

На правах рукописи

Мысленков Станислав Александрович

**ДИАГНОЗ И ПРОГНОЗ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ В
ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ ЧЕРНОГО МОРЯ**

специальность 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении
"Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской
федерации" (г. Москва).

Научный руководитель

Евгений Самойлович Нестеров
доктор географических наук,
ФГБУ «Гидрометцентр России»

Официальные оппоненты

Репина Ирина Анатольевна
доктор физико-математических наук,
ФГБУН ИФА РАН

Кабатченко Илья Михайлович
доктор географических наук,
ФГБУ «ГОИН»

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Российский государственный гидрометеорологический университет»

Защита диссертации состоится «16» октября 2017 г. в «15» часов на заседании
диссертационного совета Д002.069.01 в Институте прикладной физики РАН по
адресу: 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПФ РАН и на официальном
сайте ИПФ РАН <http://www.ipfran.ru/training/img/2017/Myuslenkov.pdf>

Автореферат разослан « » сентября 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

 А.И. Малеханов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В последние годы все больше возрастает экономический и научный интерес к прибрежным районам морей России. Это связано в основном со значительными перспективами освоения и добычи нефти и газа на шельфе. Не является исключением и прибрежная зона Черного моря, где в последние годы ведутся масштабные научные исследования для подготовки лицензионных нефтегазовых участков к началу разведки и освоению. Акватория Черного моря входит в сферу стратегических интересов России как в транспортном и инфраструктурном плане (транспортировка нефти и других важнейших грузов из Новороссийска), так и в военно-политическом. Кроме того, черноморское побережье было и остается основной курортной зоной России, поток отдыхающих с каждым годом увеличивается, антропогенная нагрузка возрастает. Таким образом, качественная гидрометеорологическая информация по Черноморскому региону становится все более востребованной при проектировании различных гидротехнических сооружений и морских работ, для обеспечения гражданского и военного флота, а также экологического мониторинга состояния морских и прибрежных экосистем.

Одним из наиболее важных разделов гидрометеорологической информации для указанных отраслей народного хозяйства являются волновые условия. Параметры волнения применяются в инженерной практике для расчета внешних нагрузок на морские объекты и сооружения, а в исследованиях экологической направленности – для прогноза разрушения берегов, динамики отложения песчаных наносов и проч.

Однако, для выполнения любых расчетов, связанных с параметрами волнения, большую проблему создает отсутствие продолжительных рядов инструментальных наблюдений, поэтому в большинстве случаев характеристики волнения получают на основе численного моделирования.

В последние десятилетия основным инструментом для расчета параметров ветрового волнения стали спектральные волновые модели. Наиболее известными из зарубежных моделей являются модель WAM с ее модификациями [WAMDI, 1988] и модель WAVEWATCH3 [Tolman, 1989, 1996]. В России наиболее известны модель узконаправленного приближения углового спектра PABM [Захаров, 1981] и спектрально-параметрическая модель AARI-PD2 [Давидан, 1988; Дымов, 2004]. Волновая спектральная модель SWAN [Booij, 1999] создана специально для расчетов параметров ветрового волнения в прибрежной зоне. В модели задаются поля ветра и течений, а также рельеф дна. Сравнение результатов численных расчетов показало, что SWAN не уступает по качеству расчетов волнения открытых частях морей моделям WAM и WAVEWATCH3 [Ortiz-Royero, 2008].

Однако, реанализ и прогноз поля ветра не всегда достаточно точен. Также в большинстве случаев поле течений, оказывающее влияние на развитие волнения, остается неизвестным. Все эти проблемы создают существенные

погрешности при расчете высоты волн, поэтому использование результатов моделирования волнения возможно, только в том случае, если оценки качества будут признаны удовлетворительными. Несмотря на большой прогресс, достигнутый в области развития вычислительных технологий, пространственный шаг моделей остается достаточно грубым: 50-100 км для Мирового океана и 2-5 км для отдельных морей. Для заливов, бухт, портов и гаваней создается отдельная вложенная сетка с разрешением 20-50 м, однако возникают сложности с заданием условий на жидких границах.

Решение всех перечисленных вопросов необходимо для создания надежной оперативной вычислительной системы анализа и прогноза морского волнения. Тема данной работы находится в русле основных задач оперативной океанографии.

Цель диссертационной работы - создание вычислительной технологии диагноза и прогноза ветрового волнения в прибрежной зоне Черного моря на основе волновой модели SWAN.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Реализация волновой модели SWAN для акватории Черного моря с детализацией в шельфовых зонах с использованием неструктурной сетки.
2. Оценка качества диагноза (ретроспективные расчеты) волнения на глубокой и мелкой воде на основе прямых измерений и спутниковых данных.
3. Создание оперативной системы прогноза волнения для акватории Черного моря с детализацией в шельфовых зонах.
4. Оценка качества прогноза волнения на глубокой и мелкой воде на основе рядов прямых измерений и спутниковых данных.
5. Оценка чувствительности модели к вариациям параметров, характеризующих ветровую накачку, диссипацию и разгон.

Методология исследования. Моделирование волнения выполняется при помощи спектральной волновой модели SWAN, с использованием нестационарных полей ветра и рельефа дна. В качестве вынуждающей силы (форсинга) используются данные о ветре из реанализа NCEP/CFRS с шагом $\sim 0.2-0.3^\circ$, прогнозы ветра GFS $0.25-0.5^\circ$ и данные мезомасштабной модели WRF-ARW с разрешением 5-10 км. Модель SWAN реализована на оригинальной неструктурной (триангуляционная сетка с изменяющимся шагом) вычислительной сетке, где большая часть моря задана с грубым шагом по пространству (10-15 км), а в некоторых выбранных прибрежных районах шаг сетки составляет до 20-100 м и постепенно увеличивается с увеличением глубины. Такой подход позволяет проследить развитие ветрового волнения, как в открытом море, так и при выходе волн на мелководье, где активизируются процессы рефракции, дифракции, обрушения, трения о дно. Моделирование волнения на неструктурной сетке позволяет получать режимные характеристики и прогнозы волнения даже в гаванях и небольших бухтах с

подробным разрешением по пространству. В отличие от расчетов на прямоугольных сетках – число узлов получается существенно меньше.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Новая реализация волновой модели SWAN для Черного моря на основе неструктурной сетки с высоким пространственным разрешением (20-100 м) в шельфовой мелководной зоне (Цемесская бухта, Керченский пролив, район Сочи).

2. Новая система оперативного прогноза волнения для акватории Черного моря с детализацией в шельфовых зонах, работающая в автоматическом режиме.

3. Оригинальная методика численного эксперимента для оценки чувствительности модели к вариациям параметров, характеризующих ветровую накачку, диссипацию и разгон.

4. Оценки вклада локального ветрового воздействия в интегральную высоту волн на примере Цемесской бухты.

Научная новизна и практическая значимость. Для решения поставленных задач создана оригинальная неструктурная сетка, с изменяющимся шагом по пространству. Подобные вычислительные сетки ранее для всего Черного моря не использовались. Предложенный подход с использованием неструктурной сетки может быть реализован для любого района Мирового океана и прибрежной зоны, при этом пространственное разрешение будет ограничено только исходными данными о рельефе дна.

Полученные данные о режиме ветрового волнения и его пространственно-временной изменчивости в прибрежной зоне Новороссийска, Сочи и Геленджика могут быть использованы для расчетов, связанных с нагрузкой на различные сооружения, с оценкой потока волновой энергии, с динамикой разрушения берегов и др.

Впервые создана и введена в эксплуатацию оперативная система прогноза волнения с детализацией в районе Цемесской бухты, Керченского пролива, района Сочи. Данная система внедрена в оперативную практику в Гидрометцентре России и результаты прогнозов доступны различным потребителям.

Для оценки вклада в общую высоту волн локального ветрового воздействия был использован новый подход, при котором, часть поля ветра, генерирующего волны, искусственно обнуляется и появляется возможность оценить отдельно вклад волн, образующихся под воздействием локального ветра и волн, приходящих извне. Данный подход может быть использован для решения различных научных задач в других акваториях.

Личный вклад автора. Автор диссертации принимал непосредственное участие в создании цифровой модели рельефа дна Черного моря, оригинальной неструктурной сетки и адаптации волновой модели SWAN для акватории Черного моря. Лично автором проводились численные эксперименты по расчетам полей ветровых волн в Черном море, получены оценки качества воспроизведения волнения на глубокой и мелкой воде. Автором создана

технология оперативного прогноза волнения, включая специализированные алгоритмы и программы. Автор принимал участие в 10 научных экспедициях на Черном море; часть использованных инструментальных данных получена при участии автора.

