

УДК 551.46,551.5

ВЕТРОВЫЕ ВОЛНЫ В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ ЮЖНОГО БЕРЕГА КРЫМА – ОЦЕНКА КАЧЕСТВА МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ МОРСКИХ НАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

© 2016 г. М. В. Шокуров, В. А. Дулов, Е. В. Скиба, В. Е. Смолон

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь**e-mail: shokurov.m@gmail.com*

Поступила в редакцию 22.09.2014 г.

После доработки 08.04.2015 г.

Работа посвящена верификации волновой модели для Черного моря с помощью натуральных данных с океанографической платформы в пос. Качивели. Волновая модель WAM и мезомасштабные модели атмосферы MM5 и WRF, которые дают поле ветра для волновой модели, адаптированы к Черноморскому региону в Морском гидрофизическом институте. Результаты работы представлены в виде характеристик качества моделирования, используемых в мировой практике для других регионов. Получено, что индекс рассеяния для высоты значительных волн равен 70% летом и 50% зимой. Величины индексов рассеяния для волновых характеристик и скорости ветра оказываются на том же уровне, что и для полузакрытых морей с северной стороны Средиземного моря. Показано, что моделирование атмосферы правильно воспроизводит взаимодействие синоптических процессов с вытянутым вдоль берега горным хребтом. Обсуждены источники ошибок при расчетах волновых полей, наиболее существенный из которых – возможность реализации мезомасштабной неустойчивости модели атмосферы без ассимиляции наблюдений внутри расчетной области.

DOI: 10.7868/S0030157416020192

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия достигнут значительный прогресс в моделировании морского волнения, что позволяет с определенной степенью надежности решать практические задачи в областях прогноза волнения для безопасности мореплавания, использования ресурсов шельфа, оценки волнового климата и его трендов, а также решать научные задачи исследования метео-волновых явлений с помощью модельных расчетов. Для этого результаты глобального моделирования атмосферы используются в мезомасштабных моделях атмосферы и волнения, которые предварительно нужно адаптировать к определенному региону. Мезомасштабные атмосферные модели MM5 и WRF вместе с волновой моделью WAM, адаптированные к Черноморскому региону в последнее десятилетие в Морском гидрофизическом институте в г. Севастополе (МГИ, до 2014 г. в ведомстве НАН Украины), используются сейчас для оценки волнового климата [2], краткосрочного метеорологического и волнового прогнозов [16], исследований волн [15] и типичных прибрежных атмосферных явлений в Черном море [1]. Научная океанологическая сторона вопроса состоит в выборе в региональных моделях правильных параметризаций природных процессов и учета региональных особенностей [3, 7], а также последу-

ющей верификации моделей, к которой нужен свой обоснованный подход.

Качество работы волновых моделей существенно различается, рассматриваем ли мы открытый океан, или замкнутые моря. Традиционно оно характеризуется индексом рассеяния SI – отношением среднеквадратичной ошибки моделирования физической величины к ее наблюдаемому среднему значению. Величины SI для скорости ветра, высоты значительных волн и периода пика волнового спектра при глобальном прогнозе доведены до значений, близких к 15% [20]. Но уже на масштабах Средиземного моря величина SI возрастает до 30–70% [8, 11, 12]. Поскольку на вход волновой модели подается векторное поле скорости ветра на горизонте 10 м, которое является результатом моделирования атмосферы, качество моделирования волн во многом определяется качеством атмосферного моделирования. В частности, волновые характеристики в северной части Средиземного моря моделируются хуже, чем в его южной части из-за наличия на северной стороне берегового горного рельефа, недостаточно адекватно учитываемого атмосферными моделями [8, 11]. Целенаправленная валидация волновой модели в Черном море, по-видимому, не выполнялась. Данная работа призвана, в какой-то мере, восполнить этот пробел.

Стандартный подход к этой задаче подразумевает сопоставление данных из трех источников — результатов модельных расчетов, спутниковых данных и натуральных записей с метеорологических и волновых буев [8, 12]. Как правило, поля скорости ветра и волновых характеристик, восстановленные по спутниковым данным, калибруются с использованием имеющихся натуральных данных [12]. Это, в свою очередь, позволяет выполнить систематическое сравнение модельных и спутниковых полей для всего исследуемого бассейна. Однако в Черном море отсутствуют метеорологические и волновые буи, данные которых можно получить в открытом доступе. Поэтому надежность самих спутниковых данных для Черного моря (скажем, известного объединенного массива SeaWind [22]), строго говоря, нуждается в подтверждении. В данной работе результаты модельных расчетов волновых характеристик сопоставлены с натурными данными, полученными со Стационарной океанографической платформы Экспериментального отделения МГИ в пос. Качивели. Отметим, что волны, наблюдаемые в определенной точке замкнутого бассейна, развиваются под воздействием ветра на всей его площади. Поэтому сравнение измеренных волновых характеристик с рассчитанными дает косвенный способ верификации атмосферных моделей, оценки их “интегрального качества”, относящегося ко всему ветровому полю над морем. Данная работа имеет целью дать такую оценку для Черного моря в виде характеристик, используемых в аналогичных оценках для Средиземного моря и при глобальном моделировании. Работа также демонстрирует возможные причины наблюдаемых расхождений.

2. ОПИСАНИЕ ДАННЫХ

2.1. Натурные измерения. Натурные данные были получены со Стационарной океанографической платформы (33°59' в.д., 44°23' с.ш.) вблизи пос. Качивели на Южном берегу Крыма в течение трех представительных периодов: октябрь 2012 г.—апрель 2013 г., июль—октябрь 2012 г. и сентябрь—октябрь 2011 г. Платформа находится на расстоянии 0.5 км от берега, где глубина моря составляет около 30 м. Вдоль береговой линии на расстоянии примерно 4 км расположено горное плато высотой около 1000 м, а между ним и берегом происходит постепенное уменьшение высоты поверхности. Внешний вид платформы, ее расположение относительно береговой черты, схематичный разрез рельефа береговой зоны в направлении по нормали к берегу приведены в работах [5, 16, и мн. др.].

Скорость и направление ветра регистрировалась на горизонте 21 м с периодом 1 мин метеостанцией “Davis Vantage Pro 2”, установленной на платформе. Для сравнения с расчетами были использованы векторы скорости ветра, усредненные

по двадцатиминутному интервалу, центр которого соответствовал моменту времени расчетной точки.

Поверхностные волны регистрировались с частотой 10 Гц решеткой из шести резистивных волнографов с диаметром струн 0.25 мм. Каждый датчик измерял возвышения морской поверхности с ошибкой менее 1 см при высотах волн до 4 м. Пять струн были расположены в вершинах правильного пятиугольника с радиусом 25 см и одна — в его центре, что позволяло определять частотные и угловые характеристики волн с длинами от 1.5 до 100 м. Возмущения, вносимые решеткой в измеряемое волновое поле, были минимизированы благодаря оригинальной системе подвески. Вся конструкция неподвижно удерживалась подъемным выстрелом на расстоянии 10 м от ближайшей колонны платформы. Для выполнения прямой сквозной калибровки измерительного-регистрирующего тракта решетка поднималась или опускалась как целое, при этом точно измерялись величины ее вертикальных смещений [6]. Конструктивные детали системы описаны в работе [4]. Для регистрации волн в период октябрь 2012 г.—апрель 2013 г. была применена специально сконструированная система, состоящая из одного струнного волнографа с повышенными прочностными характеристиками, позволяющая регистрировать волны с высотами до 10 м. Технические детали системы были сохранены теми же, но данные передавались по радиоканалу на приемное устройство, расположенное на берегу.

