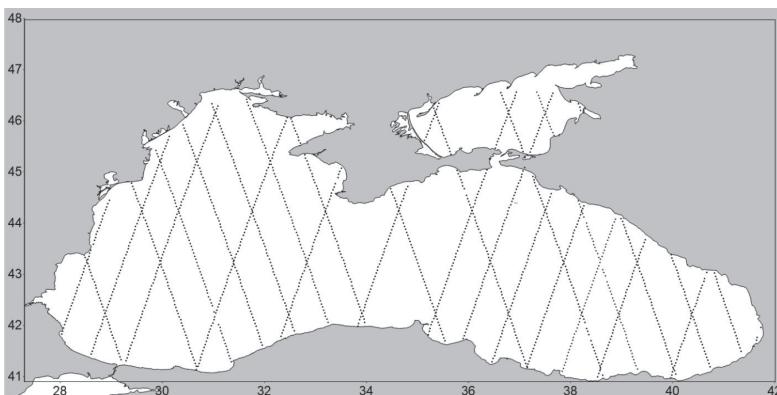


Рис. 2. Схема треков альтиметра Altika.

Оценка качества прогнозов ветрового волнения на глубокой воде

В целом высота волны диагностической версии модели хорошо согласуется с данными спутников [17]. Средняя ошибка составляет около 0,3 м, однако если посмотреть на распределение высоты значительных волн по данным альтиметрии, то можно заметить, что приблизительно в 12 % случаев ошибки менее 0,3 м. С другой стороны, известно, что точность данных альтиметрии не идеальна, а при их сравнении с более достоверными данными волновых буев ошибка СКО составляет около 0,3 м [16]. Следовательно, данные альтиметрии со значениями менее 0,3 м находятся за пределами ее точности и должны быть удалены из анализа. Более того, из распределения высоты значительных волн можно видеть, что около 70 % записей имеют высоту менее 1 м, следовательно, оценки погрешностей в этом диапазоне высот не представляют особого интереса.

Для февраля 2015 года результаты прогнозов по ветро-волновой модели были сопоставлены с данными о высоте волн по альтиметру Altika. Сопоставлялись высоты волн в узлах расчетной сетки модели SWAN с ближайшими точками альтиметра. Расстояние между парами сравниваемых точек составило не более 10 км. Поскольку прогнозы волн и ветра рассчитывались ежедневно заблаговременностью до 72 ч, то одни и те же данные спутника за конкретный день служили для оценки качества прогноза разной заблаговременности. Результаты сравнения всех данных

(разная заблаговременность) представлены на диаграмме (рис. 3, 4). В целом, рассчитанные значения хорошо согласованы, корреляция по высоте волн составляет 0,892 при форсинге GFS-0,25°, для скорости ветра 0,835 соответственно. Среднеквадратическая ошибка по высоте волны составляет 0,4 м, по ветру – 2 м/с. Величина СКО по ветровому волнению немного больше в испытываемом методе, чем по результатам других исследований. Однако в нашем случае анализировались все высоты волн от 0,15 м. Если рассчитать СКО для волн высотой более 2 м, то ошибка уменьшается до 0,25 м.

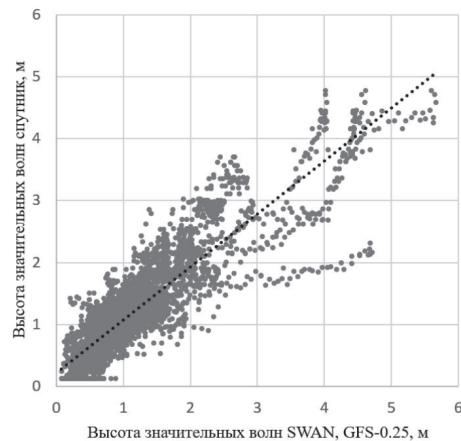


Рис. 3. Сравнение высоты волн с использованием форсинга GFS-0,25° с данными спутника.