Внедрение результатов работы. Согласно решению Центральной методической комиссии (Росгидромет) по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам №140-09091/16и от 15 декабря 2016 г. разработанная система прогноза ветрового волнения в Черном море для шельфовых зон (Керченский пролив, Цемесская бухта, район Сочи) одобрена и рекомендована к использованию в качестве вспомогательного метода.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры океанологии Географического факультета МГУ, на российских и международных конференциях: молодежная научная конференция «Комплексные исследования морей России», Севастополь, 2016; международная научно-практическая конференция «Морские исследования и образование: MARESEDU-2016», Москва, 2016; научная конференция «Мировой океан: модели, данные и оперативная океанология» Севастополь, 2016; 3-rd International Conference on the Dynamics of Coastal Zone of Non-Tidal Seas, Russia, Gelendzhik, 2014; International Scientific Conference "Science of the future", Saint-Petersburg, Russia, 2014; международный географический конгресс Международного географического общества IGC 2012 (IGU), Кельн, Германия.

Публикации. Основные положения диссертации представлены в 14 публикациях, из них 6 статей в журналах, включенных в список ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 161 странице машинописного текста и состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы, включающего 102 наименования.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** изложена актуальность работы, ее цели и задачи, научная новизна и практическая значимость, а также приведены основные положения, выносимые на защиту.

В **Главе 1** приведен обзор современных волновых моделей и описание модели SWAN. Рассматриваются основные работы по моделированию ветрового волнения в Черном море и существующие системы прогноза волнения.

Диагноз и прогноз волнения может быть основан на различных методах, однако наиболее передовым подходом является использование математических моделей ветрового волнения, которые, помимо ветрового форсинга, учитывают особенности внутренней динамики волнения, а также влияние топографии и характеристик морского дна [Дымов, 2004; Режим..., 2013].

В настоящее время большинство исследователей используют спектральные волновые модели 3-го поколения, такие как WAM, WAVEWATCH3, SWAN [Режим..., 2013]. Описание моделей и принципы их

использования для открытого моря и в прибрежной зоне изложены в работе [Rusu, 2011].

В работе использована спектральная волновая модель третьего поколения SWAN (акроним от Simulating WAVes Nearshore) версии 40.83, так как она была создана специально для расчетов параметров ветрового волнения в прибрежной зоне по заданным полям ветра и течений, а также рельефу дна [Booij, 1999; SWAN, 2007]. В SWAN могут быть реализованы следующие процессы: генерация волн ветром, распространение волн в пространстве, рефракция и дифракция волн, диссипация волн из-за обрушения, диссипация из-за обрушения волн при выходе на мелководье; диссипация при трении о дно, нелинейного волнового взаимодействия, как в глубоком (quadruplets), так и в мелком море (triads) [SWAN, 2007].

С позиции спектрального представления морское волнение рассматривается как сложный волновой процесс, представляющий собой суперпозицию бесконечно большого числа независимых друг от друга элементарных волн с различными амплитудами, частотами, направлениями распространения, случайными фазами [Режим..., 2013].

Если рассматривать волнение в некоторой точке пространства, то в общем виде функцию отклонения морской поверхности от некоего равновесного состояния в зависимости от времени можно представить, как сумму:

$$\eta(t) = \sum_i a_i \cos(\sigma_i t + \varepsilon_i), \quad (1)$$

где η – отклонение поверхности моря от невозмущенного состояния, a_i – амплитуда i -й волны, σ_i – относительная угловая частота i -й волны, ε_i – случайная фаза i -й волны.

Для линейной периодической прогрессивной волны кинетическая энергия равна потенциальной энергии. Полная энергия на единицу площади волны представляет собой сумму потенциальной и кинетической энергии и равна [Боуден, 1988]:

$$E_{tot} = \frac{1}{2} g \rho \eta^2 \quad . \quad (2)$$

Для волн малой амплитуды полная энергия любого числа наложенных друг на друга волновых цугов равна сумме энергий отдельных компонент, что позволяет ввести понятие энергетического спектра [Боуден, 1988]. Полная плотность энергии на частоте f по всем направлениям θ выражается как:

$$E(f) = \int_0^{2\pi} E(f, \theta) d\theta \quad . \quad (3)$$

Полная плотность энергии содержит всю необходимую информацию об интегральном состоянии морской поверхности, которые можно выразить через n -е моменты плотности энергетического спектра [Лопатухин, 2012]:

$$m_n = \int_0^{\infty} f^n E(f) df \quad . \quad (4)$$

При помощи этого выражения можно получить ряд необходимых характеристик, например, среднюю (\bar{H})

$$\bar{H} = \sqrt{2\pi m_0} \quad , \quad (5)$$

или «значительную высоту волны» (H_s):

$$H_s = 4\sqrt{m_0} \quad . \quad (6)$$

Или различные периоды волн:

$$T_{m0} = \frac{m_0}{m_1} \quad T_{m02} = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad T_{m-10} = \frac{m_{-1}}{m_0} \quad . \quad (7)$$

В основе модели SWAN лежит решение уравнения баланса энергии волнового действия в спектральном пространстве:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad , \quad (8)$$

где N – удельная спектральная плотность; x, y – пространственные координаты; t – время; σ – волновая частота; θ – волновой угол; c_σ, c_θ – скорости распространения в спектральном пространстве (σ, θ); S_{tot} – функция источника, определяется следующим образом:

$$S_{tot} = S_{in} + S_{nl3} + S_{nl4} + S_{ds,w} + S_{ds,b} + S_{ds,br} \quad , \quad (9)$$

где S_{in} – рост волны, вызванный ветром, перераспределение энергии за счет трехкомпонентного (S_{nl3}) и четырехкомпонентного нелинейного волнового взаимодействия (S_{nl4}), диссипация энергии через «барашки» на гребне ($S_{ds,w}$), диссипация через трение о дно ($S_{ds,b}$), диссипация за счет обрушения волн в береговой зоне ($S_{ds,br}$). Ниже будет рассмотрено каждое слагаемое в отдельности.

При запуске модели использовался режим «GEN3», при котором используются следующие параметры: схема роста KOMEN ($c_{ds2}=2.36e-5$, $stpm=3.02e-3$), трех и четырех-волновое взаимодействие (Quadrupl, Triad), обрушение (Breaking constant, $\alpha=1.0$, $\gamma=0.73$), донное трение (Friction Jonsvar Constant $cf=0.067$). Дискретные значения частот определяются рядом из 37 членов геометрической прогрессии. Направления дискретизируются с шагом 5° (72 направления).

Существуют публикации, где приведены подробные оценки качества, основанные на сравнении данных моделирования волнения с данными прямых измерений в рамках проекта NATO TU-WAVES [Акпинар, 2012; Акпинар, 2016; Kos'yan, 1998; Van Vledder, 2015]. В работе [Акпинар, 2012] используется модель SWAN, а в качестве входных данных - поля ветра из реанализа Era-interim. Сравнение результатов численного моделирования с данными волнового буя показало, что модель систематически занижает высоту волн на 0.3 м. В работах [Акпинар, 2016; Van Vledder, 2015] в качестве данных о ветре используются разные реанализы, а основной вывод состоит в том, что реанализ NCEP/CFSR дает лучший результат при моделировании волнения (при

сравнении с данными буев среднеквадратическая ошибка (RMSE) 0.4 м, а корреляция 0.88). Сравнение высоты волн с данными спутников показало, что RMSE равна 0.4 м, а коэффициент корреляции 0.78.

Однако большая часть этих работ посвящена моделированию волнения в Черном море на глубокой воде с пространственным разрешением 5-15 км. Моделированию волнения в прибрежной зоне уделялось меньше внимания. В публикациях, посвященных моделированию волнения в Керченском проливе [Fomin, 2004; Korshenko, 2011], использовалась регулярная вычислительная сетка либо отдельно для пролива, либо как вложенная. В последнее время набирает популярность создание неструктурных сеток для прибрежных районов [Zijlema, 2010; Rusu, 2011], однако для всего Черного моря они еще не использовались. Оценки качества воспроизведения волнения в прибрежной зоне также редки [Кабатченко, 2011; Шокуров, 2016; Valchev, 2010].

Оперативная технология прогноза волнения Черного моря реализована в Гидрометцентре России и основана на модели WAVEWATCH3 [Зеленько, 2014]. Модель имеет пространственное разрешение 9 км и использует прогностические поля американской системы GFS. Качество воспроизведения высоты волн оценивалось на основе спутниковых данных и его результаты признаны успешными (для прогнозов на первые сутки RMSE составляет 0.36 м, коэффициент корреляции 0.87). Также существует ряд зарубежных прогностических систем, однако они не прогнозируют параметры волнения в прибрежной зоне Черного моря [Poseidon system, Metu3 wave model].

В **Главе 2** описаны используемые в работе данные и методы. Приведено описание данных о рельефе дна Черного моря. Описаны используемые данные о скорости и направлении ветра. Дано описание инструментальных измерений волнения. Приведены основные настройки модели SWAN, и технология создания неструктурной сетки.

В работе используются данные реанализа NCEP/CFRSR с разрешением по пространству $\sim 0.3^\circ$ с 1979 по 2010 г. и $\sim 0.2^\circ$ с 2011 г. Дискретность данных по времени 1 час. Описание реанализа NCEP/CFRSR приведено в работе [Saha et al. 2010]. Использовались данные о полях прогноза ветра системы GFS с пространственным разрешением 0.5° , временной шаг 3 часа [GFS]. Начиная с 2015 года доступны прогнозы GFS на сетке 0.25° (здесь и далее GFS- 0.25°).