Волновые данные прошли контроль качества с отбраковкой ненадежных фрагментов [6]. Для сравнения с расчетами использованы участки непрерывных записей длительностью 1 час. Для каждого участка были оценены частотный $S(f)$ и частотно-угловой $S(f, \vartheta)$ спектры возвышений морской поверхности ($S(f) = \int d\vartheta S(f, \vartheta)$). Двумерные спектры рассчитывались методом максимальной энтропии [17]. По спектру определялась высота значительных волн

$$H_S = 4\sigma, \quad \sigma^2 = \oint d\vartheta \int df S(f, \vartheta), \quad (1)$$

где σ^2 — дисперсия возвышений морской поверхности, а также средняя частота и направление волн спектрального пика

$$\bar{f} = \oint d\vartheta \int df f S(f, \vartheta) / \sigma^2, \quad (2)$$

$$\bar{\vartheta} = \arctg(b/a), \quad a = \oint d\vartheta \int df \cos(\vartheta) S(f, \vartheta), \quad (3)$$

$$b = \oint d\vartheta \int df \sin(\vartheta) S(f, \vartheta),$$

согласно определениям [12]. Хотя при сравнении расчетов с натурными наблюдениями традиционно используются величины периода и направления волн спектрального пика, в нашей работе, как в натуральных, так и в рассчитанных частотно-угловых

спектрах нередко наблюдаются несколько систем волн, характеристики которых трудно сопоставить. Поэтому ниже мы ограничимся лишь сравнением интегральных характеристик спектров $H_s, \bar{f}, \bar{\vartheta}$.

2.2. Атмосферное моделирование. В качестве входа для волновой модели мы использовали следующие типы данных, полученных в результате моделирования атмосферы над Черным морем и характеризующихся различным пространственным и временным разрешением.

1. Базовым источником служили результаты глобального оперативного анализа NCEP/NCAR, который выполняется в Национальном центре атмосферных исследований США (National Center of Atmospheric Research) с использованием всех доступных данных — наземных измерений, вертикальных зондирований, данных со спутников и др. Поля характеристик атмосферы с пространственным разрешением 0.5° (около 50 км) и дискретностью по времени 6 часов предоставляются в открытом доступе в сети Интернет на сайте [13].

2. Поля скорости ветра с более высоким пространственным разрешением были получены в МГИ с использованием мезомасштабной атмосферной модели MM5 и ее более современного варианта WRF (Weather Research and Forecasting) [21]. Модели были разработаны Национальным Центром Атмосферных Исследований США, а в МГИ была выполнена их адаптация к Черноморскому региону, которая заключалась в выборе наиболее подходящих схем параметризации физических процессов, а также более детальном задании свойств подстилающей поверхности, в особенности орографии [3]. Расчетная область для региональных моделей покрывает всю акваторию Черного моря (39° – 49° с.ш., 25° – 45° в.д.), а в качестве боковых граничных условий используются результаты глобального оперативного анализа. С помощью модели MM5 для всего Черноморского региона был выполнен ретроспективный анализ с пространственным разрешением 18 км и временным разрешением 1 ч, охватывающий промежуток времени 2000–2013 гг.

3. Начиная с 2007 года, МГИ выполняет для Черноморского региона оперативный прогноз погоды с использованием модели MM5. Пространственное разрешение для всего Черноморского региона равно 10 км, а временное разрешение — 1 ч. Результаты прогноза выставляются в открытом доступе в сети Интернет на сайте [19]. Размеры расчетной области составляют 39° – 49° с.ш., 25° – 45° в.д., так что она покрывает всю акваторию Черного моря и позволяет анализировать как синоптическую ситуацию, так и мезомасштабные особенности. В качестве боковых граничных условий используются результаты глобального оперативного прогноза NCEP/NCAR [13]. На сегодняшний день в МГИ реализован краткосрочный метеорологический

прогноз для Азово-Черноморского региона с параллельным использованием двух мезомасштабных атмосферных моделей — MM5 и WRF.

Далее будем использовать результаты глобального оперативного анализа NCEP/NCAR, ре-анализа МГИ и прогноза МГИ в качестве входа волновой модели, а соответствующие данные для краткости будем обозначать номерами 1, 2 и 3.

2.3. Волновая модель для Черного моря и подход к сравнению данных расчета и измерений. Для моделирования волнения использовалась модель WAM (cycle 4), применяемая в настоящее время для прогноза и анализа ветровых волн в Мировом океане и внутренних водоемах [14, 18]. В основе модели лежит уравнение для спектра волнового действия, описывающее распространение волн при наличии течений и учитывающее взаимодействие волновых компонент в четырехволновом приближении. В правую часть уравнения добавлены члены, которые описывают генерацию волн ветром и их диссипацию за счет обрушений. Модель WAM предназначена для расчета частотно-углового спектра волн с дисперсионным соотношением для конечной глубины моря [14].

Расчет для всего бассейна Черного моря был выполнен на равномерной сетке с шагом 10 км. Шаг по времени, обеспечивающий устойчивость численной схемы, равнялся 5 мин. Течения Черного моря традиционно не учитывались, поскольку на данный момент информация о них недостаточно надежна. Поля скорости и направления ветра на горизонте 10 м вводились в модель WAM из данных 1–3 с помощью линейной интерполяции по пространству и по времени. Для сравнения с измерениями использовался частотно-угловой спектр волн $S(f, \vartheta)$ в точке расчетной сетки, ближайшей к точке измерений.

Для расчета спектра был выбран частотный диапазон 0.04–0.4 Гц на основе следующих рассуждений. На рис. 1 приведены полуэмпирические зависимости высоты значительных волн и периода волн спектрального пика от разгона волн и скорости ветра. Мы использовали формулы, приведенные на стр. 154 монографии [14], которые учитывают тот факт, что спектр волн по мере развития стремится к “предельному” спектру Пирсона-Московица. На рисунке показаны кривые для фиксированных частот спектрального пика и интересующего нас диапазона скоростей ветра. Рисунок для разгона означает, что для достижения указанной частоты пика при заданной скорости ветра волны должны пройти расстояние X . Продолжительность действия ветра на развивающиеся волны оценена по формуле $T = X/C_G$, где C_G — групповая скорость волн спектрального пика. Кривые обрываются при уменьшении скорости ветра, когда указанная частота пика недостижима, поскольку она ниже “предельной” частоты пика спектра Пирсона-Московица. Графики да-

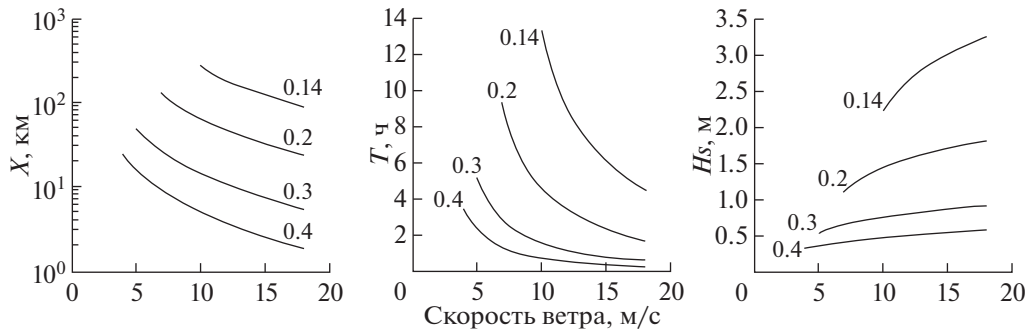


Рис. 1. Разгон (X), продолжительность действия ветра (T) и высота значительных волн (H_S) в зависимости от скорости ветра. Цифры указывают частоту спектрального пика в Гц.

ют представление о величинах волновых характеристик, которые можно ожидать в точке измерений.

