

ПРОГНОЗ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ В ЧЕРНОМ МОРЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГНОСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ВЕТРА РАЗЛИЧНОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ

С.А. Мысленков^{1,2}, Е.В. Столярова¹

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова;

²Гидрометеорологический научно-исследовательский центр

Российской Федерации

stasocean@gmail.com

Введение

В ФГБУ «Гидрометцентр России» в оперативном режиме работает система прогнозирования ветрового волнения в Мировом океане и морях России. В [1, 7] приводятся результаты испытания этой системы для акваторий Азовского, Черного и Каспийского морей. Данная система основана на волновой модели WAVEWATCH III, для акватории Черного моря используется регулярная сетка 9 км и прогностические поля ветра GFS-0,5°.

Для Керченского пролива, Цемесской бухты и района Сочи развивается система регионального прогноза волнения высокого пространственного разрешения [3, 4, 6]. Эта система более приспособлена для прогноза волнения в прибрежных и мелководных районах, но также использует прогностические поля ветра GFS-0,5°.

В феврале 2015 года стали доступны прогностические поля ветра GFS с шагом по пространству 0,25° [12]. Предполагается, что уменьшение шага по пространству должно улучшить прогноз ветра и, следовательно, волнения.

В данной работе описываются результаты сравнения прогноза ветра и волнения на акватории Черного моря с использованием прогнозов GFS-0,25° и GFS-0,5°. На основе данных спутникового альтиметра получены оценки качества прогнозов при различном форсинге.

Данные и методы

В работе использовалась созданная ранее технология прогноза параметров ветрового волнения в Черном море, основанная на спектральной волновой модели SWAN [8, 9] и нерегулярной вычислительной сетке, включающей в себя Черное и Азовское моря с шагом по пространству 12 км, а также Керченский пролив, Цемесскую бухту и район Сочи с шагом до 200 м. Общее количество узлов сетки – 12131. Более подробное описание модели, вычислительной сетки и оценки качества приводятся в [2–5].

Были произведены прогнозы поля волн на 3 сут от каждого дня с 7.02.2015 по 1.03.2015 г. Для создания начального поля волнения, близкого к реальному, расчеты начинаются от 12 ч предыдущего дня.

Для прогноза 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 [12]. С февраля 2015 г. в открытом доступе стали доступны прогностические поля ветра GFS с шагом по пространству $0,25^\circ$. Улучшение пространственного разрешения глобальной спектральной модели произошло благодаря увеличению вычислительных мощностей и изменению архитектуры компьютеров NCEP [12].

Для оценки качества прогнозов ветра и волнения 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 [13]. За период с 7.02.2015 по 1.03.2015 г. были получены спутниковые данные для 4500 точек, находящихся не более чем в 10 км от узлов расчетной сетки модели SWAN (рис. 1). Среднеквадратическая ошибка (СКО) вычисления высоты значительных волн альтиметрами обычно оценивается примерно в 0,3 м [11]. В [10] 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.

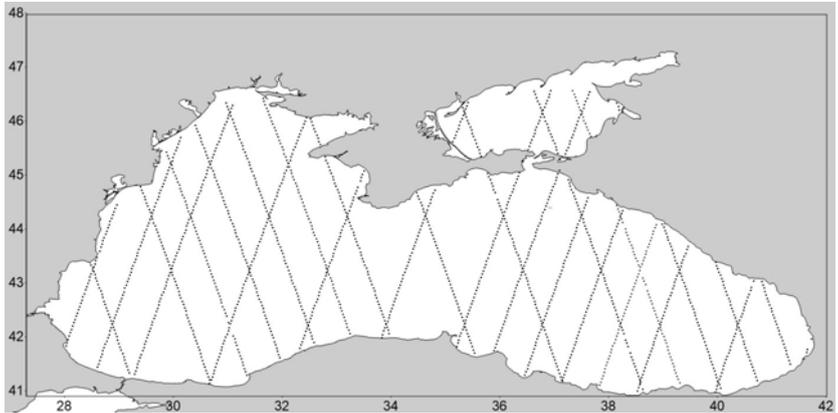


Рис. 1. Схема трекв альтиметра AltiKa. Сравнение поля ветра и волн по прогнозам GFS-0,25° и GFS-0,5°.

