

Научная статья

Численное моделирование гидродинамических волновых процессов в Азовском море на основе ветроволновой модели WAVEWATCH III

Е.А. Проценко¹, А.И. Сухинов², С.В. Проценко¹

¹ Таганрогский институт имени А.П. Чехова (филиал) Ростовского государственного экономического университета (РИНХ), Таганрог, Российская Федерация

² Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Статья посвящена исследованию возможностей современной версии ветроволновой модели третьего поколения WAVEWATCH III (WW3). Приведены основные уравнения модели и описана программная реализация. Проведен численный реанализ (повторный анализ с учетом изменения во времени) характеристик ветрового волнения в Азовском море, результаты моделирования сопоставлены с данными многолетних наблюдений гидрометеостанций на его берегах, хранящимися в базах данных Единой межведомственной федеральной информационной системы (ЕСИМО). Расчетные области, аппроксимирующие конфигурацию берегов и батиметрию реальных морских бассейнов, в прогностической модели представляют собой регулярные широтно-долготные сетки из элементов размером 1.2×1.2 град ($\sim 2 \times 2$ км). Необходимые для проведения расчетов батиметрия и соответствующая ей маска «суша–море» (двумерный массив значений, задающих принадлежность ячейки суше или морю) для каждого из бассейнов получены с использованием навигационных карт. При реанализе входная информация о ветре в узлах сетки формировалась исходя из многолетних климатических данных о его скорости в течение определенного месяца с 2008 по 2023 год. На основе спектральной модели WW3 осуществлен расчет параметров ветрового волнения в Азовском море. Построены прогностические карты ветрового волнения в течение среднего периода, средних длин и высот преобладающих волн в различные моменты времени. Необходимые для вычислений метеорологические поля (скорости ветра, температуры воды и воздуха) брались из баз данных системы Гидрометцентра России и Национальной администрации океанических и атмосферных исследований США. Найдены показатели эффективности при гибридном распараллеливании (MPI–OpenMP), определена масштабируемость как при MPI, так и при гибридных запусках.

Ключевые слова: математическое моделирование, модель WAVEWATCH III, гибридное распараллеливание, ретроспективный анализ, ветровое волнение, прогностические карты

Получение: 01.02.2024 / **Публикация онлайн:** 30.12.2024

УДК 519.6

1. Введение

Исследования ветрового волнения мелководных водоемов, как неотъемлемой составляющей прибрежных экосистем, важны для решения фундаментальных теоретических и прикладных задач природопользования. Достоверные оценки режимных характеристик колебаний водной поверхности под действием ветровых нагрузок необходимы для проектирования гидротехнических сооружений, для обеспечения безопасной морской деятельности, для решения задач судостроения.

Прогностическое моделирование ветрового волнения возможно с применением ветроволновых моделей третьего поколения, таких как WAVEWATCH III (WW3), WAM (WAve Model) и SWAN (Simulating WAVes Nearshore). Спектральная модель WW3 служит основой для численного определения параметров волн в океанах и других водоемах. Она разрабатывается и поддерживается Национальным центром по прогнозированию окружающей среды (NCEP), входящим в Национальную администрацию океанических и атмосферных исследований (NOAA) США [1–3]. Последняя версия WAVEWATCH III 6.07 выпущена в 2019 году и находится в открытом доступе на сайте разработчика [4].

В работе спектральная модель WW3 использована для получения ретроспективных прогнозов полей параметров построения прогностических карт ветрового волнения за 3, 6 и 9 ч с учетом текущей метеорологической обстановки. Входными данными для ретроспективных прогнозов ветрового волнения служили поля ветра за период с 2008 по 2023 год. В модельной конфигурации задавалась функция источника с установленным по умолчанию коэффициентом взаимодействия ветра и волн.

Проведена валидация модели по доступным альтернативным источникам информации о ветровом волнении: базам данных (БД) «Прибрежный массив среднесуточных значений высот волн в Азовском море» и «Климатические данные в узлах сетки: высота волн. Азовское море», предоставляемым Единой межведомственной федеральной информационной системой информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО) [5].

Как известно, точность моделирования оценивается: степенью совпадения реальных полей параметров, под действием которых развивается волнение, с вычисленными; принятой параметризацией ветроволнового взаимодействия, нелинейных процессов, диссипации и других источников; используемыми численными методами решения уравнений модели ветрового волнения. Качество существующих прогнозов определено путем верификации результатов вычислений на сведениях, имеющихся в БД измерений на судах и морских буях, на данных реанализа (повторного анализа архивных данных метеонаблюдений за требуемый временной период с помощью специальной программы), а также на данных дистанционного зондирования.

Работы, в которых проводится сравнение модельной и натурной информации, играют важную роль в развитии методов моделирования и калибровки существующих моделей [6–10]. Так, например, в работах [11–13]

сравниваются рассчитанные по модели значительные высоты волн и средний период волн с известными натурными данными.

В гидродинамических моделях, предназначенных для прогностического моделирования волнового движения необходимо учитывать как точность, так и результативность процесса счета. Модель WW3 обеспечивает выполнение этих запросов, но требует значительных вычислительных ресурсов, особенно при использовании более высокого пространственного разрешения или при осуществлении расчетов для глобальных прогнозов. Она позволяет выполнять гибридное распараллеливание для достижения вычислительной эффективности, то есть одновременно возможен межузловой и внутриузловой параллелизм.

Целью работы является изучение возможностей версии ветроволновой модели WW3 6.07. В статье представлены управляющие уравнения модели и структура программного комплекса, проведена верификация модели на основе ретроспективного анализа и сравнения с альтернативными измерениями, построены прогностические карты параметров ветрового волнения в Азовском море. Изложен алгоритм гибридного распараллеливания волновой спектральной составляющей модели (стандарт MPI–OpenMP), определена масштабируемость как при MPI, так и при гибридных запусах.