Для оценки качества данных реанализа NCEP/CFRSR привлекались данные метеостанций сети Росгидромета: Анапы, Новороссийска и Геленджика. Данные метеостанций имеют дискретность по времени 3 часа. Для Анапы и Новороссийска наблюдается систематическое занижение скорости ветра при абсолютной скорости более 10 м/с. Однако, как показано в работе [Van Vledder, 2015] на акватории Черного моря систематическая ошибка в скорости ветра реанализа NCEP/CFRSR может менять знак и нерегулярна во времени и пространстве.

Для создания цифровой модели рельефа дна использованы навигационные карты масштаба 1:50 000 и 1:25 000. В результате оцифровки навигационных карт для исследуемых шельфовых зон были получены значения

13000 отметок глубин, на основе которых создана оригинальная неструктурная вычислительная сетка. Большая часть моря на сетке задана с грубым шагом по пространству (10-15 км), а в выбранных прибрежных районах шаг составляет 20-100 м и постепенно увеличивается с глубиной. Детализация была выполнена для района Керченского пролива, Цемесской бухты и района Сочи (рис.1), что позволяет прослеживать развитие ветрового волнения как в открытом море, так и при выходе волн на мелководье, где активизируются процессы рефракции, дифракции, обрушения, трения о дно. Общее количество узлов сетки - 12131.

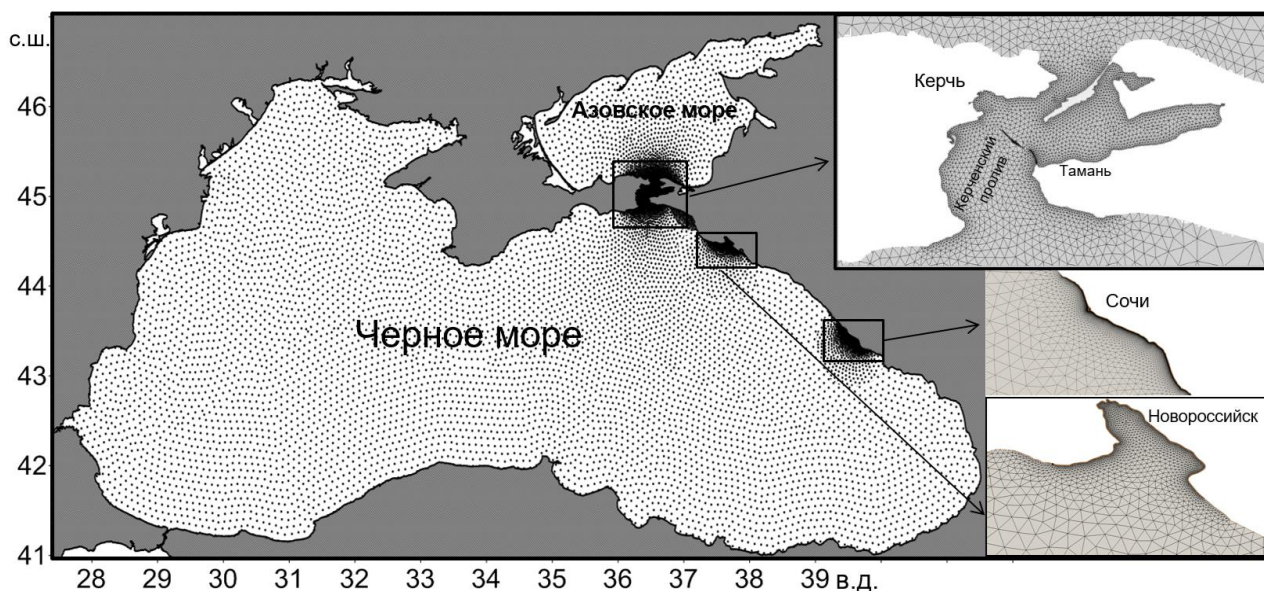


Рис. 1. Неструктурная сетка Черного моря с детализацией в шельфовых зонах.

Для верификации модели использовались данные буя волномера DWRG-4 (Datawell), лазерного уровнемера LD90-3200HiP (Riegl) и ультразвукового волнографа LOG_aLevel (General Acoustics).

Наиболее длинный ряд данных получен с помощью лазерного уровнемера Riegl, установленного в Цемесской бухте на конце нефтеналивного терминала нефтепорта «Шесхарис». Прибор измеряет высоту значительных волн с дискретностью по времени 15 минут и заявленной точностью 2 см [www.riegl.com]. Массив данных содержит измерения за 2010-2012 гг. (около 150 000 записей). Данные предоставлены А.И. Пономаревым, Гидрометеорологическое бюро «Новороссийск»).

Для оценки качества диагноза и прогноза волнения использовались данные спутников AltiKa, Envisat, Jason-1, Jason-2. Среднеквадратическая ошибка высоты значительных волн, измеряемых альтиметрами, обычно оценивается примерно в 0.3 м [Janssen, 2007]. В работе [Chiranjivi, 2016] для альтиметра AltiKa показано, что для высоты волн RMSE составляет 0.21 м, систематическая ошибка -0.04 м, для скорости ветра 1.75 м/с и 0.25 м/с соответственно.

В **Главе 3** описаны результаты диагностических расчетов волнения и проведена оценка качества воспроизведения волнения на глубокой и мелкой воде. Описаны результаты моделирования экстремального шторма 2007 года.

Приведены оценки качества моделирования волнения при использовании ветрового форсинга, полученного с помощью мезомасштабной модели WRF. Описана оперативная система прогноза ветрового волнения для Цемесской бухты, Керченского пролива и района Сочи.

Оценка качества диагностических расчетов на мелкой воде выполнялась для Цемесской бухты, где глубины меняются в пределах 10-25 м. Результаты расчетов по модели SWAN (с ветровым форсингом из реанализа NCEP/CFRS) с временным интервалом 15 минут сравнивались в точке с данными измерений в Цемесской бухте на пирсе Шесхарис (глубина 22 м). Сравнение производилось для периода с 1 января 2010 по 31 декабря 2012. На рис. 2 приведены фрагменты сравнения высоты значительных волн за зимние месяцы 2010 года.

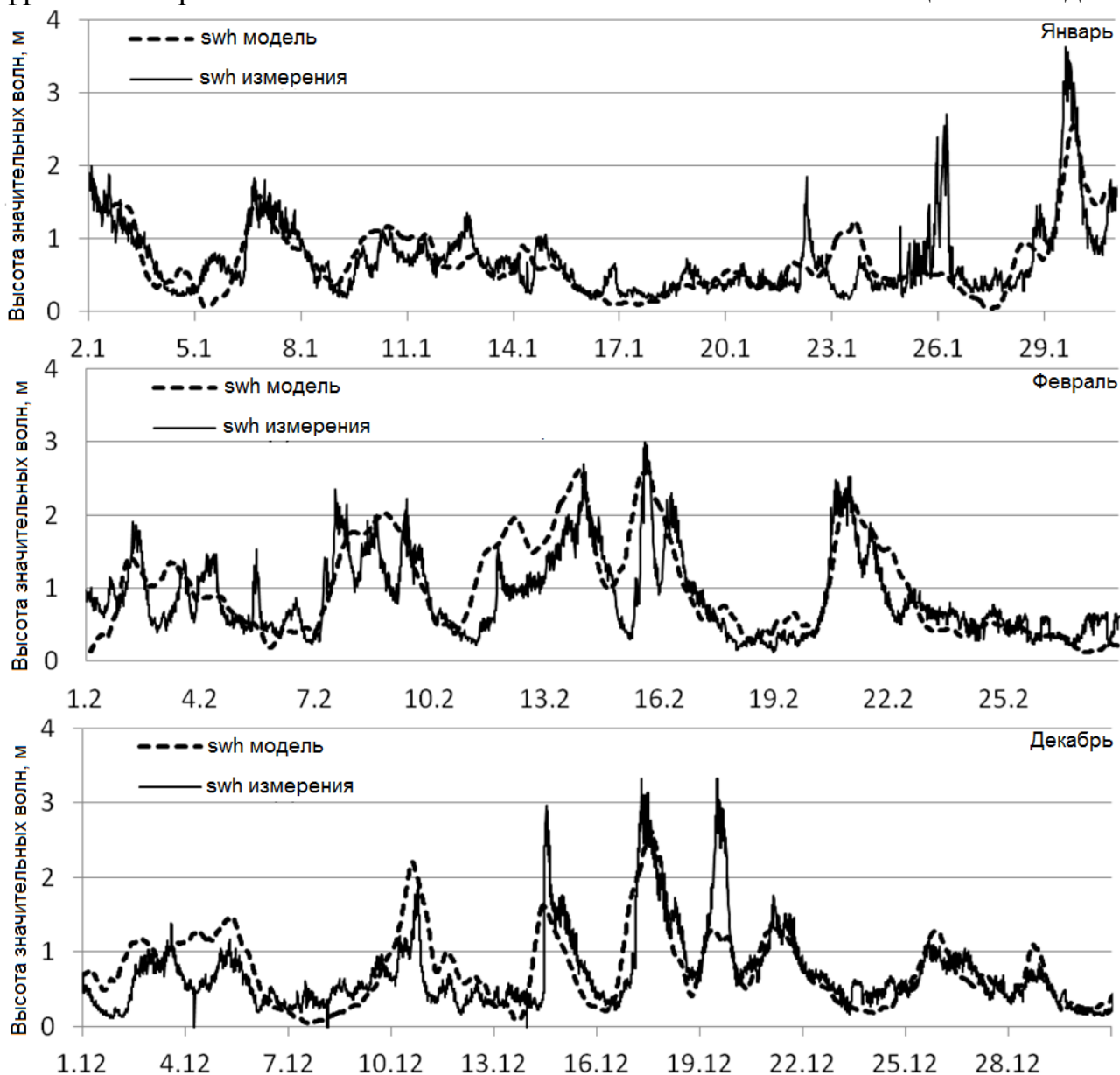


Рис. 2. Сравнение высоты значительных волн по данным моделирования и измерений в Цемесской бухте в 2010 году.

