

Е.В.Скиба, М.В.Шокуров, В.А.Дулов, В.Е.Смолов

Морской гидрофизический институт РАН, г.Севастополь

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ МОРСКИХ НАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ВЕТРОВЫХ ВОЛН В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ ЮЖНОГО КРЫМА

Работа посвящена верификации волновой модели на основе натуральных данных, полученных со стационарной океанографической платформы в пос.Кацивели. Волновая модель *WAM* и мезомасштабные модели атмосферы *MM5* и *WRF*, с помощью которых рассчитывается поле ветра для волновой модели, в последние годы были адаптированы к черноморскому региону. Для корректного сравнения расчетов с наблюдениями предложен специальный подход, основанный на полуэмпирических представлениях о развитии волн. Результаты работы представлены в виде характеристик качества моделирования, используемых в мировой практике для других регионов. Получено, что индекс рассеяния для высоты значительных волн составляет около 70 % летом и около 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.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *волновая модель, региональные модели атмосферы, качество моделирования характеристик волн и скорости ветра, источники ошибок при моделировании метеоволновых характеристик, натурные измерения ветровых волн в прибрежной зоне южного Крыма, Азово-Черноморский регион*

Введение. В последние десятилетия был достигнут значительный прогресс в моделировании морского волнения, что позволяет с определенной степенью надежности решать практические задачи в областях прогноза волнения. Мезомасштабные атмосферные модели *MM5* и *WRF* вместе с волновой моделью *WAM* используются сейчас для оценки волнового климата [1], краткосрочного метеорологического и волнового прогнозов [2], исследований волн и типичных прибрежных атмосферных явлений в Черном море [3]. Научная океанологическая сторона вопроса состоит в выборе в региональных моделях правильных параметризаций природных процессов, учете региональных особенностей [4] и последующей 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. 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 [5, 6]. Целенаправленная ве-

рификация волновой модели в Черном море, по-видимому, не выполнялась. Данная работа призвана, в какой-то мере, восполнить этот пробел.

В настоящей работе результаты модельных расчетов волновых характеристик сопоставлены с натурными данными, полученными со стационарной океанографической платформы Экспериментального отделения Морского гидрофизического института в пос.Кацивели. 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.

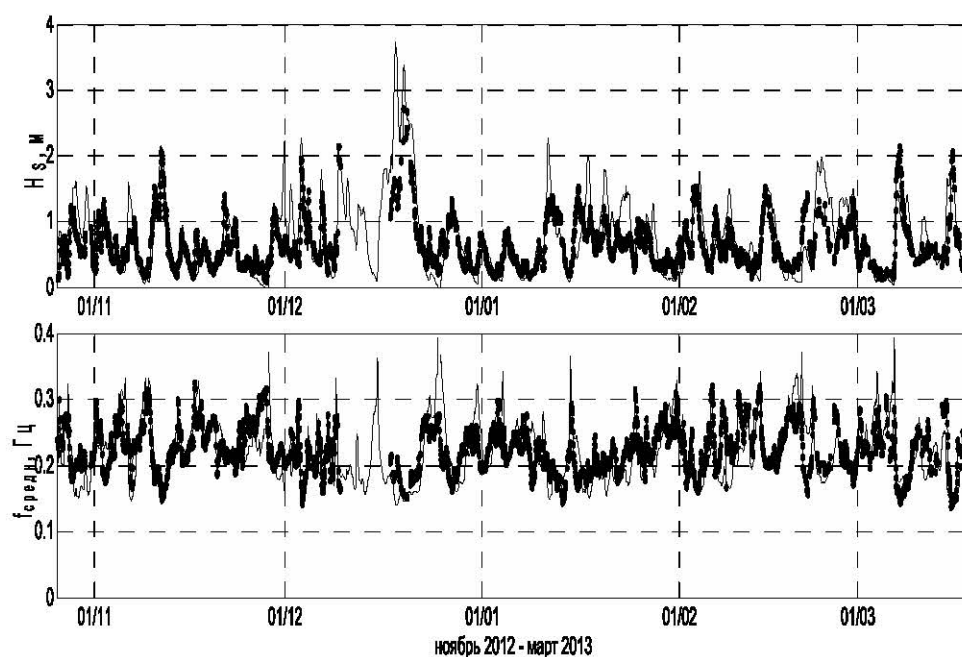
Натурные измерения. Натурные данные были получены со стационарной океанографической платформы (33°59' в.д., 44°23' с.ш.) вблизи пос.Кацивели на Южном берегу Крыма в течение трех представительных периодов: октябрь 2012 г. – апрель 2013 г., июль – октябрь 2012 г. и сентябрь – октябрь 2011 г. [7]. Скорость и направление ветра регистрировались на горизонте 21 м с периодом 1 мин. метеостанцией *Davis Vantage Pro*, 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. Для выполнения прямой сквозной калибровки измерительно-регистрирующего тракта решетка поднималась или опускалась как целое, при этом точно измерялись величины ее вертикальных смещений [8]. Конструктивные детали системы описаны в [9]. 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 [8]. Для сравнения с расчетами использованы участки непрерывных записей длительностью 1 час. Для каждого участка были рассчитаны частотный $S(f)$ и частотно-угловой $S(f, \theta)$ спектры возвышений морской поверхности. Двумерные спектры рассчитывались методом максимальной энтропии [10]. По спектру определялась высота значительных волн $H_S = 4\sigma$, где σ^2 – дисперсия возвышений морской поверхности, а также средняя частота и направление волн спектрального пика. 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 наблюдается несколько систем волн, характеристики которых трудно сопоставить. Поэтому ниже мы ограничимся лишь сравнением интегральных характеристик спектров $H_S, \bar{f}, \bar{\theta}$.