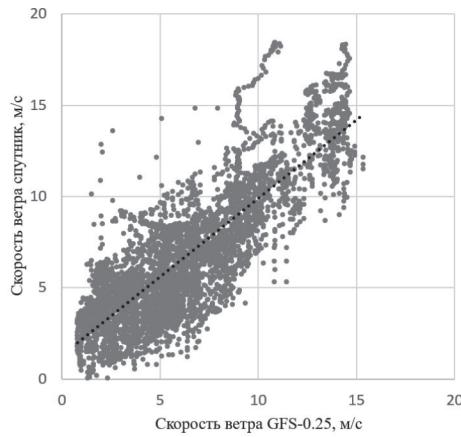


Рис. 4. Сравнение скорости ветра с использованием форсинга GFS-0,25° с данными спутника.

Оценка качества прогнозов ветрового волнения на мелкой воде

На основе архивных данных прогнозов ветра GFS был выполнен прогноз ветрового волнения на всей вычислительной сетке. Далее из результатов моделирования ветрового волнения были выбраны данные для точки в Цемесской бухте, соответствующей расположению лазерного уровнемера. Всего было рассчитано 149 ежедневных прогнозов заблаговременностью до 72 часов (для периода январь – сентябрь 2010 года) с шагом 3 часа. Прогнозы высоты значительных волн сравнивались с данными наблюдений, статистические параметры оценивались для каждой заблаговременности.

На рис. 5 представлено сравнение высоты волн по данным наблюдений и по результатам прогноза на 72 часа от 29.01.2016 г. По данным измерений максимальная высота значительных волн была 3,6 м и наблюдалась 29.01.2010 г., однако по данным прогноза высота волны была занижена и составила 2,5 м.

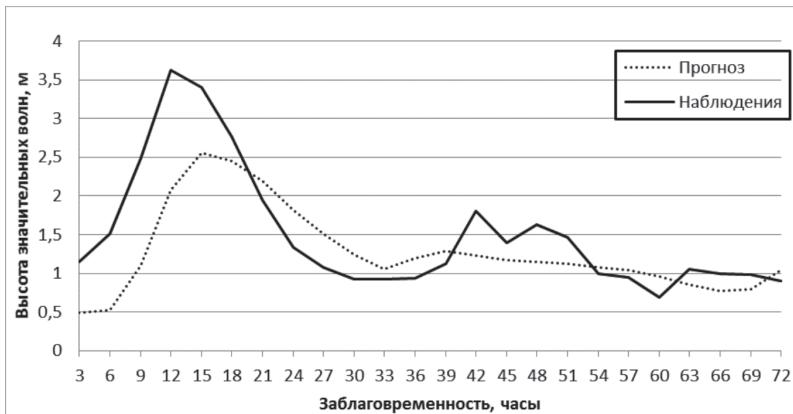


Рис. 5. Высота значительных волн по данным наблюдений и прогноза от 29.01.2016 г.

Результаты сравнения прогнозов высоты волн заблаговременностью 6 и 72 часа с данными наблюдений приведены на рис. 6 и 7. Видно, что качество прогнозов с небольшой заблаговременностью существенно выше.

Средняя корреляция между данными наблюдений и прогнозом составила 0,75, максимум 0,82 для прогноза на 6 часов, минимум 0,62

для прогноза на 72 часа (рис. 8). Среднеквадратическое отклонение изменяется от 0,08 м до 0,14 м, постепенно увеличиваясь с увеличением заблаговременности прогноза.

Однако за исследуемый период высота волн по данным измерений редко превышала 2 м, что затрудняет оценку качества прогноза ветрового волнения. Для получения более корректных оценок период сравнения должен составлять не менее двух-трех лет.