Высота значительных волн по данным измерений во время штормов составляет, как правило, 2-3 м (в отдельных случаях более 3 м). В целом модель

SWAN довольно точно воспроизводит как фазу наступления максимального волнения, так и абсолютные высоты волны (рис. 2). Максимальные ошибки наблюдаются при очень быстром и резком увеличении высоты волны, что может объясняться недостаточным временным шагом входных данных по ветру (1 час), в результате чего инерция модели оказывается большей по сравнению с реальными временными масштабами волновых процессов.

Верификация волновой модели выполнялась на основе сравнения результатов моделирования высоты значительных волн с данными наблюдений и включала следующие статистические параметры:

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Sw_{h_{model,i}} - Sw_{h_{obs,i}})}{n} \quad RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Sw_{h_{model,i}} - Sw_{h_{obs,i}})^2}{n}}$$

$$SI = \frac{RMSE}{\overline{Sw_{h_{obs}}}} \quad R = \frac{\sum_{i=1}^n (Sw_{h_{model,i}} - \overline{Sw_{h_{model}}}) \cdot (Sw_{h_{obs,i}} - \overline{Sw_{h_{obs}}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Sw_{h_{model,i}} - \overline{Sw_{h_{model}}})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (Sw_{h_{obs,i}} - \overline{Sw_{h_{obs}}})^2}}$$

где *BIAS*-систематическая ошибка; *RMSE* - среднеквадратическая ошибка; *SI*-индекс рассеяния; *R* - коэффициент корреляции; *Sw_{h_{obs,i}}* - высота значительных волн по данным наблюдений, $\overline{Sw_{h_{obs}}}$ - среднее значение по данным наблюдений, *Sw_{h_{model,i}}* - модельная высота значительных волн; $\overline{Sw_{h_{model}}}$ - среднее по данным модели и *n* - общее количество данных.

Результаты анализа всего ряда данных (~150000 значений) представлены в таблице 1. С мая по октябрь наблюдается низкая корреляция и большое отклонение, что связано с отсутствием бризов в полях ветра реанализа NCEP/CFRSR, преобладающих в летний период. Шаг сетки реанализа не позволяет воспроизвести многие мезомасштабные эффекты, в том числе бризовую циркуляцию. В зимний период корреляция составляет 0.75-0.85, а отклонение не превышает 0.2 м. Исключив период апрель-октябрь из анализа мы получим коэффициент корреляции 0.8, *BIAS* -0.1 м и *RMSE* 0.3 м. Похожие оценки были получены ранее в исследованиях [Акпинар, 2016] для моделирования на глубокой воде. В нашем случае моделирование производилось для более сложных условий в прибрежной зоне, поэтому полученные результаты вполне удовлетворительны.

На рис. 3 представлена диаграмма рассеяния и график распределения систематической ошибки при сравнении результатов модели и данных наблюдений для 2011 г. Облако точек вытянуто вдоль биссектрисы, что является хорошим результатом и подтверждает адекватное воспроизведение моделью реальных условий волнения. Анализ распределения ошибок показал, что при высоте волн до 2-2.5 м систематическая ошибка незначительна. Ошибка достигает -1 м при высоте волн 2.5-3 м (рис. 3). Анализ распределения ошибок позволил оценить качество модели во время штормов, когда правильный диагноз и прогноз волнения являются особенно важными.

Для оценки качества моделирования на глубокой воде произведено сравнение с данными спутниковых альтиметров. Расстояние между точками модели и альтиметра не превышало 10-12 км.

Таблица 1.

Статистические показатели оценки качества диагноза высоты значительных волн на мелкой воде.

Месяц	2010				2011				2012			
	R	Bias	RMSE	SI	R	Bias	RMSE	SI	R	Bias	RMSE	SI
январь	0.78	-0.06	0.38	0.52	0.81	-0.12	0.26	0.53	0.83	-0.04	0.24	0.38
февраль	0.85	0.09	0.43	0.51	0.92	-0.19	0.30	0.49	0.62	-0.01	0.32	0.63
март	0.71	-0.17	0.31	0.48	0.91	-0.12	0.20	0.39	0.88	-0.14	0.31	0.47
апрель	0.54	-0.15	0.25	0.56	0.87	-0.17	0.31	0.46	0.85	0.01	0.29	0.56
май	0.35	-0.15	0.23	0.58	0.26	-0.18	0.24	0.68	0.61	-0.14	0.21	0.60
июнь	0.53	-0.23	0.30	0.66	0.78	-0.28	0.32	0.62	0.58	-0.23	0.28	0.69
июль	0.51	-0.30	0.33	0.71	0.41	-0.31	0.34	0.74	0.57	-0.29	0.34	0.71
август	0.30	-0.28	0.31	0.67	0.44	-0.28	0.31	0.68	0.52	-0.26	0.31	0.66
сентябрь	0.60	-0.17	0.22	0.56	0.51	-0.22	0.24	0.68	0.13	-0.24	0.27	0.72
октябрь	0.72	-0.1	0.22	0.53	0.73	-0.13	0.21	0.50	0.87	-0.15	0.23	0.50
ноябрь	0.89	-0.04	0.27	0.38	0.80	-0.17	0.22	0.62	0.79	-0.13	0.22	0.54
декабрь	0.77	0.08	0.40	0.58	0.74	-0.01	0.30	0.48	0.84	-0.06	0.26	0.45
Среднее	0.75	-0.12	0.31	0.56	0.81	-0.17	0.27	0.57	0.76	-0.15	0.27	0.57
Среднее (май-сент. исключен)	0.81	-0.04	0.34	0.51	0.83	-0.12	0.26	0.5	0.81	-0.08	0.26	0.49

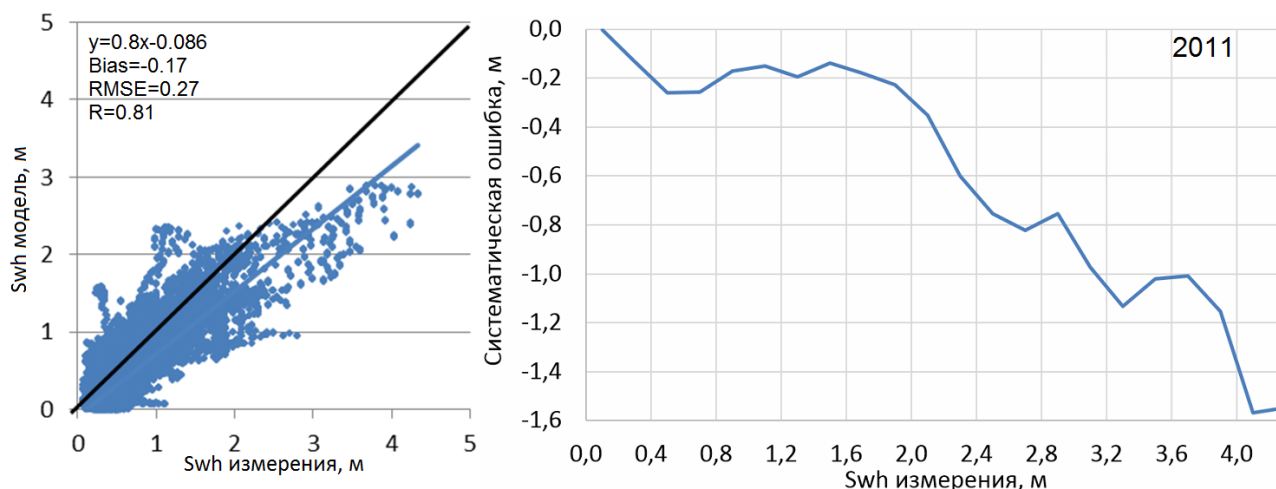


Рис. 3. Диаграмма рассеяния (слева) и распределение ошибок моделирования (справа) высоты значительных волн для 2011 года.