Атмосферное моделирование. В качестве входа для волновой модели мы использовали следующие типы данных, полученных в результате моделирования атмосферы над Черным морем: базовым источником служили результаты глобального оперативного анализа *NCEP/NCAR* (поля характеристик атмосферы с пространственным разрешением $0,5^\circ$ и дискретностью по времени 6 ч); поля скорости ветра с более высоким пространственным разрешением были получены в Морском гидрофизическом институте РАН (МГИ) с использованием мезомасштабной атмосферной модели *MM5* и ее более современного варианта *WRF* [11], расчетная область для региональных моделей покрывает всю акваторию Черного моря ($39 - 49^\circ$ с.ш., $25 - 45^\circ$ в.д.), а в качестве боковых граничных условий используются результаты глобального оперативного анализа; Начиная с 2007 г., МГИ выполняет для черноморского региона оперативный прогноз погоды с использованием модели *MM5*. Пространственное разрешение для всего черноморского региона равно 10 км, временное разрешение – 1 ч. Далее будем использовать результаты глобального оперативного прогноза *NCEP/NCAR*, ре-анализа МГИ и прогноза МГИ в качестве входа волновой модели, а соответствующие расчеты для краткости будем обозначать номерами 1, 2 и 3.

Результаты. Рисунок позволяет сравнить натурные данные с модельным расчетом 3. Здесь для зимнего сезона 2012 – 2013 гг. показаны высота значительных волн и средняя частота волн. Как следует из графиков, в штительные периоды наблюдаемая величина H_S остается на уровне двух – трех десятков сантиметров, в то время как рассчитанные величины H_S нередко оказываются на порядок меньше. 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. Хотя корректное описание волн при штילה вряд ли представляет большую практическую важность, отмеченные расхождения влияют на статистические характеристики качества моделирования. Для всех расчетов смещение H_S оказывается на уровне единиц сантиметров, смещение \bar{f} – на уровне 0,01 Гц и ниже, смещение $\bar{\theta}$ – 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 зимой. Судя по величинам индексов рассеяния *SI* и *SI2*, 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. Отметим, что расхождения в величинах $\bar{\theta}$ между различными расчетами оказываются на том же уровне.

Заключение. Выполнена оценка качества моделирования волновых полей в Черном море на основе сравнения с натурными измерениями со стац-



Р и с. Высота значительных волн (*сверху*) и средняя частота волн (*снизу*) в зимний период 2012 – 2013 гг. Точки – натурные данные, линия – расчет 3.

