

## Система оперативного прогноза ветрового волнения Черноморского центра морских прогнозов

© 2017 Ю. Б. Ратнер, В. В. Фомин, А. М. Иванчик\*,  
М. В. Иванчик

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*  
\*E-mail: antonishka@gmail.com

Поступила в редакцию 29.11.2016 г. После доработки 17.05.2017 г.

Представлена система оперативного прогноза ветрового волнения Черного моря, основанная на численной спектральной модели *SWAN* (*Simulating Waves Nearshore*). В ходе разработки системы выполнена адаптация модели *SWAN* для учета особенностей ее функционирования в Черноморском центре морских прогнозов. Осуществлено согласование ввода-вывода модели с используемыми номенклатурой и форматами представления данных, создан пользовательский интерфейс для оперативного доступа к результатам моделирования.

Выполнена валидация модели, адаптированной для прогнозов волнения Черного моря в квазиоперативном режиме работы, за 2012 – 2015 гг.

Валидация результатов расчетов проведена для всех пяти прогностических сроков на основе анализа двумерных диаграмм распределения высот волн по данным прогностических расчетов и дистанционных измерений, полученных с помощью альтиметра, установленного на спутнике *Jason-2*. Дополнительно выполнен расчет статистических характеристик отклонений между прогностическими величинами высот волн и данными их измерений с борта спутника *Jason-2*, а также регрессионный анализ зависимости между прогностическими и измеренными высотами волн.

Сравнение полученных результатов с аналогичными результатами, приведенными в работах других авторов, вышедших в 2009 – 2016 гг., показало их удовлетворительное соответствие друг другу.

Прогнозы, выполненные авторами, а также прогнозы для других районов Мирового океана показывают, что современный уровень развития численных методов прогноза морского волнения вполне соответствует требованиям, предъявляемым со стороны специалистов, занимающихся изучением и моделированием состояния океана и атмосферы, а также потребителей-практиков, использующих эти результаты для решения прикладных задач.

**Ключевые слова:** Черное море, *SWAN*, автоматическая система, прогноз волнения, альтиметр, спутниковые измерения, высоты волн, валидация, визуализация, сервер.

DOI: 10.22449/0233-7584-2017-5-56-66

### Введение

С 2009 по 2014 гг. Морской гидрофизический институт (МГИ) участвовал в проекте *FP-7* Европейского Союза «Мой океан» на правах одного из семи центров морских прогнозов. В настоящее время центр продолжает функционировать в автономном режиме. Одна из задач дальнейшего совершенствования оперативной системы Черноморского центра морских прогнозов (ЧЦМП) связана с созданием комплексных систем морских прогнозов, основанных на одновременной совместной работе различных прогностических моделей, в том числе предназначенных для совместного прогноза циркуляции и волнения Черного моря.

Совместный прогноз волнения и циркуляции позволит повысить точность расчетов скорости морских течений, температуры и солёности в верхнем слое моря и определить характеристики морского волнения. Улучшение качества прогноза достигается благодаря более корректному учету эффектов взаимодействия морских волн и течений при использовании комплексной прогностической модели этих явлений.

В 2007 – 2008 гг. в составе ЧЦМП функционировала система прогноза волнения на основе использования модели *WAM* [1]. Результаты прогноза морского волнения использовались для уточнения расчетов скорости течений в модели циркуляции Черного моря. В настоящее время появилась возможность возобновить решение этой актуальной задачи, используя модель волнения *SWAN* [2, 3]. В 2009 – 2016 гг. вышел ряд работ [4 – 10], в которых рассматриваются системы и результаты прогноза морского волнения в акватории Черного моря, основанные на использовании моделей *WaveWatch-III* [11] и *SWAN*. Результаты прогностических расчетов для Черного моря, полученные авторами, а также расчеты для других районов Мирового океана (например, в работе [12]) показывают, что современный уровень развития численных методов прогноза морского волнения вполне соответствует требованиям, предъявляемым со стороны специалистов, занимающихся изучением и моделированием состояния океана и атмосферы, а также потребителей-практиков, использующих эти результаты для решения прикладных задач.