В целом результаты моделирования хорошо согласуются с данными спутников в 2010 и 2011 годах (рис. 4). RMSE составляет около 0.35-0.38 м, коэффициент корреляции 0.85-0.87. Этот результат лучше, чем в работе [Van Vledder, 2015], где при сравнении данных волновой модели со спутниками ERS-1, ERS-2, Торех было получено RMSE 0.41 и R 0.78. Возможно, это объясняется использованием в нашем случае других спутников и реанализа NCEP/CFRSR с улучшенным до 0.2° пространственным разрешением.

На основе прогнозов ветра GFS- 0.25° создана система оперативного прогноза волнения с заблаговременностью 72 часа и дискретностью выдачи

результатов 3 часа. Данные атмосферной модели GFS подготавливаются для волновой модели SWAN, с помощью которой затем осуществляется расчет параметров волнения. Рассчитывается высота значительных волн, направление, период, высота зыби, длина волны, перенос волновой энергии.

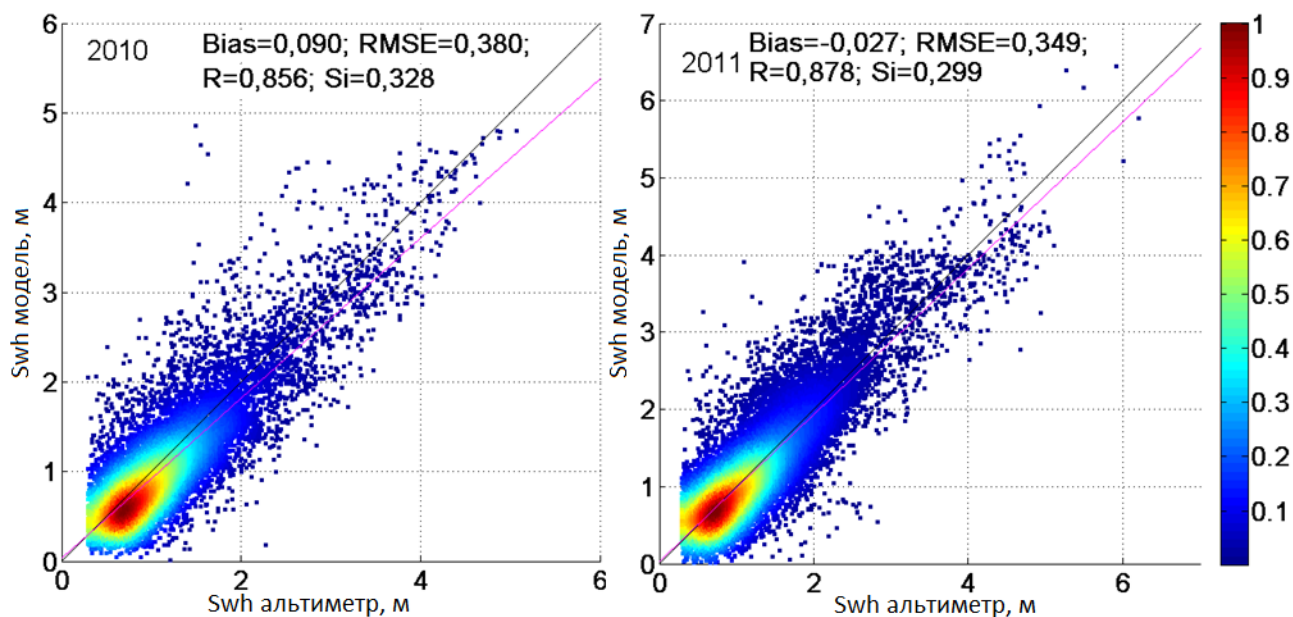


Рис. 4. Сравнение высоты значительных волн по модели SWAN с данным альтиметров за 2010 и 2011 год.

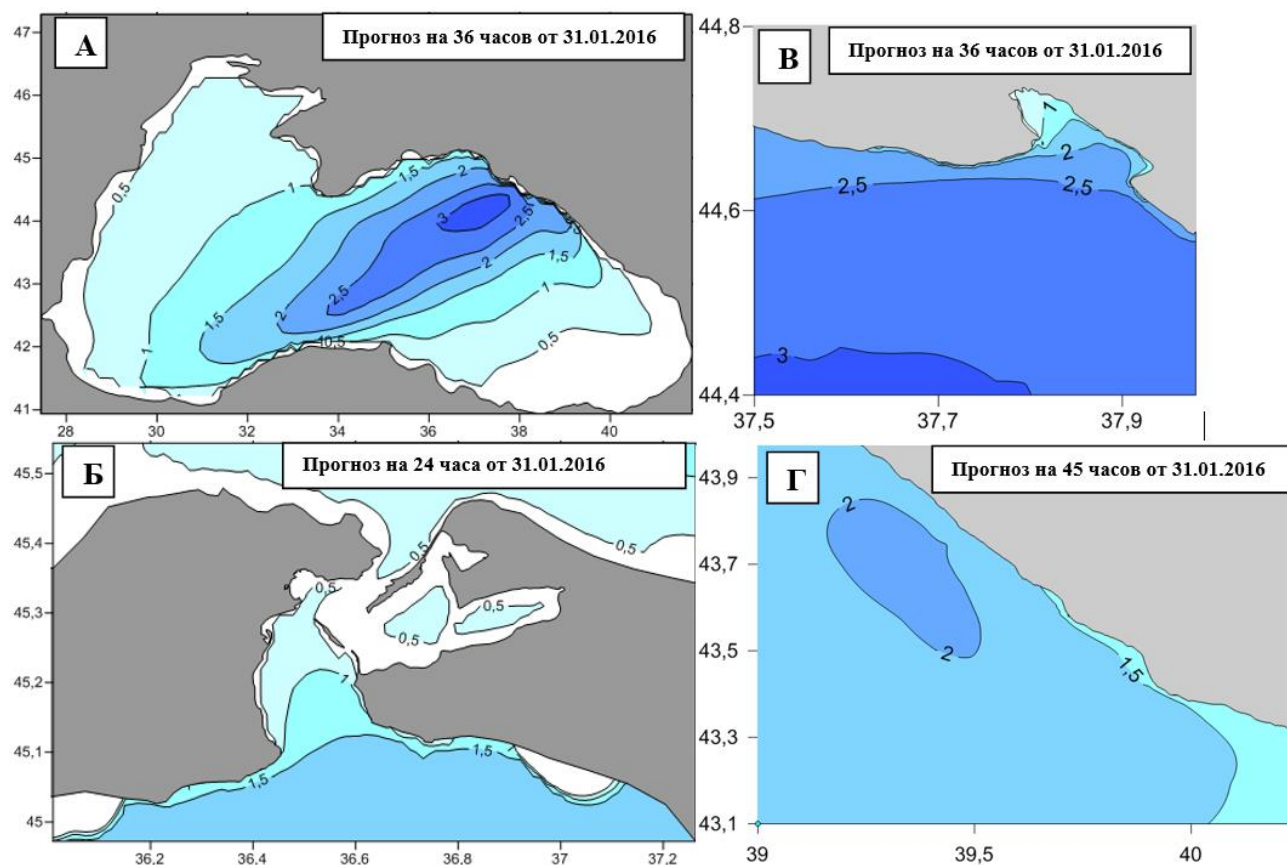


Рис. 5. Пример прогноза высоты значительных волн (м) для Черного моря (А), Керченского пролива (Б), Цемесской бухты (В) и района Сочи (Г).

Затем реализуется блок постпроцессинга: строятся карты распределения параметров волнения для акватории Черного моря и для прибрежных районов (Керченский пролив, Цемесская бухта, район Сочи) в увеличенном масштабе. На рис. 5 представлен пример прогноза высоты значительных волн на 24-45 часов от 31.01.2016 г. для всего Черного моря и отдельно для прибрежных районов, где параметры волнения моделируются с высоким пространственным разрешением.

В Главе 4 приведены результаты численных экспериментов на чувствительность модели к вариациям параметров, характеризующих ветровую накачку, диссипацию и разгон.

Известно, что мезомасштабные метеорологические модели способны существенно улучшить качество воспроизведения приземного ветра, в том числе благодаря проведению вычислений на сетках высокого пространственного разрешения (см., например, [Торопов, 2014]). Повышение качества воспроизведения поля ветра непосредственным образом сказывается и на качестве диагноза и прогноза волнения. Как правило, мезомасштабные модели используют сетки высокого разрешения для небольших районов, так как увеличение количества узлов вызывает увеличение нагрузки на вычислительные машины. Следовательно, необходимо определить размер области, где целесообразно применение мезомасштабных моделей для улучшения качества прогноза волнения в конкретном районе.

Волнение в выбранной конкретной точке формируется как за счет непосредственного воздействия локального ветра, так и в результате распространения волн из других районов. Следовательно, результаты моделирования волнения для Цемесской бухты, включают в себя общую высоту волн, как формирующихся локально, так и приходящих извне.