На платформе в Качивели, как правило, наблюдаются спектры волн с частотами пика из диапазона 0.15–0.3 Гц. При скоростях ветра меньше, чем 3–5 м/с, как правило, присутствует зыбь, из-за чего величина высоты значительных волн H_S остается на уровне 0.2–0.3 м и выше. Как следует из рисунка, для развития таких волн требуются разгоны в десятки и сотни километров. Поэтому для моделирования волн в точке платформы необходимо проводить расчет для всей акватории Черного моря. Рисунок также показывает, что на волны в Качивели будут влиять ветровые условия, реализовавшиеся над Черным морем в период, предшествующий наблюдениям, длительностью в несколько (до десятка) часов. Если частота пика ветровых волн в Качивели равна 0.4 Гц или выше, то высота таких волн, как следует из рисунка для H_S , скорее всего, не будет превышать вклад “волнового фона”, связанного с зыбью. Исходя из перечисленных соображений, модельный расчет спектров волн выполнялся для области, покрывающей все Черное море. При этом прогностический (рассчитываемый) частотный участок спектра был ограничен максимальной частотой 0.4 Гц.

Отметим, что в последнее время получило распространение моделирование волновых характеристик на вложенных сетках [10], что позволяет детально учесть береговую линию. В нашем случае, при ограничении расчета максимальной частотой 0.4 Гц, такая детализация не имеет смысла, поскольку мы учитываем лишь волны, сформировавшиеся на площади, намного превышающей характерное расстояние между платформой и берегом. С другой стороны, в модельном спектре могут присутствовать волновые компоненты с частотами ниже 0.4 Гц, приходящие с направлений, которые в действительности лежат в зоне тени, порожденной деталями береговой линии. Чтобы исключить эти компоненты при сравнении с измерениями, будем рассматривать спектры только для интервала азимутов

прихода волн 45°–255°, соответствующего направлениям в сторону открытого моря. Подчеркнем, что во всех оценках спектров, полученных по измерениям, отсутствуют спектральные пики с частотами ниже 0.4 Гц, которые попадают в исключенную область.

Итак, для сравнения с измерениями будем использовать характеристики волн, определенные по рассчитанным спектрам с помощью формул (1)–(3), но интегрирование в этих формулах будем выполнять по интервалу частот ниже 0.4 Гц и интервалу азимутов прихода волн 45°–255°.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Рис. 2 позволяет сравнить натурные данные с модельным расчетом 3. Здесь для зимнего сезона 2012–2013 гг. показаны высота значительных волн и средняя частота волн, рассчитанные по формулам (1)–(2). Как следует из графиков, в штилевые периоды наблюдаемая величина H_S остается на уровне двух-трех десятков сантиметров, в то время как рассчитанные величины H_S иногда оказываются на порядок меньшими. Эти ситуации соответствуют наблюдениям слабой зыби в условиях, когда зыбь отсутствует в модельном расчете. В соответствующие моменты на графике для средней частоты волн можно видеть резкие “выбросы”, где рассчитанная \bar{f} существенно выше измеренной. Тот факт, что волновые модели плохо описывают затухание волн зыби, неоднократно упоминался в литературе – см., например, [9]. Хотя корректное описание волн при штиле вряд ли представляет большую практическую важность, отмеченные расхождения влияют на статистические характеристики качества моделирования.

Штормовые условия на графике выделяются по пикам высоты значительных волн. В окрестностях пиков рассчитанные величины H_S могут быть как ниже (в марте 2013 г.), так и выше наблюдаемых величин. Такие расхождения могут достигать десятков процентов. Причина подобных значительных

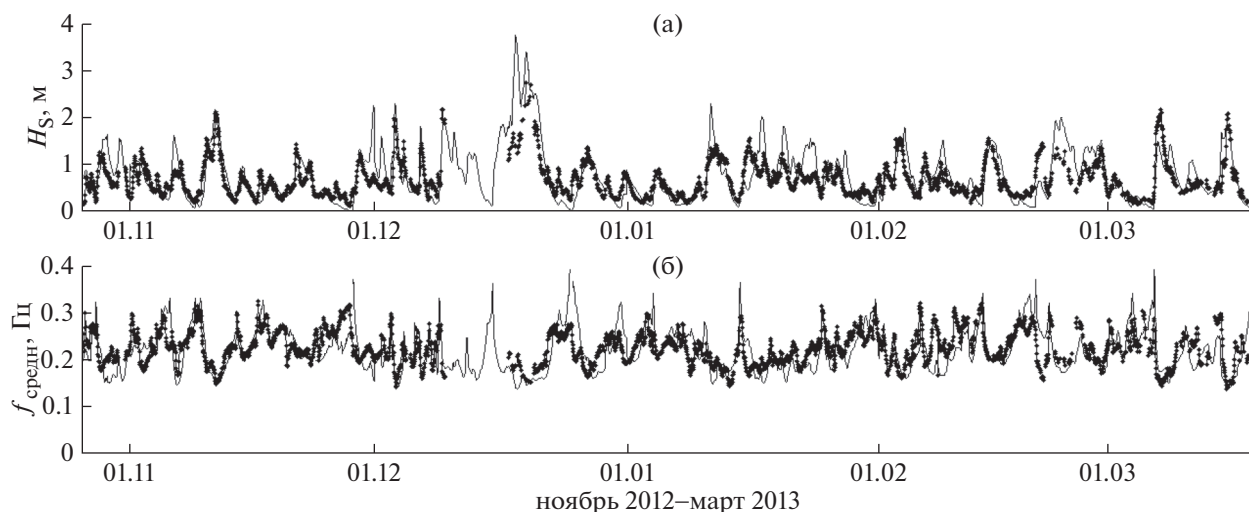


Рис. 2. Высота значительных волн (а) и средняя частота волн (б) в зимний период 2012–2013 гг. Точки – натурные данные, линия – расчет 3 (оперативный атмосферный прогноз МГИ с разрешением 10 км).

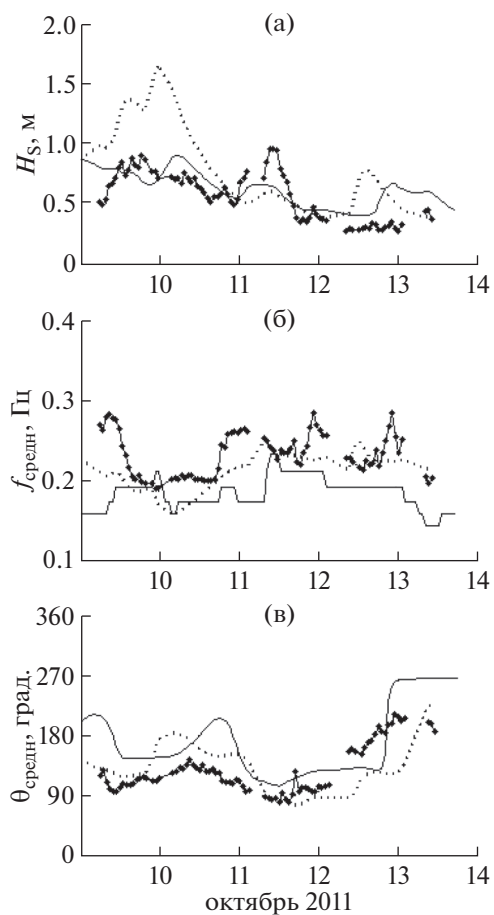


Рис. 3. Фрагмент данных за октябрь 2011 г. (а) – высота значительных волн, (б) – средняя частота волн, (в) – среднее направление волн. Точки – натурные данные, сплошная линия – расчет 1 (оперативный атмосферный анализ NCEP/ NCAR с разрешением 50 км), прерывистая линия – расчет 3 (оперативный атмосферный прогноз МГИ с разрешением 10 км).