В то же время некоторые из перечисленных систем работают в исследовательском режиме. Прогнозы, получаемые с помощью других систем, работающих в оперативном режиме, трудно адаптировать для совместного использования с моделями, функционирующими в составе ЧЦМП. Исходя из этого, было принято решение о разработке собственной системы прогноза морского волнения.

Целью работы является создание и предварительная валидация системы прогноза морского волнения, функционирующей в ЧЦМП, для ее последующего объединения с моделью циркуляции вод Черного моря, что даст возможность повысить достоверность оперативных прогнозов циркуляции вод и параметров морских волн.

В ходе выполнения работы были поставлены следующие задачи:

1. Ввести в состав системы морских прогнозов ЧЦМП модель прогноза морского волнения *SWAN* с целью обеспечения в дальнейшем ее совместного использования с моделью циркуляции Черного моря.

2. Создать пользовательский интерфейс для оперативного доступа сотрудников МГИ и представителей других заинтересованных научных организаций к данным прогноза волнения.

3. Выполнить предварительную валидацию модели *SWAN*, адаптированной для прогнозов волнения Черного моря в квазиоперативном режиме, за 2012 – 2015 гг. и провести сравнение полученных результатов с аналогичными работами других авторов.

## Система прогноза морского волнения ЧЦМП

В системе прогноза волнения ЧЦМП используется волновая модель SWAN, основанная на численном решении уравнения баланса волновой энергии в спектральной форме [3]:

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} (c_x N) + \frac{\partial}{\partial y} (c_y N) + \frac{\partial}{\partial \sigma} (c_\sigma N) + \frac{\partial}{\partial \theta} (c_\theta N) = \frac{S}{\sigma}. \quad (1)$$

Здесь  $N = E/\sigma$  – плотность волнового действия;  $E$  – энергетический спектр волнения;  $x, y, t$  – пространственные координаты и время;  $\sigma, \theta$  – частотная и угловая координаты. Величины  $c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta$  – скорости переноса плотности волнового действия вдоль соответствующих пространственных и частотно-угловых координат [13]. Функция источника в правой части уравнения (1) имеет вид

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{wc} + S_{bf} + S_{dib} \quad (2)$$

где  $S_{in}$  – источник генерации волн ветром;  $S_{nl}$  – нелинейные взаимодействия спектральных гармоник;  $S_{wc}$  – диссипация энергии вследствие обрушения волновых гребней;  $S_{bf}$  – диссипация энергии, обусловленная донным трением;  $S_{dib}$  – обрушение волн на критических глубинах.

Применялась модель SWAN версии 42.10, использующая технологию *OpenMP* для многоядерных процессоров. Волновые характеристики определялись на сетке  $238 \times 132$ , покрывающей Черное море с шагом  $\sim 4,5$  км. Рельеф дна задавался на той же сетке. Частотный интервал ( $0,05 \text{ Гц} \leq \sigma \leq 1 \text{ Гц}$ ) покрывался неравномерной сеткой с 31 узлом. Разрешение модели по угловой координате составляло  $10^\circ$ . Шаг интегрирования по времени в уравнении (1) равнялся 30 мин. Донное трение определялось на основе теории Гранта – Мадсена [14]. На входе в модель задавалась скорость ветра на стандартной высоте 10 м с дискретностью по времени 3 ч.

Основными выходными характеристиками модели являются: высота значительных волн, среднее направление распространения волн, средний период волн.

В ходе разработки системы выполнена адаптация модели SWAN для учета особенностей ее функционирования в ЧЦМП. Улучшено представление данных по батиметрии Черного моря и осуществлено согласование входных и выходных данных модели с номенклатурой и форматами представления данных ЧЦМП.

Автоматическая система прогноза волнения в настоящее время работает в автономном оперативном режиме и выполняет стандартную последовательность действий, предусмотренных при выполнении прогнозов, – от планирования вычислений до выдачи результатов расчетов высоты, направления и периода значимых волн на серверы ЧЦМП. Атмосферное воздействие (скорость ветра) задается согласно данным греческого центра атмосферных прогнозов *SKIRON* [15], регулярно принимаемым ЧЦМП по каналам *Internet* и подготавливаемым для использования в моделях ЧЦМП.

Функциональная схема системы показана на рис. 1. Управление ее работой осуществляется с помощью скрипт-файлов, разработанных на языке *CalcmanPack* и исполняемых программами-интерпретаторами пакета программ *CalcMan* [16]. В процессе функционирования система выполняет следующую последовательность действий:

- планирование выполнения прогнозов;
- ожидание времени запуска очередного цикла прогноза;
- подготовку исходной информации, необходимой для выполнения очередного цикла прогноза;
- прогноз характеристик волнения с использованием модели *SWAN*;
- архивирование входных и вспомогательных данных, использованных и созданных при выполнении очередного цикла прогноза, в локальном файловом архиве, размещенном на файл-сервере ЧЦМП;
- подготовку выходных *NetCDF*-файлов данных прогноза волнения, архивирование результатов в локальном файловом архиве;
- выгрузку результатов прогноза на *THREDDS*-сервер для обеспечения пользователям доступа к данным;
- завершение цикла работы, переход к планированию следующего цикла вычислений.

#### Автоматическая система прогноза волнения моделью *SWAN*

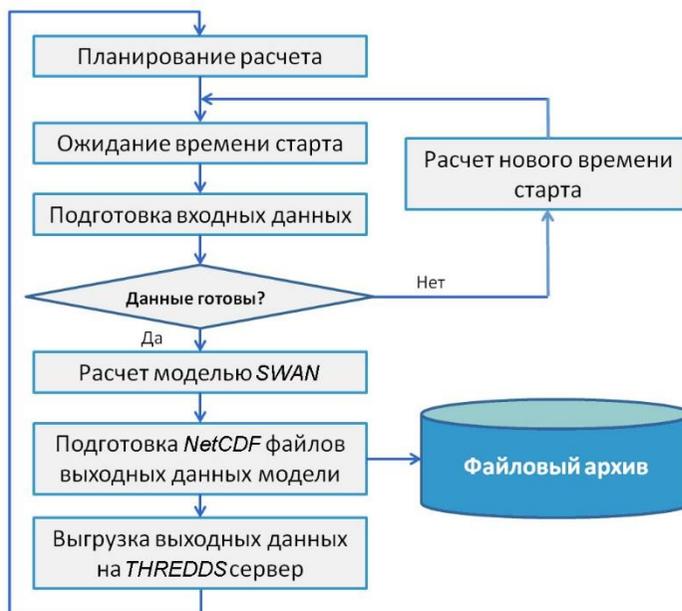


Рис. 1. Функциональная схема системы прогноза волнения ЧЦМП

При работе системы автоматически создаются журналы работы для каждого цикла расчета отдельно, в них фиксируются результаты каждого шага работы и возникающие в ходе выполнения прогноза проблемы. Журналы работы доступны через Интернет.

Доступ к данным, хранящимся на *THREDDS* сервере, реализован через продуктовые линейки [17, 18]. Для выбора и загрузки в компьютер пользователя данных по интересующим параметрам морской среды в произвольной области акватории Черного моря используется специальный *NetcdfSubset* интерфейс [18]. В настоящее время по соображениям экономии ресурсов дисковой памяти с файл-сервера ЧЦМП могут быть загружены данные за любой промежуток времени в пределах 90 дней назад – 5 дней вперед от текущей даты.

Визуализация результатов прогноза волнения выполняется через стандартный компонент *THREDDS*-сервера [17] – интерактивный интерфейс *Godiva2*. Он позволяет получать значение прогнозируемого параметра в любой точке акватории, визуализировать горизонтальные и вертикальные сечения, создавать анимационные картинки в заданных интервалах времени, строить временные ряды в фиксированных точках. Пример визуализации результатов прогноза морского волнения показан на рис. 2.

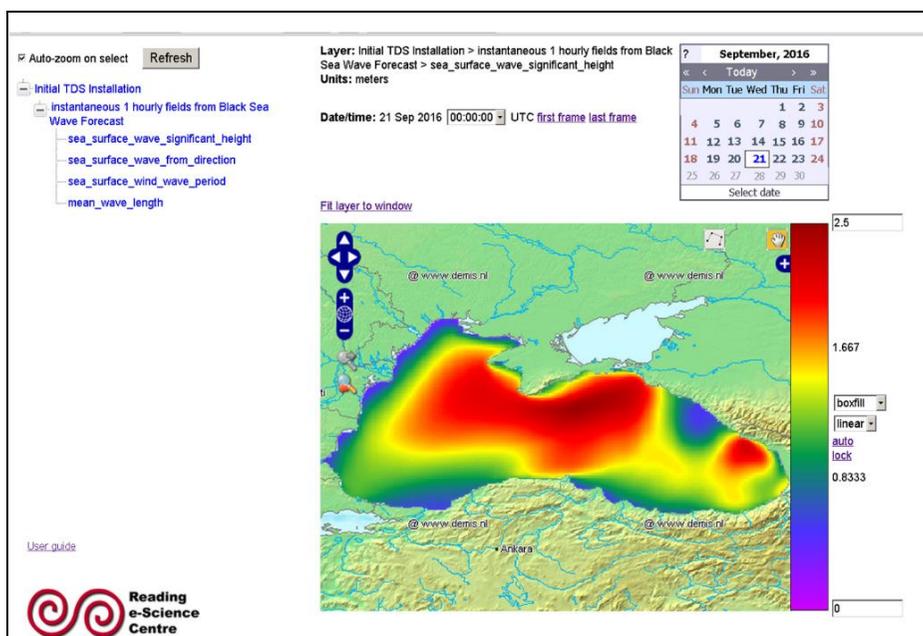


Рис. 2. Пример визуализации поля высот значительных волн с помощью интерфейса *Godiva2*

В настоящее время система прогноза волнения функционирует в оперативном режиме.

### Валидация результатов прогнозов волнения ЧЦМП

Для валидации прогностических расчетов были использованы *GDR* архивы данных (о высотах волн), полученных с помощью альтиметра *Poseidon-3* спутника *Jason-2* [19]. Данные модельных расчетов линейно интерполировались по пространству и времени на точки и время выполнения дистанционных измерений. Количество совместных данных  $N = 63315$ . Период валида-

ции прогнозов морского волнения – с 2012 по 2015 гг. Согласно справочнику продуктов спутника *Jason-2* [19], ожидаемое значение стандартного отклонения для ошибок восстановления высоты значительных волн составляет 0,25 м, актуальная – 0,12 м.

При выполнении валидации модели спутниковые данные проходили стандартную процедуру фильтрации, изложенную в справочнике продуктов спутника *Jason-2* [19]. Некоторые параметры фильтров, приведенные в этой работе, были изменены в соответствии с материалами, изложенными в работе [5]. К стандартной процедуре фильтрации спутниковых данных, приведенной в справочнике [19], были добавлены дополнительные фильтры, используемые в статье [5]. В частности, в этой публикации предложено фильтровать спутниковые данные с высотой волн меньше 0,1 м. Никакие собственные процедуры фильтрации спутниковых данных нами не использовались.

Анализ результатов прогнозов выполнялся на основе использования диаграмм рассеяния прогностических значений высоты значительных волн относительно их значений, полученных по данным альтиметра *Poseidon-3*, и следующих статистических характеристик разностей между прогностическими и измеренными значениями:

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_{m,i} - H_{s,i}, \quad SD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (H_{m,i} - H_{s,i} - ME)^2},$$

