

ГЛАВА 5. ВОЛНЫ В АЗОВСКОМ МОРЕ И ИХ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА БЕРЕГА

УДК 551.466.31(262.54)

DOI 10.23885/1993-6621-2020-8-86-96

5.1. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ АЗОВСКОГО МОРЯ

Н.А. Яицкая

Аннотация. В статье представлены результаты работ по адаптации спектральной ветро-волновой модели к условиям Азовского моря на примере зимних периодов 2015–2016 и 2016–2017 гг. Описана концептуальная схема расчета ветрового волнения для мелководной акватории, которая основывается на постепенном восстановлении данных с помощью математического моделирования от наибольшего Азово-Черноморского бассейна к относительно небольшим областям Керченского пролива и Таганрогского залива. Такой подход с рядом последовательных вычислений с использованием вложенных сеток в модели позволяет получать детальные картины пространственного распределения параметров с заданной точностью без статистической обработки. Выполнен сравнительный анализ случаев штормового волнения с данными натурных наблюдений за уровнем моря в Таганрогском заливе.

Ключевые слова: Азовское море, ветровое волнение, шторма, опасные природные явления, математическое моделирование, ретроспективный анализ

Введение

Начало XXI века в южном макрорегионе России ознаменовалось рядом природных катаклизмов: аномально холодные зимы 2006 и 2012 гг., когда в Азовском море наблюдались торосы до 2 м высотой, Чёрное море замерзло практически до Констанцы (Румыния), а Каспийское – до Махачкалы [Матишов и др., 2012]; штормовое волнение в ноябре 2007 г., приведшее к затоплению ряда нефтеналивных судов в Керченском проливе; с 2010 г. участилась повторяемость экстремальных нагонов в Таганрогском заливе и дельте р. Дон, например 30.09–01.10.2010 г., 24–25.03.2013 г., 24–25.09.2014 г., когда ураганная адвекция черноморских вод в мелководное Азовское море привела к поступлению морской воды солёностью до 4–6 ‰ в водозабор, а затем в водопровод г. Азова [Матишов и др., 2017].

Одно из наиболее опасных природных явлений – ледовый нагон, или ледовый шторм, – в современный период наблюдалось зимой 2009–2010, 2010–2011 и 2014–2015 гг. Сочетание стремительного нагонного повышения уровня воды или экстремального волнения в Азовском море и наличия ледового покрова наносит существенный экономический ущерб прибрежным территориям. Особую актуальность эта проблема приобрела в период строительства моста через Керченский пролив. В 1944 г. мост через пролив уже строился, но

в феврале 1945 г., после 15 дней непрекращающихся штормовых волнений, вместе с движением ледовых полей этот мост был деформирован и разрушен.

Несмотря на большое количество публикаций, внутривековой волновой климат Азовского моря изучен недостаточно. Данных натурных наблюдений за волнением крайне мало, поэтому длительное время в работах использовали эмпирические формулы расчета параметров волнения, в которых высота волны зависит от глубины водоема [Гидрометеорологический справочник ... 1962]. В настоящее время основным инструментом исследования ветрового волнения являются математические модели, при этом зачастую Азовское море рассматривается как неотъемлемая часть Чёрного моря, и не учитываются его специфические черты (мелководность, наличие сгонно-нагонных колебаний уровня), используется батиметрия с грубым разрешением, составленная по данным электронных ресурсов и устаревшей информации. Вследствие подобных неточностей результаты математического моделирования ветрового волнения Азовского моря в большинстве случаев можно рассматривать лишь как справочную информацию без количественных и качественных оценок.

Несмотря на то что в наиболее штормовые месяцы февраль и март (скорость ветра более 20 м/с) развитие волнения в море ограничивается наличием льда, этот природный феномен не становится менее опасным. В литературе описаны наиболее значительные шторма, сопровождающие их метеорологические ситуации и среднемноголетние режимные характеристики [Атлас ... 2012]. Такие знания немаловажны, но вместе с тем восстановленные многолетние ряды данных позволяют выявить закономерности и особенности ветрового волнения на протяжении XX–XXI вв., определить его связь с региональным и глобальным климатом, провести анализ и систематизацию знаний о наиболее опасных зимних штормовых условиях Азовского моря. Инструменты математического моделирования, откалиброванные по данным наблюдений, позволяют восполнить этот пробел путем ретроспективного анализа.

В настоящей статье описан разработанный подход к расчетам и результаты адаптации спектральной волновой модели к условиям мелководного Азовского моря. Для этого выбраны два зимних периода: 2015–2016 и 2016–2017 гг. – по нескольким причинам. Во-первых, наличие данных для верификации модели; во-вторых, в зимы этих периодов наблюдались нагонные явления, что позволяет провести дополнительные предварительные исследования мультиопасных природных явлений в Азовском море.