В результате проведенных расчетов по модели SWAN были получены прогностические поля ветровых волн при использовании двух вариантов форсинга: GFS-0,5° и GFS-0,25°. На первом этапе, чтобы определить наличие различий, производилось сравнение высоты значительных волн в точке с координатами 44° с. ш., 37° в. д. (рис. 2).

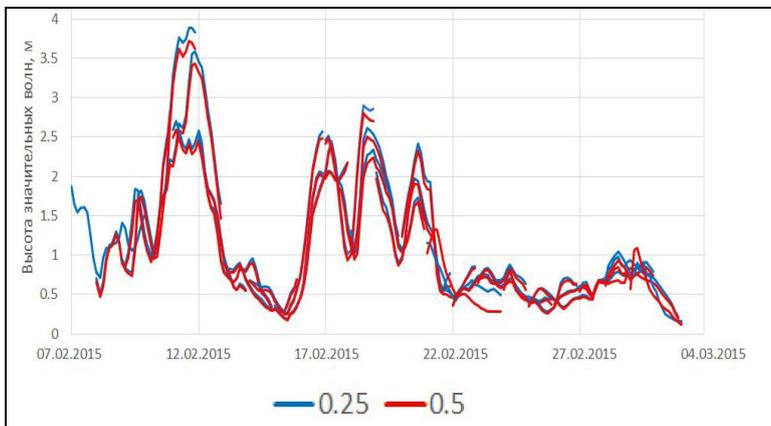


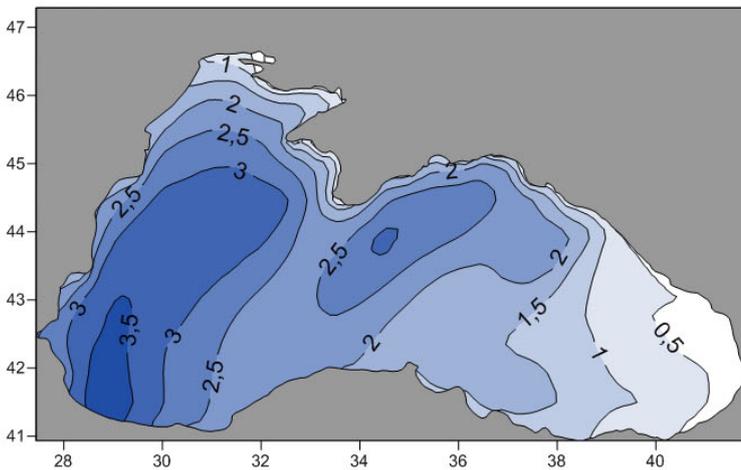
Рис. 2. Прогноз высоты значительных волн в точке 44° с. ш., 37° в. д. с использованием прогнозов ветра GFS-0,25° и GFS-0,5°.

Сравнение показало, что высоты волн с использованием форсинга GFS-0,25° немного выше, особенно при высоте волн более 2 м. При небольшом волнении оба прогноза дают подобные результаты. Учитывая тот факт, что модели в основном занижают высоту волн при штормовом волнении 3 м и более [1, 3, 5], возникают предпосылки для уменьшения ошибок при использовании форсинга GFS-0,25°.

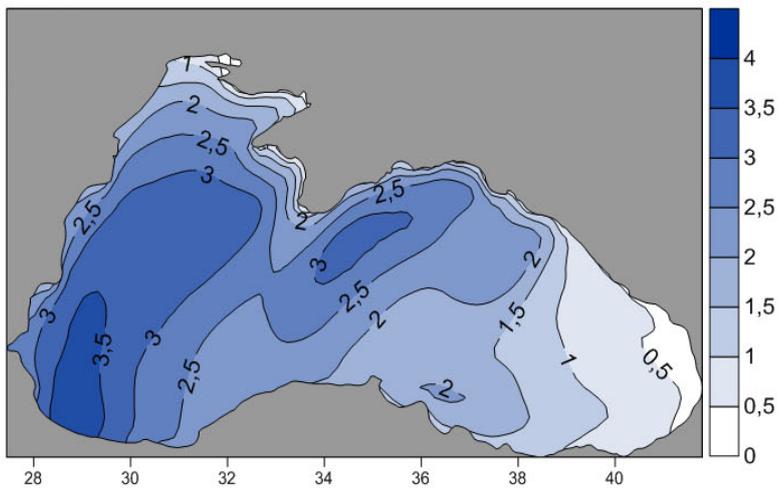
Далее проводилось сравнение полей волн обоих прогнозов для самого сильного шторма за рассматриваемый период, который был 11.02.2015 г. На рис. 3 видно, что поля волнения в целом похожи, особенно локальный максимум в западной части. Однако максимум, расположенный восточнее, имеет другую площадь при прогнозе GFS-0,25°.