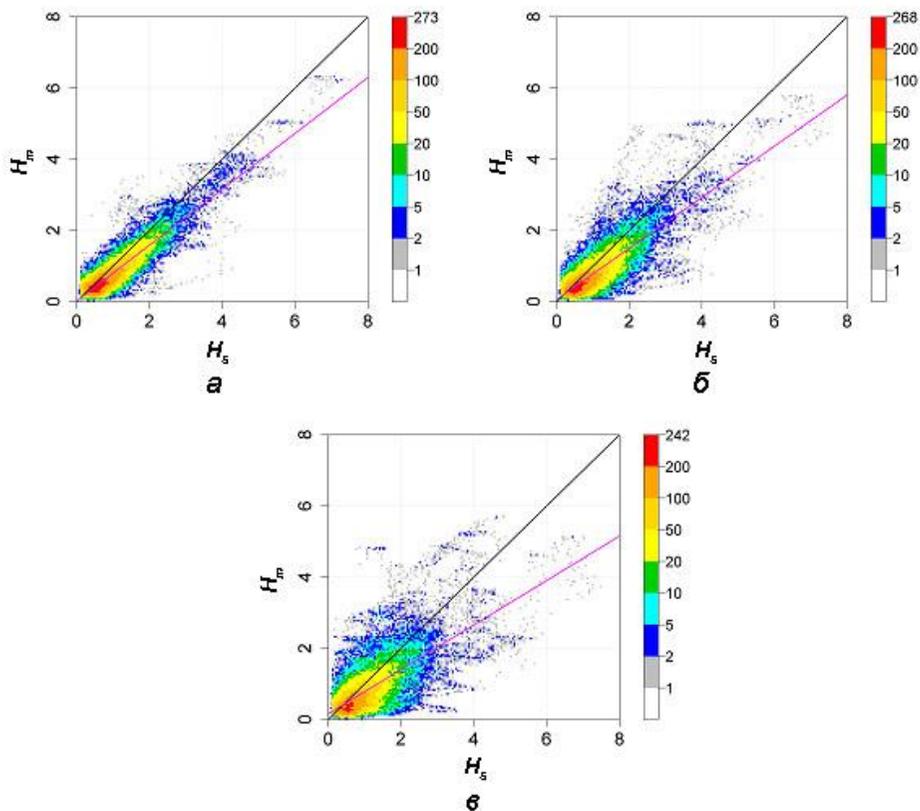
$$RMSE = \sqrt{ME^2 + SD^2}, \quad SI = \frac{RMSE}{MH_s},$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (H_{m,i} - MH_m)(H_{s,i} - MH_s)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (H_{m,i} - MH_m)^2 (H_{s,i} - MH_s)^2}},$$

$$MH_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_{m,i}, \quad MH_s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_{s,i},$$

где  $ME$  – среднее отклонение;  $SD$  – стандартное отклонение;  $RMSE$  – среднеквадратичное отклонение;  $SI$  – индекс рассеяния (относительное среднеквадратичное отклонение);  $R$  – коэффициент корреляции;  $MH_m$  и  $MH_s$  – средние высоты волн, рассчитанные по данным прогноза и спутниковым измерениям.

На рис. 3 показаны совместные эмпирические распределения значений высот волн полученных в результате прогноза и измерений с борта ИСЗ для прогностических сроков в интервалах 0 – 1, 2 – 3 и 4 – 5 сут. Вся область значений от 0 до 8 м разбита на  $160 \times 160$  пикселей (ячеек) размером  $0,05 \times 0,05$  м, для каждого из которых было подсчитано количество пар рассчитанных и измеренных значений высоты волн, попавших в этот пиксел. Количество попаданий в каждый пиксел показано цветом. Соответствие цветов количеству пар, попавших в пиксели, показано на цветовой палитре справа.



**Рис. 3.** Диаграммы рассеяния прогностических значений высоты значительных волн относительно данных альтиметрических наблюдений: *а* – при прогнозе на 0 – 1 сут; *б* – при прогнозе на 2 – 3 сут; *в* – при прогнозе на 4 – 5 сут

В табл. 1 приведены значения среднего (*ME*), стандартного (*SD*) и среднеквадратичного (*RMSE*) отклонений, индекса рассеяния (*SI*) и коэффициента корреляции (*R*), а также коэффициентов линейной регрессии – величины наклона (*a*) и смещения (*b*) прогностических высот волн на их измеренные значения.

Т а б л и ц а 1

**Статистические характеристики разностей между прогностическими и измеренными значениями высоты ветровых волн в Черном море**

Срок прогноза	<i>ME</i>	<i>SD</i>	<i>RMSE</i>	<i>SI</i>	<i>R</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
0 – 1 сут	-0,21	0,32	0,39	0,36	0,90	0,78	0,02
2 – 3 сут	-0,24	0,43	0,49	0,46	0,81	0,72	0,07
4 – 5 сут	-0,24	0,55	0,61	0,57	0,69	0,62	0,16

Полученные нами результаты были сопоставлены с данными авторов работ [4 – 7]. В работе [4] расчеты были выполнены для 15.04 – 30.11.2011 г. Для сопоставления с прогностическими значениями высоты волн использовались данные измерений спутников *Jason1*, *Jason2*, *Envisat*. В работе [5] расчеты были выполнены для 01.10.2012 – 31.12.2012 г. В ней использовались данные измерений спутника *Jason2*. Результаты реанализа значений высоты значительных волн, полученные в работе [6], соответствуют периоду 01.01.2002 – 30.04.2002 г. При сопоставлении результатов реанализа были использованы данные спутника *Topex*, качество которых, согласно данным, приведенным в табл. 7 [6, с. 14], является наилучшим. В работе [7] приведены результаты реанализа значений высоты значимых волн, полученные в период 2010 – 2011 гг. Сопоставление этих результатов с данными наблюдений было выполнено на основе использования дистанционных измерений спутников *Envisat*, *Jason1* и *Jason2* в 2010 – 2011 гг. Ниже нами приведены данные, представленные на рис. 7, с [7, с. 8], полученные с использованием спутника *Jason2* в 2010 г.

Результаты сопоставления наших оценок с данными перечисленных работ представлены в табл. 2. Они приведены для прогнозов на срок 0 – 1 сут.

Т а б л и ц а 2

**Таблица сравнения статистических оценок из табл. 1 с данными работ других авторов [4 – 7]**

Источник	<i>ME</i>	<i>SD</i>	<i>RMSE</i>	<i>SI</i>	<i>R</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
МГИ	-0,21	0,32	0,39	0,36	0,90	0,78	0,02
Работы [4, 8]	-0,09	0,32	0,33	0,28	0,91	0,92	0
Работа [6]	-0,01	0,36	0,36	0,36	0,78	–	–
Работа [7]	0,03	0,40	0,40	0,44	0,85	0,84	0,11

Для прогностических сроков от нуля до одних суток имеет место наиболее слабое рассеяние прогностических значений относительно измеренных значений высоты волн. Коэффициент корреляции принимает высокое значение  $R = 0,9$ . Оно практически такое же, как и в статье [5]. В других работах корреляция между данными расчетов и дистанционными измерениями более слабая. Стандартное отклонение *SD* принимает значения меньшие, чем те, которые были рассчитаны нами на основе данных о величинах среднего и среднеквадратичного отклонений, приведенных у авторов работ [4 – 8]. Значение средней ошибки *ME*, полученной нами, оказывается достаточно большим. Оно по абсолютной величине составляет около 60 % от стандартного отклонения. По этой причине полученные нами оценки среднеквадратичного отклонения и индекса рассеяния оказываются несколько выше, чем у авторов перечисленных работ. Сравнение наклонов регрессионных прямых, полученных нами и оцененных по рис. 7, приведенному в работе [5, с. 16], показывает, что наша оценка наклона регрессионной прямой на 14 % меньше, чем та, которая следует из данных источника [5].

При увеличении сроков прогноза в наших расчетах, как и в работах других авторов, наблюдается ухудшение соответствия между данными дистанционных измерений и расчетными значениями высоты волн. Сопоставление прогнозов, полученных нами для других прогностических сроков, с аналогичными результатами других авторов выявляет те же особенности, что имели место для прогноза на срок 0 – 1 сут.

### **Выводы**

1. Система прогноза морского волнения работает в автоматическом оперативном режиме. Созданная система работает надежно. За период с середины июня до середины ноября 2016 г. не зафиксировано сбоев в работе системы, связанных с ненадлежащим функционированием разработанного программного обеспечения.