2. Управляющие уравнения модели WW3

Спектральные компоненты волн описываются с использованием нескольких фазовых и амплитудных параметров. Фазовыми параметрами являются вектор волнового числа, волновое число, направление и некоторые частоты. Чтобы принять во внимание влияние усредненного течения на волны, необходимо учитывать относительную и абсолютную частоты. Вводится предположение о медленно меняющихся глубинах и течениях, подразумевающее крупномасштабную батиметрию, при которой дифракцией волн, как правило, можно пренебречь. При принятом приближении же о медленно изменяющемся течении и глубине локально может быть применена теория квазиоднородных волн, согласно которой справедливы следующие соотношения [14]:

$$\sigma^2 = gk \tanh(kd), \tag{1}$$

$$\omega = \sigma + \mathbf{k} \cdot \mathbf{U}, \tag{2}$$

где \mathbf{k} — вектор волнового числа, k — волновое число, $\sigma = 2\pi f_r$ — относительная или собственная частота, $\omega = 2\pi f_a$ — абсолютная частота, d — средняя глубина воды, \mathbf{U} — вектор скорости течения (его компоненты усредняются по глубине и времени в масштабах отдельных волн), g — ускорение свободного падения. Определение \mathbf{k} и ω из фазовой функции волны или волновой составляющей подразумевает, что число гребней волны сохраняется:

$$\frac{\partial \mathbf{k}}{\partial t} + \nabla \omega = 0. \tag{3}$$

Из уравнений (1)–(3) можно рассчитать скорости изменения фазовых параметров.

Функцией всех независимых фазовых параметров является спектр плотности дисперсии высоты поверхности — $F(\mathbf{k}, \sigma, \omega)$, который изменяется в пространстве и во времени в масштабах больших, чем у отдельных волн. В WW3 основным спектром служит спектр волнового числа и направления $F(k, \theta)$, который был выбран вследствие неизменности его характеристик по отношению к показателям роста и затухания волн для переменных глубин воды. Выходные данные WW3, однако, состоят из более традиционного спектра — спектра частот и направления $F(f_r, \theta)$. Другие спектры вычисляются на основе $F(k, \theta)$:

$$F(f_r, \theta) = \frac{\partial k}{\partial f_r} F(k, \theta) = \frac{2\pi}{c_g} F(k, \theta), \tag{4}$$

$$F(f_a, \theta) = \frac{\partial k}{\partial f_a} F(k, \theta) = \frac{2\pi}{c_g} \left(1 + \frac{\mathbf{k} \cdot \mathbf{U}}{kc_g} \right)^{-1} F(k, \theta), \tag{5}$$

$$c_g = \frac{\partial \sigma}{\partial k} = n \frac{\sigma}{k}, \quad n = \frac{1}{2} + \frac{kd}{\operatorname{sh}(2kd)}, \tag{6}$$

где θ — направление, перпендикулярное гребню волны (или спектральной составляющей), c_g — групповая скорость.

Распространение волн описывается формулой:

$$\frac{DN}{Dt} = \frac{S}{\sigma}, \tag{7}$$

где D/Dt — полная производная от некоторого спектра N , а S представляет собой суммарный эффект источников взаимодействия (далее функция источников) для спектра F . Поскольку левая часть уравнения (7) в целом рассматривает линейное распространение без рассеяния, в S возникают эффекты нелинейного распространения волн и частичных отражений волн.

Уравнение баланса для спектра $N(k, \theta; \mathbf{x}, t)$, используемое в модели WW3, имеет вид [14]:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \mathbf{x} \cdot \dot{\mathbf{x}} N + \frac{\partial}{\partial k} \dot{k} N + \frac{\partial}{\partial \theta} \dot{\theta} N = \frac{S}{\sigma}, \quad (8)$$

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{c}_g + \mathbf{U}, \quad (9)$$

$$\dot{k} = -\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial s} - \mathbf{k} \cdot \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial s}, \quad (10)$$

$$\dot{\theta} = -\frac{1}{k} \left[\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \mathbf{k} \cdot \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial m} \right]. \quad (11)$$

В стандартной форме функция источников S включает три вида взаимодействий: ветра и волн; волн с морем, при котором преобладают разбивающиеся волны, то есть имеет место диссипация их энергии; волновых процессов и донной поверхности. При изучении мелководных водоемов, подобных Азовскому морю, последнее взаимовлияние особо значимо. Таким образом, функция источников представляется так:

$$S = S_{ln} + S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{db} + S_{tr} + S_{sc} + S_{ref} + S_{user}, \quad (12)$$

где S_{ln} — линейный источник, необходимый для инициализации волны, то есть определяющий ее начальный рост, S_{in} — источник, описывающий взаимодействия ветра и волн (учитывается только доминирующий процесс), S_{nl} — источник нелинейных волновых взаимодействий, S_{ds} — источник взаимодействия волн с морем, S_{bot} — источник взаимодействия дна и волн, S_{db} — дополнительный критерий разлома (учитывает разрушение волн в зависимости от глубины), S_{tr} — триадные волновые взаимодействия, S_{sc} — рассеяние волн элементами дна искусственного происхождения, S_{ref} — источники энергии инфрагравитационных волн, S_{user} — дополнительные источники, задаваемые пользователем.

3. Структура модели WW3 (версия с общей памятью)

На рисунке 1 представлены основные элементы программы, файлы и подпрограммы, стрелками обозначены направления потоков данных при расчетах волнового процесса по версии с общей памятью [14]. Согласно программе модели WW3, ядром является подпрограмма wave model. Вспомогательные программы включают в себя препроцессор для работы с сеткой, программу для генерации начальных условий, программные оболочки для многосеточных приложений, два входных препроцессора и постпроцессоры для работы с сеткой и выходными данными. Сеточный препроцессор генерирует файл mod_def.ww3 с информацией о батиметрии дна и конструкциях на дне водоема. Для волновой модели начальные условия, находящиеся в файле restart.ww3, состоят из параметрической выборки с ограниченным спектром из БД о начальном поле ветра. Подпрограмма wave model считывает граничные условия из файла nest.ww3 и генерирует граничные условия для последовательных запусков