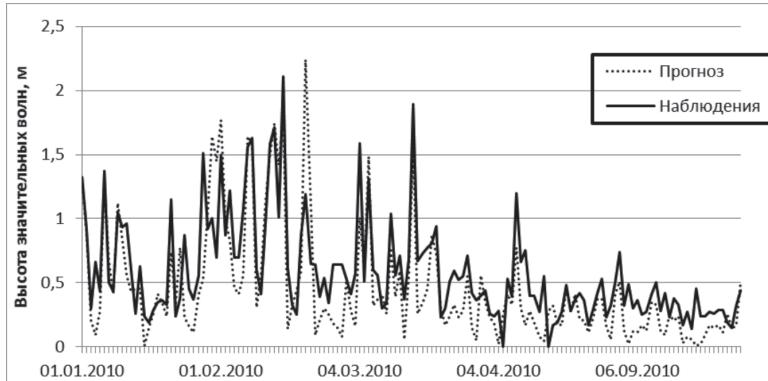


Рис. 6. Высота волн по данным наблюдений и прогнозов с заблаговременностью 6 ч.

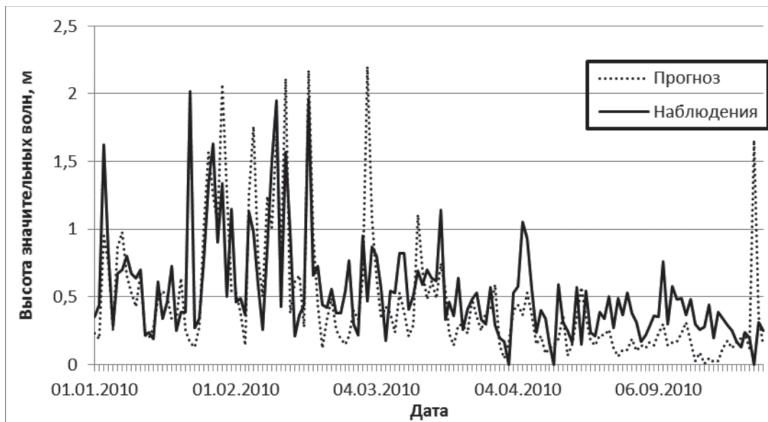


Рис. 7. Высота волн по данным наблюдений и прогнозов с заблаговременностью 72 ч.



Рис. 8. Коэффициент корреляции между данными наблюдений и прогнозов высоты волн разной заблаговременности.

В целом полученные оценки качества не уступают подобным оценкам для диагностической версии системы [3, 10, 17] и основным мировым системам прогноза ветрового волнения [1, 12, 13, 19].

Заключение

На основе спектральной волновой модели SWAN была создана технология регионального прогноза ветрового волнения в Черном море с детализацией в шельфовых зонах. Оперативная прогностическая система работает на основе полей прогноза ветра GFS. Расчеты производились с использованием оригинальной нерегулярной сетки, что позволило получить модельные параметры ветрового волнения с шагом по пространству 200–300 м. Детальный прогноз ветрового волнения визуализирован для Керченского пролива, Цемесской бухты и района Сочи. При сравнении прогнозов по значительной высоте волн с измерениями были получены статистические показатели качества модели, которые являются вполне удовлетворительными для современных ветро-волновых моделей (коэффициент корреляции 0,8, среднеквадратическая ошибка 0,3 м). Модель хорошо воспроизводит как фазу наступления максимального волнения, так и абсолютные высоты.