расхождений, как будет показано далее, связана в основном с неточностью расчета скорости ветра атмосферными моделями. Однако, несмотря на отмеченные пункты, рис. 2 демонстрирует явную корреляцию измеренных и рассчитанных величин. Вышесказанное можно отнести к сравнению всех расчетов со всеми данными.

На рис. 3 приведен фрагмент записей 2011 г. Рисунок демонстрирует детальный временной ход данных, включая среднее направление волн (см. формулу (3)). Здесь в качестве направления волн принят географический азимут, с которого приходят волны (по аналогии с направлением ветра). Рис. 3 также позволяет сравнить результаты расчетов 1 и 3. Для даты 10 октября можно видеть аномально сильное расхождение графиков для H_S , оно будет специально обсуждено ниже. Типичными являются расхождения H_S для других дат, а также показанные на рисунке расхождения \bar{f} и $\bar{\theta}$.

На рис. 4 приведены примеры диаграмм рассеяния для высоты значительных волн и средней частоты, построенные путем объединения данных всех периодов измерений. Шкала оттенков серого дает относительные частоты точек с фиксированными значениями измеренных и рассчитанных величин. Диаграммы иллюстрируют степень соответствия между результатами расчетов и измерений. Как следует из рисунка, расчет 1 занижает значения H_S , а расчет 3 завышает их. В то же время диаграммы рассеяния для средних частот волн практически одинаковы для расчетов 1 и 3.

Охарактеризуем степень соответствия количественно, рассчитав следующие характеристики качества моделирования: смещение

$$bias = \langle U_{mod} \rangle - \langle U_{mes} \rangle, \quad (4)$$

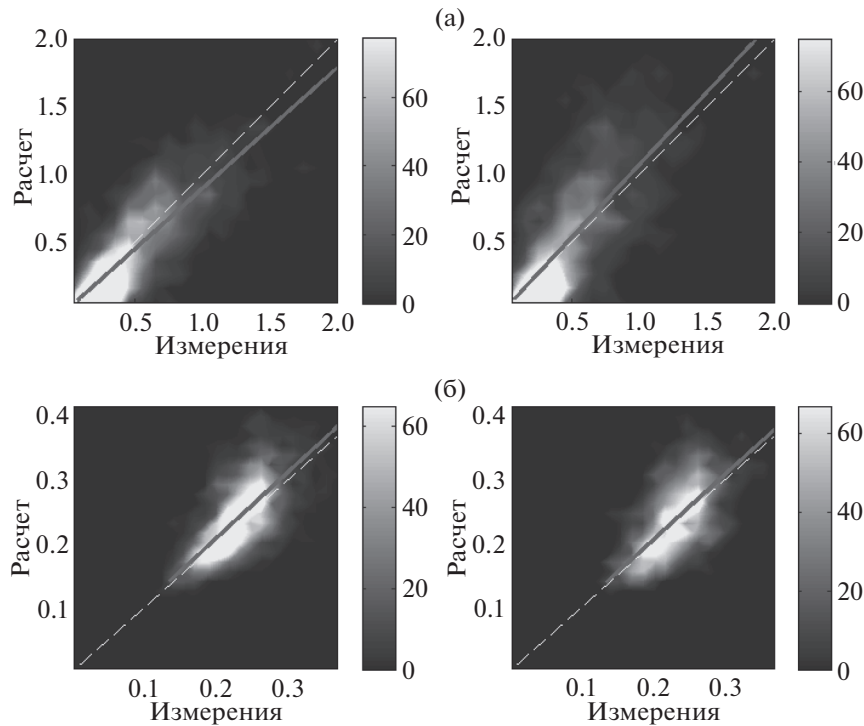


Рис. 4. Диаграммы рассеяния для характеристик волн. (а) – высота значительных волн, (б) – средняя частота. Слева – сравнение с расчетом 1 (оперативный атмосферный анализ NCEP/ NCAR с разрешением 50 км), справа – с расчетом 3 (оперативный атмосферный прогноз МГИ с разрешением 10 км). Прерывистая прямая – полное соответствие, сплошная прямая – результат линейной регрессии.

где U – скалярная величина, индексы $_{mod}$ и $_{mes}$ относятся к рассчитанным и измеренным величинам, а угловые скобки означают осреднение по набору данных; среднеквадратичная ошибка

$$RMSE = \sqrt{\langle (U_{mod} - U_{mes})^2 \rangle}; \quad (5)$$

коэффициент линейной регрессии $slope$, определяемый из уравнения

$$U_{mod} = slope U_{mes} \quad (6)$$

методом наименьших квадратов; индекс рассеяния (scatter index) согласно двум определениям

$$SI = RMSE / \langle U_{mes} \rangle \quad (7)$$

$$\text{и } SI2 = \sqrt{\langle (U_{mod} - slope U_{mes})^2 \rangle} / \sqrt{\langle U_{mes}^2 \rangle};$$

коэффициент корреляции

$$r = \langle (U_{mod} - \langle U_{mod} \rangle)(U_{mes} - \langle U_{mes} \rangle) \rangle / \sqrt{\langle (U_{mod} - \langle U_{mod} \rangle)^2 \rangle \langle (U_{mes} - \langle U_{mes} \rangle)^2 \rangle}. \quad (8)$$

Качество расчета направления волн охарактеризуем смещением среднего направления и стандартным отклонением ошибки –

$$bias_{dir} = \langle \vartheta_{mod} \rangle - \langle \vartheta_{mes} \rangle$$

$$\text{и } SDE_{dir} = \sqrt{\langle (\vartheta_{mod} - \vartheta_{mes} - bias_{dir})^2 \rangle}, \quad (9)$$

где средние углы вычислены с помощью усреднения величины $\exp(i\alpha)$ аналогично (3). Случаи малой высоты значительных волн (скажем, $H_s < 0.3 - 0.5$ м), по-видимому, не представляют существенного интереса при оценке качества расчета направлений волн. Чтобы подавить их вклад, усреднение в формулах (9) будем проводить с весом, пропорциональным высоте значительных волн. Вычис-

лим эти характеристики, как для всех данных, так и для трехмесячных периодов 15 июня 2012 г. – 15 сентября 2012 г. (лето) и 01 декабря 2012 г. – 01 марта 2013 г. (зима). В табл. 1 приведены соответствующие средние величины измеренной высоты значительных волн и средней частоты волн, а также их коэффициенты вариаций, определенные как отношение стандартного отклонения к средней величине.

В табл. 2 приведены характеристики качества моделирования высоты значительных волн, средней частоты волн и среднего направления волн для расчетов 1–3 по объединенному массиву данных. В таблицу также включены 2 столбца, показывающие расхождения между самими модель-

Таблица 1. Средние характеристики натуральных данных

| Характеристика данных | Весь массив | Лето | Зима |
|--------------------------------|-------------|------|------|
| $\langle H_S \rangle$, м | 0.52 | 0.39 | 0.67 |
| $k_{\text{var}}(H_S)$, % | 64 | 60 | 55 |
| $\langle \bar{f} \rangle$, Гц | 0.24 | 0.25 | 0.22 |
| $k_{\text{var}}(\bar{f})$, % | 15 | 13 | 15 |

ными расчетами. Здесь заголовок столбца “2 и 1” означает, что при вычислениях по формулам (4)–(9) измеренные величины заменены на данные 1, которые сравниваются с данными 2, и аналогичный смысл имеет заголовок “3 и 1”. Эти столбцы в сравнении с первыми тремя столбцами таблиц демонстрируют, что расхождения между результатами расчетов и измерений оказываются не намного сильнее, чем расхождения в результатах самих расчетов. Табл. 3 позволяет сопоставить качество моделирования в летний и зимний сезоны.