онарной океанографической платформы в пос.Кацивели. 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 МГИ. Поскольку развитие волн, наблюдаемых на платформе, происходит на площади всего бассейна, полученные оценки характеризуют «интегральное качество моделирования» волн и атмосферы в Черном море. Чтобы корректно провести сравнение, был предложен специальный подход, основанный на полуэмпирических представлениях о развитии волн. Для детального анализа полей ветра методом вложенных сеток были выполнены 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. Полученные результаты показывают, что качество моделирования высоты значительных волн и скорости ветра в прибрежной зоне южного Крыма, характеризуемое величинами индексов рассеяния 40 – 60 %, соответствует полузакрытым морям с северной стороны Средиземного моря, где индекс рассеяния может достигать 70 % [5, 6]. 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, так что индекс рассеяния для высоты значительных волн зимой оказывается примерно на 20 % ниже, чем летом. Качество моделирования скорости ветра не превосходит качество моделирования характеристик

волн, т.е. модель атмосферы может являться основным источником ошибок при расчетах волновых полей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ефимов В.В., Комаровская О.И.* Атлас экстремального ветрового волнения Черного моря.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009.– 59 с.
2. *Ivanov V.A., Shokurov M.V., Dulov V.A., Kudryavtsev V.N., Soukissian T.* Operational Atmospheric Modeling for Advance Warning of Weather Disasters in the Black Sea Region // *Geography, Environment, Sustainability.*– 2013.– v.6, № 4.– P.31-47.
3. *Ефимов В.В., Барабанов В.С.* Бризовая циркуляция в Черноморском регионе // *Морской гидрофизический журнал.*– 2009.– № 5.– С.23-36.
4. *Шокуров М.В., Артамонов С.Ю., Эзау И.Н.* Численное моделирование атмосферы в районе платформы в Качивели для планирования и интерпретации натурных экспериментов // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.*– Севастополь, 2010.– вып.21 (К юбилею 30-летия платформы в Качивели).– С.239-251.
5. *Cavaleri L., Bertotti L.* The accuracy of modelled wind and waves fields in enclosed seas // *Tellus.*– 2004.– 56A.– P.167-175.
6. *Ardhuin F., Bertotti L., Bidlot J.R., Cavaleri L., Filipetto V., Lefevre J.M., Wittmann, P.* Comparison of wind and wave measurements and models in the Western Mediterranean Sea // *Ocean Engineering.*– 2007.– 34(3).– P.526-541.
7. *Ivanov V.A., Dulov V.A., Kuznetsov S.Yu., Dotsenko S.F., Shokurov M.V., Saprykina Y.V., Malinovsky V.V., Polnikov V.G.* Risk assessment of encountering killer waves in the Black Sea // *Geography, Environment, Sustainability.*– 2012.– 5(№1).– P.84-111.
8. *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.*– Севастополь, 2013.– вып.27.– С.215-220.
9. *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.*– Севастополь, 2004.– вып.11.– С.236-251.
10. *Kahma K., Hauser D., Krogstad H.E., Lehner S., Monbaliu J.A.J., Wyatt L.R.* Measuring and analysing the directional spectra of ocean waves.– EU COST Action 714, EUR 21367.– Brussels, 2005.– 465 p.
11. *Skamarock W.C. et al* 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, June 2008.– 113 p.

Материал поступил в редакцию 16.03.2016 г.
После доработки 10.11.2016 г.

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

ASSESSMENT OF SIMULATION QUALITY BASED ON MARINE IN SITU MEASUREMENTS OF WIND WAVES IN THE COASTAL SOUTHERN CRIMEA

The work is devoted to the wave model verification based on in situ data obtained with the stationary oceanographic platforms in the Katsiveli. The wave WAM model and mesoscale atmospheric MM5 and WRF models, which were used to calculate a wind field

for the wave model, have been adapted to the Black Sea region in recent years. For a correct comparison a calculations with observations the special approach based on the semi-empirical conception of wave development is suggested. The results are presented as simulation quality parameters used in the world practice for other regions. It was found that the dispersion index for the height of significant waves is about 70 per cent in summer and 50 per cent in winter. The scattering indexes for the wave parameters and wind speed are at the same level as for the semi-enclosed seas on the northern side of the Mediterranean Sea.

KEYWORDS: wave model, regional atmospheric model, simulation quality of wave parameters and wind speed, sources of errors in simulation of meteo and wave parameters, in situ measurements of wind waves in the coastal southern Crimea, the Azov-Black Sea region