В модели SWAN, в правой части уравнения баланса волновой энергии (9) находится член S_{tot} , отвечающий за источники и стоки волновой энергии.

В первом эксперименте на участке 60x60 км в районе Новороссийска (рис. 6) компонент S_{in} задавался равным нулю на каждом шаге вычислений:

$$S_{tot} = \cancel{S_{in}} + S_{nl3} + S_{nl4} + S_{ds,w} + S_{ds,b} + S_{ds,br} \quad (10)$$

На остальной акватории Черного моря S_{in} рассчитывался обычным образом. Таким образом удалось исключить влияние локального ветра на формирование волн в Цемесской бухте. Во втором контрольном эксперименте расчеты производились по стандартной методике без ограничения накачки. Результаты двух экспериментов представлены для точки в Цемесской бухте (рис. 7), где ранее производилась оценка качества модели. Сравнение высоты значительных волн по результатам эксперимента 1 (с ограничением ветровой накачки) и эксперимента 2 позволяет утверждать, что при отсутствии локального ветра высота волн в среднем в 1.5-2 раза меньше, чем в контрольном эксперименте 2.

Однако, встречаются ситуации, когда величина высоты волн приблизительно одинакова по результатам обоих экспериментов, что говорит об отсутствии вклада локального ветра в формирование волн.

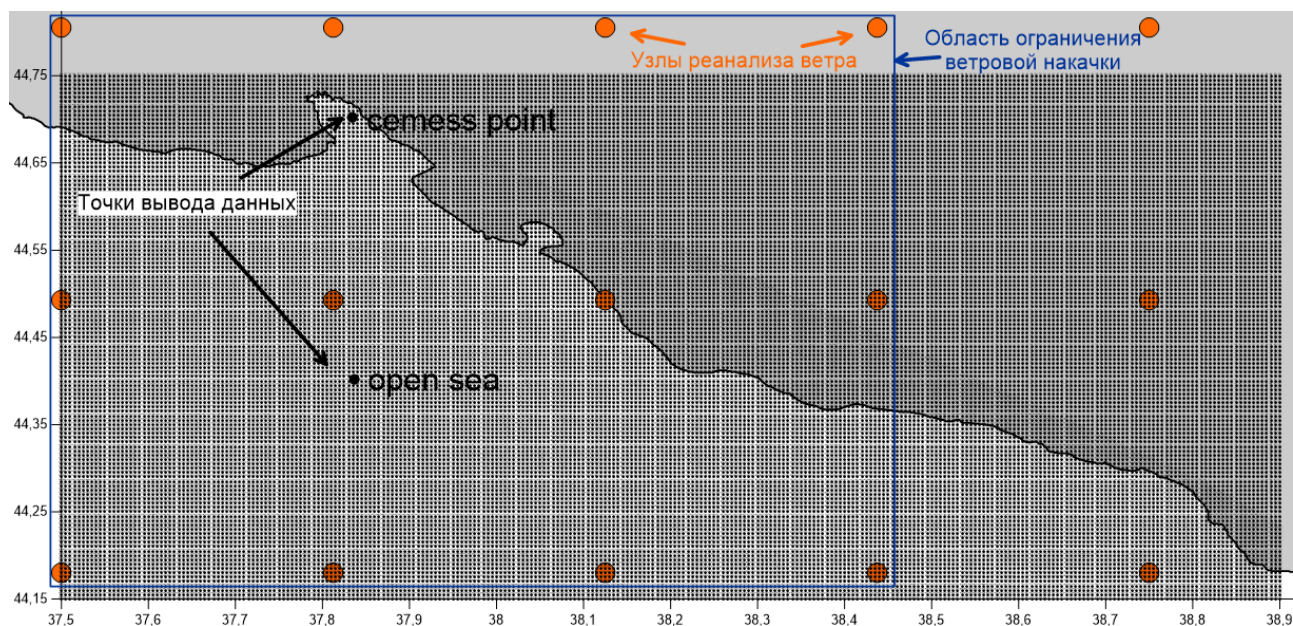


Рис. 6. Область ограничения ветровой накачки. Вложенная регулярная сетка для Цемесской бухты с шагом 0.05° . Точки вывода данных.



Рис. 7. Высота значительных волн (м) по результатам экспериментов 1 и 2.

Вклад волн, приходящих извне, (отношение средней высоты значительных волн по экспериментам 1 и 2), в среднем за весь период составляет 73 %. Соответственно, вклад локального ветра – оставшиеся 27%. Если анализировать распределение вклада локального ветра в высоту волн в зависимости от значений реальной высоты волн, полученной из эксперимента 2, то получим, что при увеличении абсолютных значений высоты волн вклад локального ветра увеличивается от 17 до 40 % (рис. 8).

Далее для каждой точки вычислительной сетки в пределах исследуемой области было рассчитано отношение средней высоты волн по данным

экспериментов 1 и 2 за 2010 год (для высоты волн более 2 м), чтобы оценить пространственную неоднородность вклада локального ветра в высоту волн (рис. 8). В открытом море и на входе в бухту вклад локального ветра не превышает 20%, что связано с близостью к границе области ограничения накачки, где результаты обоих экспериментов совпадают, а также со слабой диссипацией на глубокой воде. В глубине бухты влияние локального ветра увеличивается до 40%, что связано с существенной диссипацией энергии волн, приходящих из-за границ области.

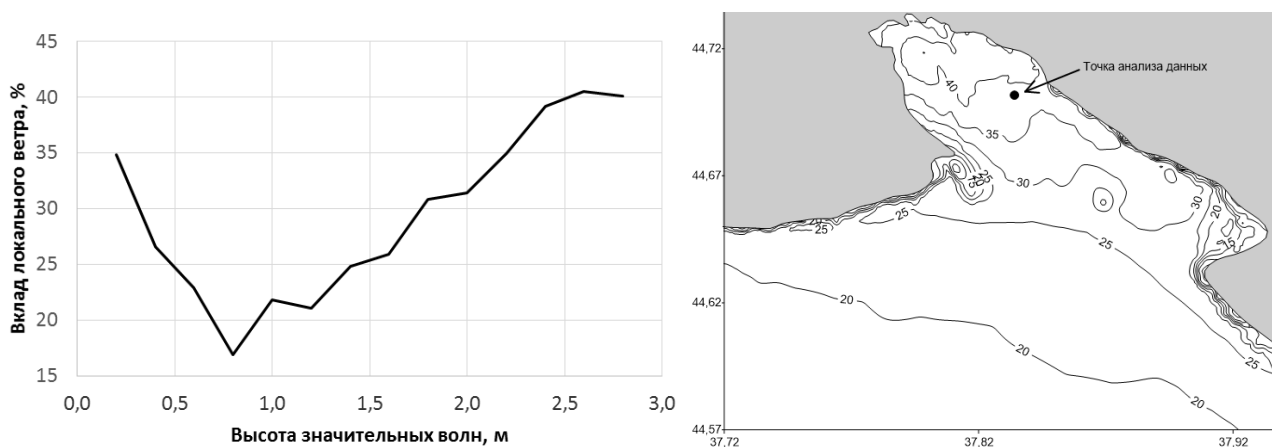


Рис. 8. Распределение вклада локального ветра (%) по абсолютным высотам волн (слева) и его пространственная неоднородность в Цемесской бухте.

В результате выполненных численных экспериментов установлено, что вклад локального ветра (для акватории 60x60 км) не является определяющим для формирования волн в Цемесской бухте и составляет 25–40%. Область ограничения ветровой накачки ветра можно увеличивать или уменьшать, получая подобные оценки в диапазоне от 0 до 100%. Данный метод можно эффективно использовать с целью максимального сокращения области моделирования, без существенных потерь качества воспроизведения волнения.

Рассмотрим более подробно спектры волнения для одного из штормов, зафиксированного в районе Цемесской бухты 20-22 февраля 2010 года (рис. 9). Для различных стадий шторма (отмечены линиями sp1-4 на рис. 9) построены графики спектральной плотности за период 30 мин. Спектры в Цемесской бухте и для точки в открытом море (рис. 6) для четырех стадий шторма представлены на рис. 10. Первое, что необходимо отметить – для точки в Цемесской бухте спектральная плотность на один порядок больше. В развитии шторма пики спектральной плотности приходятся на следующие частоты для открытого моря: Sp1-0.15 Гц, Sp2-0.11 Гц, Sp3-0.11 Гц, Sp4-0.10 Гц (рис. 10). По мере развития и затухания шторма пик смещается в низкочастотную область. Для Цемесской бухты картина несколько иная: Sp1-0.16 Гц, Sp2-0.12 Гц, Sp3-0.11 Гц, Sp4-0.086 Гц. Пик спектров также смещается в низкие частоты, однако в более широких пределах. Далее проанализированы спектры для результатов эксперимента 1 (с ограничением ветровой накачки). Спектральная плотность для точки в открытом море при ограничении накачки ожидаемо уменьшилась

(рис. 11). Форма спектров стала более компактной, пики спектров также смещаются в сторону низких частот по мере развития и затухания шторма.