Как следует из таблиц, величина индекса рассеяния для H_S лежит на уровне 40–60%, что определенно хуже, чем при моделировании волн в открытом океане [20]. Однако эти значения соответствуют индексам рассеяния в прибрежной зоне с северной стороны Средиземного моря (25–70% согласно работам [8, 12]).

Для всех расчетов смещение H_S оказывается на уровне единиц сантиметров, смещение \bar{f} – на уровне 0.01 Гц и ниже, смещение $\bar{\vartheta}$ – на уровне 10° и ниже. Величины *slope* для H_S показывают, что расчет 1 всегда занижает высоту волн, в то время как расчеты 2 и 3 завышают ее. Величины *slope* для \bar{f} показывают, что все расчеты завышают среднюю частоту волн летом и занижают ее зи-

мой. Судя по величинам индексов рассеяния SI и SI_2 , средняя частота волн моделируется существенно качественнее, чем высота значительных волн, причем H_S и \bar{f} в зимнем сезоне моделируются лучше, чем в летнем. Отметим, что коэффициент корреляции r для \bar{f} всегда ниже, чем для H_S , что может быть связано с недостаточно адекватным описанием зыби в волновой модели. Среднее направление волн моделируется с существенной ошибкой – на уровне 40° (см. строку SDE_{dir} в таблицах). Отметим, что расхождения в величинах $\bar{\vartheta}$ между различными расчетами оказываются на том же уровне (см. табл. 2).

Как видно из табл. 2 и 3, величины коэффициента корреляции между измеренными и модельными параметрами ветровых волн систематически, хотя и незначительно, уменьшаются с улучшением разрешения атмосферной модели, используемой для расчета полей ветра. То же можно сказать и о величинах разброса $RSME$. Далее рассмотрим возможные причины этих расхождений между данными измерений и результатами расчетов. Прежде всего, уместно оценить качество моделирования полей ветра, которые использовались, как вход волновой модели.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ КАК ВОЗМОЖНЫЙ ИСТОЧНИК РАСХОЖДЕНИЙ

Имеющиеся данные позволяют выполнить непосредственное сравнение расчетов скорости ветра с натурными измерениями с платформы в Кацивели. Однако ввиду того, что платформа расположена в прибрежной зоне, желательно использовать для сравнения расчеты с повышенным пространственным разрешением. Такие расчеты были специально выполнены с помощью

Таблица 2. Характеристики качества моделирования по всему массиву данных

| Параметр | Характеристика качества | Номер расчета | | | Сравнение расчетов | |
|-------------------|-------------------------|---------------|---------|---------|--------------------|---------|
| | | 1 | 2 | 3 | 2 и 1 | 3 и 1 |
| H_S | <i>bias</i> , м | –0.0579 | 0.0522 | 0.0270 | 0.1152 | 0.0851 |
| | RMSE, м | 0.2101 | 0.3291 | 0.3091 | 0.2498 | 0.2223 |
| | SI , % | 40.5724 | 62.5780 | 59.7795 | 53.7660 | 48.2459 |
| | SI_2 , % | 33.8285 | 52.3287 | 49.8784 | 40.9492 | 35.9888 |
| | <i>slope</i> | 0.8963 | 1.0979 | 1.0730 | 1.2073 | 1.1815 |
| | r | 0.8260 | 0.7502 | 0.7738 | 0.8705 | 0.8984 |
| \bar{f} | <i>bias</i> , Гц | 0.0097 | 0.0057 | 0.0071 | –0.0042 | –0.0020 |
| | RMSE, Гц | 0.0395 | 0.0430 | 0.0426 | 0.0336 | 0.0284 |
| | SI , % | 16.4467 | 17.9395 | 17.7540 | 13.5036 | 11.4264 |
| | SI_2 , % | 16.3061 | 17.7776 | 17.5982 | 13.0344 | 11.1343 |
| | <i>slope</i> | 1.0378 | 1.0177 | 1.0256 | 0.9743 | 0.9871 |
| | r | 0.6555 | 0.5701 | 0.6016 | 0.7907 | 0.8512 |
| $\bar{\vartheta}$ | $bias_{\text{dir}}$, ° | 14.2216 | 3.8878 | 7.5029 | –7.4019 | –5.6345 |
| | SDE_{dir} , ° | 35.2711 | 39.8423 | 40.4287 | 38.0324 | 34.7409 |

Таблица 3. Характеристики качества моделирования в летний и зимний периоды

| Параметр | Характеристика качества | Лето, тип данных | | | Зима, тип данных | | |
|-------------------|-------------------------|------------------|---------|---------|------------------|---------|---------|
| | | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| H_S | $bias$, м | -0.0680 | 0.0391 | -0.0027 | -0.0591 | 0.1094 | 0.0732 |
| | RMSE, м | 0.1967 | 0.3266 | 0.2878 | 0.2187 | 0.3491 | 0.3798 |
| | SI_1 , % | 50.0048 | 83.0066 | 73.1503 | 32.4322 | 51.7596 | 56.2202 |
| | SI_2 , % | 43.6228 | 70.0091 | 62.0261 | 28.0619 | 45.2316 | 48.8693 |
| | $slope$ | 0.8854 | 1.1488 | 1.0688 | 0.9092 | 1.1485 | 1.1181 |
| | r | 0.7829 | 0.6889 | 0.7329 | 0.8377 | 0.7598 | 0.7481 |
| \bar{f} | $bias$, м | 0.0198 | 0.0139 | 0.0219 | 0.0006 | -0.0047 | -0.0026 |
| | RMSE, м | 0.0475 | 0.0496 | 0.0508 | 0.0299 | 0.0385 | 0.0380 |
| | SI_1 , % | 18.7043 | 19.5068 | 20.0171 | 13.3730 | 17.2244 | 17.0248 |
| | SI_2 , % | 18.7815 | 19.5895 | 20.1754 | 13.2131 | 16.9232 | 16.7800 |
| | $slope$ | 1.0714 | 1.0439 | 1.0776 | 0.9990 | 0.9730 | 0.9839 |
| | r | 0.4153 | 0.2423 | 0.3228 | 0.7087 | 0.5568 | 0.5921 |
| $\bar{\vartheta}$ | $bias_{dir}^{\circ}$ | 10.3160 | -1.4992 | 2.0814 | - | - | - |
| | SDE_{dir}° | 34.1436 | 36.3131 | 38.5470 | - | - | - |

модели WRF для периода измерений сентябрь–октябрь 2011 г. Данные ре-анализа с разрешением 18 км (расчет 2) были использованы как граничные условия для выполнения даунскейлинга в трех вложенных доменах с центром в точке расположения платформы [7]. Домены представляли собой квадраты со сторонами 829, 276 и 93 км и шагом сеток 9, 3 и 1 км. Для краткости будем обозначать эти расчеты номерами 4, 5 и 6 соответственно. Таким образом, для анализа имелось 6 типов данных с пространственным разрешением около 50, 18, 10, 9, 3 и 1 км. Для сравнения с измерениями использовались результаты этих расчетов в узле вертикальной сетки на горизонте 20 м, наиболее близком к горизонту измерений 21 м.

Априори расчет должен правильно описывать синоптическую изменчивость атмосферных полей вследствие примененного метода вложенных сеток, когда для известных крупномасштабных полей (данные 1) рассчитывается их детальная структура в заданном регионе. Поэтому результаты расчета должны демонстрировать взаимодействие синоптических процессов с главной особенностью рельефа подстилающей поверхности – с вытянутым вдоль берега горным хребтом. На рис. 5 показаны составляющие скорости ветра вдоль хребта (U_x) и перпендикулярно ему (U_y) согласно измерениям и расчету 5. В качестве генерального направления хребта был выбран азимут 65° , положительным значениям U_x соответствует направление на восток, а положительным значениям U_y – на север.