Список литературы

1. Зеленько А.А., Реснянский Ю.Д., Струков Б.С. Результаты испытаний системы прогнозирования ветрового волнения в мировом океане // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2016. – № 43. – С. 133–147.
2. Зеленько А.А., Струков Б.С., Реснянский Ю.Д., Мартынов С.Л. Система прогнозирования ветрового волнения в Мировом океане и морях России // Труды государственного океанографического института. – 2014. – Т. 215. – С. 90–101.
3. Ивонин Д.В., Мысленков С.А., Чернышов П.В., Архипкин В.С., Телегин В.А., Куклев С.Б., Чернышова А.Ю., Пономарев А.И. Система мониторинга ветрового волнения в прибрежной зоне Черного моря на основе радиолокации, прямых наблюдений и моделирования: первые результаты // Проблемы региональной экологии. – 2013. – № 4 . – С. 172–183.
4. Кабатченко И.М., Резников М.В. Моделирование морского ветрового волнения, методы и аспекты прикладного применения. - Труды государственного океанографического института. – 2011. – Т. 213. – С. 205–215.
5. 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 // Российский морской регистр судоходства. – СПб, 2006. – 452 с.
6. Мысленков С.А., Архипкин В.С. Анализ ветрового волнения в Цемесской бухте Черного моря с использованием модели SWAN // Труды Гидрометцентра России. – 2013. – Вып. 350. – С. 58–67.
7. Мысленков С. А., Архипкин В. С. Система регионального прогноза ветрового волнения в Цемесской бухте Черного моря // Труды ГОИН, – 2014, – Т. 215. – С. 117–125.
8. Мысленков С.А., Столярова Е.В. Прогноз ветрового волнения в Черном море с использованием прогностических полей ветра различного пространственного разрешения // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. – 2016. – № 362. – С. 55–65.
9. 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. – 2016. – С. 327–331.
10. Мысленков С.А., Шестакова А.А., Торопов П.А. Численное моделирование штормового волнения у северо-восточного побережья Черного моря // Метеорология и гидрология. –2016. – № 10. – С. 61–71.
11. Столярова Е.В., Мысленков С.А. Прогноз ветрового волнения высокого пространственного разрешения в Керченском проливе // Труды Гидрометцентра России. – 2015. – Вып. 354. – С. 24–35.

12. Струков Б.С., Зеленъко А.А., Реснянский Ю.Д., Мартынов С.Л. Система прогнозирования характеристик ветрового волнения и результаты ее испытаний для акваторий Азовского, Черного и Каспийского морей // Информационный сборник № 40 «Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов». – 2013. – С. 64–79.
13. Akpinar A., S. Ponce de León. An assessment of the wind re-analyses in the modelling of an extreme sea state in the Black Sea // Dynamics of Atmospheres and Oceans. – 2016. – Vol. 73. – P. 61–75.
14. Booij N., Ris R.C., Holthuijsen L.H. A third-generation wave model for coastal regions. Part I: Model description and validation // J. Geoph. Res. – 1999. – Vol. 104. – P. 7649–7666.
15. Chiranjivi Jayaram, Saurabh Bansal et. al. Evaluation of SARAL/AltiKa Measured Significant Wave Height and Wind Speed in the Indian Ocean Region // J. Indian Soc. Rem. Sens. – 2016. – Vol. 44, Issue 2. – P. 225–231.
16. Janssen P., Abdalla S., Hersbach H., Bidlot J.-R. Error estimation of buoy, satellite, and model wave height data // J. Atm. Ocean. Tech. – 2006. – Vol. 24, Issue 9. – P. 1665.
17. Myslenkov S., Chernyshova A. Comparing wave heights simulated in the Black sea by the SWAN model with satellite data and direct wave measurements // Russian Journal of Earth Sciences. – 2016. – Vol. 16. – N 5. – P. 1–12.
18. National Centers for Environmental Prediction/National Weather Service/NOAA/U.S. Department of Commerce (2015), NCEP GFS 0.25 Degree Global Forecast Auxiliary Grids Historical Archive, Accessed: 03 Jan 2016.
19. Rusu E. Strategies in using numerical wave models in ocean/coastal applications. // Journal of Marine Science and Technology. – 2011. – Vol. 19. – P. 58–75.
20. SWAN Technical Documentation, SWAN Cycle III version 40.51A. – Netherlands, Delft: University of Technology, 2007. – 98 p.
21. <http://rads.tudelft.nl/rads/rads.shtml>