Материал и методы

Исходные данные для исследования состоят из двух групп:

а) данные об абсолютных глубинах и положении береговой линии моря, включая острова;

б) информация о скорости и направлении ветра в виде серий данных меридиональной и зональной компонент.

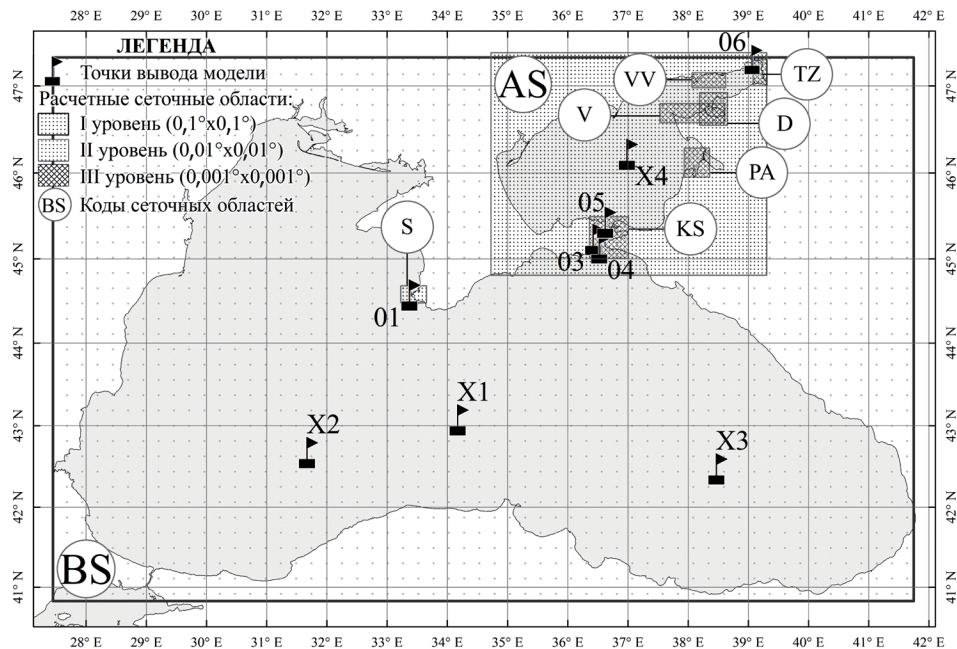
Точность расчетных значений параметров волнения отчасти зависит от качества и пространственной детализации расчетной сетки батиметрии, особенно на мелководных участках. Прибрежные районы Азовского моря, ограниченные изобатой 10 м, как известно, характеризуются сложным строением с активным развитием песчаных кос, пересыпей, дельт и лиманов [Матишов, 2006а]. Публично доступные наборы данных по батиметрии или открытые информационные системы с готовыми моделями рельефа дна морей и океанов (например, база данных ETOPO [ETOPO1, 2017]) не представляют рельеф дна и береговую линию Азовского моря с необходимыми пространственным разрешением и точностью. Поэтому в работе была использована составленная академиком Г.Г. Матишовым [Матишов, 2006б] по новейшим батиметрическим данным цифровая модель рельефа дна (ЦМР) [Магаева, Третьякова, 2015]. Все работы с батиметрическими данными были выполнены с использованием программного продукта ArcGIS (ESRI, США) [<http://desktop.arcgis.com/ru/>].

На основе ЦМР были построены регулярные сетки для Азово-Черноморского региона, Азовского моря в целом и отдельных районов с разным пространственным разрешением в частности (рис. 1). В целях оптимизации расчетов и хранения результатов каждой сетке присвоен уникальный код. Заранее был определен ряд дополнительных ключевых точек модели (рис. 1), для которых рассчитывали основные статистические характеристики, выполняли сравнение с данными наблюдений. Необходимо отметить, что сеточные области для отдельных районов и ключевые точки созданы в рамках разработки общего подхода к моделированию ветрового волнения в Азово-Черноморском бассейне и в настоящем исследовании использованы не все.

