

УДК 551.466.31(262.54)  
DOI: 10.23885/2500-0640-2017-3-4-60-70

## РЕЗУЛЬТАТЫ РЕТРОСПЕКТИВНОГО АНАЛИЗА ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ В АЗОВСКОМ МОРЕ (НА ПРИМЕРЕ ЗИМ 2015–2017 гг.)

© 2017 г. Н.А. Яицкая<sup>1,2</sup>

**Аннотация.** В статье представлены результаты работ по адаптации спектральной ветро-волновой модели и итоги ретроспективного анализа ветрового волнения в Азово-Черноморском бассейне на примере зимних периодов 2015–2016 и 2016–2017 гг. Описана концептуальная схема расчета ветрового волнения для мелководной акватории, такого как Азовское море, 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. В зимние периоды 2015–2017 гг. в Азовском море наблюдалось 28 случаев шторма с высотой волны более 1,5 м, из них 6 случаев с высотой волны более 2 м. Волновые процессы получают максимальное развитие при отсутствии льда в море и, как правило, сопровождаются нагонными явлениями в Таганрогском заливе. Как и для нагонных явлений, перед которыми зачастую возникает мощный по силе сгон, для сильного волнения характерно некоторое уменьшение высоты волн перед началом шторма и далее стремительное их развитие. На примере двух зимних сезонов показано, что ситуации с высоким волнением возникают практически в одни и те же календарные сроки.

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

### THE RESULTS OF HINDCASTING EXPERIMENTS OF WIND WAVE IN THE SEA OF AZOV (AS ILLUSTRATED BY WINTERS 2015–2017)

N.A. Yaitskaya<sup>1,2</sup>

**Abstract.** In the present article the results of work for adaptation of the spectral wind-wave model and retrospective analysis of the wind wave climate in the Azov-Black Sea region illustrated by two winter periods 2015/16, 2016/17 are presented. The conceptual scheme of wind wave calculation for shallow water area such as the Sea of Azov, based on the gradual data restoration using mathematical modeling from the largest Azov-Black Sea basin to the relatively small areas of the Kerch Strait and the Taganrog Bay, is described. This approach with sequential computations using nested grids in the model allows to obtain detailed pictures of parameters spatial distribution to the specified accuracy without statistical processing. Comparison analysis of storm wave situations with observation data of the sea level in the Taganrog Bay was carried out. In winter periods 2015–2017 28 cases with wave height more than 1.5 m were observed in the Sea of Azov, six of them with wave height more than 2 m. The maximum evolution of wave processes is achieved in the absence of ice in the sea and, as a rule, are accompanied by surgings in the Taganrog Bay. As well as for surgings, before which a powerful negative surge often occurs, strong waves are characterized by a slight decrease in wave height before the beginning of the storm and further rapid development. By the example of two winter seasons, it was shown that the situations with high wave occur almost in the same calendar period.

**Keywords:** the Sea of Azov, wind wave, storm, natural hazards, mathematic simulation, hindcasting.

<sup>1</sup> Южный научный центр Российской академии наук (Southern Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: yaitskayan@gmail.com

<sup>2</sup> Институт аридных зон Южного научного центра Российской академии наук (Institute of Arid Zones, Southern Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41

## 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, Черное море замерзло практически до Констанцы (Румыния), а Каспийское – до Махачкалы [1]; 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 соленостью до 4–6 ‰ в водозабор, а затем в водопровод г. Азова [2].

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. Особенно актуальной такая проблема становится с учетом строительства моста через Керченский пролив. В 1944 г. мост через пролив уже строился, но в феврале 1945 г. после 15 дней непрекращающихся штормовых условий 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 [3]. В настоящее время основным инструментом исследования ветрового волнения являются математические модели, при этом зачастую Азовское море исследуют как неотъемлемую часть Черного моря и не учитывают его специфические черты (мелководность, наличие сгонно-нагонных колебаний уровня), используют батиметрию с грубым разрешением, составленную 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 [4]. Такие знания немаловажны, но вместе с тем восстановленные многолетние ряды данных позволяют выявить закономерности и особенности ветрового волнения на протяжении XX–XXI веков, 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.