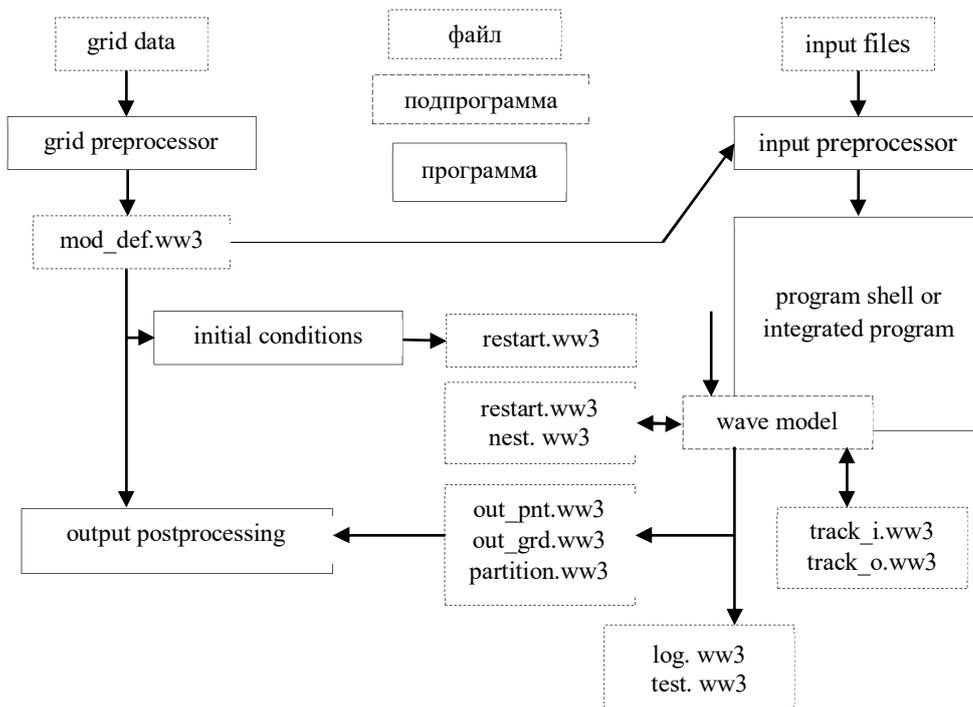


Рис. 1. Основные элементы программы для модели WW3 (показаны в соответствующих рамках)

в `nestn.ww3` (файл не приведен, так как схема отображает не все возможные функции модели, а лишь основные процессы. Повторное присутствие `restart.ww3` обусловлено промежуточным (через определенные интервалы времени) сохранением данных во время счета, чтобы в случае сбоя или при необходимости пересчета можно было начать с последней рассмотренной точки).

Подпрограмма `wave model` выводит необработанные данные в выходные файлы `out grd.ww3`, `out pnt.ww3`, `partition.ww3`, `track_i.ww3` и `track_o.ww3`, а также записывает эти данные в собственный файл журнала `log.ww3` и, при необходимости, тестовые выходные файлы `test.ww3` (или `testnnn.ww3` для версии с распределенной памятью). Доступны различные постпроцессоры вывода для последующей графической обработки данных в виде сетки и спектральных данных.

4. Вычислительный эксперимент

Для верификации модели WW3 была взята информация из БД ЕСИМО, опубликованная в 2024 году. Использовались БД: «Прибрежный массив среднемесячных значений высот волн в Азовском море», «Климатические данные в узлах сетки: высота волн. Азовское море», «Климатические данные в узлах сетки: скорость ветра в Азовском море» [5].

БД «Прибрежный массив среднемесячных значений высот волн в Азовском море» содержит среднемесячные данные о высотах волн береговых гидрометеорологических станций Азовского моря (Рис. 2). БД охватывает информацию с 1977 по 2023 год с ежемесячным временным разрешением и ежегодной периодичностью обновления. Географические характеристики области измерений (крайние точки), [град]: западная 35.8, восточная 38.9, северная 45.1, южная 47.2.

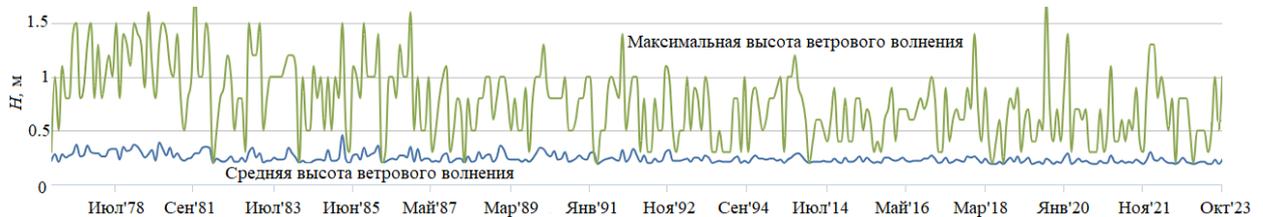


Рис. 2. График среднемесячных значений высот волн с 1977 по 2024 год

БД ЕСИМО «Климатические данные в узлах сетки: высота волн. Азовское море» предоставляет сглаженные многолетние климатические данные о высоте волн в узлах сетки с шагом 1 град — средние и максимальные значения по месяцам (Рис. 3). БД охватывает измерения с 2008 по 2024 год с ежемесячным временным разрешением и ежегодной периодичностью обновления.

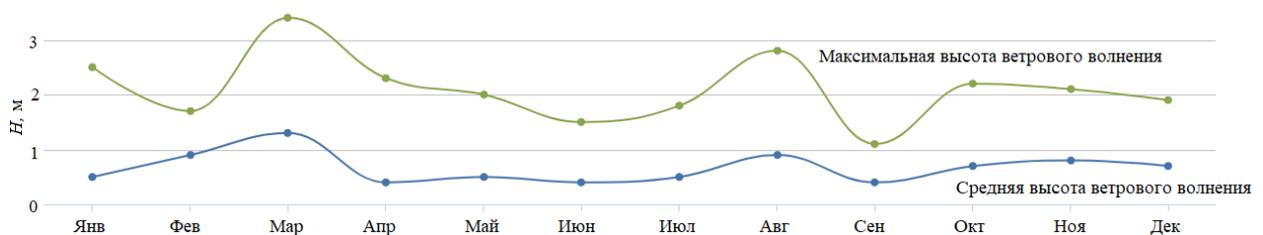


Рис. 3. График сглаженных данных о высоте волн в Азовском море в течение определенного месяца за период 2008–2023 гг.