Ветровой поток в этот период был направлен, главным образом, вдоль хребта и характеризовался изменчивостью на масштабах в несколько суток. Эти основные черты поля ветра хорошо воспроизведены моделью. Однако изменчивость на масштабах сутки и менее воспроизводится хуже, в особенности для составляющей скорости ветра, попе-

речной хребту. Например, в период с 25 по 29 сентября выделяются колебания U_y с примерно суточным периодом, которые не воспроизводятся в расчетах. Тем не менее, моделирование описывает ряд характерных региональных явлений. Например, в период 24–26 сентября направление ветра над всем Черным морем было северным. При такой синоптической ситуации скорость ветра на платформе в Качивели может быть или очень малой, когда платформа попадает в зону “ветровой тени”, или, наоборот, большой в случае склонового ветра с локальным усилением у подножия. Как можно видеть на рис. 5, ветер в этот период был слабым, но в течение нескольких часов (ночь–утро 25 сентября) имело место его резкое усиление. Модель хорошо воспроизвела эту ситуацию.

Модель описывает специфическое для данного района явление – формирование вдольбереговой струи при обтекании Крымских гор. Пример струи в срок 12:00 UTC 9 октября 2011 г. приведен на рис. 6 (расчет 5), а на рис. 5 струя хорошо видна в измеренных значениях вдольбереговой составляющей ветра U_x . Она выражается в усилении скорости ветра до 12–15 м/с в узкой прибрежной полосе шириной около 30 км.

Детальные расчеты скорости ветра охватывают период длительностью 28 суток. Для него в табл. 4 приведены характеристики качества моделирования скорости и направления ветра для всех типов модельных данных, рассчитанные по формулам (4–9), причем усреднение для характеристик направления ветра в формулах (9) выполнено с весом, пропорциональным скорости ветра. Средняя величина измеренной скорости ветра равняется 6.10 м/с, а ее коэффициент вариации – 62%.

Отметим, что в табл. 4 оценка величины индекса рассеяния для скорости ветра оказывается на том же уровне, что и при моделировании атмосферы в полужакрытых морях с северной стороны

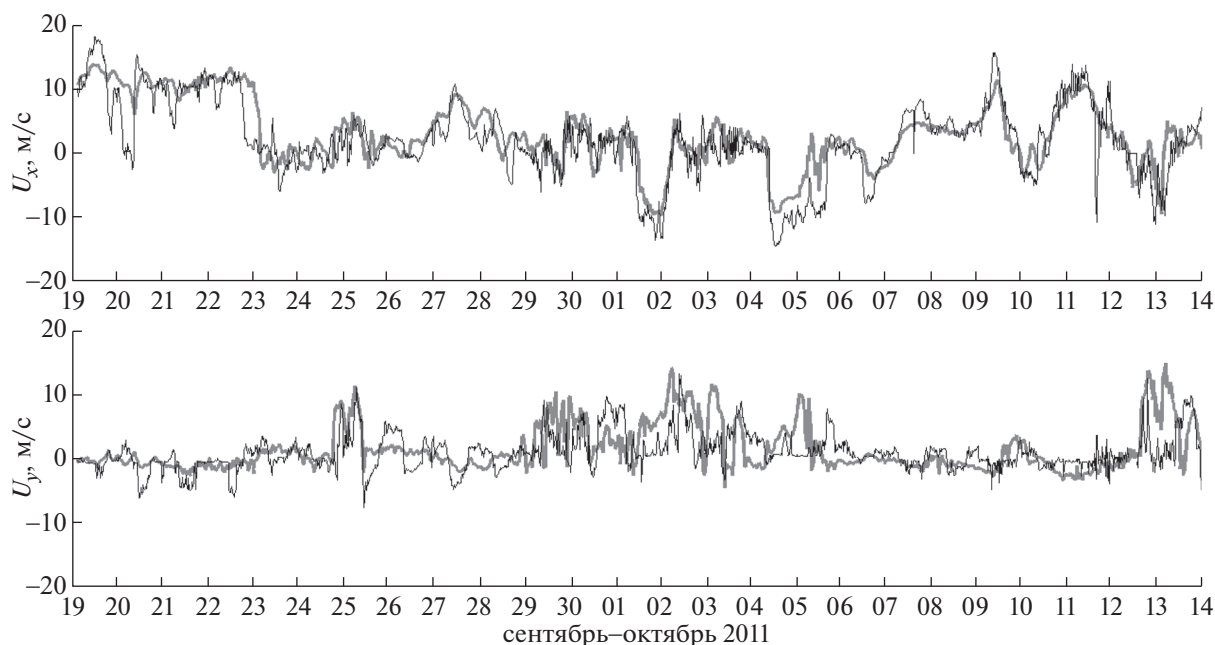


Рис. 5. Составляющие скорости ветра вдоль хребта (U_x) и перпендикулярно ему (U_y). Черная линия – натурные измерения, толстая серая линия – расчет 5 (модель WRF с разрешением 3 км).

Средиземного моря [8]. Сравнение табл. 4 с табл. 2 и 3 показывает, что качество моделирования скорости и направления ветра не превосходит качество моделирования высоты значительных волн и среднего направления волн. Это говорит в пользу заключения, что моделирование атмосферы является важным и, возможно, основным источником ошибок при расчетах волновых полей.

В работе [16] сделан вывод, что две наиболее сильные погодные катастрофы в Черноморском регионе, случившиеся в последние годы, были предсказаны прогнозом МГИ (расчет 3, разрешение 10 км), но не были предсказаны глобальным прогнозом NCEP/NCAR (данные 1, разрешение 50 км). В работах [11, 12] показано, что качество моделирования ветра и волн в Средиземном море улучшается с улучшением пространственного разрешения моделей. Качество моделирования поля ветра в районе Южного берега Крыма также повышается с улучшением разрешения моделей – например, вдольбереговая струя, показанная на рис. 6, отчетливо проявляется в полях модельной скорости ветра, полученных с разрешением 1 и 3 км (расчеты 6 и 5), но отсутствует при расчетах с худшим разрешением. Однако, как следует из табл. 4, характеристики качества расчета скорости ветра в точке платформы оказались по существу не зависящими от разрешения. С подобной ситуацией столкнулись также авторы работы [8]. Согласно их трактовке, при улучшении разрешения моделирования возникают случайные движения, которые добавляют энергию в маломасштабную часть спектра вариаций скорости ветра и

приводят к усилению разброса точек на диаграмме рассеяния.

Анализ наших результатов выявляет также другую возможную причину расхождений – реализацию “неустойчивости модели атмосферы” без ассимиляции наблюдений внутри расчетной области. На рис. 7 показаны поля ветра над Черным морем, соответствующие двум типам расчетов для срока 12:00 UTC 09.10.2011. Расчеты приводят к качественно различным ситуациям. Расчет 3 (пространственное разрешение 10 км) дает прохождение над морем мезомасштабного атмосферного фронта, в то время как результат глобальной модели демонстрирует слабоградиентное поле. Рассмотрим соответствующий эффект для высоты волн на платформе через 12 часов (сдвиг по времени нужен, чтобы учесть развитие волн на масштабе всего бассейна, см. рис. 1). На рис. 3 в окрестности срока 00:00 UTC 10.10.2011 выделяется существенное превышение высоты значительных волн, рассчитанных по ветровому полю типа 3, над измеренными значениями. В то же время результаты расчета 1 соответствуют измерениям. Таким образом, резкого фронта со скоростями ветра выше 14 м/с в теплом секторе перед фронтом, демонстрируемого расчетом 3, в действительности не было. Реальный фронт, по видимому, был значительно менее выраженным. Модификация и даже генерация мезомасштабных атмосферных явлений региональными атмосферными моделями в расчетном домене с задаваемыми на границах домена граничными условиями – хорошо известная особенность. Без ассимиляции измерений внутри расчетного до-