Для акватории Чёрного моря выбраны две точки в наиболее глубоководных областях (рис. 1, точки X2, X3) и одна в пограничном районе (рис. 1, точка X1). Также и в Азовском море выбрана точка, соответствующая максимальной глубине (рис. 1, точка X4). Наиболее глубоководным районам морей соответствует наибольшее количество натурных наблюдений. Три точки в Керченском проливе (рис. 1, точки 03, 04, 05) расположены в районе фарватера и характеризуют центральный, южный и северный районы пролива. Это позволяет в ходе работы контролировать значения высоты и длины волны при прохождении узкого «горлышка» пролива. Точка в Таганрогском заливе (рис. 1, точка 06) соответствует положению автоматизированного гидрологического поста «Взморье» Южного научного центра РАН, где ведутся регулярные метеорологические наблюдения, которые будут использованы в работе.

Точка 01 в прибрежной области г. Севастополя выбрана для контроля значений высоты и длины волны в мелководной области при подходе к узким бухтам. Точки 01 и 06 расположены в непосредственной близости от крупных городских агломераций, где при возникновении экстремального волнения возможен наибольший, по мнению автора, материальный ущерб. Поскольку используемую модель SWAN (Simulating WAves Nearshore Model) мы настраи-

вали не только для ретроспективного анализа, но и для возможности прогноза ветрового волнения, наличие таких областей в расчетах необходимо.



Код	Название области	Уровень	Размер ячейки (град)	Размер сеточной области		Координаты левого нижнего угла (град)	
				столбцы	строки	X	Y
BS	Черное и Азовское моря	I	0,1	144	66	27,398	40,773
AS	Азовское море	II	0,01	459	258	34,721	44,800
TZ	Таганрогский залив	III	0,001	233	296	39,081	47,001
VV	Весело-Вознесенск	III	0,001	561	174	38,065	46,978
D	Должанская	III	0,001	466	374	38,191	46,550
V	Воронцовка	III	0,001	1076	220	37,534	46,580
PA	Приморско-Ахтарск	III	0,001	423	336	37,937	45,954
KS	Керченский пролив	III	0,001	651	492	36,361	45,002
S	Севастопольская бухта	II	0,01	430	205	33,226	44,476

Рис. 1. Трехуровневая схема расчетных сеток в Азово-Черноморском бассейне, положение сеточных областей и отдельных ключевых точек

Информация о непрерывном ветровом воздействии при расчете параметров волнения, представленная в виде наборов меридиональной (U) и зональной компонент (V) на высоте 10 м над уровнем моря, была выбрана из реанализа Национальных центров прогнозирования состояния окружающей среды (National Centers for Enviromental Prediction (NCEP), США) и Национального центра атмосферных исследований (National Center for Atmospheric Research (NCAR), США) [Kalnay et al., 1996], который содержит ретроспективные значе-

ния различных метеорологических параметров начиная с 1948 г. Временное разрешение данных составляет 6 часов, пространственное – $\sim 1,9^\circ$ по широте и $1,875^\circ$ по долготе. Чтобы избежать накопления ошибок при пересчетах, интерполяция в узлы расчетных сеток не выполнялась. Итоговые наборы данных в виде текстовых файлов были использованы в качестве входной информации в модель SWAN.

Для исследования волнового климата Азовского моря использована спектральная модель SWAN (Simulating WAVes Nearshore Model). Это волновая модель третьего поколения для получения реалистичных параметров при заданном ветре, батиметрии и текущих условиях в мелководных акваториях – прибрежных регионах, озерах и эстуариях. Модель разработана на факультете гражданского строительства и наук о Земле Делфтского технического университета в Нидерландах [Booij et al., 1999].

Адаптация модели SWAN к условиям Азовского и Чёрного морей и ее верификация были выполнены в соответствии с разработанным автором подходом [Yaitskaya, Tretyakova, 2014; 2016], который заключается в следующем: для ряда контрольных временных интервалов со средним по силе или штормовым волнениям (независимо от сезона) проведены тестовые расчеты с параметрами «по умолчанию»; последовательно тестировался каждый физический процесс, предустановленный в модели, и подобраны необходимые коэффициенты. Для контроля корректности результатов были привлечены данные наблюдений за ветровым волнением в открытом море и на прибрежных гидрометеостанциях из базы данных Единой системы информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО) [<http://esimo.ru>], информация о прогнозе волнения в Азово-Черноморском бассейне из Кипрской океанической прибрежной системы прогнозирования и наблюдения CYCOFOS (Cyprus Coastal Ocean Forecasting and Observing System) [<http://www.oceanography.ucy.ac.cy/cycfos/index.html>; Zodiatis et al., 2008].

В результате проведенных экспериментов был определен ряд основных процессов и коэффициентов, включенных в итоговые расчеты: линейный рост волны в соответствии с подходом, изложенным в работе [Komen et al., 1984]; диссипация из-за «забурунивания»; опрокидывание волн на мелководье, вызванное изменением глубины; придонное трение, параметризованное константой спектра JONSWAP [Hasselmann et al., 1973]; трех- и четырехволновое взаимодействие волн друг с другом.

Для реанализа ветрового волнения Азовского моря разработана трехуровневая схема расчетов с последовательностью вложенных сеток: 1) Азово-Черноморский бассейн; 2) Азовское море; 3) Керченский пролив, Таганрогский залив, косы. Такой подход позволяет получать детальные картины пространственного распределения параметров с заданной точностью без статистической обработки. Для тестовых экспериментов в зимние периоды 2015–2016 и 2016–2017 гг. шаг расчетов по времени составил 30 минут с 30.10.2015 г. по 02.04.2017 г. Значения внешних факторов (скорость и направление ветра)

изменялись каждые 6 часов. Результатом работы модели SWAN являются рассчитанные значения ветро-волновых характеристик для моря в целом и для выделенных регионов: значительная высота, средние (нулевой и минус первый моменты спектра) период, длина и направление волны, параметры волн зыби.

Результаты и обсуждение

На рисунках 2, 3 представлено сравнение значений высот значительных волн и средних периодов волн, рассчитанных по модели SWAN в рамках настоящей работы и по модели Wave Model (WAM) из системы прогнозирования CYCOFOS. Наибольший коэффициент детерминации ($R^2 = 0,78$) соответствует центральной части Азовского моря (рис. 2, точка X4). Модель SWAN занижает значения высоты значительных волн для разных точек в диапазоне от 10 до 20 см, но при этом воспроизводятся все качественные характеристики и пиковые значения. Систематическое занижение высоты волны отсутствует. Причиной существующих отличий расчетных значений могут быть различия в исходной батиметрии, а также погрешности, вызванные особенностями моделей и ветровым форсингом.

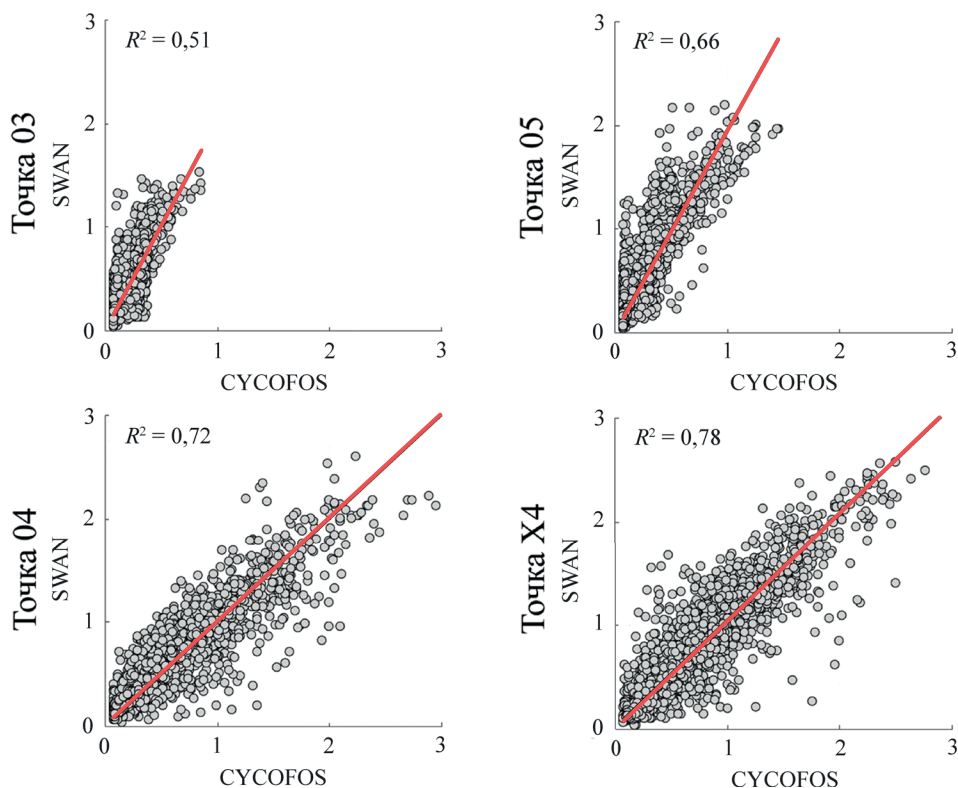


Рис. 2. Сопоставление результата расчета параметров ветрового волнения (высота значительных волн, м) системы CYCOFOS и результатов настоящего исследования по модели SWAN

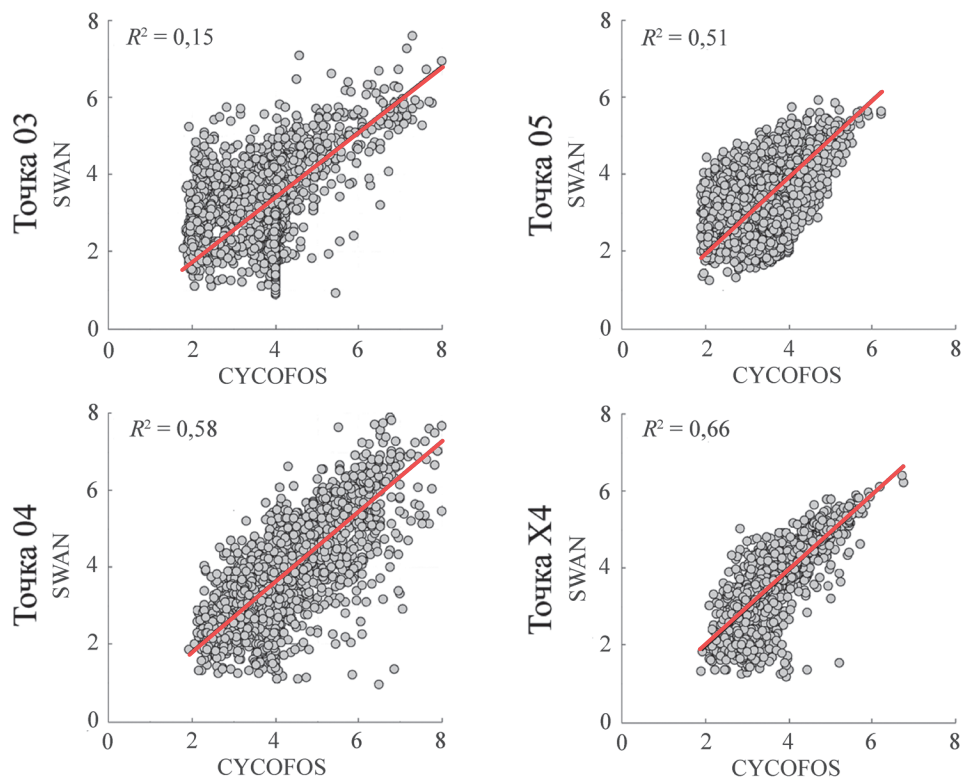


Рис. 3. Сопоставление результата расчета параметров ветрового волнения (средний период волны, сек.) системы CYCOFOS и результатов настоящего исследования по модели SWAN

Для ситуаций со скоростью ветра более 15 м/с модель достоверно воспроизводит штормовые условия. На рисунке 4 представлена пространственная картина развития и затухания шторма 24–25.09.2014, когда в бассейне Азовского моря наблюдались экстремальные штормовые условия. Мощный циклонический шторм, который сформировался над Крымским полуостровом, переместился на восток и 24.09.2014 вызвал ураганный ветер со скоростью до 37 м/с. На восточном побережье Азовского моря вода достигла отметки «опасное явление» в первой половине 24.09.2014. В дельте р. Дон в с. Кагальник Азовского района Ростовской области начало нагона зафиксировано в 12:20, а максимальное увеличение уровня воды отмечено с 18:00 до 20:00 и составило 3,4–3,6 м от реперной метки [Матишов, 2015] при высоте волн 3 %-ной обеспеченности около 1,0 м. В г. Азове в 20:00 уровень воды составлял 2,81 м. Максимальное развитие ветрового волнения в соответствии с расчетами пришлось на период с 6:00 до 12:00 ч 24.09.2014.

Всего в зимние периоды 2015–2017 гг. в Азовском море наблюдалось 28 случаев шторма с высотой волны более 1,5 м в центральной части водоема. Из них можно выделить 6 случаев с высотой волны от 2 до 3 м (рис. 5).

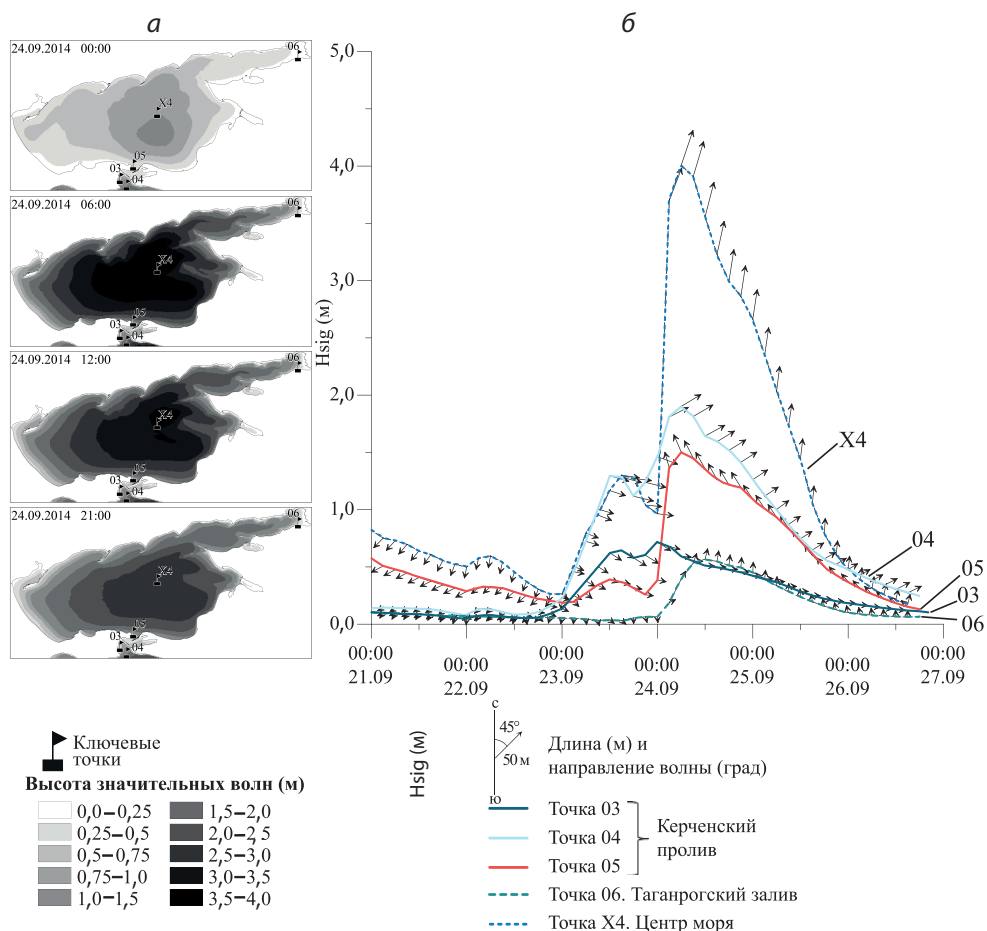


Рис. 4. Реанализ развития и затухания штормового волнения в Азовском море 21–27.09.2014 г.: а – карты высот значительных волн (24.09.2014); б – динамика ветро-волновых параметров (21–27.09.2014). Скорость ветра более 20 м/с

Максимального развития волновые процессы достигают при отсутствии льда в море и, как правило, сопровождаются нагонными явлениями в Таганрогском заливе и дельте р. Дон. Так, например, в декабре 2016 г. в Азовском море наблюдался нагон до 1,8 м при южном ветре со скоростью 12 м/с и порывами 16 м/с. Наибольшей силы волнение достигает в центральной части Азовского моря и южной оконечности Керченского пролива, наименьшей – в северной части Таганрогского залива и центре Керченского пролива. Как и для нагонных явлений, перед которыми зачастую возникает мощный по силе сгон [Матишов и др., 2014], для сильного волнения характерно некоторое уменьшение высоты волн перед началом шторма и далее их стремительное увеличение. Зачастую процессы развития и затухания сгонно-нагонных и штормовых явлений в Азовском море являются синхронными, таким образом, возникает мультиопасное явление.