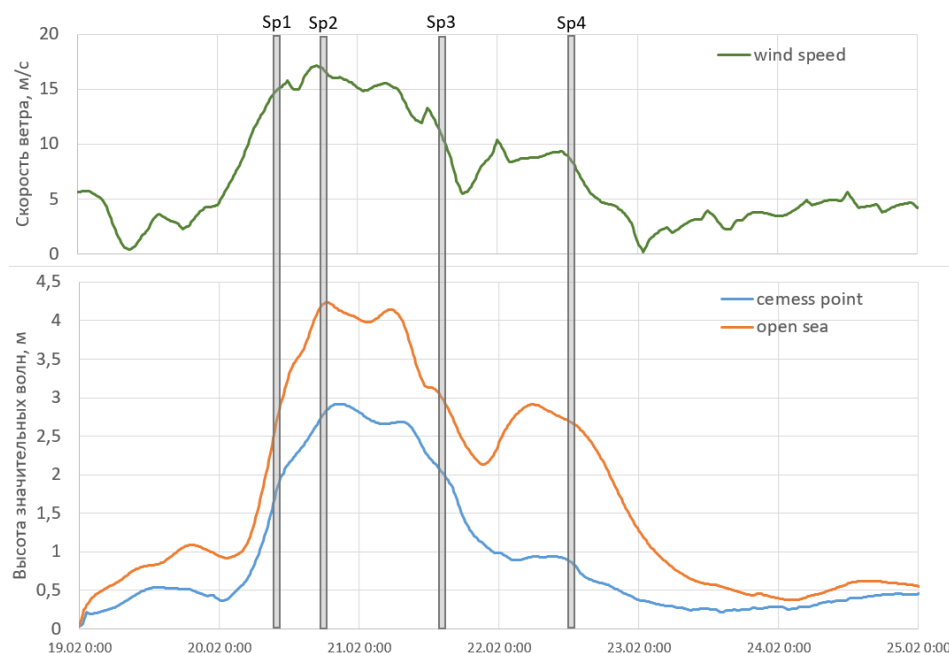


Рис. 9. Высоты значительных волн (м) в точке в Цемесской бухте (cemess point) и в открытом море (open sea), скорость ветра (м/с) в Цемесской бухте. Sp1, Sp2, Sp3, Sp4 – стадии шторма, для которых анализировались спектры.

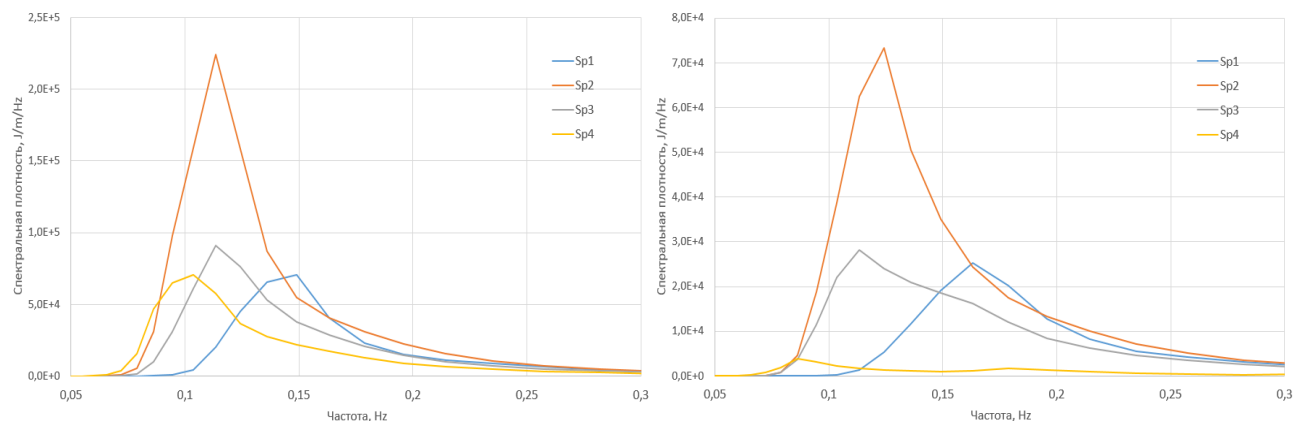


Рис. 10. Спектральная плотность для точек в открытом море (слева) и в Цемесской бухте (справа) по данным контрольного эксперимента.

Максимумы пика спектра, соответствующие последней стадии (Sp4), когда скорость ветра уменьшилась, для эксперимента с ограничением накачки и для контрольного эксперимента практически одинаковы (рис. 10-11). Это означает, что при отсутствии ветра волны с низкой частотой практически без изменений доходили до точки в открытом море. На этот процесс также влияет близость исследуемой точки к границе области. Для точки в Цемесской бухте результатам эксперимента 1 спектры существенно отличаются от спектров открытом море (рис. 11). Первый спектр Sp1 практически отсутствует, так как локально волны не генерируются, а из-за границ области ограничения накачки

энергия почти не доходит. Максимальная энергия в спектре наблюдается не на стадии Sp2, а на стадии затухания шторма (спектр Sp3). На финальной стадии спектр Sp4, также, как и при наличии ветра, имеет частоту 0.086 Гц, что соответствует периоду 11.5 сек.

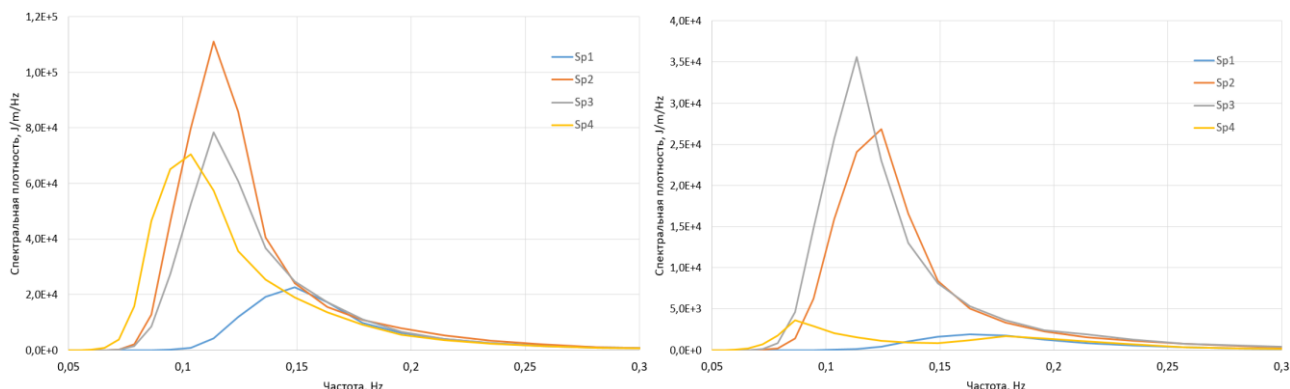


Рис. 11. Спектральная плотность для точек в открытом море (слева) и в Цемесской бухте (справа) по данным моделирования с ограничением накачки (эксперимент 1).

Далее был выполнен численный эксперимент №3, в котором были отключены и ветровая накачка, и процессы диссипации:

$$S_{tot} = \cancel{S_{in}} + S_{nl3} + S_{nl4} + \cancel{S_{ds,w}} + \cancel{S_{ds,b}} + \cancel{S_{ds,br}} \quad (11)$$

В данном эксперименте ветровая накачка отсутствовала локально в районе Цемесской бухты, а процессы диссипации отключены на всей акватории Черного моря. Сравнение высоты значительных волн за январь 2010 года по результатам эксперимента 3 и контрольного эксперимента 2 представлено на рис. 12. При отсутствии диссипации на акватории всего Черного моря, волны в Цемесскую бухту приходят с высотой в 1.5-2 раза больше, чем при стандартных условиях моделирования. Данный эксперимент показывает, насколько важен правильный учет члена $S_{ds,w}$ в уравнении (9).



Рис. 12. Высота значительных волн (м) по результатам экспериментов № 2 и 3.

Затем было проведено исследование чувствительности модели к отключению процессов диссипации непосредственно на той же области, где уже был ранее отключен ветер. Для решения этой задачи вычисления проводились на вложенной сетке с шагом 0.005° (рис. 6). На открытых границах области задавались спектральные характеристики волнения из эксперимента 2.

В эксперименте № 4 на вложенной сетке была ограничена ветровая накачка и отключены процессы диссипации, в эксперименте № 5 на вложенной сетке была ограничена только ветровая накачка. Результаты эксперимента № 5 повторяют эксперимент 1, но на вложенной сетке. Высота значительных волн экспериментов № 4 и 5 при сравнении с контрольным экспериментом практически во всех случаях меньше (рис. 13). Высота волн в эксперименте 4 на 0.2-0.3 м больше, чем для эксперимента 5. Этот эксперимент показывает, что вклад от локального ограничения процессов обрушения и донного трения в уменьшение интегральной высоты волн незначительный. Также на рис. 13 видно, что при небольшой высоте волн (<1.5 м) влияние процессов диссипации ощущается совсем слабо. Это объясняется малой длиной волн и, как следствие, уменьшением влияния донного трения и обрушения при их выходе на мелководье.