Цель данной работы – адаптация спектральной волновой модели к условиям мелководного Азовского моря и выполнение ретроспективного анализа ветрового волнения в данном водоеме. Для этого выбраны два зимних периода – 2015–2016 и 2016–2017 гг. – по нескольким причинам: наличие данных для верификации модели; в эти зимы 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. Прибрежный шельф Азовского моря, ограниченный изобатой 10 м, как известно, характеризуется сложным строением с активным развитием песчаных кос, пересыпей, дельт и лиманов [5]. Публично доступные наборы данных по батиметрии или открытые

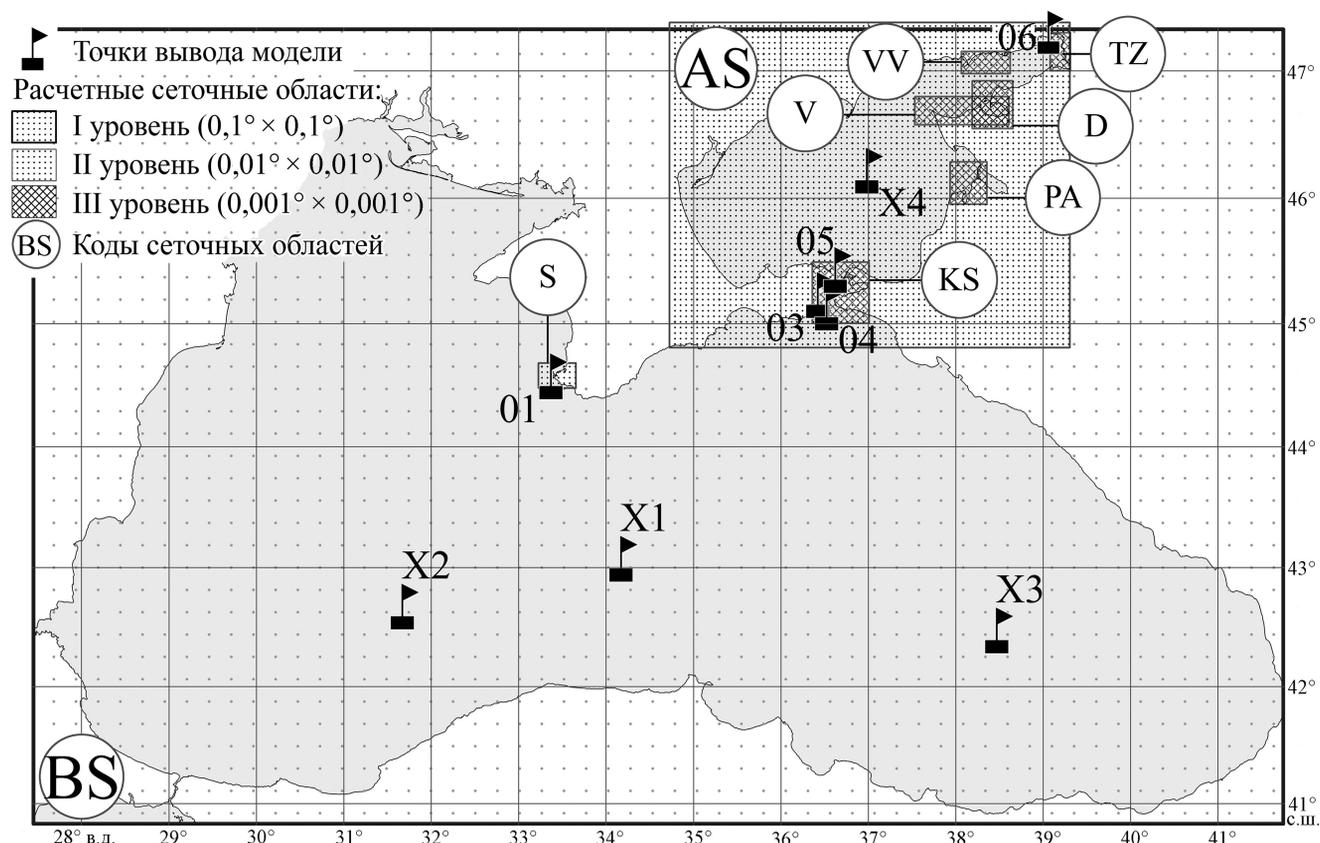


Рис. 1. Трехуровневая схема расчетных сеток в Азово-Черноморском бассейне, положение сеточных областей и отдельных ключевых точек.