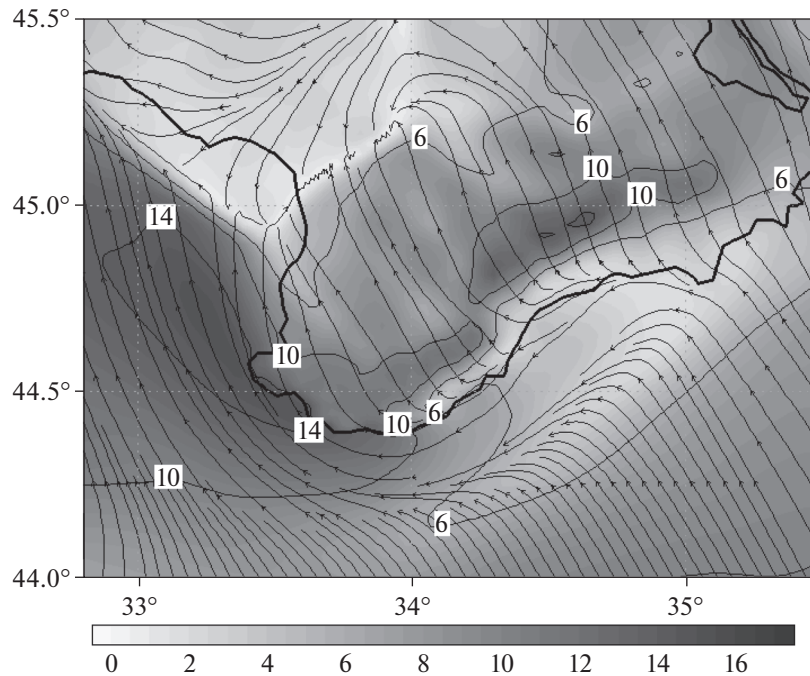


Рис. 6. Вдольбереговая струя, 12:00 UTC 09.10.2011 г. Поле ветра показано с помощью оттенков серого и направленных линий тока в координатных осях северная широта – восточная долгота. Цифры на цветовой шкале и изолиниях – скорость ветра в м/с. Черная линия – граница суша–море.

мена модель может “далеко уйти” от реального состояния атмосферы. Измерений же с высоким пространственным разрешением для ассимиляции мезомасштабной моделью в настоящее время недостаточно. Такого рода модификации, по-видимому, не часто имеют место: в нашем случае – лишь одно событие за период в 28 суток, для которого были проведены расчеты. Однако оно привело к существенным ошибкам в расчете высот волн. Поэтому разработка проблемы, как избежать подобных ошибок в модельных расчетах, представляет важное практическое значение.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе выполнена оценка качества моделирования волновых полей в Черном море на основе сравнения с натурными измерениями

со Стационарной океанографической платформы в Качивели. Моделирование проведено с использованием волновой модели WAM (cycle 4), на вход которой подавались поля скорости ветра в Азово-Черноморском регионе, полученные с помощью мезомасштабных моделей атмосферы MM5 и WRF. Эти модели были адаптированы к региону в Морском гидрофизическом институте. Поскольку развитие волн, наблюдаемых на платформе, происходит на площади всего бассейна, полученные оценки характеризуют “интегральное качество моделирования” волн в Черном море и атмосферы над ним. Приведено теоретическое обоснование выбора максимальной разрешаемой частоты при моделировании ветровых волн в Черном море, равной 0.4 Гц. Чтобы корректно провести сравнение с измерениями в точ-

Таблица 4. Характеристики качества моделирования скорости и направления ветра

| Характеристика | Тип данных | | | | | |
|-------------------------------|------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| <i>bias</i> , м/с | -1.7298 | -0.7824 | -0.0433 | -2.0618 | -0.7347 | -0.1957 |
| <i>RMSE</i> , м/с | 3.1676 | 3.5874 | 3.4283 | 2.8498 | 3.1634 | 3.4411 |
| <i>SI</i> , % | 54.6242 | 61.0368 | 58.3311 | 48.5027 | 51.8024 | 58.5673 |
| <i>SI2</i> , % | 23.8158 | 38.0912 | 40.0862 | 26.5534 | 39.2431 | 46.1471 |
| <i>slope</i> | 0.5630 | 0.6793 | 0.7842 | 0.5790 | 0.7893 | 0.8584 |
| <i>r</i> | 0.6736 | 0.4124 | 0.4821 | 0.6721 | 0.6170 | 0.6007 |
| <i>bias_{dir}</i> , ° | 5.7967 | 11.1342 | 15.8910 | 10.4986 | 11.3211 | 11.4869 |
| <i>SDE_{dir}</i> , ° | 46.3734 | 58.1434 | 51.3671 | 43.1418 | 41.1899 | 51.2616 |

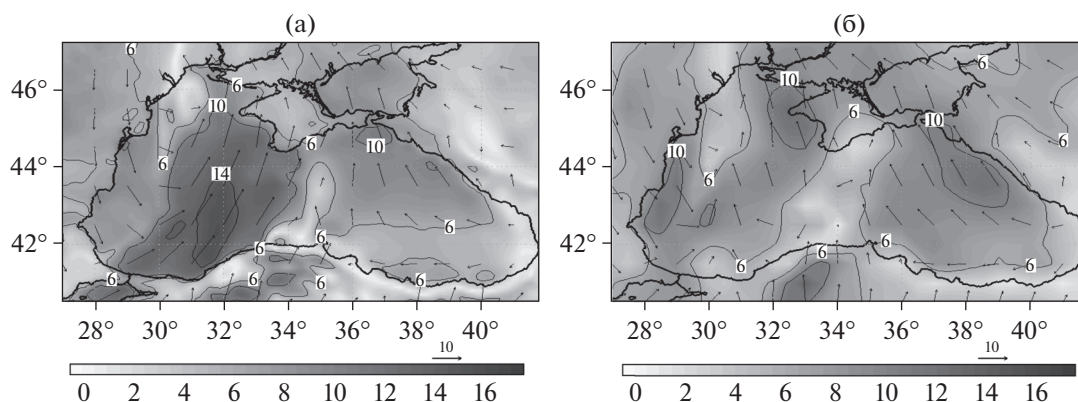


Рис. 7. Поля ветра на горизонте 20 м, 12:00 UTC 09.10.2011 г. (а) – расчет 3 (оперативный атмосферный прогноз МГИ с разрешением 10 км), (б) – расчет 1 (оперативный атмосферный анализ NCEP/NCAR с разрешением 50 км). Обозначения см. на рис. 6.

ке платформы, из расчетного спектра требуется исключить угловой диапазон, соответствующий направлениям развития волн от берега 255° – 45° . Для детального анализа полей ветра были выполнены методом вложенных сеток специальные расчеты атмосферных полей с повышенным (до 1 км) пространственным разрешением. Результаты работы представлены в виде характеристик качества моделирования, используемых в мировой практике для других регионов (см. табл. 2–4).

Полученные результаты показывают, что качество моделирования высоты значительных волн и скорости ветра в прибрежной зоне Южного берега Крыма, характеризуемое величинами индексов рассеяния 40–60%, соответствует полузакрытым морям с северной стороны Средиземного моря, где индекс рассеяния может достигать 70% [8, 12]. Качество моделирования средней частоты волн выше, оно приближается к результатам глобального моделирования ($SI \sim 15\%$). Наименее надежен расчет средних направлений волн (характерная ошибка на уровне 40°). В зимний сезон характеристики волн моделируются надежнее, чем в летний (см. табл. 3), так что индекс рассеяния для высоты значительных волн зимой оказывается примерно на 20% ниже, чем летом. В условиях слабого ветра, как правило, наблюдается зыбь с высотами значительных волн, не превосходящими 0.5 м, которая отсутствует в модельных расчетах. Это обстоятельство (возможно, не важное с практической точки зрения) указывает на неадекватность описания затухания зыби в волновой модели.