2. Для поддержания функционирования системы требуется только ежедневный контроль результатов ее работы и устранение проблем, изредка возникающих из-за отсутствия необходимых входных данных, перебоев с электропитанием и нарушений в работе внутренних и внешней сетей передачи данных.

3. Выполненная валидация прогностических расчетов показала хорошие результаты по критериям максимума коэффициента корреляции и минимума стандартного отклонения. Вместе с тем по критерию минимума систематического отклонения полученные результаты уступают результатам, изложенным в работах других авторов.

Работа выполнялась в рамках НИР Морского гидрофизического института РАН. Тема (проект): №1002-2014-0011 «Исследования закономерностей изменения состояния морской среды на основе оперативных наблюдений и данных системы диагноза, прогноза и реанализа состояния морских акваторий» (шифр «Оперативная океанография»).

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Hasselmann S., Hasselmann K., Bauer E. et al.* The WAM model – a third generation ocean wave prediction model // *J. Phys. Oceanogr.* – 1988. – 18, Iss. 12. – P. 1775 – 1810. – doi:10.1175/1520-0485(1988)018<1775:TWMGTGO>2.0.CO;2
2. *Booij N., Ris R.C., Holthuijsen L.H.* A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation // *J. Geophys. Res.* – 1999. – 104, Iss. C4. – P. 7649 – 7666. – doi:10.1029/98JC02622
3. *The SWAN team.* SWAN Cycle III version 41.10AB. Scientific and Technical Documentation. – Delft: Delft University of Technology, 2016. – 138 p. – URL: <http://swanmodel.sourceforge.net/download/zip/swantech.pdf> (дата обращения: 10.05.2017).
4. *Зеленько А.А., Струков Б.С., Реснянский Ю.Д. и др.* Система прогнозирования ветрового волнения в мировом океане и морях России // *Труды ГОИН.* – М.: ГОИН, 2014. – Вып. 215. – С. 90 – 101.
5. *Dimitrova M., Kortcheva A., Galabov V.* Validation of the operational wave model WAVEWATCH III against altimetry data from JASON-2 satellite // *Bulg. J. Meteorol. Hydrol.* – 2013. – 18, No. 1 – 2. – P. 4 – 17.

6. *Rusu L., Bernardino M., Guedes Soares C.* Wind and wave modelling in the Black Sea // *J. Oper. Oceanogr.* – 2014. – 7, Iss. 1. – P. 5 – 20. – doi:10.1080/1755876X.2014.11020149
7. *Myslenkov S., Chernyshova A.* Comparing wave heights simulated in the Black Sea by the SWAN model with satellite data and direct wave measurements // *Russ. J. Earth Sci.* – 2016. – 16. – ES5002. – P. 1 – 12. – doi:10.2205/2016ES000579
8. *Струков Б.С., Зеленько А.А., Реснянский Ю.Д. и др.* Система прогнозирования характеристик ветрового волнения и результаты ее испытаний для акваторий Азовского, Черного и Каспийского морей // Информационный сборник № 40. Новые технологии, модели и методы гидрометеорологических прогнозов и результаты их оперативных испытаний / Под ред. канд. геогр. наук А.А. Алексеевой. – М., Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2013. – С. 64 – 79. – URL: <http://method.meteorf.ru/publ/sb/sb40/sb40.pdf> (дата обращения: 5.05.2017).
9. *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.
10. *Столярова Е.В., Мысленков С.А.* Прогноз ветрового волнения высокого пространственного разрешения в Керченском проливе // Тр. Гидрометеорологического науч.-исслед.центра Российской Федерации / Под ред. д-ра геогр. наук Е.С. Нестерова. – М.: ФГБУ ГНИЦР, 2015. – Вып. 354: Гидрометеорологические прогнозы. – С. 24 – 35. – URL: <http://method.meteorf.ru/publ/tr/tr354/tr354.pdf> (дата обращения: 5.05.2017).
11. *Tolman H.L.* A third-generation model for wind waves on slowly varying, unsteady, and inhomogeneous depths and currents // *J. Phys. Oceanogr.* – 1990. – 21, No. 6. – P. 782 – 797. – doi:10.1175/1520-0485(1991)021<0782:ATGMFW>2.0.CO;2
12. *Zieger S., Vinoth J., Young I.R.* Joint calibration of multiplatform altimeter measurements of wind speed and wave height over the past 20 years // *J. Atmos. Ocean. Technol.* – 2009. – 26, No. 12. – P. 2549 – 2564. – doi:10.1175/2009JTECHNA1303.1
13. *Holthuijsen L.H.* *Waves in Oceanic and Coastal Waters.* – Cambridge: Cambridge University Press, 2007. – 404 p. – <https://doi.org/10.1017/CBO9780511618536>
14. *Grant W.D., Madsen O.S.* Combined wave and current interaction with a rough bottom // *J. Geophys. Res.* – 1979. – 84, Iss. C4. – P. 1797 – 1808. – doi:10.1029/JC084iC04p01797
15. *Papadopoulos A., Katsafados P., Kallos G. et al.* The weather forecasting system for Poseidon – an overview // *J. Atmos. & Ocean Sci.* – 2002. – 8, Iss. 2 – 3. – P. 219 – 237. – doi:10.1080/1023673029000003543
16. *Иванчик А.М.* Управление функционированием автоматизированных систем морского прогноза // Современные проблемы гуманитарных и естественных наук: материалы XX международной научно-практической конф., 2 – 3 октября 2014 г. / Науч.-информ. издат. центр «Институт стратегических исследований». – М.: Изд-во «Институт стратегических исследований», 2014. – С. 56 – 61.
17. *Коротаев Г.К., Ратнер Ю.Б., Иванчик М.В. и др.* Оперативная система диагноза и прогноза гидрофизических характеристик Черного моря // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 2016. – 52, № 5. – С. 609 – 617. – doi:10.7868/S0002351516050072
18. *Thredds-server.* – URL: <http://mis.bsmfc.net:8080/thredds/catalog.html> (дата обращения: 5.05.2017).
19. *Dumont J.P., Rosmorduc V., Carrere L. et al.* *OSTM/Jason-2 Products Handbook.* – Washington, DS: NOAA/NESDIS, 2017. – Polar Series/OSTM J400, Iss.: 1 rev. 11. – 77 p.

## System of the wind wave operational forecast by the Black Sea marine forecast center

**Yu. B. Ratner, V. V. Fomin, A. M. Ivanchik\*, M. V. Ivanchik**

*Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russian Federation*

*\*e-mail: antonishka@gmail.com*

System of the wind wave operational forecast in the Black Sea based on the numerical spectral model SWAN (Simulating Waves Nearshore) is represented. Development of the system implies adaptation of the SWAN model for better allowing for the features of its functioning in the Russian Black Sea marine forecast centre.

The model input-output is agreed with the applied nomenclature and the formats of data representation. The user interface is developed to make the access to the simulation results operational. The model adapted to forecasting waves in the Black Sea in a quasi-operational mode, is validated for 2012 – 2015.

The simulation results are validated for all of five forecast terms based on the analysis of two-dimensional graphs of the wave heights' distribution derived from the data of prognostic calculations and remote measurements obtained due to the altimeter installed on the satellite Jason-2. Moreover, statistical characteristics of the deviations between the forecasted wave heights' values and those measured from the satellite Jason-2 are calculated, and regression analysis of dependence between the forecasted and the measured wave heights is done.

Being compared, the obtained results and the similar ones represented in the papers by other authors in 2009 – 2016 show their satisfactory compliance.

The forecasts carried out by the authors for the Black Sea as well as those obtained for the other regions of the World Ocean show that the present level of numerical methods developed to forecast sea waves, satisfies the requirements both of the scientists involved in studying and modeling the ocean and the atmosphere state, and the experts using these results for solving urgent applied problems.

**Keywords:** Black Sea, SWAN, automatic system, wave forecast, altimetry, satellite measurements, wave height, validation, visualization, server.