Fig. 1. Three-level scheme of the computation grid areas of the Azov-Black Sea basin, position of grid areas and selected key points.

Таблица 1. Характеристики расчетных сеточных областей

Table 1. Description of the calculation grid areas

Код / Code	Название области Area name	Уровень Level	Размер ячейки (град.) / Mesh size (degree)	Размер сеточной области (град.) Grid size (degree)		Координаты левого нижнего угла (град.) / Coordinates of the left lower corner (degree)	
				столбцы / columns	строки / lines	X	Y
BS	Черное и Азовское моря Black Sea and Sea of Azov	I	0,1	14,400	6,600	27,398	40,773
AS	Азовское море Sea of Azov	II	0,01	4,590	2,580	34,721	44,800
TZ	Таганрогский залив Taganrog Bay	III	0,001	0,233	0,296	39,081	47,001
VV	Весело-Вознесенск Veselo-Voznesensk	III	0,001	0,561	0,174	38,065	46,978
D	Должанская Dolzhanskaya	III	0,001	0,466	0,374	38,191	46,550
V	Воронцовка Vorontsovka	III	0,001	1,076	0,220	37,534	46,580
PA	Приморско-Ахтарск Primorsko-Akhtarsk	III	0,001	0,423	0,336	37,937	45,954
KS	Керченский пролив Kerch Strait	III	0,001	0,651	0,492	36,361	45,002
S	Севастопольская бухта Sevastopol Bay	II	0,01	4,300	2,050	33,226	44,476

информационные системы с готовыми моделями рельефа дна морей и океанов (например база данных ETOPO [6]) 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 [7] по новейшим батиметрическим данным цифровая модель рельефа дна (ЦМР) [8]. Все работы с батиметрическими данными были выполнены с использованием программного продукта ArcGIS (ESRI, США) [9].

На основе ЦМР были построены регулярные сетки для Азово-Черноморского региона, Азовского моря в целом и отдельных районов с разным пространственным разрешением (рис. 1). В целях оптимизации расчетов и хранения результатов каждой сетке присвоен уникальный код (табл. 1). 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.

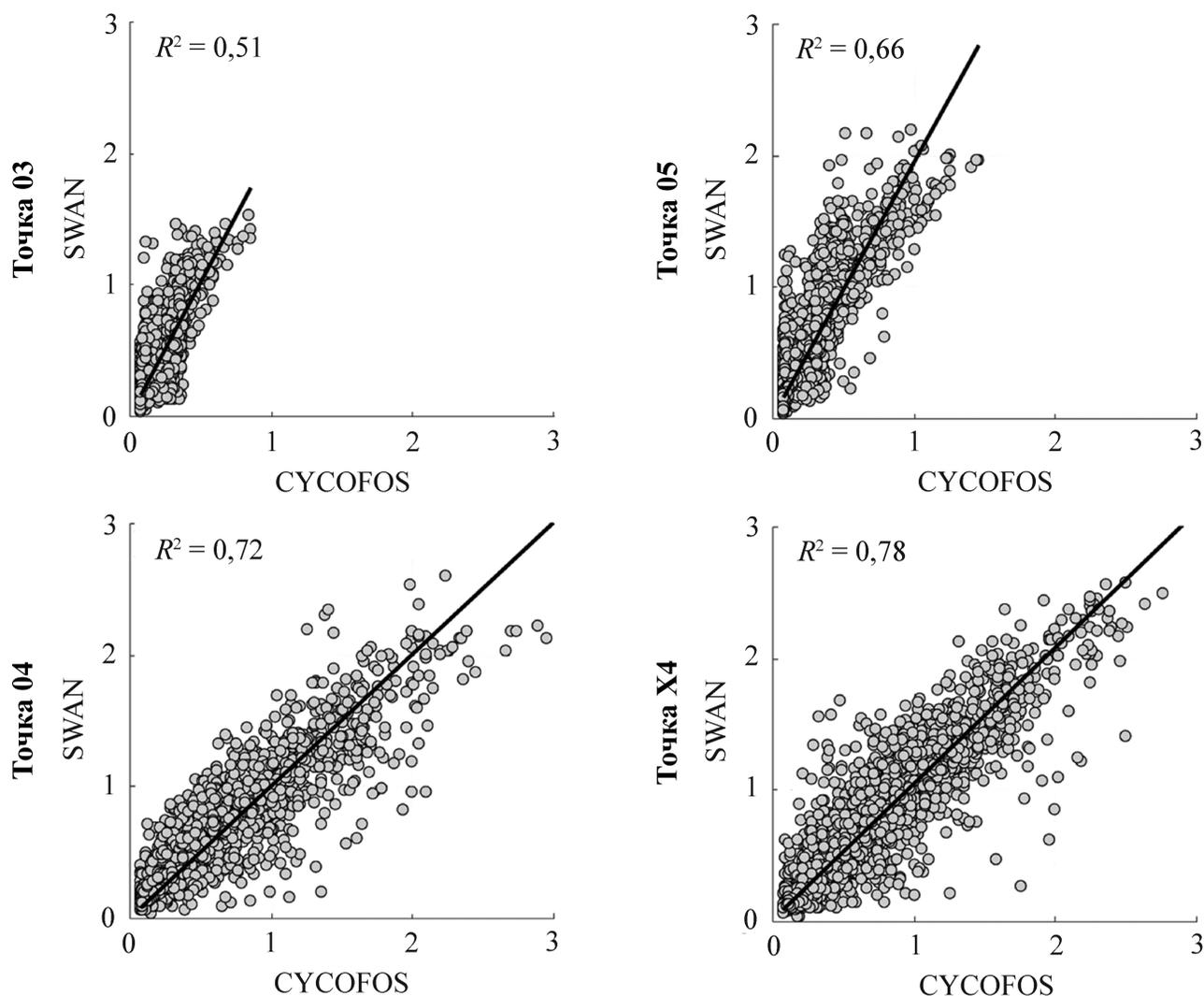
Для акватории Черного моря выбраны две точки в наиболее глубоководных областях (рис. 1, точки X2, X3) и одна в пограничном районе (рис. 1, точка X1). Также и в Азовском море выбрана точка, соответствующая максимальной глубине (рис. 1, точка X4). Наиболее глубоководным районам морей соответствует наибольшее количество натуральных 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 метеопункта «Донской» Южного научного центра РАН, где ведутся регулярные метеорологические наблюдения, которые будут использованы в продолжении работы. 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 настраивали не только для ретроспективного анализа, но и для возможности прогноза ветрового волнения, то наличие таких областей в расчетах необходимо.

Информация о непрерывном ветровом воздействии при расчете параметров волнения и уровня моря, 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 Environmental Prediction (NCEP), США) и Национального центра атмосферных исследований (National Center for Atmospheric Research (NCAR), США) [10], который содержит ретроспективные значения различных метеорологических параметров начиная с 1948 г. Временное разрешение данных составляет 6 часов, пространственное –  $2,5^\circ \times 2,5^\circ$  по долготе и широте. 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 версии 41.01A. 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, Нидерланды [11].

Адаптация модели SWAN к условиям Азовского и Черного морей и ее верификация были выполнены в соответствии с разработанным автором подходом [12; 13], который заключается в следующем: для ряда контрольных временных интервалов со средним по силе или штормовым волнением (независимо от сезона) проведены тестовые расчеты с параметрами «по умолчанию»; последовательно проверен 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



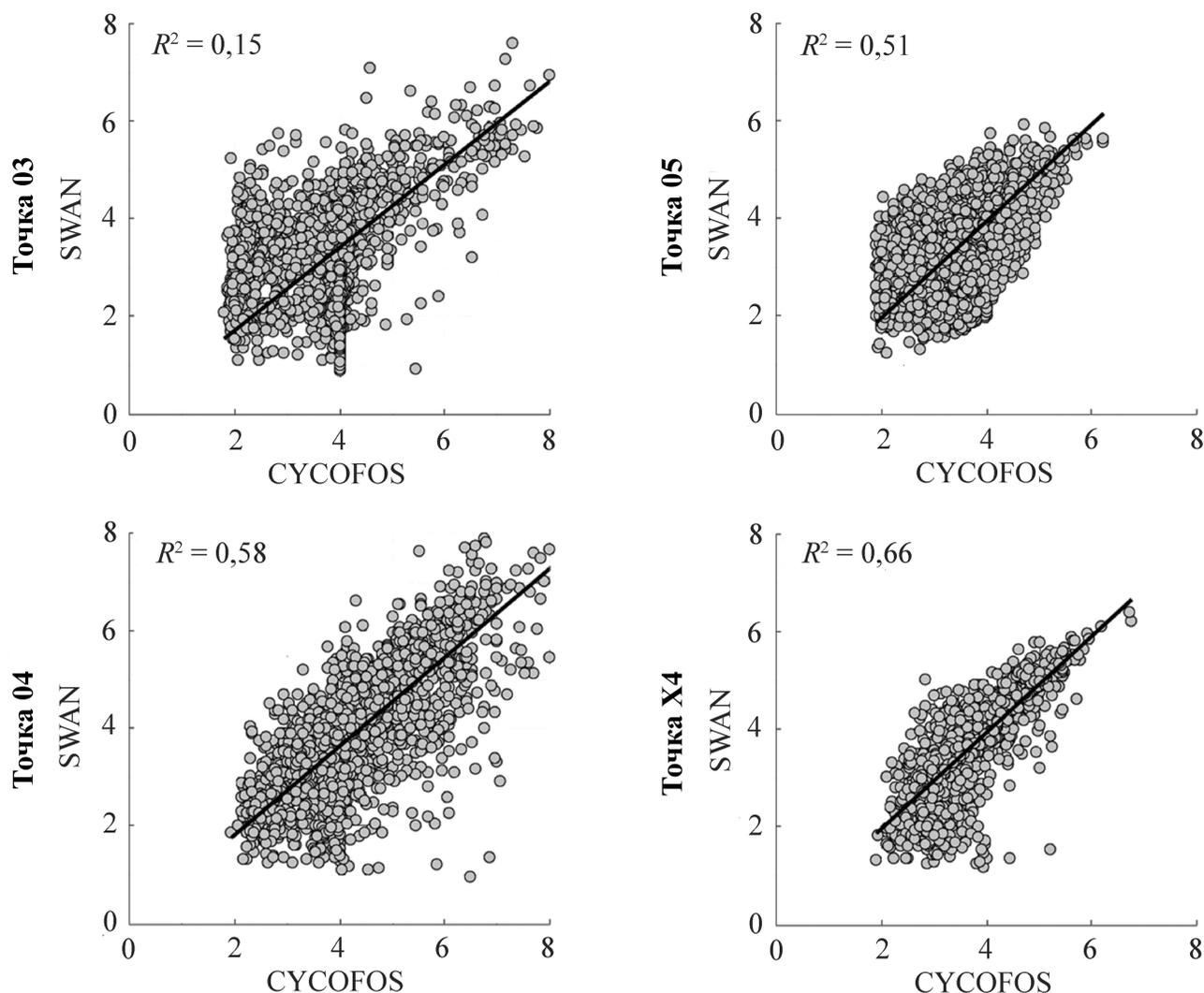
**Рис. 2.** Сопоставление результата расчета параметров ветрового волнения (высота значительных волн, м) системы CYCOFOS и результатов настоящего исследования по модели SWAN.

**Fig. 2.** Comparison of the calculation results of the wind wave parameters (significant wave height, m) by the CYCOFOS system and results of the present study by the SWAN model.

системы информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО) [14], информация о прогнозе волнения в Азово-Черноморском бассейне из Кипрской океанической прибрежной системы прогнозирования и наблюдения CYCOFOS (Cyprus Coastal Ocean Forecasting and Observing System) [15; 16].

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 [17]; диссипация из-за «забурунивания»; опрокидывание волн на мелководье, вызванное изменением глубины; придонное трение, параметризованное константой спектра JONSWAP [18]; трех- и четырехволновое взаимодействие волн друг с другом.

Для реанализа ветрового волнения Азовского моря в зимние периоды 2015–2016 и 2016–2017 гг. 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. Шаг расчетов по времени составил 30 минут с 30.10.2015 г. по 02.04.2017 г. На каждом временном шаге значения искомых параметров были рассчитаны в каждой ячейке сетки и записаны в выходные файлы. Значения внешних факторов (скорость и направление ветра) изменялись каждые 6 часов. Результатом работы модели SWAN являются рассчитанные



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

**Fig. 3.** Comparison of the calculation results of the wind wave parameters (mean wave period, sec.) by the CYCOFOS system and results of the present study by the SWAN model.

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 высо-

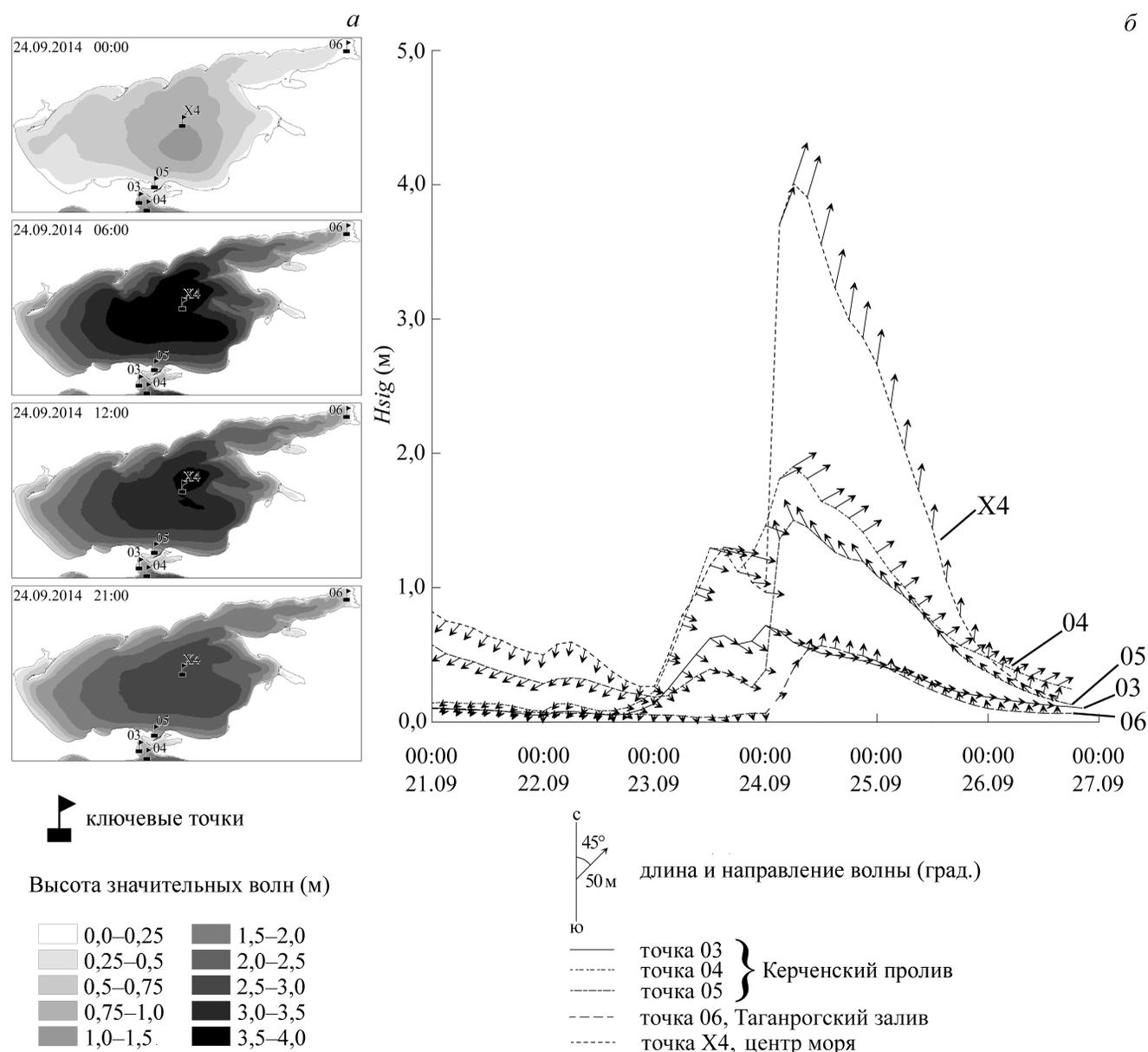
ты значительных волн в среднем на 10–20 см, но при этом воспроизводятся все качественные характеристики и пиковые значения. Систематическое занижение высоты волны отсутствует. Причиной существующих отличий расчетных значений могут быть различия в исходной батиметрии, а также погрешности, вызванные особенностями моделей.