Для настройки модели и формирования входных данных о ветре в узлах сетки использовалась БД «Климатические данные в узлах сетки: скорость ветра в Азовском море». База содержит сглаженные многолетние данные о скорости ветра по месяцам в узлах 1-градусной сетки (Рис. 4). База охватывает данные с 2008 по 2023 год с ежемесячным временным разрешением и ежегодной периодичностью обновления. Географические

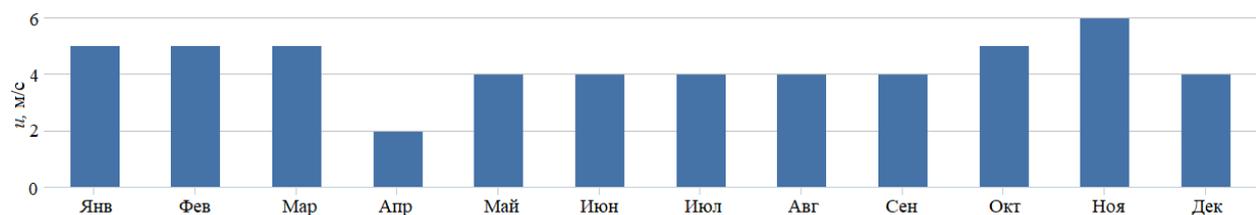


Рис. 4. График сглаженных данных о скорости ветра над акваторией Азовского моря на высоте 10 м за период 2008–2023 гг.

характеристики области измерений (крайние точки), [град]: западная 34.9, восточная 39.1, северная 47.1, южная 45.4. БД предоставлена Всероссийским научно-исследовательским институтом гидрометеорологической информации — Мировым центром данных/Росгидромет.

Расчетные области, аппроксимирующие конфигурацию берегов и батиметрию реальных морских бассейнов, в прогностической модели определяются на регулярных широтно-долготных сетках. Необходимые для проведения расчетов батиметрия и соответствующая ей маска «суша–море» для каждого из бассейнов построены с использованием навигационных карт. Для Азовского моря расчетная сетка состояла из элементов размером 1.2×1.2 град ($\sim 2 \times 2$ км).

Верификация модели WW3 произведена путем сравнения с данными регрессивного анализа, полученными на основе расчетов и результатов наблюдений из БД «Прибрежный массив среднемесячных значений высот волн в Азовском море». На рисунках 5 и 6 содержится информация для сопоставления максимальных и средних высот волн по месяцам, рассчитанных по модели WW3, и взятых из БД ЕСИМО «Климатические данные в узлах сетки: высота волн. Азовское море».

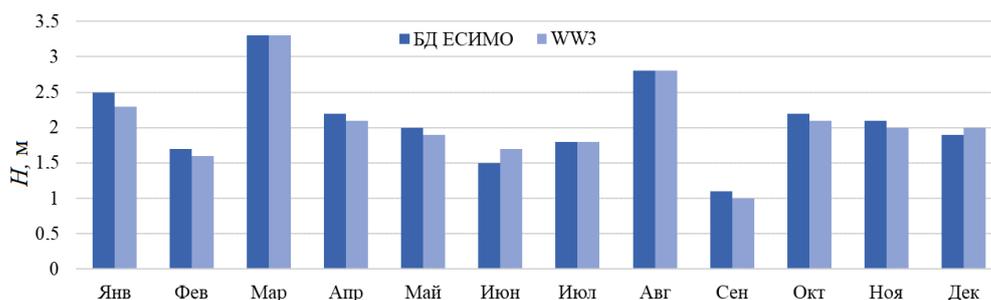


Рис. 5. К сопоставлению результатов моделирования и данных из базы ЕСИМО о максимальной высоте волн по месяцам

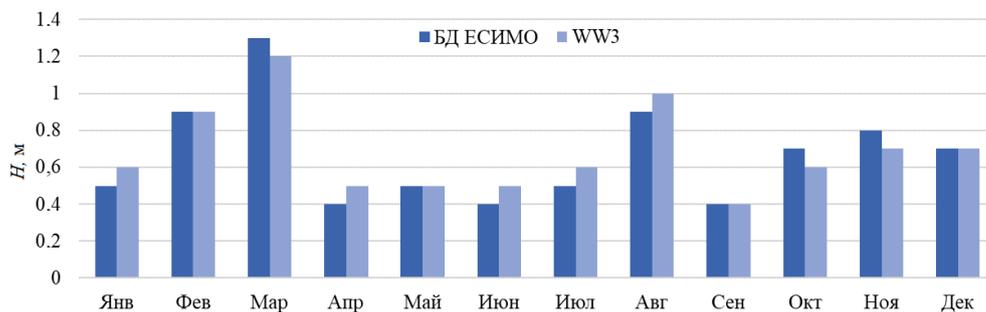


Рис. 6. К сопоставлению результатов моделирования ветрового волнения и данных из базы ЕСИМО о средней высоте волн по месяцам

При исследовании месячной изменчивости ветрового волнения его ретроспективные прогнозы продемонстрировали идентичную динамику ветрового климата. Расхождения в числовых оценках, полученных с использованием спектральной волновой модели WW3, и взятых из альтернативных измерений находятся в пределах требуемой точности воспроизведения соответствующих характеристик; картины их пространственных распределений на выбранном масштабе очень близки.

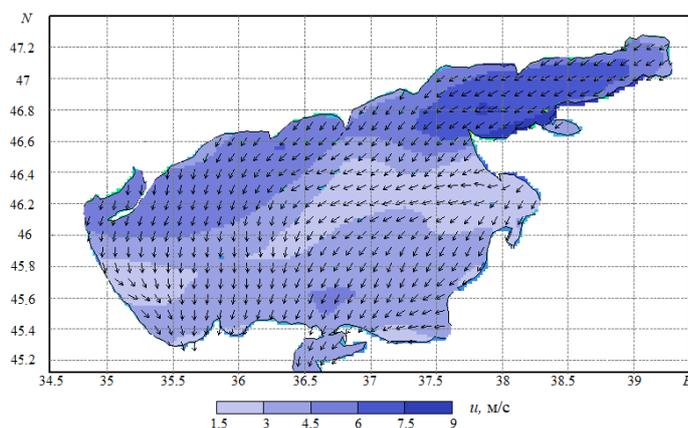


Рис. 7. Скорость ветра u на высоте 10 м в начальный момент моделирования; стрелками показано направление ветра в координатах «северная широта N – восточная долгота E »

На основе спектральной модели WW3 осуществлен прогноз параметров ветрового волнения в Азовском море. Необходимая для прогностических расчетов метеорологическая информация (поля скорости ветра, температуры воды и воздуха) отвечают продукции систем среднесрочного метеорологического прогноза Гидрометцентра России и NCEP/NOAA США. В качестве входной сетки использовалась общая сетка ветров, свойственная изучаемому процессу — `ww3_multi`. Для этого генерировались файлы `wind.input` и `mod_def.input`, содержащие сведения, согласующиеся с рисунком 7.