Рис. 13. Высота значительных волн (м) по результатам экспериментов № 2, 4, 5.

На основе моделирования волнения в Цемесской бухте проведена проверка зависимости между высотой и периодом волн при определенных условиях. Согласно работе [Zakharov, 2015], при ограниченном разгоне (например, если ветер дует с берега) рост волн не зависит от скорости ветра и регулируется только компонентами нелинейного волнового взаимодействия.

В условиях ограниченного разгона высота волн и период связаны следующим соотношением [Zakharov, 2015]:

$$H^* = 8\alpha_0^{3/4} T^{*5/2} \approx 5.59 T^{*5/2}, \quad \text{где} \quad H^* = \frac{H_s}{x} \quad - \quad \text{безразмерная высота волн;}$$

$T^* = T \sqrt{\frac{g}{8\pi^2 x}}$ - безразмерный период, x – разгон, H_s – высота значительных волн,

T – пиковый период.

Из данных моделирования за 2011 год было выбрано 15 точек, находящихся на расстоянии от 0.2 до 41 км от берега, вдоль перпендикулярной к берегу линии. Далее отобраны случаи, когда ветер дул с берега (направление 25-35°) вдоль линии выбранных из модели точек. Выборка по пространству и по углу направления ветра позволила ограничить длину разгона. Из отобранных случаев на основе высоты значительных волн и среднего периода рассчитаны безразмерная высота волн и безразмерный период (рис. 14) по формулам, представленным выше. В целом, полученные результаты хорошо согласуются с теоретической зависимостью (уравнение (4.1) [Zakharov, 2014]).

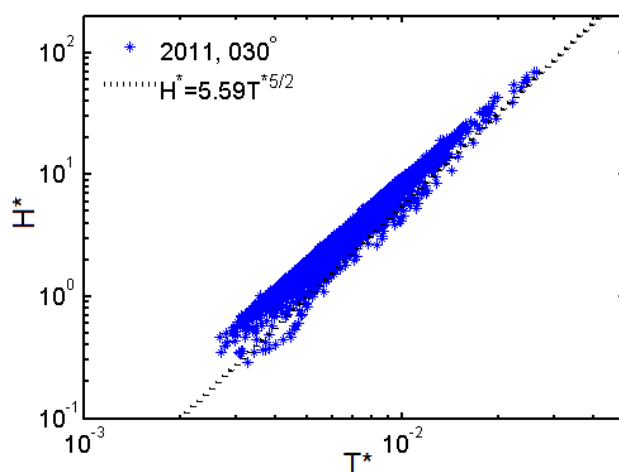


Рис. 14 Зависимость безразмерной высоты волн от безразмерного периода. Черным пунктиром обозначена линия, соответствующая степенной зависимости 5/2.

Хорошее совпадение результатов модели с теоретическим соотношением показало, что в модели верно воспроизводятся процессы генерации и распространения волн, в том числе и нелинейное волновое взаимодействие. Важно, что при выполнении этой проверки не используются данные о скорости ветра, которая может содержать ошибки.

В Заключение сформулированы основные результаты диссертации.

1. Получена новая реализация волновой модели SWAN для Черного моря на неструктурной сетке с высоким разрешением (20-100 м) в шельфовой зоне. Оценки точности воспроизведения волнения для диагностической версии следующие: на глубокой воде RMSE 0.38 м, коэффициент корреляции 0.88; на мелкой воде RMSE 0.3 м, коэффициент корреляции 0.8.
2. Создана оперативная система прогноза волнения в Черном море с детализацией в шельфовых зонах. Система работает в автоматическом режиме на основе прогностических полей ветра GFS-0.25° с заблаговременностью 72

часа. На мелкой воде средний коэффициент корреляции между данными наблюдений и прогнозами составляет 0.75, максимум 0.82 для прогнозов на 6 часов, минимум 0.62 для прогнозов на 72 часа. Среднеквадратическое отклонение изменяется от 0.08 м до 0.14 м, постепенно увеличиваясь с увеличением заблаговременности.

3. Предложена методика численного эксперимента для оценки чувствительности модели к вариациям параметров, характеризующих ветровую накачку, диссипацию и разгон, позволяющая при необходимости значительно сократить область моделирования без существенных потерь качества воспроизведения волнения.

4. Получена оценка вклада в общую высоту волн локального ветрового воздействия. Вклад локального ветра в высоту волн для акватории 60x60 км составляет 25-40 %. Вклад диссипации оценивается в 10-15% от высоты волн.

5. Выполнена проверка соответствия результатов моделирования теоретической степенной зависимости $(5/2)$ безразмерной высоты волн и безразмерного периода при ограниченном разгоне. Результаты моделирования хорошо согласуются с теоретическим соотношением, следовательно, в модели верно воспроизводятся процессы генерации и распространения волн, в том числе и нелинейное волновое взаимодействие.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность своему научному руководителю д.г.н. Е.С. Нестерову. Автор благодарит к.г.н. В.С. Архипкина и д.ф.-м.н. С.И. Бадулина за регулярные консультации по вопросам моделирования волнения. Автор благодарит своих соавторов и коллектив кафедры океанологии Географического факультета МГУ за плодотворное сотрудничество и помощь в исследовательской работе. Автор особенно признателен к.б.н. И.В. Волошиной, к.б.н. А.И. Мысленкову и К.П. Сильвестровой за поддержку и мотивацию при подготовке данной работы.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах из списка ВАК:

1. Мысленков С.А., Шестакова А.А., Торопов П.А. Численное моделирование штормового волнения у северо-восточного побережья Черного моря с использованием различного ветрового форсинга // Метеорология и гидрология, 2016, № 10, С. 61-71.

2. Myslenkov S.A., Chernyshova A.Yu 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, P. 1-12.

3. Мысленков С.А., Столярова Е.В. Прогноз ветрового волнения в Черном море с использованием прогностических полей ветра различного пространственного разрешения // Труды Гидрометцентра России, 2016, № 362, С. 55-65.

4. Ивонин Д.В., Мысленков С.А., Чернышов П.В. и др. Система мониторинга ветрового волнения в прибрежной зоне Черного моря на основе радиолокации,

прямых наблюдений и моделирования: первые результаты // Проблемы региональной экологии, 2013, № 4, С. 172-182.

5. P.A. Toropov, S.A. Myslenkov, A. A. Shestakova. Numerical simulation of Novorossiysk bora and related wind waves using the WRF-ARW and SWAN models // Russian Journal of Earth Science, 2012, Vol. 12, P. 1-7.

6. Торопов П.А., Мысленков С.А., Самсонов Т.Е. Численное моделирование Новороссийской боры и связанного с ней опасного ветрового волнения // Вестник МГУ, Сер. 5. География, №2, С. 38-46, 2013.

Прочие публикации:

1. Мысленков С.А., Архипкин В.С. Анализ ветрового волнения в Цемесской бухте черного моря с использованием модели SWAN // Труды Гидрометцентра России. 2013. № 350. С. 58-67.

2. Мысленков С.А., Архипкин В.С. Система регионального прогноза ветрового волнения в Цемесской бухте Черного моря // Труды ГОИН, 2014, № 215, С. 117-125.

3. Столярова Е.В., Мысленков С.А. Прогноз ветрового волнения высокого пространственного разрешения в Керченском проливе // Труды Гидрометцентра России, 2015, № 354, С. 24-35.

4. Мысленков С.А., Столярова Е.В., Архипкин В.С. Прогноз ветрового волнения высокого пространственного разрешения для Керченского пролива, Цемесской бухты и района Сочи // в сборнике конференции КИМР-2016, Севастополь.

5. Мысленков С.А., Столярова Е.В., Маркина М.Ю., Гиппиус Ф.Н. Сравнение потенциала волновой энергии в прибрежной зоне Черного и Баренцева морей // в сборнике конференции «Возобновляемые источники энергии». 2016.

6. Myslenkov S.A., Arkhipkin V.S. Verification of operational wave forecast for Tsemes Bay of the Black Sea. International Scientific Conference "Science of the future", Saint Petersburg, Russia, 2014.

7. Arkhipkin V.S., Myslenkov S.A. The regional wave forecast system for Tsemes Bay of the Black Sea // 3-rd International Conference on the Dynamics of Coastal Zone of Non-Tidal Seas, Russia, Gelendzhik, Россия, 2014.

8. Мысленков С.А., Архипкин В.С., Суркова Г.В., Добролюбов С.А., Koltermann K. Some features of the storm on the Black sea in June 2011. IGC 2012 (IGU), Кельн, Германия, 2012.

В Российском агентстве по патентам и товарным знакам получено свидетельство о регистрации базы данных: Архипкин В.С., Малярченко Е.А., Мысленков С.А., Самсонов Т.Е. База Данных Ветрового Волнения Черного моря // № 2013621524. Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам.