

# ПРОГНОЗ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ ВЫСОКОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ В КЕРЧЕНСКОМ ПРОЛИВЕ

*Е.В. Столярова<sup>1</sup>, С.А. Мысленков<sup>1,2</sup>*

*<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова*

*<sup>2</sup>Гидрометеорологический научно-исследовательский центр*

*Российской Федерации*

*stasocean@gmail.com*

## **Введение**

Прогноз волнения в Керченском проливе является чрезвычайно важной задачей для России, т. к. это район интенсивного судоходства и хозяйственного освоения. С 2014 года, после вступления Автономной Республики Крым в состав Российской Федерации, трафик паромной переправы в Керченском проливе резко увеличился. Планируется строительство автомобильного и железнодорожного моста через Керченский пролив. Большой резонанс вызвала трагедия, произошедшая в ноябре 2007 года, когда в результате сильного шторма в Керченском проливе погибли люди, произошел разлив нефти, окружающей среде был нанесен серьезный ущерб [5, 16].

Для исследования волнового климата и прогнозирования волнения в Черном море существует много вариантов использования современных ветро-волновых моделей [3, 7, 8, 11, 12], в [1, 4, 6, 10, 17, 19] успешно используется модель SWAN. В [5, 15] модель SWAN использовалась для моделирования волнения в Керченском проливе. Оценки качества воспроизведения параметров ветрового волнения моделью SWAN приводятся в [6, 12, 17].

В данной работе представлена технология регионального прогноза волнения высокого разрешения для Керченского пролива

Черного моря. Прогноз волнения осуществляется с использованием спектральной волновой модели SWAN на нерегулярной вычислительной сетке (с пространственным разрешением до 200–300 м) и прогностических полей ветра GFS.

### **Описание модели и входных данных**

Для расчета параметров ветрового волнения использовалась спектральная волновая модель третьего поколения SWAN версии 41.01. Так как глубины в Керченском проливе составляют 5–10 м, а берега имеют сложную конфигурацию, то использование модели SWAN, специально предназначенной для работы на мелкой воде, абсолютно оправдано. Код модели SWAN является открытым и доступен на сайте Делфтского технического университета [18].

Подобная технология прогноза волнения высокого разрешения уже создана для Цемесской бухты Черного моря. В [8, 9] изложены основные особенности работы системы прогноза.

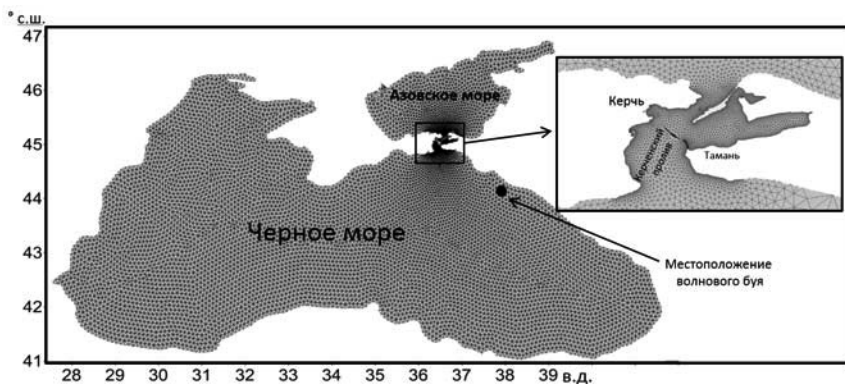
В нашей конфигурации модели SWAN реализованы следующие процессы, связанные с распространением волн: распространение волн в пространстве, рефракция и дифракция волн, генерация ветром; диссипация из-за «забурунивания» (whitcapping); диссипация из-за обрушения волн, вызванного изменением глубины; диссипация при трении о дно, нелинейного взаимодействия волн друг с другом (quadruplets, triads) [18]. При запуске модели использовался режим «GEN3», при котором используются следующие параметры: схема роста KOMEN ( $cds2=2.36e-5$ ,  $stpm=3.02e-3$ ), трех- и четырехволновое взаимодействие (Quadrupl, Triad), обрушение (Breaking constant,  $\alpha=1.0$ ,  $\gamma=0.73$ ), донное трение (Friction Jonswap Constant  $cf=0.067$ ).

В работе в качестве входных данных о ветре для диагностических расчетов использовались данные реанализа высокого разрешения NCEP Climate Forecast System Reanalysis (1979–2010 гг.) [8]. Пространственное разрешение реанализа составляет  $\sim 0,3^\circ$ , шаг по времени 1 час. Для прогностических расчетов использовались данные системы GFS (Global Forecasting System), функционирующей в метеорологическом центре NCEP/NOAA. Пространственное разрешение системы GFS оставляет  $0,5^\circ$  временной шаг 3 часа [13].

Для калибровки волновой модели SWAN использованы данные заякоренного буя, установленного в районе Геленджика на глубине 98 м [2], доступные на сайте [22].

Для сравнения прогнозов волнения привлекались результаты оперативной модели ЕСИМО [3, 21].

В качестве расчетной сетки использовалась нерегулярная триангуляционная сетка, включающая Черное и Азовское моря с шагом по пространству 8 км и Керченский пролив с шагом до 200 м (рис. 1). Общее количество узлов сетки – 16050. Методика создания и применения нерегулярных сеток изложена в [14, 20].



**Рис. 1. Расчетная неструктурная сетка для Черного и Азовского морей. На врезке – Керченский пролив.**

**Черным кружком обозначено положение волнового буя в районе Геленджика.**

Используемая нерегулярная сетка позволяет получать диагностические и прогностические поля волнения высокого разрешения при относительно небольшом количестве узлов, что при использовании регулярных и вложенных сеток весьма проблематично. В Керченском проливе шаг сетки уменьшается пропорционально уменьшению глубины и составляет около 200–300 м. Такой подход позволяет проследить развитие ветрового волнения как в открытом море, так и при выходе волн на мелководье, где действуют

процессы рефракции, дифракции, обрушения, диссипации. Подобные системы диагноза и прогноза волнения можно использовать для любых других акваторий.

### Оценка качества модели ветрового волнения

Данные о параметрах волнения в Керченском проливе у авторов отсутствуют, поэтому для оценки точности модели использовались данные волнового буйа в районе Геленджика, полученные в ЮО ИО РАН [2]. Буй располагался на глубине 98 м, что позволяет судить о качестве результатов моделирования на глубокой воде. На рис. 2 приводятся результаты моделирования значительной высоты волн в сравнении с данными измерений.

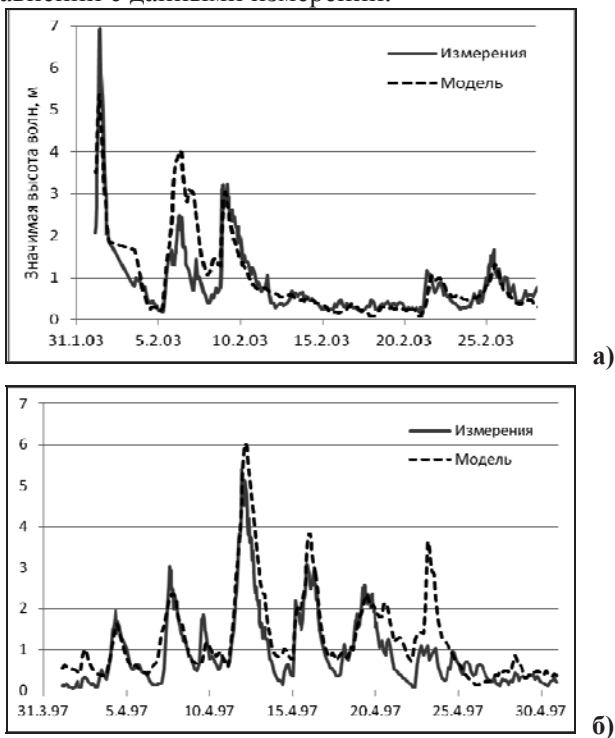


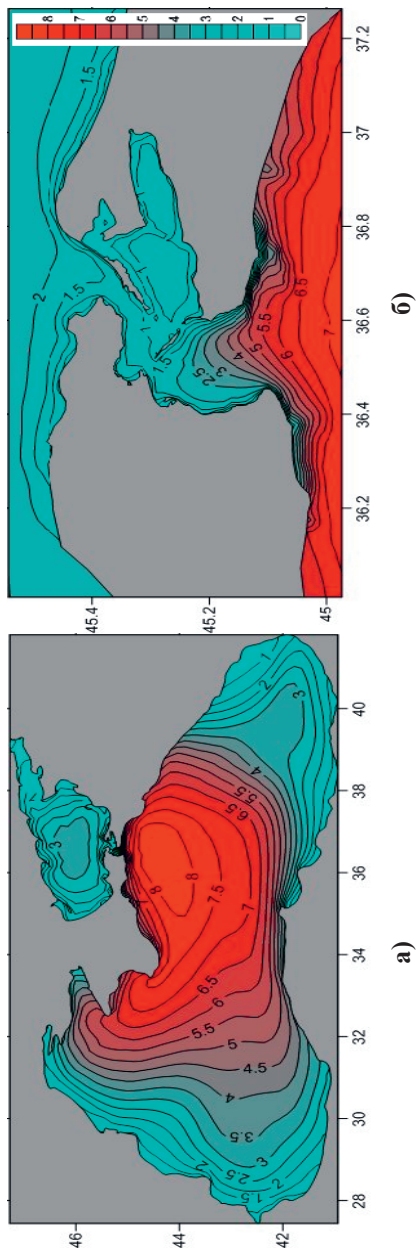
Рис. 2. Сравнение модельной высоты волн с данными измерений в районе Геленджика.

Из графиков на рис. 2 можно видеть, что модель, как правило, довольно точно воспроизводит как фазу наступления максимального волнения, так и абсолютные высоты. Однако в ряде случаев значительная высота волн по модели может отличаться от измеренной на 1–1,5 м, что связано, скорее всего, с ошибками в поле ветра. Систематического завышения или занижения высоты волн моделью не наблюдается. Коэффициент корреляции составляет около 0,86.

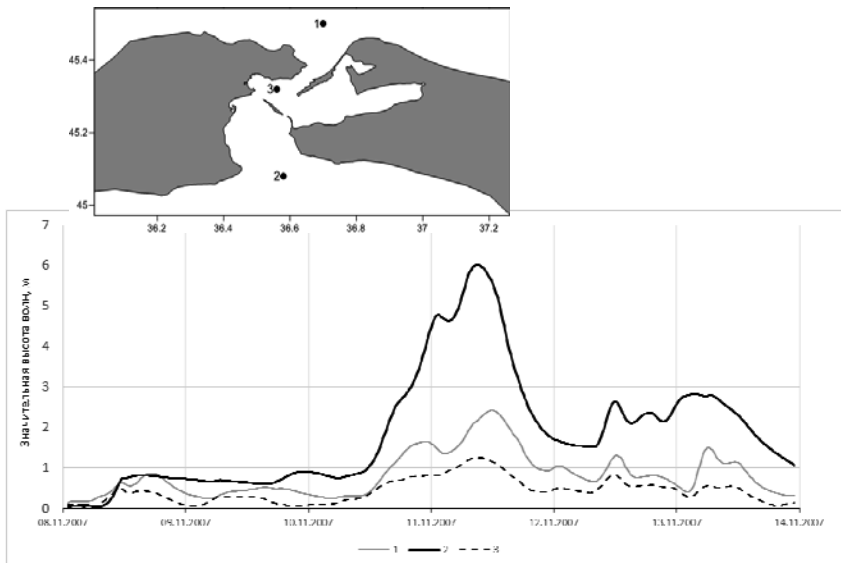
### **Моделирование волнения для шторма 11 ноября 2007 года**

В качестве одного из тестовых случаев были проведены диагностические расчеты волнения для катастрофического шторма 11 ноября 2007 г. Описание данного шторма и результаты его моделирования приведены в [1, 5, 15, 16]. По нашим расчетам высота значительных волн в открытой части Черного моря на 09:00 11 ноября на пике шторма достигала 8 м (рис. 3 а), согласно работе [1] – 6,8 м, согласно [5] – 9 м. В [5] также указано, что высота значительных волн на подходах к Керченскому проливу составляет 3–7 м, что вполне согласуется с нашими расчетами. На подходах к проливу высота волн снижается до 6 м, а в районе косы Тузла – до 1,5–2 м вследствие уменьшения глубины (рис. 3 б). Следует отметить, что максимальная высота волн может быть больше значительной в 1,5–2 раза: так, волны 3%-ной обеспеченности, согласно распределению Рэлея, в 1,33 раза больше значительных волн [6].

Чтобы проследить динамику изменения высоты волн в Керченском проливе, были выбраны 3 точки: в центре пролива и на подходах с юга и севера (рис. 4). Из рисунка видно, что высота волн на подходах к проливу со стороны Черного моря (в точке 2) достигала 6 м. В центре пролива высота волн не превышала 1,2 м, поскольку небольшие глубины и коса Тузла существенно препятствуют распространению волн. Со стороны Азовского моря максимум составляет порядка 2,5 м, причем видно, что фаза максимального волнения на несколько часов позже, чем со стороны Черного моря, что связано с движением шторма на север. В [5] значительная высота волн в точке, расположенной в Керченском проливе, достигала 3,8 м, однако там используется вложенная сетка с шагом 2 мили, чего явно недостаточно для корректного воспроизведения сложной береговой линии, рельефа дна и островов.



**Рис. 3. Значительная высота волн в Черном и Азовском морях (а) и в Керченском проливе (б) по данным моделирования 11 ноября 2007 года.**

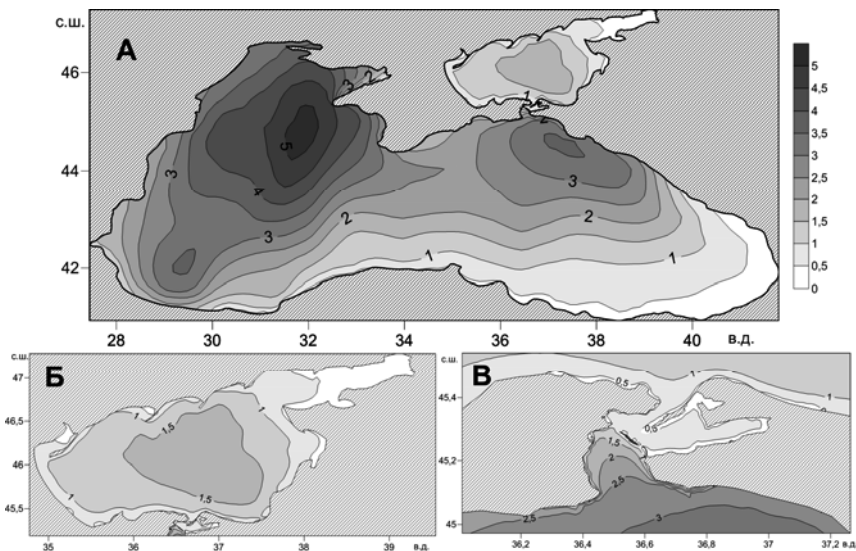


**Рис. 4. Сравнение высоты волн на входе в Керченский пролив со стороны Азовского моря (1), со стороны Черного моря (2) и в проливе (3).**

### **Система прогноза ветрового волнения**

К сожалению, в литературе не встречается сравнения результатов моделирования с данными инструментальных наблюдений в Керченском проливе, а все оценки качества моделей приводятся для других районов Черного моря.

После проведения оценки качества волновой модели на основании диагностических расчетов была создана прогностическая система, использующая данные прогноза ветра GFS. На рис. 5 представлен пример прогноза волнения на 36 часов от 30.01.2015 г. Все исполняемые файлы системы расположены на сервере CRAУ в МГУ имени М.В. Ломоносова. Поля ветра скачиваются с сервера NOAA (<ftp://nomads.ncdc.noaa.gov/GFS/>). Используются данные прогноза GFS на 72 часа с шагом 3 часа. Далее при помощи скриптов из глобальных полей ветра GFS вырезается область для Черного и Азовского морей.



**Рис. 5. Пример прогноза волнения для Черного (а) и Азовского (б) морей и для Керченского пролива (в).**

На следующем шаге происходит конвертация полей GFS и формирование входного файла для модели SWAN. После формирования входного файла, содержащего поля ветра на 72 часа, происходит запуск модели SWAN. Чтобы избежать занижения высоты волн для первых прогнозов (на 3, 6, 9 часов), связанного с «холодным» стартом модели (начальным условием является отсутствие волн), используются также данные прогноза GFS от 12:00 предыдущего дня.

Волновая модель стартует от 12:00 предыдущего дня и к первому прогнозу на 3 часа текущего дня волнение уже разгоняется в течение 15 часов, чего, по оценкам авторов, вполне достаточно для Черного и Азовского морей. После окончания расчетов модель выдает файлы, содержащие следующую информацию о волнении: значительная высота, направление, период, высота зыби, длина волны, зональный и меридиональный перенос волновой энергии.



Далее при помощи скриптов в программе Surfer производится построение карт распределения параметров волн для акватории Черного и Азовского морей и для Керченского пролива в увеличенном масштабе. Карты содержат прогноз параметров ветрового волнения с временным шагом 3 часа.

### **Сравнение волн в открытом море с данными ЕСИМО**

Прогнозы волнения сравнивались с результатами прогнозов оперативного модуля ЕСИМО [3, 21], где используется волновая модель WaveWatch 3 и такой же форсинг GFS. На рис. 6 приведены прогнозы значительной высоты волн от 30 января 2015 г. с заблаговременностью 51 час (рис. 6 а, б) и 63 часа (рис. 6 в, г) по двум системам прогноза. Как видно из рисунков, высота волн в открытом море прогнозируется практически одинаково, поскольку используется один и тот же форсинг, и модели 3-го поколения на открытой воде работают приблизительно одинаково. Оценки качества для модели оперативного прогноза волнения ЕСИМО приводятся в [3].

### **Заключение**

Спектральная волновая модель SWAN была адаптирована для регионального диагноза и прогноза волнения в Керченском проливе Черного моря. Расчеты производились с использованием оригинальной неструктурной сетки, что позволило получить модельные параметры ветрового волнения с шагом по пространству 200 м в Керченском проливе. Такого разрешения вполне достаточно для корректного воспроизведения волнения в проливе с учетом сложного рельефа дна, береговой линии и косы Тузла. Сравнение данных моделирования по значительной высоте волн с измерениями в районе Геленджика показало хорошее совпадение модели и измерений. На основе модели волнения и прогноза ветра GFS создана система регионального прогноза волнения высокого разрешения. Сравнение результатов прогнозов для Черного и Азовского морей с прогнозами системы ЕСИМО показало, что обе системы по высоте волн на глубокой воде дают практически одинаковые результаты.

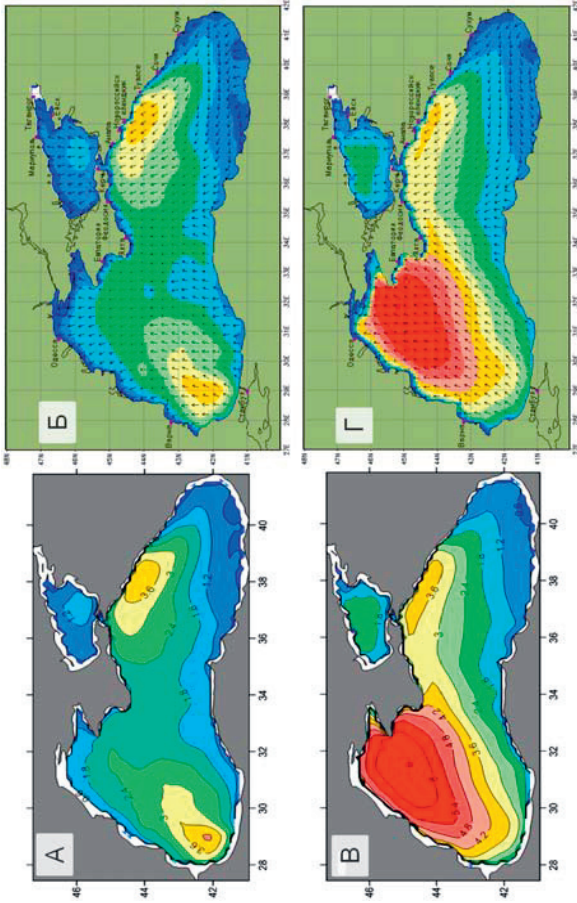


Рис. 6. Сравнение значительной высоты волн прогнозов на 51 ч (а, б) и 63 ч (в, г) от 30.01.2015 г. Слева – результаты прогноза ЕСИМО, слева – результаты авторов.

## Список использованных источников

1. Бухановский А.В., Лопатухин Л.И., Рожков В.А. Шторм на Черном море 11 ноября 2007 г. и статистики экстремальных штормов моря // Известия РГО. – 2009. – Т. 141. – Вып. 2. – С. 71–79.
2. Бухановский А.В., Дивинский Б.В., Косьян Р.Д., Лопатухин Л.И., Рожков В.А. Типизация ветрового волнения Черного моря по инструментальным данным // Океанология. – 2000. – Т. 40, № 2. – С. 289–297.
3. Зеленько А.А., Струков Б.С., Реснянский Ю.Д., Мартынов С.Л. Система прогнозирования ветрового волнения в Мировом океане и морях России // Труды ГОИН. – 2014. – Т. 215. – С. 90–101.
4. Ивонин Д.В., Мысленков С.А., Чернышов П.В., Архипкин В.С., Телегин В.А., Куклев С.Б., Чернышова А.Ю., Пономарев А.И., Халиков З.А. 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.
5. Лопатухин Л.И., Бухановский А.В., Чернышева Е.С., Колесов А.М. О шторме на Черном море в ноябре 2007 г. // Российский речной регистр – М., 2009. – 36 с.
6. 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.
7. Матушевский Г.В., Кабатченко И.М. Объединенная параметрическая интегральная модель ветрового волнения и ее применение // Метеорология и гидрология. – 1991. – № 5. – С. 45–50.
8. 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.
9. Мысленков С.А., Архипкин В.С. Система регионального прогноза ветрового волнения в Цемесской бухте Черного моря // Труды ГОИН. – 2014. – Т. 215. – С. 117–125.
10. Торопов П.А., Мысленков С.А., Самсонов Т.Е. Численное моделирование Новороссийской боры и связанного с ней опасного ветрового волнения // Вестник МГУ. Серия Географическая. – 2013. – № 2. – С. 38–46.
11. Akpınar A., Vledder G., Kömürcü M., Özger M. Evaluation of the numerical wave model (SWAN) for wave simulation in the Black Sea // Continental Shelf Research. – 15 December 2012. – Vol. 50–51. – P. 80–99.

12. Arkhipkin V.S., Gippius F.N., Koltermann K.P., Surkova G.V. Wind waves in the Black Sea: results of a hindcast study // Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions. – 2014. – Vol. 14. – P. 2883–2897.

13. CISL Research Data Archive. <http://rda.ucar.edu>

14. Dietrich J.C., Tanaka S., Westerink J.J., Dawson C.N., Luettich R.A. Jr., Zijlema M., Holthuijsen L.H., Smith J.M., Westerink L.G., Westerink H.J. Performance of the Unstructured-Mesh, SWAN+ADCIRC Model in Computing Hurricane Waves and Surge // Journal of Scientific Computing. – August 2012. – Vol. 52. – P. 468–497.

15. Fomin V.V., Ivanov V.A. Numerical simulation of wind waves near the Kosa-Tuzla Island // Ecological Safety of the Coastal and Shelf Zones and Complex Utilization of the Shelf Resources. – 2004. – P. 233–242.

16. Korshenko A, Ilyin Y, Velikova V. Oil spill in the Kerch Strait in November 2007. –M: Nauka, 2011. – P. 34–78.

17. Rusu E. Strategies in using numerical wave models in ocean/coastal applications // J. Mar. Sci. Tech. – 2011. – V. 19. – P. 58–75.

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

19. 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 // Russ. J. Earth Sci. – 2012. – V. 12. – P. ES6001–ES6007. – doi:10.2205/2012ES000524.

20. Zijlema M. Computation of wind-wave spectra in coastal waters with SWAN on unstructured grids // Coast. Eng. – 2010. – Vol. 57. – P. 267–277.

21. [http://193.7.160.230/web/esimo/black/wwfm/wwf\\_black.php](http://193.7.160.230/web/esimo/black/wwfm/wwf_black.php)

22. [www.coastdyn.ru](http://www.coastdyn.ru)

*Поступила в редакцию 13.04.2015 г.*