Расчетная сетка Азовского моря имела разрешение 2 км. Географические характеристики моделируемого участка были следующими (крайние точки, [град]): западная 34.5, восточная 39.5, северная 47.4, южная 45.2. Для расчета используется данные о текущей скорости ветра на моделируемом участке на высоте 10 м.

Построены прогностические карты параметров ветрового волнения на основе результатов расчетов по спектральной модели WW3. Проведено прогностическое моделирование высот преобладающих волн (Рис. 8), средней длины (Рис. 9) и периода ветровых волн (Рис. 10) в Азовском море в начальный момент времени, и через 3, 6 и 9 часов. Средняя длина и период волн рассчитаны как средние взвешенные по всему частотно-угловому спектру, разрешаемому моделью, с весами, пропорциональными плотности распределения волновой энергии по спектру.

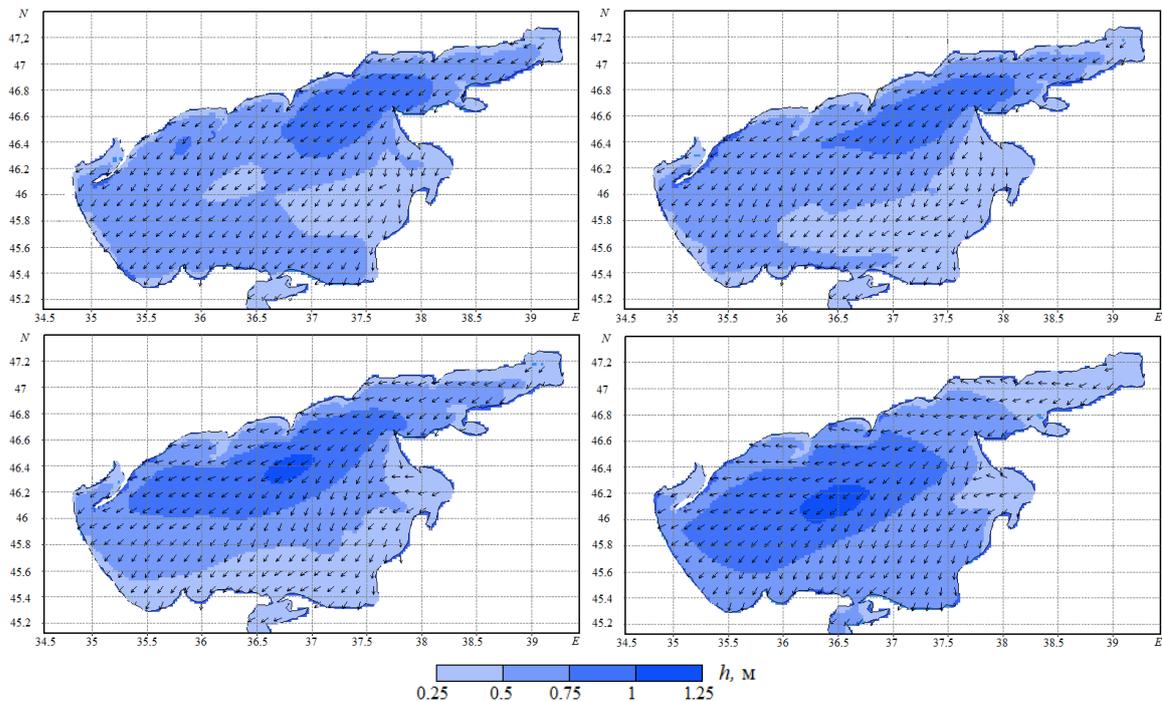


Рис. 8. Результаты моделирования высот h преобладающих волн в разные моменты времени (см. слева направо и сверху вниз): начальный момент, через 3, 6 и 9 ч; стрелками показано среднее направление распространения волн

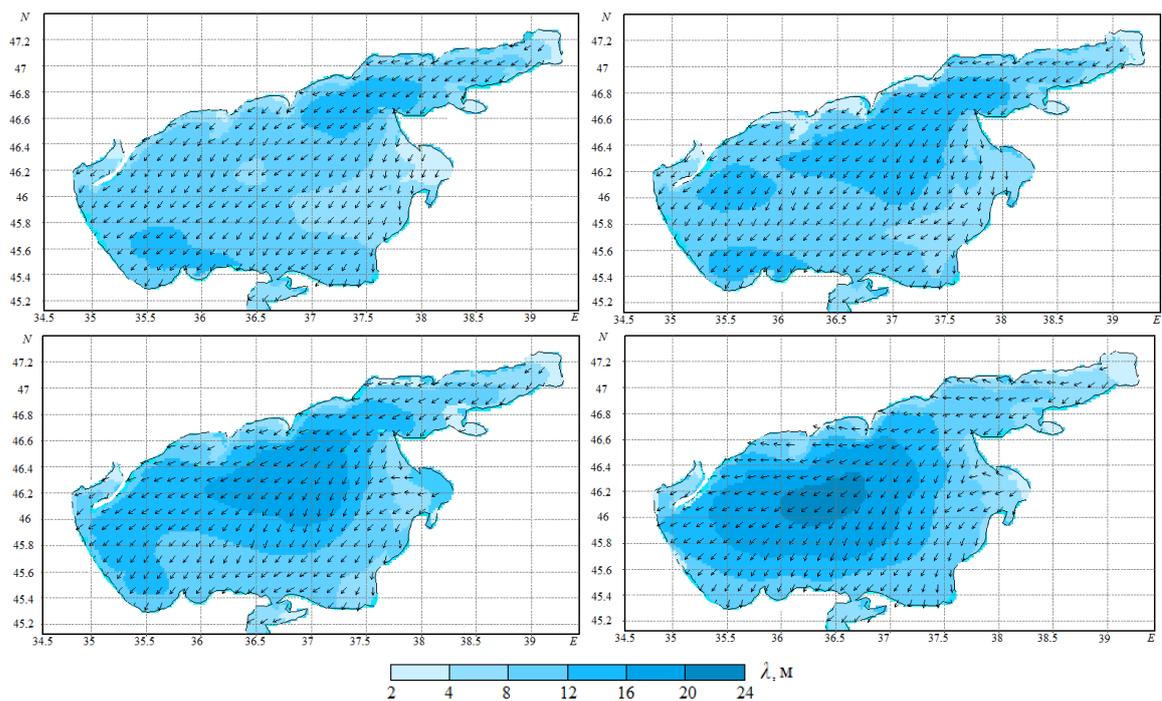


Рис. 9. Результаты моделирования средней длины волн λ в разные моменты времени (см. слева направо и сверху вниз): начальный момент, через 3, 6 и 9 ч; стрелками показано среднее направление распространения волн

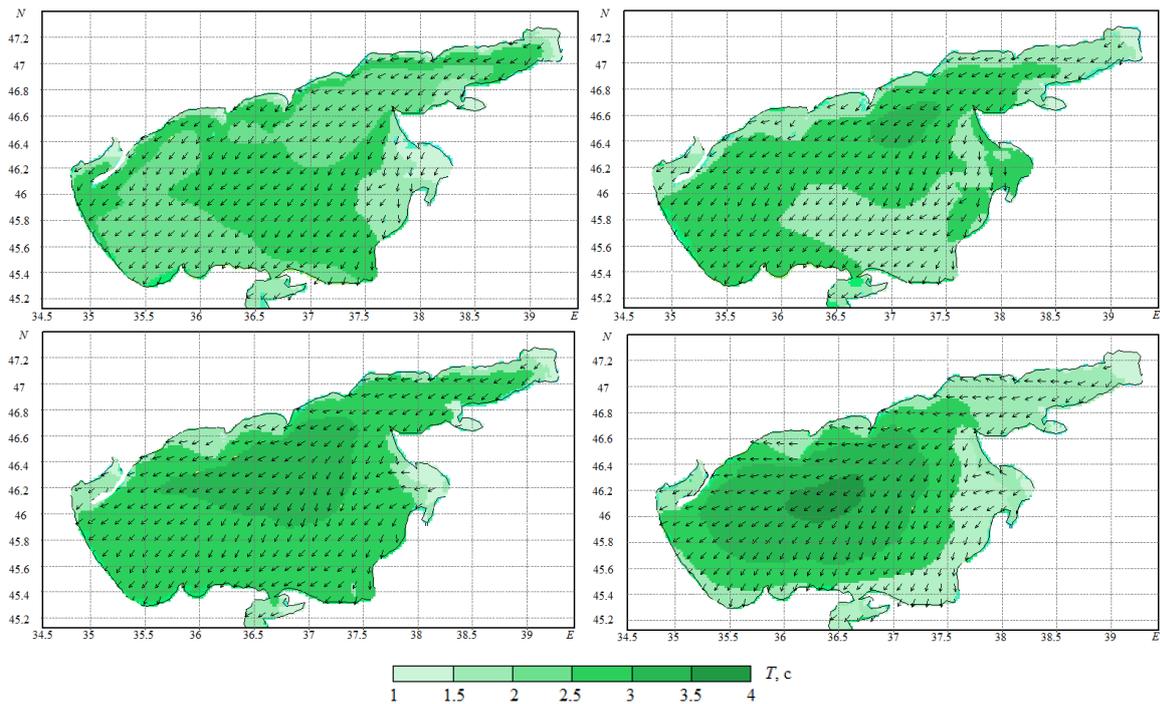


Рис. 10. Результаты моделирования среднего периода волн T в разные моменты времени (см. слева направо и сверху вниз): начальный момент, через 3, 6 и 9 ч; стрелками показано среднее направление распространения волн

Моделирование ветрового волнения в Азовском море позволяет предсказывать изменения в высоте, длине и периоде волн на интересующем участке, что важно для безопасности судоходства и береговой защиты. Прогностическое моделирование предоставляет возможность лучше понимать суть физических процессов, лежащих в основе образования и распространения волн, климатических и гидрологических проявлений и их влияние на окружающую среду и человеческую жизнедеятельность. Таким образом, моделирование волнового волнения имеет большое значение как для научных исследований, так и для практического применения в морских и прибрежных областях.

5. Гибридное распараллеливание (MPI–OpenMP)

Возможности параллельного ведения расчетов значительно расширены в версии WW3 5.01, в которой стали доступны многопоточность и распараллеливание с использованием переключателя MPI, подходы pure MPI, pure OpenMP и гибридный MPI–OpenMP [4].

В модели WW3 при гибридном распараллеливании MPI применяется для перераспределения информации между узлами вычислительного кластера. Каждый процессор обрабатывает свою собственную область данных, а MPI, при необходимости, обеспечивает обмен информацией между процессами и синхронизирует выполнение задач на разных узлах. OpenMP управляет созданием, выполнением и коммуникацией между этими процессами внутри узла (внутри процессора). Это позволяет более эффективно эксплуатировать многопоточность на уровне каждого процессора, что особенно полезно на современных многоядерных архитектурах (Рис. 11).

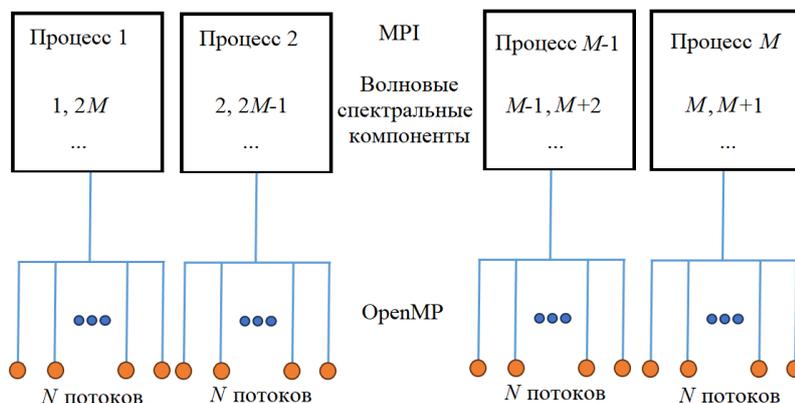


Рис. 11. Гибридное распараллеливание при использовании модели WW3

Каждый отдельный процесс в MPI отвечает за хранение информации о спектрах волн для определенных точек в море. Процесс вычисления распространения какой-то конкретной компоненты волнового спектра по всему региону выполняется в одном из процессов MPI. Для более эффективного употребления ресурсов каждый процесс MPI (M) разделен на несколько потоков OpenMP (N) в пределах одного узла с общей памятью.

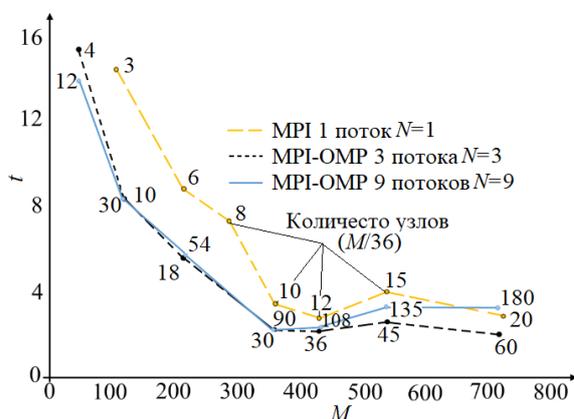


Рис. 12. Параллельная эффективность WW3

ограничение, которое составляет 1/3 от спектральных компонент (процессов MPI). Гибридное распараллеливание также имеет ограничение, равное 9 OpenMP-потокам. Гибридное распараллеливание приводит к лучшему масштабированию и может сократить время вычислений на 50% по сравнению с запуском в режиме MPI.

6. Заключение

В статье оцениваются возможности последней версии модели WW3. Приведены ее основные уравнения, описана программная реализация. Представлены результаты ретроспективного прогноза, позволившего провести верификацию модели на основе данных многолетних наблюдений. Рассчитаны компоненты ветрового волнения в Азовском море на предстоящие 3, 6, 9 часов, построены их прогностические карты. Проведено прогностическое моделирование средних значений высот преобладающих волн, длин и периода ветровых волн в Азовском море. Изучены возможности гибридного распараллеливания с применением модели WW3, выполнена декомпозиция по волновым спектральным компонентам с использованием технологий по стандарту MPI и гибридного подхода MPI–OpenMP, при котором, кроме декомпозиции по компонентам, распараллеливание осуществляется по потокам. Определена масштабируемость как при MPI, так и при гибридных запусках и выявлено, что она выравнивается при работе 360 процессов MPI или 10 узлов, умноженных на N потоков (1, 3, 9 потоков).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-21-00210), <https://rscf.ru/project/23-21-00210/>.

Литература

1. Alves J.-H.G.M., Chawla A., Tolman H.L., Schwab D., Lang G., Mann G. The Operational Implementation of a Great Lakes Wave Forecasting System at NOAA/NCEP* // Weather and Forecasting. 2014. Vol. 29, no. 6. P. 1473–1497. DOI: 10.1175/WAF-D-12-00049.1
2. Ardhuin F., Rawat A., Aucan J. A numerical model for free infragravity waves: Definition and validation at regional and global scales // Ocean Modelling. 2014. Vol. 77. P. 20–32. DOI: 10.1016/j.ocemod.2014.02.006
3. Ardhuin F., Collard F., Chapron B., Girard-Ardhuin F., Guitton G., Mouche A., Stopa J.E. Estimates of ocean wave heights and attenuation in sea ice using the SAR wave mode on Sentinel-1A // Geophysical Research Letters. 2015. Vol. 42. P. 2317–2325. DOI: 10.1002/2014GL062940
4. WAVEWATCH III Development Group: Public release version 6.07. URL: <https://github.com/NOAA-EMC/WW3/releases/tag/6.07> (дата обращения: 15.11.2024)
5. Единая государственная система информации об обстановке в Мировом океане. URL: <http://esimo.ru/portal/> (дата обращения: 15.11.2024)
6. Панфилова М.А., Кузнецова А.М., Байдаков Г.А., Троицкая Ю.И., Караев В.Ю. Методика сравнения данных расчёта волновой модели WAVEWATCH III с данными радиолокатора Ка-диапазона // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17, № 7. С. 9–18. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-9-18
7. Li J., Zhang S., Liu Q., Yu X., Zhang Z. Design and evaluation of an efficient high-precision ocean surface wave model with a multiscale grid system (MSG_Wav1.0) // Geoscientific Model Development. 2023. Vol. 16, no. 21. P. 6393–6412. DOI: 10.5194/gmd-16-6393-2023

8. Gu J., Li X., He Y. A speckle noise suppression method based on surface waves investigation and monitoring data // *Acta Oceanologica Sinica*. 2023. Vol. 42, no. 1. P. 131–141. DOI: 10.1007/s13131-022-2103-4
9. Li J., Qian H., Li h., Liu Y., Gao Z. Numerical study of sea waves created by tropical cyclone Jelawat // *Acta Oceanologica Sinica*. 2011. Vol. 30. P. 64–70. DOI: 10.1007/s13131-011-0148-x
10. Li M., Ip R., Judith W., Chen X., Burrows R. Numerical investigation of wave propagation in the Liverpool Bay, NW England // *Acta Oceanologica Sinica*. 2011. Vol. 5. P. 1–13. DOI: 10.1007/s13131-011-0142-3
11. Григорьева В.Г., Гулев С.К., Шармар В.Д. Верификация глобальной спектральной волновой модели WAVEWATCH III по данным попутных судовых наблюдений // *Океанология*. 2020. Т. 60, № 1. С. 14–26. DOI: 10.31857/S003015742001013X
12. Chu P.C., Qi Y., Chen Y., Shi P., Mao Q. South China Sea Wind-Wave Characteristics. Part I: Validation of Wavewatch-III Using TOPEX/Poseidon Data // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2004. Vol. 21. P. 1718–1733. DOI: 10.1175/JTECH1661.1
13. Sangalugeme C., Luhunga P., Kijazi A., Kabelwa H. Validation of Operational WAVEWATCH III Wave Model Against Satellite Altimetry Data Over South West Indian Ocean Off-Coast of Tanzania // *Applied Physics Research*. 2018. Vol. 10, no. 4. P. 55–65. DOI: 10.5539/apr.v10n4p55
14. WAVEWATCH III Development Group: User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 6.07. Tech. Note 333, NOAA/NWS/NCEP/MMAB. College Park, MD, USA, 2019. 465 p.