Поле скорости ветра, построенное по данным обоих прогнозов, также свидетельствует о небольших различиях (рис. 4). Скорости ветра по прогнозам составили 12–14 м/с для районов с высотой значительных волн более 3 м. Направление ветра также почти одинаково по обоим прогнозам.

Для большей наглядности и выявления различий между высотой волн и скоростью ветра были построены разности: из поля по прогнозу GFS-0,25° вычиталось поле GFS-0,5°. Разности для поля ветра представлены на рис. 5 а, для поля волн – на рис. 5 б. По высоте волн разность практически на всей акватории Черного моря положительна, следовательно, волны по прогнозу GFS-0,25° в основном выше. Однако величина разности составляет не более 0,4 м, а чаще 0,1–0,15 м. В разности полей ветра картина несколько отличается: имеются области как положительной, так и отрицательной разности в диапазоне от -1 до 2 м/с. Разность полей ветра менее пригодна для анализа, поскольку временная и пространственная изменчивость поля ветра намного выше, чем у поля волнения. В разности полей волнения имеется «накопленный» сигнал за период порядка 1–2 суток, обусловленный передачей энергии от ветра. Анализируя расположение максимальных разностей по ветру и по высоте волн, можно заключить, что они тяготеют к прибрежным районам, а нулевые разности наблюдаются преимущественно в отдалении от берега.

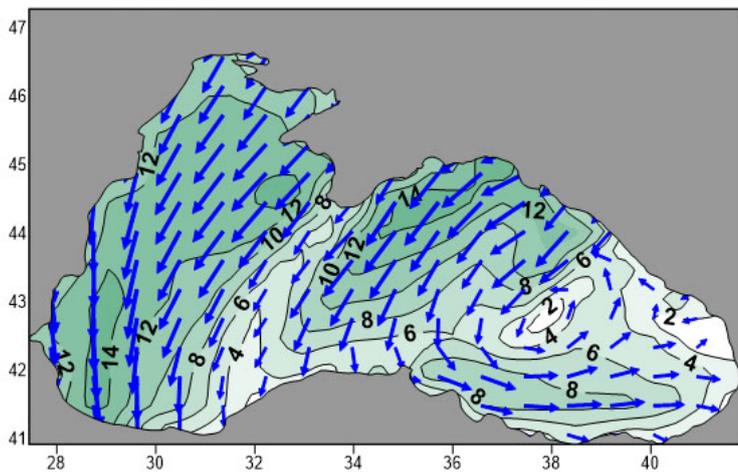


а)

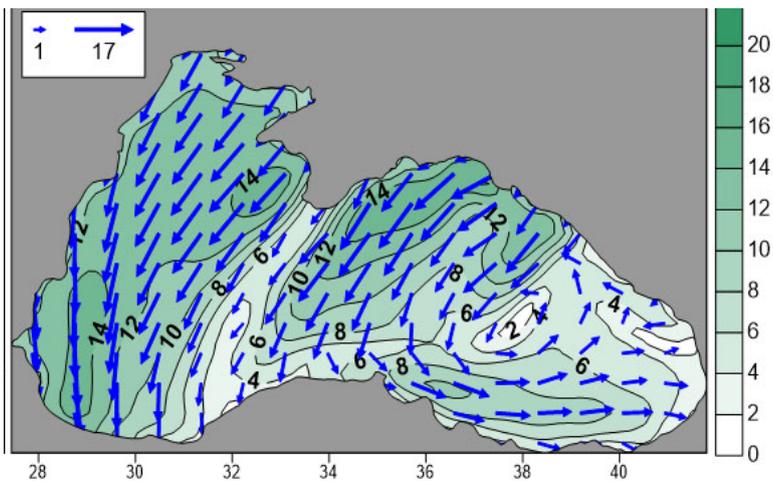


б)

Рис. 3. Прогноз на 21 ч высоты значительных волн от 00 ч 11 февраля 2015 г. с использованием форсинга: GFS-0,5° (а) и GFS-0,25° (б).

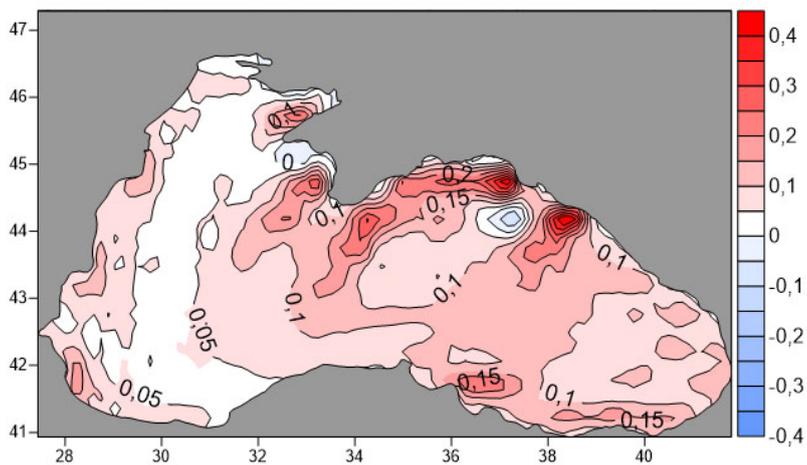


а)

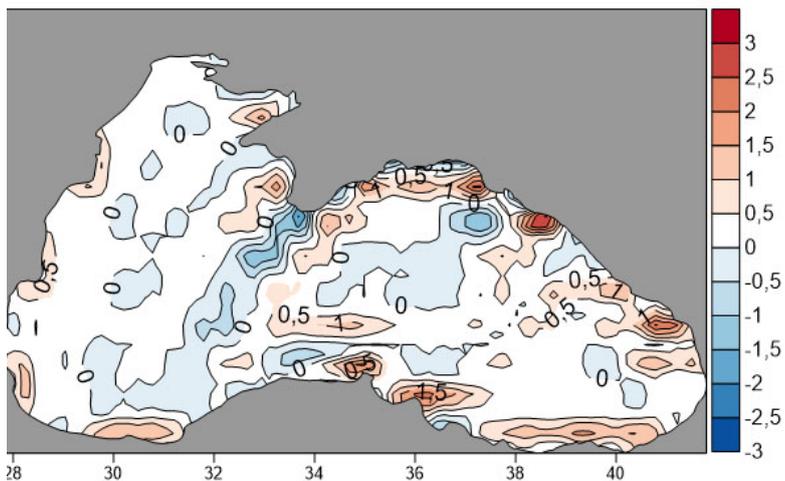


б)

Рис. 4. Прогноз на 21 ч скорости ветра от 00 ч 11 февраля 2015 г. с использованием форсинга: GFS-0,5° (а) и GFS-0,25°(б).



а)



б)

**Рис. 5. Разности между прогнозами на 21 ч высоты значительных волн и ветра от 00 ч 11 февраля 2015 г.:
высоты значительных волн, м (а); скорости ветра, м/с (б).**

Это объясняется тем, что при увеличении пространственного разрешения в модели атмосферы в прибрежной зоне возникают районы, где изменение маски рельефа и подстилающей поверхности начинает вносить большой вклад в работу физических механизмов модели. В открытом море, на удалении от берега эти эффекты затухают.

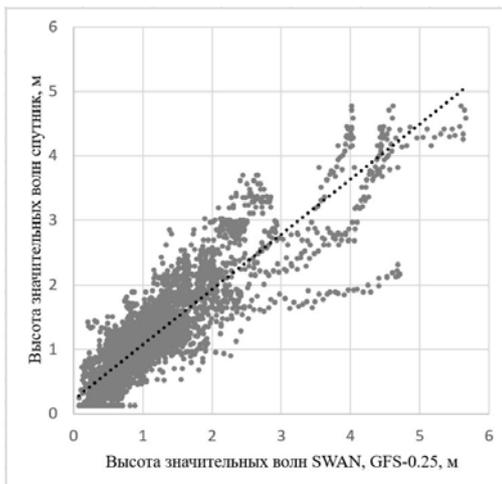
Оценка качества прогнозов ветра и волнения на основе спутниковых данных

Для всего периода расчетов были сопоставлены скорости ветра и высоты волн в узлах расчетной сетки модели SWAN. Расстояние между парами сравниваемых точек составило не более 10 км. Поскольку прогнозы волн и ветра выполнены на 72 ч от каждого дня, 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. 6). В целом, значения хорошо согласованы, корреляция по высоте волн составляет 0,89 при форсинге GFS-0,5° и 0,892 при GFS-0,25°, для скорости ветра 0,839 и 0,835 соответственно. Среднеквадратическая ошибка по высоте волны составляет 0,4 м, по ветру 2 м/с. В целом, ошибки по скорости ветра и по высоте волн немного меньше при использовании форсинга GFS-0,25°, однако различия эти весьма незначительны. Величина СКО по волнению немного больше, 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.

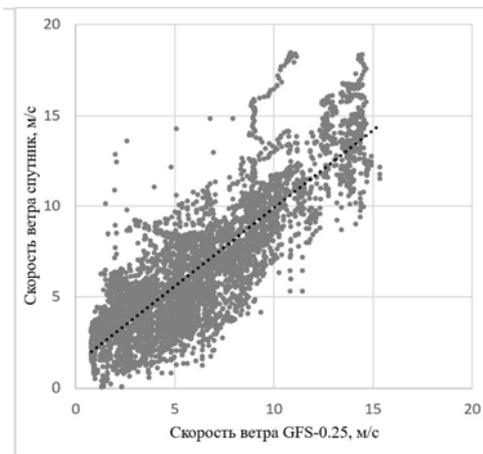
Как было показано на рис. 5, основные различия в поле ветра и волн между двумя прогнозами наблюдаются в прибрежной зоне, тогда как спутниковые данные возле берега имеют плохое качество и отбраковываются. В результате в открытом море оба прогноза имеют примерно одинаковые ошибки при сравнении со спутниками.

Величина ошибки прогнозов в зависимости от заблаговременности увеличивается, например, для высоты волн СКО от 0,3 м для прогноза на 21 ч до 0,5 м на 72 ч. Однако длины нашего ряда

прогнозов и соответствующих им спутниковых данных недостаточно для обеспеченных статистических оценок этой динамики. В будущем авторы планируют провести подобные расчеты для периода более года.



а)



б)

Рис. 6. Сравнение высоты волн (а) и скорости ветра (б) с данными спутника с использованием форсинга GFS-0,25°.

Оценка качества моделирования волнения выполнена С.А. Мысленковым при поддержке гранта РФФИ №16-08-00829, подготовка неструктурной сетки выполнена Е.В. Столяровой за счет гранта РФФИ №16-35-00488.

Заключение

Сравнение прогнозов волнения по модели SWAN при использовании двух вариантов форсинга показало, что высоты волн с использованием форсинга GFS-0,25° немного выше, чем при GFS-0,5°, особенно при высоте волн более 2 м. При небольшом волнении оба прогноза дают схожий результат. Наибольшие различия между двумя прогнозами в поле ветра и волн сосредоточены в прибрежных районах, а нулевые разности наблюдаются преимущественно в отдалении от берега. Это объясняется тем, что увеличение пространственного разрешения в прогнозах GFS-0,25° дает эффект только для прибрежной зоны Черного моря.

Сравнение данных моделирования по значительной высоте волн и скорости ветра со спутниковыми данными показало, что, в целом, поля хорошо согласованы, корреляция по высоте волн составляет 0,89, для скорости ветра 0,84. Среднеквадратическая ошибка по высоте волны составляет 0,4 м, по ветру 2 м/с. Ошибки по скорости ветра и по высоте волн немного меньше при использовании форсинга GFS-0,25°, однако различия эти весьма незначительны, поскольку сравнение со спутниками ведется преимущественно для открытого моря.

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 государственного океанографического института. – 2014. – Т. 215. – С. 90–101.

2. *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.

3. 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.

4. 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.

5. 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.

6. Столярова Е.В., Мысленков С.А. Прогноз ветрового волнения высокого пространственного разрешения в Керченском проливе // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. – 2015. – Вып. 354. – С. 24–35.

7. Струков Б.С., Зеленко 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.

8. SWAN Technical Documentation, SWAN Cycle III version 40.51A. – Netherlands, Delft: University of Technology, 2007. – 98 p.

9. 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.

10. 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.

11. Janssen P., Abdalla S., Hersbsch 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.

12. 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.

13. <http://rads.tudelft.nl/rads/rads.shtml>

Поступила в редакцию 17.08.2016 г.