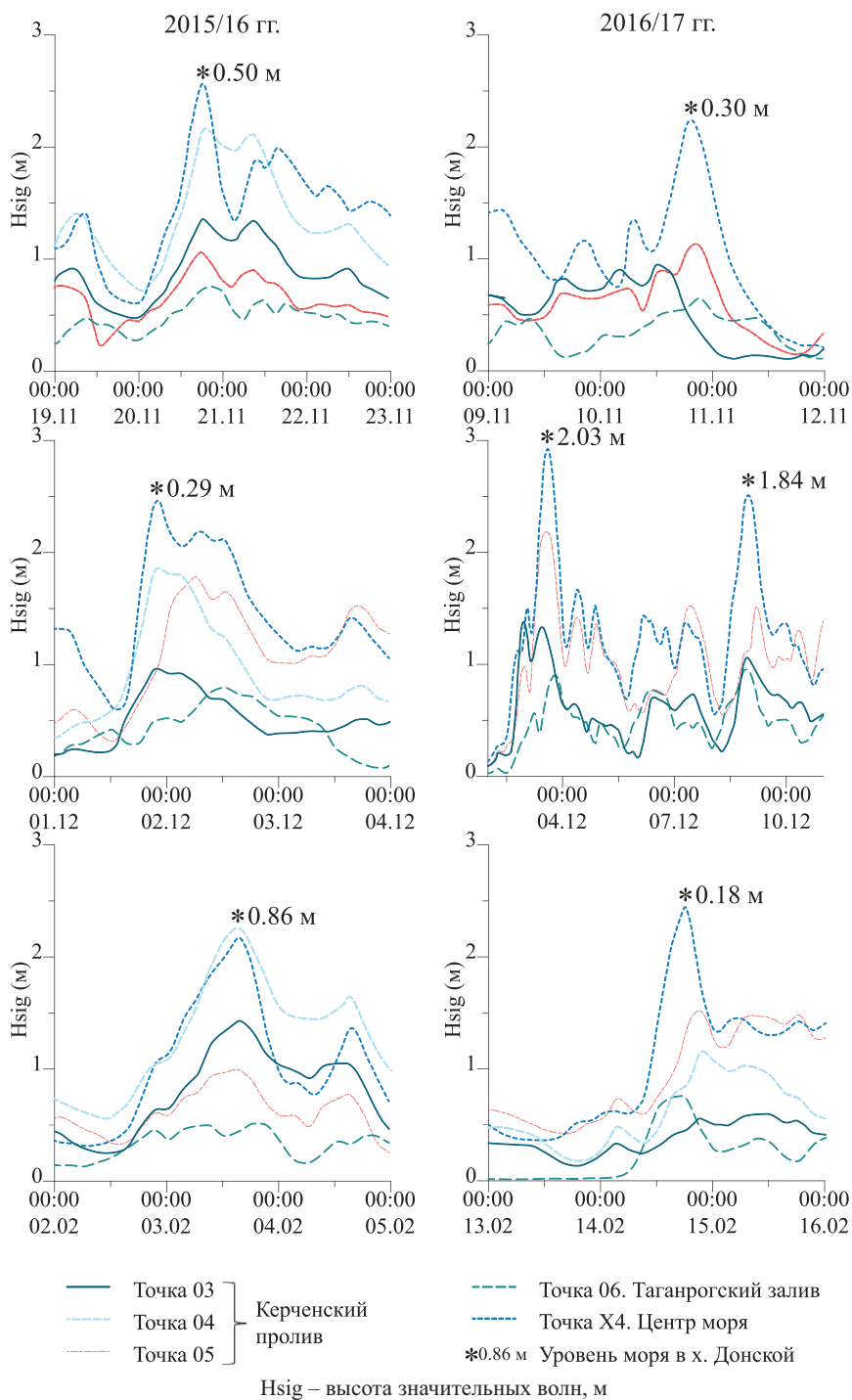


Рис. 5. Штормовые ситуации в Азовском море по результатам расчетов для зимних периодов 2015–2016 и 2016–2017 гг.

Примечательно, что ситуации с высоким волнением возникают практически в одни и те же календарные сроки. Это хорошо прослеживается на примере двух зимних сезонов (рис. 5).

Заключение

Разработанный подход к расчету ветрового волнения для мелководной акватории с последовательностью вложенных сеток позволил восстановить для двух зимних сезонов Азовского моря непрерывные ряды параметров – значительная высота, средние (нулевой и минус первый моменты спектра) период, длина и направление волны, параметры волн зыби. Средняя ошибка расчетных значений высот значительных волн при максимальной высоте 3 м составила 10–20 см.

С помощью ретроспективного анализа установлен ряд особенностей ветро-волнового режима Азовского моря. Для водоема характерно наличие мультиопасных явлений – штормовое волнение, как правило, сопровождается нагонными явлениями, то есть наибольшую высоту волн вызывают ветра юго-западной составляющей; ситуации с высотой волны более 2 м в центральном районе моря из года в год возникают практически в одни и те же календарные сроки; для мелководного Азовского моря при среднем по силе волнении отсутствует значительная контрастность полей ветрового волнения. Показанная эффективность примененной схемы расчета позволяет использовать ее для ретроспективного анализа ветрового волнения в других неглубоких водоемах или на акваториях с обширными мелководными областями, а также при выполнении практических работ по прогнозированию ветрового волнения, в фундаментальных исследованиях процессов образования и разрушения ледового покрова под воздействием ветрового волнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Атлас волнения, течений и уровня Азовского моря / Морское отделение Украинского научно-исследовательского гидрометеорологического института. Киев, 2012. 238 с.

Гидрометеорологический справочник Азовского моря. Ленинград: Гидрометеопиздат, 1962. 853 с.