Качество моделирования скорости ветра не превосходит качество моделирования характеристик волн (ср. табл. 2 и 4), т.е. модель атмосферы может являться основным источником ошибок при расчетах волновых полей. Детальное сравнение рассчитанной скорости ветра с данными измерений показывает, что атмосферная модель с повышенным пространственным разрешением (1–3 км) качественно правильно описывает взаи-

модействие синоптических процессов с вытянутым вдоль берега горным хребтом, воспроизводя вдольбереговые струи, ветровые затенения, склоновый ветер. В то же время в данной работе выявлены недостатки модели, которые можно разделить на три типа. Во-первых, модель плохо отражает изменчивость скорости ветра на масштабах сутки и менее, в особенности для составляющей скорости ветра, перпендикулярной хребту (см. рис. 5, график для U_y). Во-вторых, существуют недетерминированные движения (ранее отмеченные в [8]), возникающие при улучшении разрешения модели. В результате улучшение разрешения не приводит к улучшению характеристик качества моделирования как скорости ветра, так и волн (см. табл. 4 и 2). В-третьих, при моделировании атмосферы возможна реализация “неустойчивости модели” без ассимиляции наблюдений внутри расчетной области (см. рис. 7). Это приводит к существенным ошибкам в расчете высот волн. На данный момент третий недостаток является наиболее существенным, и его ликвидация рассматривается как ближайшая задача совершенствования региональной модели атмосферы в МГИ.

Авторы благодарят Ф. Ардуэна из института Ифремер (F. Ardhuin, Ifremer), Франция, за полезные обсуждения результатов.

Работа выполнена в МГИ при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках ФЦП “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы” (уникальный идентификатор проекта RFMEFI57714X0110), а также по проекту “Towards COast to Coast Networks of marine protected areas coupled with sea-based wind energy potential (COCONET)” седьмой рамочной программы ЕС (Grant Agreement № 287844, FP7/2007–2013).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ефимов В.В., Барабанов В.С.* Бризовая циркуляция в Черноморском регионе // Морск. гидрофиз. журн. 2009. № 5. С. 23–36.
2. *Ефимов В.В., Комаровская О.И.* Атлас экстремального ветрового волнения Черного моря // Севастополь: НПЦ “ЭКОСИ-Гидрофизика”, 2009. 59 с.
3. *Ефимов В.В., Станичный С.В., Шокуров М.В., Яровая Д.А.* Наблюдение квазитропического циклона над Черным морем // Метеорология и гидрология. 2008. № 4. С. 53–62.
4. *Малиновский В.В., Дулов В.А., Большаков А.Н. и др.* Методическое и техническое обеспечение калибровки РЛСБО ИСЗ “Сич-1м” для работ над морской поверхностью. Возможный подход // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2004. № 11. С. 236–251.
5. *Соловьев Ю.П.* Характеристики внутреннего пограничного слоя над морем при ветре с берега, имеющего горный рельеф // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь, 2010. № 21 (К юбилею 30-летия платформы в Качивели). С. 74–87.
6. *Чечина Е.В.* База волнографических данных, полученных со Стационарной океанографической платформы ЭО МГИ НАН Украины в Качивели // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2013. № 27. С. 215–220.
7. *Шокуров М.В., Артамонов С.Ю., Эзау И.Н.* Численное моделирование атмосферы в районе платформы в Качивели для планирования и интерпретации натуральных экспериментов // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь, 2010. № 21 (К юбилею 30-летия платформы в Качивели). С. 239–251.
8. *Ardhuin F., Bertotti L., Bidlot J.R. et al.* Comparison of wind and wave measurements and models in the Western Mediterranean Sea // Ocean Engineering. 2007. № 34(3). P. 526–541.
9. *Ardhuin F., Chapron B., Collard F.* Observation of swell dissipation across oceans // Geophys. Res. Lett. 2009. № 36, L06607, doi: 10.1029/2008GL037030
10. *Ardhuin F., Roland A.* The development of spectral wave models: Coastal and coupled aspects // Proceedings of Coastal Dynamics 2013: 7th International Conference on Coastal Dynamics. University of Bordeaux, Bordeaux, France, 2013. P. 25–38.
11. *Cavaleri L., Bertotti L.* The accuracy of modelled wind and waves fields in enclosed seas // Tellus. 2004. № 56A. P. 167–175.
12. *Cavaleri L., Sclavo M.* The calibration of wind and wave model data in the Mediterranean Sea // Coastal Engineering. 2006. № 53. P. 613–627.
13. Environmental Modeling Center Global Forecast System, National Weather Service, NOAA, USA. 2014. <http://www.emc.ncep.noaa.gov/index.php?branch=GFS>.
14. *Holthuijsen L.H.* Waves in Oceanic and Coastal Waters: Cambridge Univ. Press, 387 p.
15. *Ivanov V.A., Dulov V.A., Kuznetsov S.Yu. et al.* Risk assessment of encountering killer waves in the Black Sea // Geography, Environment, Sustainability. 2012. № 1. P. 84–111.
16. *Ivanov V.A., Shokurov M.V., Dulov V.A. et al.* Operational Atmospheric Modeling for Advance Warning of Weather Disasters in the Black Sea Region // Geography, Environment, Sustainability. 2013. V. 06. № 4. P. 31–47.
17. *Kahma K., Hauser D., Krogstad H.E. et al.* Measuring and analysing the directional spectra of ocean waves. EU COST Action 714. 2005. EUR 21367, Brussels, 465 p.
18. *Komen G.J., Cavaleri L., Donelan M. et al.* Dynamics and modeling of ocean waves. Cambridge Univ. Press, 1994. 532 p.
19. Marine Hydrophysical Institute 5-day weather forecast over the Black Sea. Atmosphere-Ocean Interaction Department of Marine Hydrophysical Institute, Sevastopol, Ukraine. 2014. <http://vao.hydrophys.org>
20. *Richardson D.S.* Verification statistics and evaluations of ECMWF forecasts in 2011–2012 // ECMWF Technical Memoranda. № 688. 53 p. (available at <http://www.ecmwf.int/publications/>)
21. *Skamarock W.C.* A description of the Advanced Research WRF version 3. NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR, Mesoscale and Microscale Meteorology Division: National Center of Atmospheric Research, 2008. 113 p.
22. *Zhang H.-M., Bates J.J., Reynolds R.W.* Assessment of composite global sampling: Sea surface wind speed // Geophys. Res. Lett. 2006. № 33. L17714, doi: 10.1029/2006GL027086

Wind Waves in Coastal Zone of Southern Crimea – Comparison of Model Calculations and in situ Measurements

M. V. Shokurov, V. A. Dulov, E. V. Skiba, V. E. Smolov

Verification of the Black Sea wave model on the basis of field data obtained on the Katsiveli research platform is presented. The *WAM* and mesoscale atmospheric models, *MM5* and *WRF*, which are used to calculate the wave field for the wave model, were recently adjusted to the Black Sea region at the Marine Hydrophysical Institute. An approach based on the semi-empirical theory of wave development is suggested for correct comparison of the data. A set of commonly used characteristics of modeling quality was evaluated. The scatter index for significant wave height is equal to 70% in summer and 50% in winter. The values of scatter index for wave parameters and wind speed correspond to the case of semi-enclosed basins in the northern side of the Mediterranean Sea. It is shown that the atmosphere simulation correctly reproduces the interaction of synoptic processes and alongshore extended mountain range. The sources of errors in the wave modeling were discussed. The most significant drawback is the possible instability of the atmosphere model at the scale of computational domain.