Сведения об авторах:

Проценко Елена Анатольевна, кфмн, доц., Таганрогский институт им. А.П. Чехова (филиал) Ростовского государственного экономического университета (РГЭУ РИHX), 347936, г. Таганрог, ул. Инициативная, д. 48; e-mail: eparos@rambler.ru; ORCID: 0000-0001-7911-3558

Сухинов Александр Иванович, чл.-корр. РАН, дфмн, проф., зав. каф., Донской государственный технический университет (ДГТУ), 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1; e-mail: sukhinov@gmail.com; ORCID: 0000-0002-5875-1523

Проценко Софья Владимировна (корр.), кфмн, доц, РГЭУ РИHX; e-mail: rab55555@rambler.ru; ORCID: 0000-0001-9656-8466

Research article

Numerical simulation of hydrodynamic wave processes in the Sea of Azov based on the WAVEWATCH III wind-wave model

E.A. Protsenko¹, A.I. Sukhinov², S.V. Protsenko¹

¹ Chekhov Taganrog Institute (branch) Rostov State University of Economics, Taganrog, Russian Federation

² Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

The article is devoted to the study of the possibilities of the modern version of the third-generation wind-wave model WAVEWATCH III (WW3). The basic equations of the model are given and the software implementation is described. A retrospective analysis of the characteristics of wind waves in the Sea of Azov was carried out, and the simulation results were compared with the data from long-term observations of coastal hydrometeorostations of the Sea of Azov, presented in the Unified Interdepartmental Federal Information System (ESIMO) databases. In the predictive model, the computational domains approximating the shoreline configuration and the bathymetry of real marine basins are regular latitude-longitude grids consisting of elements of size 1.2×1.2 degree ($\sim 2 \times 2$ km). The bathymetry and the corresponding land-sea mask (a two-dimensional array with values determining the belongingness of an element to ground or sea) required to do calculations for each of the basins were constructed using navigation maps. In the retrospective analysis, climatic data for a multi-year month (2008–2023) on wind speed were used to generate input wind data at grid nodes. Based on the WW3 spectral model, the forecast of wind wave parameters in the Sea of Azov was carried out. Prognostic maps of the average period, average length and heights of the waves prevailing at different points in time were constructed. The meteorological fields (wind speed, water and air temperature) necessary for calculations were taken from the databases of the Hydrometeorological Center of Russia and NCEP/NOAA. Parallel efficiency indicators for hybrid parallelization (MPI–OpenMP) were calculated, and scalability was determined for both MPI and hybrid launches.

Keywords: mathematical modelling, model WAVEWATCH III, hybrid parallelization, retrospective analysis, wind waves, predictive maps

Received: 01.02.2024 / **Published online:** 30.12.2024

References

1. Alves J.-H.G.M., Chawla A., Tolman H.L., Schwab D., Lang G., Mann G. The Operational Implementation of a Great Lakes Wave Forecasting System at NOAA/NCEP*. *Weather and Forecasting*. 2014. Vol. 29, no. 6. P. 1473–1497. DOI: 10.1175/WAF-D-12-00049.1
2. Ardhuin F., Rawat A., Aucan J. A numerical model for free infragravity waves: Definition and validation at regional and global scales. *Ocean Modelling*. 2014. Vol. 77. P. 20–32. DOI: 10.1016/j.ocemod.2014.02.006

3. *Ardhuin F., Collard F., Chapron B., Girard-Ardhuin F., Guitton G., Mouche A., Stopa J.E.* Estimates of ocean wave heights and attenuation in sea ice using the SAR wave mode on Sentinel-1A. *Geophysical Research Letters*. 2015. Vol. 42. P. 2317–2325. DOI: 10.1002/2014GL062940
4. WAVEWATCH III Development Group: Public release version 6.07. URL: <https://github.com/NOAA-EMC/WW3/releases/tag/6.07> (accessed: 15.11.2024)
5. Unified State System of Information on the Situation in the World Ocean. URL: <http://esimo.ru/portal/> (accessed: 15.11.2024)
6. *Panfilova M., Kuznetsova A., Baydakov G., Troitskaya Y., Karaev V.* The method of comparison of WAVEWATCH III model calculation results with the data of KA-band radar. *Current problems in remote sensing of the Earth from space*. 2020. Vol. 17, no. 7. P. 9–18. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-9-18
7. *Li J., Zhang S., Liu Q., Yu X., Zhang Z.* Design and evaluation of an efficient high-precision ocean surface wave model with a multiscale grid system (MSG_Wav1.0). *Geoscientific Model Development*. 2023. Vol. 16, no. 21. P. 6393–6412. DOI: 10.5194/gmd-16-6393-2023
8. *Gu J., Li X., He Y.* A speckle noise suppression method based on surface waves investigation and monitoring data. *Acta Oceanologica Sinica*. 2023. Vol. 42, no. 1. P. 131–141. DOI: 10.1007/s13131-022-2103-4
9. *Li J., Qian H., Li h., Liu Y., Gao Z.* Numerical study of sea waves created by tropical cyclone Jelawat. *Acta Oceanologica Sinica*. 2011. Vol. 30. P. 64–70. DOI: 10.1007/s13131-011-0148-x
10. *Li M., Ip R., Judith W., Chen X., Burrows R.* Numerical investigation of wave propagation in the Liverpool Bay, NW England. *Acta Oceanologica Sinica*. 2011. Vol. 5. P. 1–13. DOI: 10.1007/s13131-011-0142-3
11. *Grigorieva V., Gulev S., Sharmar V.* Validating Ocean Wind Wave Global Hindcast with Visual Observations from VOS. *Oceanology*. 2020. Vol. 60. P. 9–19. DOI: 10.1134/S0001437020010130
12. *Chu P.C., Qi Y., Chen Y., Shi P., Mao Q.* South China Sea Wind-Wave Characteristics. Part I: Validation of Wavewatch-III Using TOPEX/Poseidon Data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2004. Vol. 21. P. 1718–1733. DOI: 10.1175/JTECH1661.1
13. *Sangalugeme C., Luhunga P., Kijazi A., Kabelwa H.* Validation of Operational WAVEWATCH III Wave Model Against Satellite Altimetry Data Over South West Indian Ocean Off-Coast of Tanzania. *Applied Physics Research*. 2018. Vol. 10, no. 4. P. 55–65. DOI: 10.5539/apr.v10n4p55
14. WAVEWATCH III Development Group: User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 6.07. Tech. Note 333, NOAA/NWS/NCEP/MMAB. College Park, MD, USA, 2019. 465 p.