

Модернизированная система оперативного прогноза морского волнения Черноморского центра морских прогнозов

Ю. Б. Ратнер , В. В. Фомин, А. Л. Холод, А. М. Иванчик

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

 yubrat@gmail.com

Поступила в редакцию 31.03.2021 г., после доработки – 20.05.2021 г.

Цель. Цель работы – модернизация системы прогноза морского волнения Черноморского центра морских прогнозов посредством включения блока прогноза ветрового волнения в Севастопольском регионе и улучшения точности прогнозов волнения с помощью предложенной процедуры настройки модели SWAN.

Методы и результаты. В модернизированной прогностической системе на основе метода вложенных сеток реализована возможность выполнения совместных оперативных прогнозов морского волнения с пространственным разрешением 5 км для акватории Черного моря и 1 км – для Севастопольского региона. Для улучшения точности прогнозов волнения предложена процедура настройки модели SWAN. Процедура основана на изменении параметризации коэффициента поверхностного трения $C_d(V)$, где V – скорость приземного ветра, что позволяет уменьшить отклонения высот волн, полученных в результате прогностических расчетов, от полученных по спутниковым альтиметрическим измерениям. Для оценки эффективности предложенной процедуры сопоставлены результаты прогностических расчетов с данными дистанционных измерений. Показано, что при прогнозах с оптимальным выбором функциональной зависимости $C_d(V)$ индекс рассеяния между расчетными и измеренными величинами может быть уменьшен на 20 %.

Выводы. Представлена модернизированная система Черноморского центра морских прогнозов, предназначенная для выполнения совместных оперативных прогнозов морского волнения в акватории Черного моря и Севастопольского региона. На основе результатов валидации модели показано, что предложенная процедура настройки модели SWAN позволяет уменьшить отклонения рассчитанных высот волн от измеренных с помощью датчиков, установленных на альтиметрических спутниках.

Ключевые слова: Черное море, SWAN, автоматическая система, прогноз волнения, настройка модели, параметры модели, коэффициент поверхностного трения, спутниковые измерения, альтиметрические измерения, высота волн, валидация, визуализация, сервер

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 18-45-920059 p_a и в рамках государственного задания Морского гидрофизического института РАН по теме № 0555-2021-0003 «Развитие методов оперативной океанологии на основе междисциплинарных исследований процессов формирования и эволюции морской среды и математического моделирования с привлечением данных дистанционных и контактных измерений».

Для цитирования: Модернизированная система оперативного прогноза морского волнения Черноморского центра морских прогнозов / Ю. Б. Ратнер [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 5. С. 623-640. doi:10.22449/0233-7584-2021-5-623-640

Updated System for the Sea Wave Operational Forecast of the Black Sea Marine Forecasting Center

Yu. B. Ratner ✉, V. V. Fomin, A. L. Kholod, A. M. Ivanchik

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
✉ yubrat@gmail.com

Purpose. The work is aimed at updating the sea wave forecasting system developed in the Black Sea Marine Forecasting Center by including the block of wind wave forecast in the Sevastopol region and by improving the wave forecast accuracy using the proposed procedure for the SWAN model tuning.

Methods and Results. In the updated forecasting system, the possibility of performing the joint operational sea wave forecasts for the Black Sea and the Sevastopol region (with the 5 and 1 km spatial resolutions, respectively) became possible due to the nested grid method applied. To improve accuracy of the wave forecasts, the procedure for the SWAN model tuning was proposed. It is based on changing the parameterization of the surface friction coefficient $C_d(V)$, where V is the surface wind speed. This permits to reduce the deviations of the forecasted wave heights from those obtained from the satellite altimetry measurements. Efficiency of the proposed procedure was assessed through comparison of the forecasting results with the remote sensing data. It is shown that in the forecasts supplied with an optimal choice of functional dependence $C_d(V)$, the scattering index between the forecasted and measured values can be reduced by 20 %.

Conclusions. Represented is the updated system of the Black Sea Marine Forecasting Center intended for the joint operational sea wave forecasts in the Black Sea and in the Sevastopol region. The results of model validation have shown that the procedure proposed for tuning the SWAN model makes it possible to reduce the deviations of the forecasted wave heights from those measured by the sensors installed at the altimetry satellites.

Keywords: Black Sea, SWAN, automatic system, wave forecast, model tuning, model parameters, surface friction coefficient, satellite measurements, altimetry measurements, wave height, validation, visualization, server

Acknowledgments: the work was carried out at financial support of the RFBR grant No. 18-45-920059 p_a and within the framework of the state task of Marine Hydrophysical Institute, RAS on theme No. 0555-2021-0003 “Development of methods of operational oceanology based on interdisciplinary studies of the processes of the marine environment formation and evolution, and mathematical modeling using the data of remote and contact measurements”.

For citation: Ratner, Yu.B., Fomin, V.V., Kholod, A.L. and Ivanchik, A.M., 2021. Updated System for the Sea Wave Operational Forecast of the Black Sea Marine Forecasting Center. *Physical Oceanography*, [e-journal] 28(5), pp. 579-595. doi:10.22449/1573-160X-2021-5-579-595

1. Введение

Система диагноза и прогноза ветрового волнения для Черного моря и Севастопольского региона имеет важное значение для решения как научных задач, связанных с изучением волнового режима, так и прикладных, связанных с оценкой его влияния на различные аспекты хозяйственной деятельности и экологию. При этом наиболее широко в фундаментальных и прикладных исследованиях ветровых волн применяются спектральные волновые модели 3-го поколения WAM [1], WAVEWATCH [2] и SWAN [3].

В последние несколько лет опубликовано большое количество работ, посвященных различным аспектам математического моделирования ветровых волн в Черном море на основе различных волновых моделей. В работе [4] проанализирован штормовой климат в западной части Черного моря по непрерывному набору ретроспективных данных за 63 года. В [5] проведено численное

моделирование ветровых волн для некоторых прибрежных районов Крымского п-ова. Результаты анализа изменчивости межгодовых и сезонных вариаций ветровых волн опубликованы в [6]. В [7] приведены оценки чувствительности модели к изменению входных параметров. В [8, 9] были представлены результаты численного моделирования штормовых волн в Черном море с использованием различных типов атмосферного реанализа. В [10] исследована изменчивость климата ветрового волнения за последние 37 лет.

В работе [11] анонсирована система оперативного прогноза ветрового волнения Черного моря с пространственным разрешением 5 км, разработанная на основе использования модели *SWAN*. Сравнение полученных нами результатов моделирования ветрового волнения с результатами других авторов показало их удовлетворительное соответствие. В настоящей работе изложены результаты модернизации этой системы, направленной на улучшение достоверности прогнозов морского волнения, путем подключения вложенной подсистемы прогноза волнения в Севастопольском регионе с пространственным разрешением 1 км, а также результаты настройки параметров модели для акватории Черного моря в целом и Севастопольского региона в частности.

2. Модернизация системы прогноза морского волнения Черноморского центра морских прогнозов (ЧЦМП) для выполнения расчетов характеристик волн в Севастопольском регионе

Для прогностических расчетов волнения в Севастопольском регионе с более высоким пространственным разрешением, по сравнению со всей остальной акваторией Черного моря, в модели *SWAN* возможны два варианта модернизации. Первый вариант заключается в переходе от регулярных пространственных сеток, на которых выполняются расчеты в существующей системе прогнозов волнения ЧЦМП, к использованию неструктурированных расчетных сеток со сгущением узлов в Севастопольском регионе. Такой вариант требует существенной доработки существующей системы. Поэтому использовался второй вариант, основанный на применении двухшагового метода вложенных сеток. На первом шаге выполнялся прогноз волнения на сетке, охватывающей всю акваторию Черного моря. На втором шаге на более мелкой сетке моделировалось волнение в Севастопольском регионе. Параметры волнения на жидких границах второй сетки определялись интерполяцией модельных данных, полученных на первом шаге. Характеристики используемых сеток даны в табл. 1.

Т а б л и ц а 1
T a b l e 1

Характеристики пространственных сеток моделей Characteristics of spatial grids of the models

Количество узлов / Number of nodes	° в. д. / ° E	Количество узлов / Number of nodes	° с. ш. / ° N
Черное море / Black Sea			
238	27,4122–41,895535	132	40,8633–46,685524
Севастопольский район / Sevastopol region			
268	32,003128–34,229286	152	43,7122–44,971848

Волновые характеристики рассчитывались по модели *SWAN* (версия 41.20), использующей технологию *OpenMP* для многоядерных процессоров. Рельеф дна для акватории Черного моря задавался таким же образом, как и в системах ЧЦМП [11, 12]. Для Севастопольского региона был подготовлен рельеф дна на основе использования базы данных¹ с пространственным разрешением 30 с. По частотной координате, изменяющейся в диапазоне 0,05–1,0 Гц, использовалась неравномерная сетка с 31 узлом. Разрешение модели по угловой координате составляло 10°. Шаг интегрирования по времени равнялся 30 мин. Донное трение определялось на основе теории Гранта – Мадсена [13]. Другие параметры модели *SWAN* были выбраны по умолчанию. Применялась неявная схема интегрирования по времени.

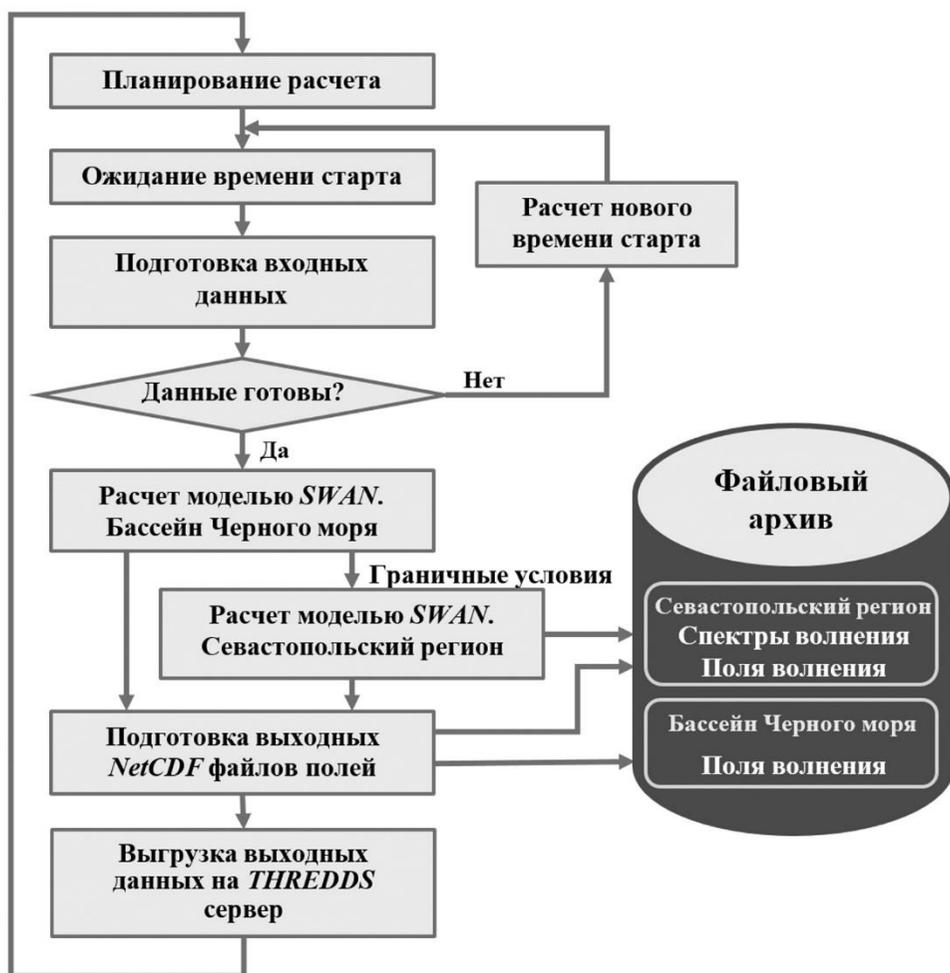
В качестве основного источника данных о ветре использовались результаты атмосферных прогнозов греческого центра *SKIRON* [14] на стандартной высоте 10 м с дискретностью по времени 3 ч и пространственным разрешением 10 км. В редких случаях, когда эти данные отсутствовали, в качестве дополнительного источника использовалась выборка данных прогнозов глобальной модели ПЛАВ 20 ФГБУ «Гидрометцентр России» по акватории Черного моря на стандартной высоте 10 м с дискретностью по времени 3 ч и пространственным разрешением 22 км. Прием этих данных по сети *Internet* осуществлялся ежедневно в автоматическом режиме системой ввода ЧЦМП [12].

В настоящее время система прогноза волнения в Черном море и в Севастопольском регионе работает в тестовом режиме и выполняет стандартную последовательность действий, предусмотренных при выполнении оперативных прогнозов – от планирования вычислений до записи результатов расчетов высоты, направления и периода волн в локальные архивы ЧЦМП. Функциональная схема системы показана на рис. 1. Она аналогична функциональной схеме, приведенной в работе [11], за исключением блока, осуществляющего прогноз волнения в Севастопольском регионе, который включен в систему в ходе ее модернизации. Прогнозы выполняются ежедневно по циклически повторяемой схеме. Один цикл содержит результаты прогнозов волнения на 5 сут. Управление работой системы осуществляется с помощью скрипт-файлов, разработанных на языке *CalcmanPack* и исполняемых программами-интерпретаторами пакета программ *CalcMan* [15].

При функционировании системы создаются журналы работы для каждого цикла расчета отдельно, в них фиксируются результаты каждого шага работы и возникающие в ходе выполнения прогноза проблемы.

Основными выходными данными системы являются поля высот значительных волн (среднее значение высот – 1/3 наиболее высоких волн в спектре волнения), среднего направления распространения волн, средних периодов и средних длин волн. Дополнительно в пяти точках Севастопольского региона выводятся характеристики частотно-углового спектра волн.

¹ URL: <https://www.gebco.net> (дата обращения: 20.09.2021).



Р и с. 1. Функциональная схема системы совместного прогноза морского волнения в акватории Черного моря и Севастопольского региона

F i g. 1. Functional scheme of the system of joint sea waves forecasts in the Black Sea and in the Sevastopol region

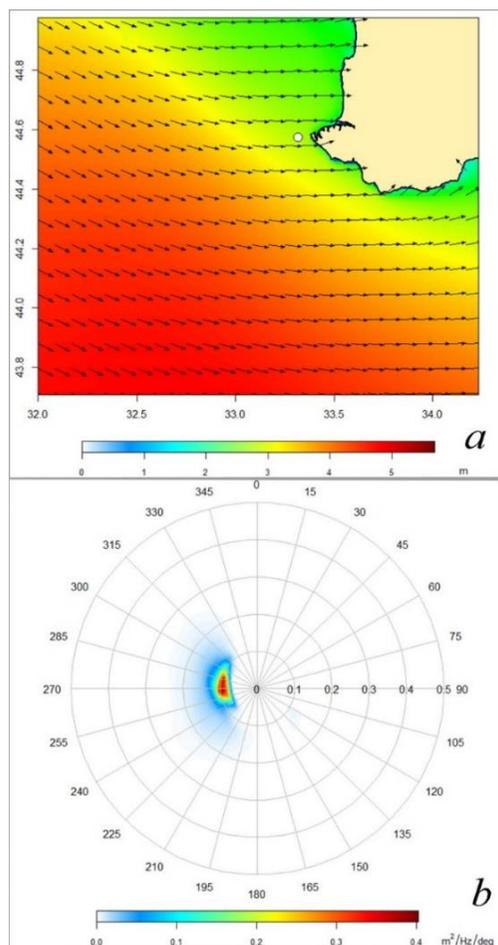
Координаты точек, в которых выводятся данные о частотно-угловом спектре волнения, следующие:

Номер узла	1	2	3	4	5
° в. д.	33,318909	32,919743	32,922863	33,342297	33,785118
° с. ш.	44,574348	44,574348	44,242233	44,270298	44,278095

Все результаты тестовых расчетов с июля 2017 по июнь 2019 г. хранятся в локальном архиве ЦЦМП.

Результаты расчетов полей параметров морских волн записываются в файлы формата *NetCDF*. Периодичность выдачи результатов – 1 ч, в каждом файле хранятся данные на одни сутки прогноза. Для визуализации результатов прогноза волнения были разработаны программные средства, написанные на

языке программирования R^2 . Один из примеров визуализации результатов прогноза морского волнения для Севастопольского региона показан на рис. 2.



Р и с. 2. Пример визуализации результатов прогноза морского волнения для Севастопольского региона за 19.01.2018 г: *a* – высота значительных волн (цвет) и среднее направление распространения волн (стрелки); *b* – частотно-угловой спектр в точке, отмеченной белым кружком на части *a* рис. 2

F i g. 2. Example of visualizing the results of the sea waves forecast for the Sevastopol region for 19.01.2018: *a* – the height of significant waves (color) and the average direction of wave propagation (arrows); *b* – the frequency-angular spectrum at the point marked with a white circle in Fig. 2, *a*

3. Данные спутниковых измерений, используемые для настройки модели и валидации результатов прогноза морского волнения

Одна из важных задач, связанная с модернизацией системы прогноза волнения, касается сопоставления результатов прогнозов с данными наблюдений.

² R: A language and environment for statistical computing / The R Core Team. Vienna, Austria : R Foundation for Statistical Computing, 2016. URL: <https://www.R-project.org/> (date of access: 20.09.2021).

В настоящее время для наблюдения за морским волнением применяются различные варианты измерительной аппаратуры. В районах, сравнительно мало удаленных от берега, используются данные натуральных измерений, получаемых с волновых буев [16, 17], лазерных уровнемеров и ультразвуковых волнографов. Могут быть использованы также данные береговых радиолокационных станций, предназначенных для измерений характеристик морского волнения, и струнных волнографов. Однако мы не располагаем ни одним из этих источников данных. Поэтому с результатами прогнозов были сопоставлены данные о высотах значительных волн, получаемые с помощью методов, основанных на спутниковых альтиметрических измерениях.

Были подготовлены архивы данных спутниковых альтиметрических измерений высоты значительных волн за 2017–2019 гг. Созданные архивы данных содержат продукт *Global ocean L3 significant wave height from NRT satellite measurements*³ Европейской системы центров морских прогнозов *Copernicus*⁴. Всего с июля 2017 по июнь 2019 г. над акваторией Севастопольского региона было выполнено около 6000 альтиметрических измерений высот волн со спутников *CryoSat-2*, *Jason-3*, *Sentinel-3A* и *AltiKa*. Над бассейном Черного моря за этот же период было выполнено около 139000 альтиметрических измерений.

4. Особенности предлагаемой процедуры настройки модели SWAN

Результаты валидации базовой версии системы для акватории Черного моря, приведенные в работе [11], и аналогичным образом выполненной валидации модифицированной системы для акваторий Черного моря и Севастопольского региона по данным альтиметрических измерений за 2017–2019 гг. показали заметное занижение расчетных значений высоты значительных волн по отношению к данным спутниковых измерений в условиях умеренного и сильного волнения. Этот эффект отмечается не только в полученных нами результатах, но и в других работах. Например, в работах [16, 17] предполагается, что он связан с недостаточной точностью задания параметров модели в источниках, описывающих генерацию и диссипацию волновой энергии в акватории Черного моря. Эта проблема решается путем дополнительной настройки параметров модели с использованием данных *in situ* и спутниковых альтиметрических измерений высот значительных волн.

В большинстве волновых моделей и, в частности, в модели *SWAN* основной параметр, ответственный за генерацию и диссипацию волн, – скорость трения ветра u_* , который рассчитывается на основе данных атмосферных моделей о скорости приповерхностного ветра V . Расчет значения u_* выполняется по формуле $u_*^2(V) = C_d(V, \alpha_1, \dots, \alpha_n)V^2$, где C_d – коэффициент трения воздуха; α_i – числовые параметры. В модели *SWAN* зависимость $C_d(V, \alpha_1, \dots, \alpha_n)$ задана квадратичной функцией с фиксированными коэффициентами, изменение которой, в отличие от параметров в источниках, описывающих генерацию и диссипацию волновой энергии, не предусмотрено. Но на самом деле коэффициент

³ URL: ftp://nrt.cmems-du.eu/Core/WAVE_GLO_WAV_L3_SWH_NRT_OBSERVATIONS_014_001/dataset-wav-alti-l3-swh-rt-global-al/ (дата обращения: 20.09.2021).

⁴ URL: <http://marine.copernicus.eu/documents/QUID/CMEMS-WAV-QUID-014-001.pdf> (дата обращения: 20.09.2021).

C_d известен почти с той же степенью неопределенности [18–22], что и параметры математических моделей, описывающих диссипацию и генерацию морских волн. Неопределенность значения C_d особенно характерна для прибрежных районов, находящихся на удалении до 100–200 км от побережья. Вблизи берегов проявляются эффекты стратификации приповерхностного слоя воздуха и специфические особенности взаимодействия приповерхностного слоя атмосферы и подстилающей поверхности, присущие каждому отдельному локальному прибрежному району, в котором выполняются прогностические расчеты волнения. Их описание приведено, например, в [23–25]. Они в той или иной мере должны влиять на характер зависимости $C_d(V)$, и их необходимо учитывать при выполнении расчетов морского волнения.

С учетом вышеизложенного представляет интерес опробовать процедуру настройки волновой модели *SWAN*, основанную на варьировании формы и параметров зависимости $C_d(V, \alpha_1, \dots, \alpha_n)$. Настройка и контроль точности в рамках предлагаемого способа основаны на единственном доступном нам источнике информации о волнении в Севастопольском районе и Черном море – данных спутниковых альтиметрических измерений высоты значительных волн. Согласно [24], их достоверность примерно соответствует точности контактных измерений высоты значительных волн с морских платформ⁵. Так как пространственное разрешение данных о волнении, получаемых со спутниковых альтиметров, составляет 7 км, то, строго говоря, эта модель может быть применима в условиях однородности поля высот морских волн на масштабах 7–10 км.

Предлагаемая процедура настройки имеет ряд общих черт с процедурами контроля точности прогноза высот волн [9, 11, 16, 17]. В ходе ее выполнения также формируется совместная выборка данных, содержащая результаты расчетов высот значительных волн и соответствующих им спутниковых измерений. По этим совместным измерениям оцениваются статистические критерии для отклонений между рассчитанными и измеренными высотами значительных волн, используемые для контроля за изменением точности расчетов в процессе настройки модели. При формировании совместной выборки в [11] данные модельных расчетов линейно интерполировались по пространству и времени на точки и моменты выполнения дистанционных измерений. Аналогичная процедура использована и в настоящей статье.

При выполнении настройки модели возникает дополнительная проблема. Она связана с тем, что, в силу естественной изменчивости ветра и высот значительных волн, в получаемой совместной выборке содержится чрезмерно много данных, соответствующих слабому волнению с высотами значительных волн, меньшими 1–1,5 м. В результате нарушается репрезентативность по отношению к условиям умеренного и сильного волнения. Поэтому, если выполнять настройку по таким полным выборкам совместных измерений, окажется, что модель в условиях слабого волнения будет работать хорошо, а в условиях сильного – неудовлетворительно. Одно из возможных решений состоит в том, чтобы из имеющихся данных оставить совместные измерения только за те дни,

⁵ URL: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-3-altimetry> (дата обращения: 20.21.2021).

когда, согласно спутниковым данным и модельным расчетам по действующей оперативной модели [11], наблюдается достаточно высокая частота повторения условий умеренного и сильного волнения. В результате объем совместной выборки уменьшается на порядок, но эффективность настройки модели для ситуаций сильного волнения существенно улучшается без ухудшения результатов для ситуаций с малыми высотами значительных волн. Дополнительно к этому примерно на порядок уменьшается время, затрачиваемое на выполнение расчетов. Сказанное будет подтверждено результатами нашей работы, приведенными далее.

Предлагаемая процедура настройки сводится к варьированию параметров зависимости $C_d(V, \alpha_1, \dots, \alpha_n)$ таким образом, чтобы обеспечить минимальное значение индекса рассеяния [11] между расчетными и измеренными высотами значительных волн. Оптимизация по этому критерию выполняется при дополнительных условиях малости величины систематического отклонения и коэффициента корреляции Cor_E между отклонениями высот значительных волн от значений, полученных по данным спутниковых измерений, а также при ограничениях, накладываемых на функциональную зависимость $C_d(V, \alpha_1, \dots, \alpha_n)$ известными теоретическими представлениями и экспериментальными данными о ней [22, 23]. Это гарантирует оптимальность настройки модели по критерию минимума индекса рассеяния и одновременно отсутствие большого систематического смещения и линейного тренда отклонений расчетных высот волн относительно измеренных значений при сохранении физической допустимости используемой параметризации. Благодаря этому линейная регрессия рассчитанных высот волн на их измеренные значения приближается к функции, график которой соответствует равным величинам расчетных и измеренных высот волн, а коэффициент корреляции между расчетными и измеренными высотами значительных волн оказывается максимально близким к 1. При этом остальные параметры модели *SWAN* остаются без изменения – с заданными в базовой версии нашей прогностической системы значениями [11].

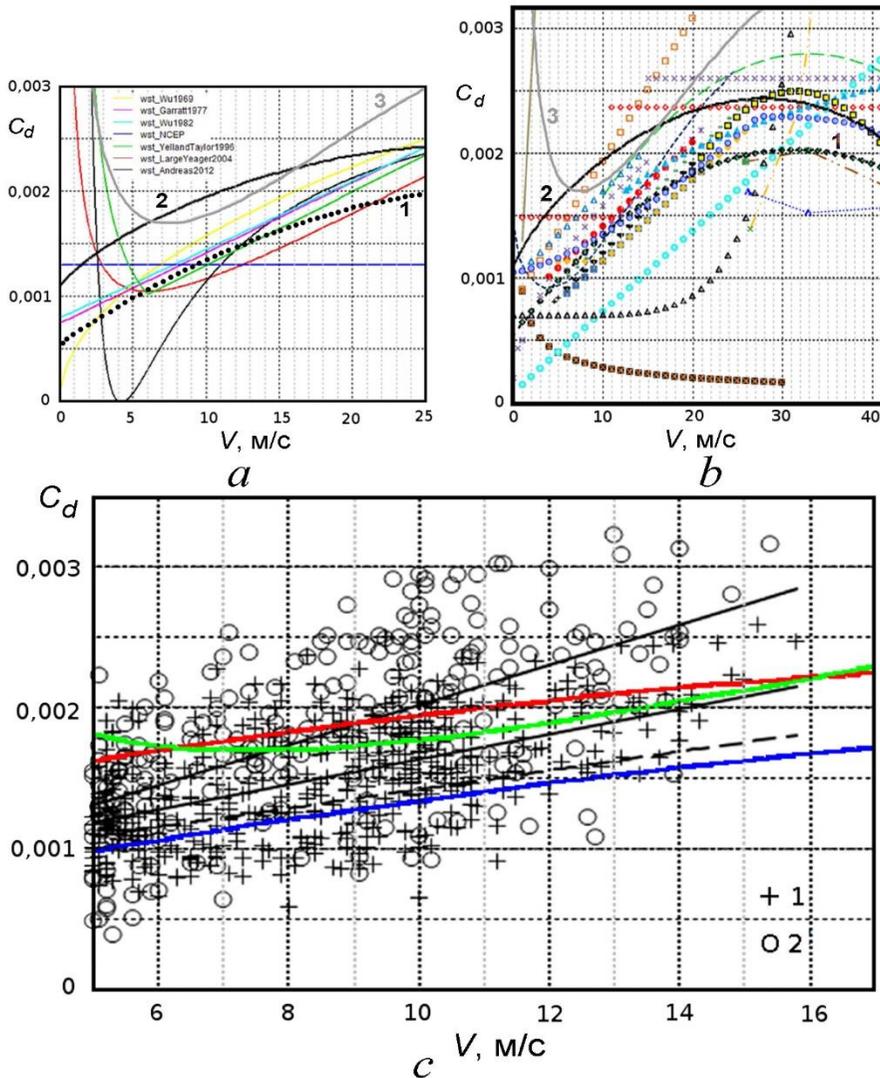
Коэффициент корреляции между отклонениями высот значительных волн от величин, полученных по данным спутниковых измерений Cor_E , рассчитывается по формуле

$$Cor_E = \frac{\sum_{i=1}^N (SWH_{Mi} - \overline{SWH}_M - SWH_{Si} + \overline{SWH}_S)(SWH_{Si} - \overline{SWH}_S)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (SWH_{Mi} - \overline{SWH}_M - SWH_{Si} + \overline{SWH}_S)^2 \sum_{i=1}^N (SWH_{Si} - \overline{SWH}_S)^2}}. \quad (1)$$

В формуле (1) SWH_{Mi} и SWH_{Si} – i -ая пара соответствующих друг другу рассчитанных и измеренных высот волн; \overline{SWH}_M и \overline{SWH}_S – соответственно рассчитанные и измеренные высоты значительных волн, усредненные по выборке. Остальные упоминаемые статистические характеристики вычисляются по формулам, приведенным в [11, 17].

Нами рассматриваются три варианта параметризации зависимости $C_d(V, \alpha_1, \dots, \alpha_n)$. Вариант В1 соответствует функции $C_{d1}(V) = \alpha_1 + \alpha_2 V + \alpha_3 V^2$ со значениями α_i , заданными, как в модели *SWAN*. В варианте В2 зависимость $C_{d2}(V, \alpha_1, \dots, \alpha_n) = \alpha_1 + \alpha_2 V + \alpha_3 V^2$ была выбрана качественно соответствующей зависимости, используемой в модели *SWAN* (вогнутая парабола), но коэф-

коэффициенты $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ подбирались на основе процедуры оптимизации, изложенной выше. Для варианта В3 зависимость $C_{d3}(V, \alpha_1, \dots, \alpha_n) = \alpha_1/V + \alpha_2 + \alpha_3 V$ выбрана в соответствии с [23], а оптимальные коэффициенты подбирались таким же образом, как в варианте В2. Нами рассмотрен также вариант В3, так как параметризации подобного вида встречаются в ряде работ, посвященных изучению зависимости коэффициента трения от скорости ветра. Некоторые из этих работ цитируются в [18] и приводятся в нашей работе на рис. 3.



Р и с. 3. Зависимость коэффициента $C_d(V)$ согласно данным из работы [18, с. 293] (a); отчета [19, с. 3] (b); статьи [25, с. 58] (c)

Fig. 3. Dependence of the coefficient $C_d(V)$ according to the data from [18, p. 293] (a), [19, p. 3] (b), [25, p. 58] (c)

На старте процедуры настройки необходимо задать вид функциональной зависимости коэффициента поверхностного трения $C_{dt}(V, \alpha_1, \dots, \alpha_n)$, где $t = 2$ или $t = 3$, а также начальные значения параметров α_i и осуществить прогностические расчеты по акваториям Черного моря и Севастопольского региона с последующей оценкой критериев оптимизации. Затем для поиска оптимальных значений коэффициентов α_i необходимо выполнить их направленное изменение, используя какую-либо процедуру оптимизации величин α_i по выбранному критерию с учетом принятых ограничений, упомянутых выше, с проведением расчетов и оценки статистических характеристик отклонений для вновь выбираемых значений параметров. В результате циклического повторения этих действий формируется набор статистик отклонений прогностических величин значительных высот волн от их измеренных значений с последовательно уменьшающимся коэффициентом рассеяния. По достижении приемлемого результата выполнение процедуры следует остановить.

5. Результаты настройки модели

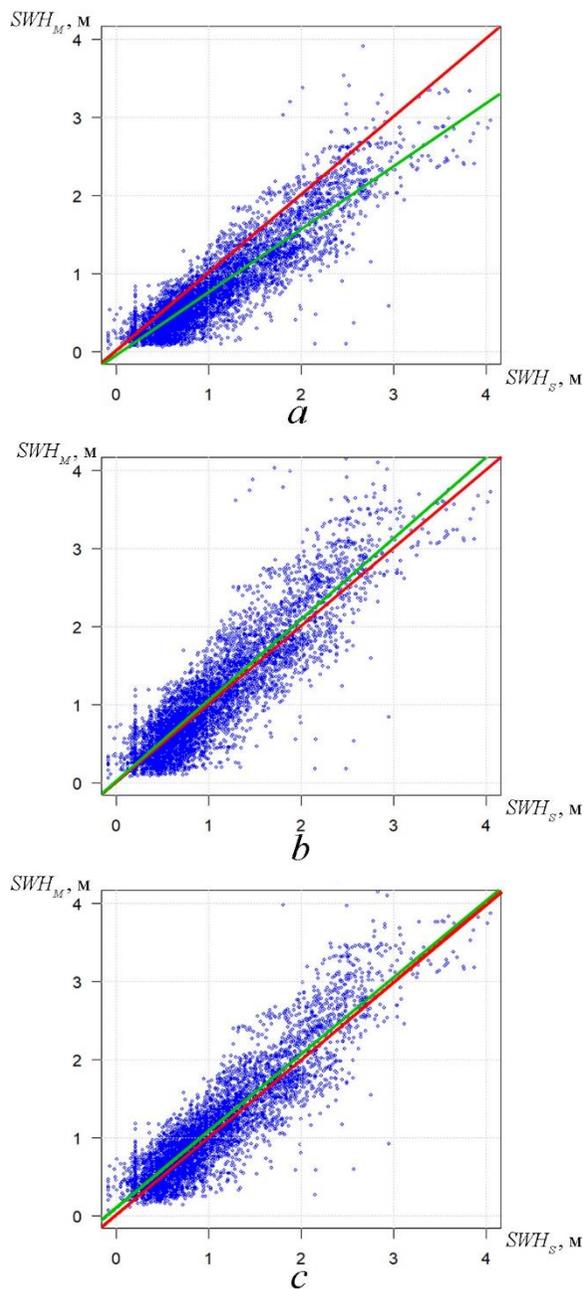
Предлагаемая процедура настройки применялась только для Севастопольского региона. В ходе ее практической реализации, чтобы обойти необходимость вносить изменения в текст программы модели SWAN, исходная зависимость заменялась следующим образом. Вместо исходных значений вектора скорости ветра на вход модели подавались трансформированные величины: направление вектора скорости не изменялось, а его модуль определялся в соответствии с соотношением $V_t = V\sqrt{C_{dt}(V, \alpha_1, \dots, \alpha_n)/C_{d1}(V)}$. Отметим, что приведенная формула преобразования скорости ветра может быть обобщена, но в данной статье мы этого делать не будем. Нетрудно показать, что при такой замене скорость трения ветра, используемая при моделировании, определяется в соответствии с формулой

$$u_{*t}^2 = C_{d1}(V_t) \cdot V_t^2 = C_{dt}(V, \alpha_1, \dots, \alpha_n) \cdot \frac{C_{d1}(V_t)}{C_{d1}(V)} \cdot V^2 = \hat{C}_{dt}(V, \alpha_1, \dots, \alpha_n) \cdot V^2. \quad (2)$$

Формула (2) указывает на то, что трансформация модуля скорости ветра эквивалентна трансформации $C_d(V)$, и наоборот. Таким образом, ошибки прогноза скорости ветра могут быть до некоторой степени скомпенсированы трансформацией коэффициента поверхностного трения в соответствии с (2). Из (2) также следует, что результаты настройки модели путем коррекции $C_d(V)$ зависят от используемого источника данных о скорости ветра.

В формуле (2) величина $C_{d1}(V_t)/C_{d1}(V)$ при скоростях ветра до 30 м/с и физически допустимых ограничениях на коэффициенты α_i , учитываемых в процессе настройки, изменяется мало и функции $\hat{C}_{dt}(V, \alpha_1, \dots, \alpha_n)$ и $C_{dt}(V, \alpha_1, \dots, \alpha_n)$ слабо отличаются друг от друга. Следовательно, замена исходной зависимости $C_{dt}(V, \alpha_1, \dots, \alpha_n)$ на трансформированную

$\hat{C}_{dt}(V, \alpha_1, \dots, \alpha_n)$ не приведет к заметному ухудшению оптимизируемого критерия. Ниже это подтверждается результатами, представленными на рис. 3, 4, и в табл. 2.



Р и с. 4. Диаграммы рассеяния между прогностическими (SWH_M) и измеренными (SWH_S) высотами значительных волн в Севастопольском регионе Черного моря: a – вариант B1; b – вариант B2; c – вариант B3

F i g. 4. Diagrams of scattering between the forecasted (SWH_M) and measured (SWH_S) heights of significant waves in the Sevastopol region of the Black Sea: a – variant B1; b – variant B2; c – variant B3

На рис. 3 приведены полученные нами зависимости $\hat{C}_{dt}(V, \alpha_1, \dots, \alpha_n)$ в сопоставлении с данными из других литературных источников. Рис. 3, *a* приведен в работе [18, с. 293], рис. 3, *b* – в работе [19, с. 3], рис. 3, *c* – в работе [25, с. 58]. На рис. 3, *a* и *b* дополнительно кривыми 1–3 показаны зависимости $C_d(V)$, полученные нами для вариантов В1 – В3 соответственно. На рис. 3, *c* зависимости $C_d(V)$ для вариантов В2 и В3 показаны красной и зеленой кривыми соответственно. Синей кривой показана зависимость $C_d(V)$, используемая в модели SWAN.

Анализируя информацию, представленную на рис. 3, *a, b*, можно сделать вывод о том, что полученные параметризации зависимостей $C_d(V)$ для вариантов В2 и В3 соответствуют современным представлениям о характере этой зависимости. В целом в диапазоне скоростей ветра от 0 до 30 м/с величины коэффициентов трения $\hat{C}_{dt}(V, \alpha_1, \dots, \alpha_n)$ превышают соответствующие значения $C_{d1}(V)$. Для варианта В2 максимальная величина $\hat{C}_{d2}(V, \alpha_1, \dots, \alpha_n)$ достигается при скорости ветра 28 м/с, в то время как для исходной параметризации $C_{d1}(V)$ – при скорости ветра 31,5 м/с. Для варианта В3 значения $\hat{C}_{d2}(V, \alpha_1, \dots, \alpha_n)$ превосходят значения $C_d(V)$, соответствующие параметризации [23], которая показана кривой красного цвета на рис. 3, *a*. Минимальное значение величины $\hat{C}_{d2}(V, \alpha_1, \dots, \alpha_n)$ достигается при скорости ветра 7,5 м/с, а при параметризации [23] оно достигается при $V = 6$ м/с. Крутизна кривой $\hat{C}_{d2}(V, \alpha_1, \dots, \alpha_n)$ при больших значениях скорости ветра слегка превышает крутизну кривой $C_d(V)$ при параметризации [23].

Особое внимание хотелось бы обратить на рис. 3, *c*. Здесь приведены результаты сопоставления полученных нами зависимостей $C_d(V)$ с данными статьи [25], полученными в ходе экспериментальных работ на морской платформе в районе Южного берега Крыма (пгт. Кацивели, платформа удалена от берега на расстояние 600 м), который находится в рассматриваемом нами Севастопольском регионе. Результаты, представленные на рис. 3, *c*, показывают, что зависимости $C_d(V)$, соответствующие вариантам В2 и В3 в диапазоне скоростей ветра от 8 до 16 м/с, согласуются с полученными в экспериментах значениями коэффициента трения лучше, чем зависимость, используемая в модели SWAN.

Результаты сопоставления высот волн, рассчитанных с новыми зависимостями $C_d(V)$, полученными в результате настройки модели, показывают значительное уменьшение систематических отклонений расчетных высот значительных волн от измеренных. Это подтверждается примерами для Севастопольского региона, приведенными на рис. 4 и в табл. 2.

На рис. 4 представлены три диаграммы рассеяния расчетных и спутниковых высот значительных волн для Севастопольского региона. Прямыми красного цвета показаны линии равных значений рассчитанных и измеренных высот волн, прямыми зеленого цвета – графики регрессии рассчитанных высот значительных волн на измеренные величины. Варианту В1, представленному на рис. 4, *a*, соответствует зависимость $C_{d1}(V)$, используемая в модели SWAN. График зависимости $C_{d1}(V)$, соответствующий варианту В1, показывает упомянутое ранее существенное занижение высоты значительных волн при уме-

ренных и сильных ветрах. Рис. 4, *b* соответствует варианту В2; рис. 4, *c* иллюстрирует результаты, полученные на основе варианта В3. Результаты, приведенные на рис. 4, *c* и в табл. 2, показывают, что индекс рассеяния между расчетными и измеренными высотами волн для варианта В3 на 11 % меньше, чем для варианта В2, и на 20 % меньше, чем индекс рассеяния, полученный для варианта В1. Для варианта В3 в Севастопольском регионе величина индекса рассеяния составляет 0,29, что соответствует результатам работ других авторов [16, 17, 26–32], а в ряде случаев лучше.

Т а б л и ц а 2
T a b l e 2

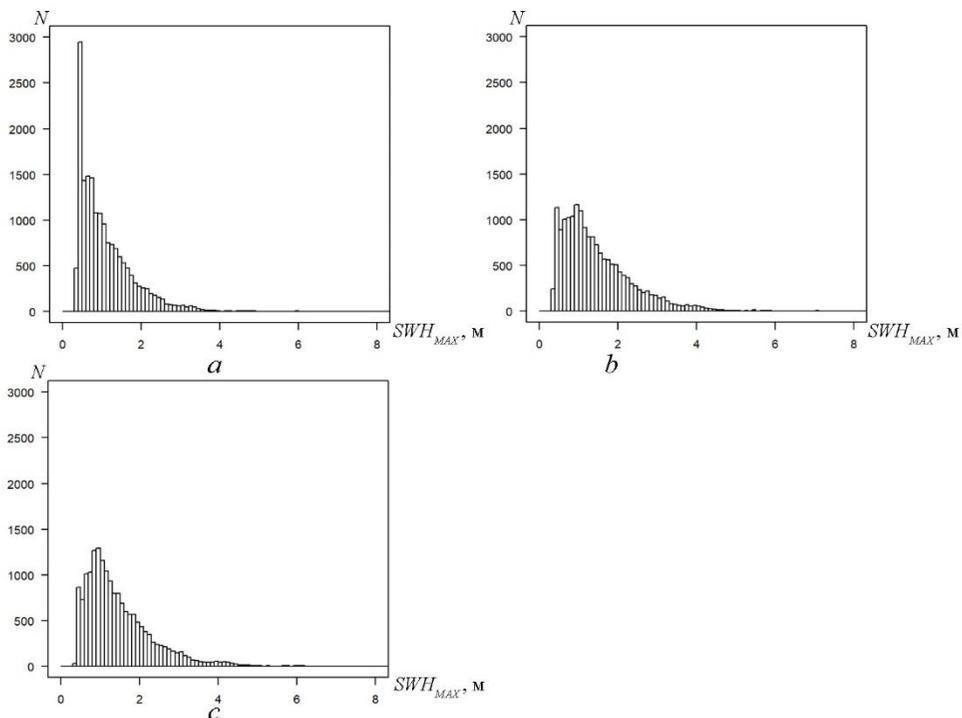
Статистические характеристики разностей между прогностическими и измеренными значениями высоты ветровых волн в Черном море
Statistical characteristics of the differences between the forecasted and measured values of the wind wave heights in the Black Sea

Регион / Region	Вариант / Variant	N_{obs}	SI	$Bias$	Cor_E	$RMSE$	Cor_{SWH}	a	b
Севастопольский / Sevastopol	В1	5996	0,363	-0,255	-0,443	0,384	0,900	0,807	-0,050
	В2	6004	0,327	0,044	0,073	0,347	0,894	1,038	0,003
	В3	5991	0,292	0,072	-0,033	0,308	0,907	0,985	0,087
Черное море / Black Sea	В1	138782	0,399	-0,253	-0,534	0,396	0,892	0,758	-0,012
	В2	138819	0,338	0,027	-0,067	0,336	0,890	0,966	0,060
	В3	138758	0,320	0,066	-0,134	0,317	0,898	0,938	0,127

Пр и м е ч а н и е : N_{obs} – число альтиметрических измерений высоты значительных волн; SI – индекс рассеяния между прогностическими и измеренными высотами значительных волн; $Bias$ – систематическое отклонение между прогностическими и измеренными высотами значительных волн SWH ; Cor_E – коэффициент корреляции между отклонениями и измеренными величинами SWH ; $RMSE$ – среднеквадратичное отклонение; Cor_{SWH} – коэффициент корреляции между прогностическими и измеренными SWH ; a и b – коэффициенты наклона и смещения регрессионной прямой соответственно.

Н о т е : N_{obs} is the number of altimetry measurements of the significant wave heights; SI is the scattering index between the forecasted and measured significant wave heights; $Bias$ is the systematic deviation between the forecasted and measured heights of significant waves SWH ; Cor_E is the correlation coefficient between the deviations and the measured values SWH ; $RMSE$ is the standard deviation; Cor_{SWH} is the correlation coefficient between the forecasted and measured SWH ; a and b are the slope and displacement coefficients of the regression line, respectively.

На рис. 5 показаны гистограммы распределения ежечасных максимальных величин значительных волн в акватории Севастопольского региона, полученных по результатам расчетов для трех вариантов задания зависимости $C_d(V)$ с июля 2017 по июнь 2019 г. Результаты, представленные на рис. 5, демонстрируют существенную недооценку высот значительных волн, рассчитанных по модели со стандартной зависимостью $C_d(V)$ (вариант В1). В то же время для вариантов В2 и В3, по нашему мнению, распределение максимальных высот значительных волн имеет более реалистичный характер.



Р и с. 5. Гистограммы максимальных высот волн в акватории Севастопольского региона 01.07.2017 – 01.07.2019 гг.: *a* – вариант B1; *b* – вариант B2; *c* – вариант B3

F i g. 5. Histograms of the wave maximum heights in the Sevastopol water area, 01.07.2017 – 01.07.2019: *a* – variant B1; *b* – variant B2; *c* – variant B3

Достоверность результатов диагноза и прогноза может быть улучшена путем внесения изменений в программный код модели *SWAN*. Внесение этих изменений позволит обеспечить возможность задавать различные функциональные зависимости $C_d(V)$ и привлекать данные измерений других характеристик морского волнения.

6. Выводы

Модернизированная система обеспечивает прогноз ветрового волнения в Севастопольском регионе с высоким пространственным разрешением. Она может быть легко адаптирована для выполнения прогнозов в других прибрежных районах Черного моря. Апробированная процедура настройки модели *SWAN*, основанная на изменении параметризации коэффициента поверхностного трения $C_d(V)$, позволяет уменьшить отклонения высот значительных волн, полученных на основе прогностических расчетов, от измеренных с помощью спутниковых альтиметров величин. Индекс рассеяния между расчетными и измеренными высотами волн при настройке формы и коэффициентов зависимости $C_d(V)$ может быть уменьшен на 20 % по сравнению с исходной параметризацией, используемой в модели *SWAN*. Предложенная процедура настройки модели зависит от используемого источника данных о скорости

ветра, поэтому при его замене она должна быть выполнена заново. Полученные результаты настройки модели в дальнейшем возможно уточнить и улучшить.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The WAM model – a third generation ocean wave prediction model / the WAMDI group // Journal of Physical Oceanography. 1988. Vol. 18, iss. 12. P. 1775–1810. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1988\)018<1775:TWMTGO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1988)018<1775:TWMTGO>2.0.CO;2)
2. Tolman H. L. A third-generation model for wind waves on slowly varying, unsteady, and inhomogeneous depths and currents // Journal of Physical Oceanography. 1991. Vol. 21, iss. 6. P. 782–797. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1991\)021<0782:ATGMFW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1991)021<0782:ATGMFW>2.0.CO;2)
3. SWAN Cycle III version 42.10 : Scientific and Technical Documentation. Delft, Netherlands : Delft University of Technology, 2016. 132 p.
4. Valchev N. N., Trifonova E. V., Andreeva N. K. Past and recent trends in the western Black Sea storminess // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2012. Vol. 12, iss. 4. P. 961–977. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-961-2012>
5. Математическое моделирование ветрового волнения в Севастопольской бухте / Д. В. Алексеев [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2012. № 1. С. 75–84.
6. Wind waves in the Black Sea: results of a hindcast study / V. S. Arkhipkin [et al.] // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2014. Vol. 14, iss. 11. P. 2883–2897. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-2883-2014>
7. Rusu L., Bernardino M., Guedes Soares C. Wind and wave modelling in the Black Sea // Journal of Operational Oceanography. 2014. Vol. 7, iss. 1. P. 5–20. <https://doi.org/10.1080/1755876X.2014.11020149>
8. Van Vledder G. Ph., Akpınar A. Wave model predictions in the Black Sea: Sensitivity to wind fields // Applied Ocean Research. 2015. Vol. 53. P. 161–178. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2015.08.006>
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. Дивинский Б. В., Косьян Р. Д. Волновой климат прибрежной зоны Крымского полуострова // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34, № 2. С. 101–110. [doi:10.22449/0233-7584-2018-2-101-110](https://doi.org/10.22449/0233-7584-2018-2-101-110)
11. Система оперативного прогноза ветрового волнения Черноморского центра морских прогнозов / Ю. Б. Ратнер [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2017. № 5. P. 56–66. [doi:10.22449/0233-7584-2017-5-56-66](https://doi.org/10.22449/0233-7584-2017-5-56-66)
12. Оперативная система диагноза и прогноза гидрофизических характеристик Черного моря / Г. К. Коротаяев [и др.] // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52, № 5. С. 609–617. [doi:10.7868/S0002351516050072](https://doi.org/10.7868/S0002351516050072)
13. Grant W. D., Madsen O. S. Combined wave and current interaction with a rough bottom // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1979. Vol. 84, iss. C4. P. 1797–1808. <https://doi.org/10.1029/JC084iC04p01797>
14. The weather forecasting system for Poseidon – An overview / A. Papadopoulos [et al.] // Journal of Atmospheric & Ocean Science. 2002. Vol. 8, iss. 2–3. P. 219–237. <https://doi.org/10.1080/1023673029000003543>
15. Иванчик А. М. Управление функционированием автоматизированных систем морского прогноза // Современные проблемы гуманитарных и естественных наук : материалы XX международной научно-практической конференции, 2–3 октября 2014 г. М. : Научно-информационный издательский центр «Институт стратегических исследований», 2014. С. 56–61.
16. 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. ES5002. [doi:10.2205/2016es000579](https://doi.org/10.2205/2016es000579)

17. *Akpınar A., Ponce de León S.* 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. <https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2015.12.002>
18. *Wróbel-Niedźwiecka I., Drozdowska V., Piskozub J.* Effect of drag coefficient formula choice on wind stress climatology in the North Atlantic and the European Arctic // *Oceanologia*. 2019. Vol. 61, iss. 3. P. 291–299. doi:10.1016/j.oceano.2019.02.002
19. *Sterl A.* Drag at high wind velocities – a review : final version / Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut. De Bilt : KNMI, 2017. 33 p. (Technical report ; TR-361). URL: <http://publicaties.minienm.nl/documenten/drag-at-high-wind-velocities-a-review> (date of access: 16.08.2021).
20. *Huang C. H.* Modification of the Charnock wind stress formula to include the effects of free convection and swell // *Advanced methods for practical applications in Fluid Mechanics* / Steven Jones (Ed.). Rijeka : InTech, 2012. P. 47–70. doi:10.5772/27003
21. *Andreas E. L., Mahrt L., Vickers D.* A new drag relation for aerodynamically rough flow over the ocean // *Journal of the Atmospheric Sciences*. 2012. Vol. 69, iss. 8. P. 2520–2537. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-11-0312.1>
22. On the exchange of momentum over the open ocean / J. B. Edson [et al.] // *Journal of Physical Oceanography*. Vol. 43, iss. 8. P. 1589–1610. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-12-0173.1>
23. *Large W. G., Yeager S.* Diurnal to decadal global forcing for ocean and sea-ice models: The data sets and flux climatologies. Boulder, USA : National Center for Atmospheric Research, 2004. 112 p. (NCAR TECHNICAL NOTE ; NCAR/TN-460+STR). doi:10.5065/D6KK98Q6
24. Wave modelling in coastal and inner seas / L. Cavaleri [et al.] // *Progress in Oceanography*. 2018. Vol. 167. P. 164–233. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2018.03.010>
25. Экспериментальное исследование коэффициента сопротивления морской поверхности при сильных ветрах / И. А. Репина [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2015. № 1. P. 53–63. doi:10.22449/0233-7584-2015-1-53-63
26. Система прогнозирования ветрового волнения в Мировом океане и морях России / А. А. Зеленько [и др.] // *Труды Государственного океанографического института*. М., 2014. Вып. 215 : Исследования океанов и морей. С. 90–101.
27. *Dimitrova M., Kortcheva A., Galabov V.* Validation of the operational wave model WAVEWATCH III against altimetry data from JASON-2 satellite // *Bulgarian Journal of Meteorology and Hydrology*. 2013. Vol. 18, iss. 1–2. P. 4–17.
28. Система прогнозирования характеристик ветрового волнения и результаты ее испытаний для акваторий Азовского, Черного и Каспийского морей / Б. С. Струков [и др.] // *Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов : Информационный сборник / под редакцией канд. геогр. наук А. А. Алексеевой*. М. ; Обнинск : ИГ–СОЦИН, 2013. № 40. С. 64–79. URL: <http://method.meteorf.ru/publ/sb/sb40/sb40.pdf> (дата обращения: 20.09.2021).
29. *Столярова Е. В., Мысленков С. А.* Прогноз ветрового волнения высокого пространственного разрешения в Керченском проливе // *Труды гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации*. М. : ТРИАДА ЛТД, 2015. Вып. 354. С. 24–35. URL: <http://method.meteorf.ru/publ/tr/tr354/tr354.pdf> (дата обращения: 13.08.2021).
30. Evaluation of the numerical wave model (SWAN) for wave simulation in the Black Sea / A. Akpınar [et al.] // *Continental Shelf Research*. 2012. Vol. 50–51. P. 80–99. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2012.09.012>
31. Setup and evaluation of a SWAN wind wave model for the Sea of Marmara / V. Kutupoğlu [et al.] // *Ocean Engineering*. 2018. Vol. 165. P. 450–464. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.07.053>
32. *Rusu E.* Wave energy assessments in the Black Sea // *Journal of Marine Science and Technology*. 2009. Vol. 14, iss. 3. P. 359–372. <https://doi.org/10.1007/s00773-009-0053-6>

Об авторах:

Ратнер Юрий Борисович, заведующий лабораторией морских прогнозов отдела динамики океанических процессов, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-9250-7743**, **ResearcherID: AAY-1101-2021**, yubrat@gmail.com

Фомин Владимир Владимирович, заведующий отделом вычислительной техники и математического моделирования, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-9070-4460**, v.fomin@ukr.net

Холод Антон Леонидович, научный сотрудник, отдел динамики океанических процессов, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат технических наук, **ORCID ID: 0000-0003-4694-8406**, **ResearcherID: ABA-3482-2020**, antonholod@mail.ru

Иванчик Антонина Михайловна, ведущий инженер-программист лаборатории морских прогнозов отдела динамики океанических процессов, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0003-4354-7965**, antonishka@gmail.com