Единая государственная система информации об обстановке в Мировом океане. URL: <http://esimo.ru> (дата обращения: 17.08.2017).

Магаева А.А., Третьякова И.А. Создание цифровой модели рельефа дна Азовского моря // Экология. Экономика. Информатика. Т. 3: Геоинформационные технологии и космический мониторинг. Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2015. С. 266–269.

Матишов Г.Г. Геоморфологические особенности шельфа Азовского моря // Вестник Южного научного центра. 2006а. 2(1): 44–48. doi: 10.23885/1813-4289-2006-2-1-44-48.

Матишов Г.Г. Батиметрия и закономерности формирования рельефа дна Азовского моря // Экосистемные исследования Азовского, Чёрного, Каспийского морей / под ред. Г.Г. Матишова. Т. VIII. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2006б. С. 31–42.

Матишов Г.Г. Керченский пролив и дельта Дона: безопасность коммуникаций и населения // Вестник Южного научного центра. 2015. 11(1). С. 6–15.

Матишов Г.Г., Гаргона Ю.М., Чикин А.Л. Моделирование ледостава в Азовском море с учетом климатического тренда в начале XXI века // Доклады Академии наук. 2012. 445(5). С. 590–593.

Матишов Г.Г., Чикин А.Л., Бердников С.В., Шевердяев И.В., Клещенков А.В., Кириллова Е.Э. Экстремальное затопление дельты Дона весной 2013 г.: хронология, условия формирования и последствия // Вестник Южного научного центра. 2014. 10(1). С. 17–24.

Матишов Г.Г., Матишов Д.Г., Бердников С.В., Яицкая Н.А. Природные катастрофы в Азово-Черноморском бассейне в начале XXI века. Ростов н/Д.: Изд-во ЮНЦ РАН, 2017. С. 160 с.

ArcGIS Desktop. URL: <http://desktop.arcgis.com/ru/> (дата обращения: 17.08.2017).

Booij N., Ris R.C., Holthuijsen L.H. A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation // Journal of Geophysical Research. 1999. 104(C4): 7649–7666. doi: 10.1029/98JC02622

Cyprus Coastal Ocean Forecasting and Observing System. URL: <http://www.oceanography.ucy.ac.cy/cycofos/index.html> (дата обращения: 17.08.2017).

ETOPO1 Global Relief Model. NOAA. National Centers for Environmental Information of the National Oceanic and Atmospheric Administration. 2017. URL: <https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/etopo1sources.html> (дата обращения: 17.08.2017).

Hasselmann K., Barnett T.P., Bouws E., Carlson H., Cartwright D.E., Enke K., Ewing J.A., Gienapp H., Hasselmann D.E., Kruseman P., Meerburg A., Müller P., Olbers D.J., Richter K., Sell W., Walden H. Measurements of Wind-Wave Growth and Swell Decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP) // *Ergänzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift*. 1973. 8(12). P. 1–95.

Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K.C., Ropelewski C., Wang J., Leetmaa A., Reynolds R., Jenne R., Joseph D. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1996. 77(3). P. 437–471. Doi: 10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.

Komen G.J., Hasselmann S., Hasselmann K. On the existence of a fully developed wind-sea spectrum // *Journal of Physical Oceanography*. 1984. 14(8): 1271–1285. Doi: 10.1175/1520-0485(1984)014<1271:OTE0AF>2.0.CO;2

Zodiatis G., Lardner R., Hayes D.R., Georgiou G., Sofianos S., Skliris N., Lascaratos A. 2008. Operational ocean forecasting in the Eastern Mediterranean: implementation and evaluation. *Ocean Science*. 4(1): 31–47. Doi: 10.5194/os-4-31-2008

Yaitskaya N., Tretyakova I. The study of hazardous natural phenomena in the Sea of Azov basin by mathematical modelling and GIS technologies // *Geoinformation Sciences and Environmental Development: New Approaches, Methods, Technologies*. Collection of articles of the II International conference (Limassol, Cyprus, 5–9 May 2014). Rostov-on-Don: Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences Publishers. 2014. P. 152–165.

Yaitskaya N., Tretyakova I. Mathematical Modelling of Dangerous Storm and Surge Phenomena in the Basin of the Sea of Azov (March 24, 2013) // *SGEM-2016 Conference Proceedings “16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM-2016”* (Albena, Bulgaria, June 28 – July 6, 2016). 2016. P. 481–488. Doi: 10.5593/SGEM2016/B31/S12.063.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Яицкая Наталья Александровна – к.г.н., ЮНЦ РАН; Субтропический научный центр РАН, г. Сочи; yaitskayan@gmail.com