Для ситуаций со скоростью ветра более 15 м/с модель хорошо воспроизводит штормовые условия. На рисунке 4 представлена пространственная картина развития и затухания шторма 24–25.09.2014 г., когда в бассейне Азовского моря наблюдались экстремальные штормовые условия. Мощный циклонический шторм, который сформировался над Крымским полуостровом, переместился на восток и 24.09.2014 г. вызвал ураганный ветер со скоро-

стью до 37 м/с. На восточном побережье Азовского моря вода отметки «опасное явление» в первой половине 24.09.2014 г. 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 [19] при высоте волн 3%-й 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 часов 24.09.2014 г.

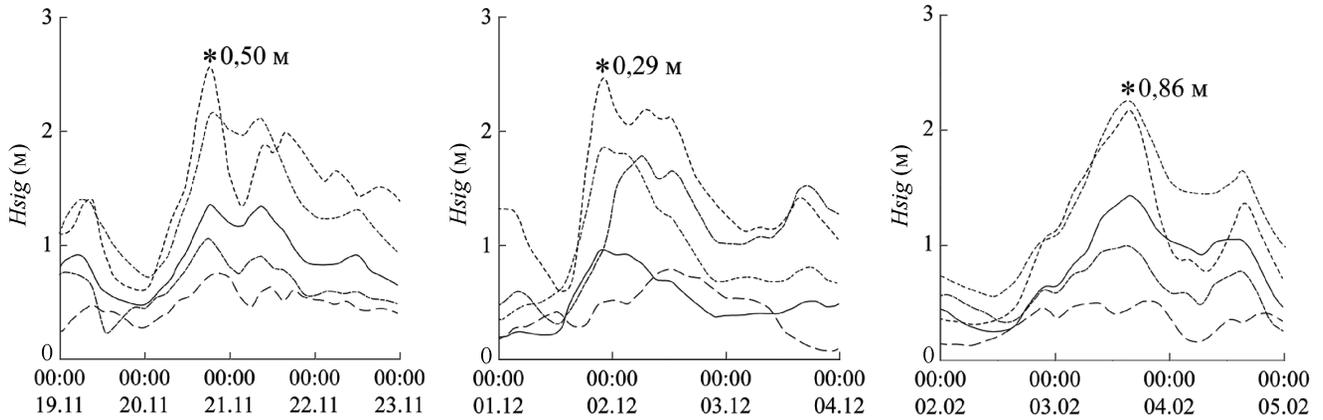
Всего в зимние периоды 2015–2017 гг. в Азовском море наблюдалось 28 случаев шторма с высотой волны более 1,5 м в центральной части водоема. Из них можно выделить 6 случаев с высотой волны от 2 до 3 м (рис. 5). Максимального развития волновые процессы достигают при отсутствии льда в море и, как правило, сопровождаются нагонными явлениями в Таганрогском заливе и дельте



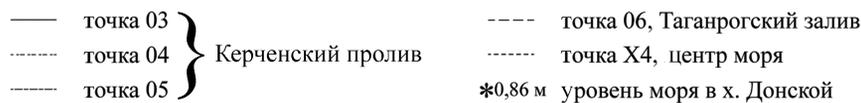
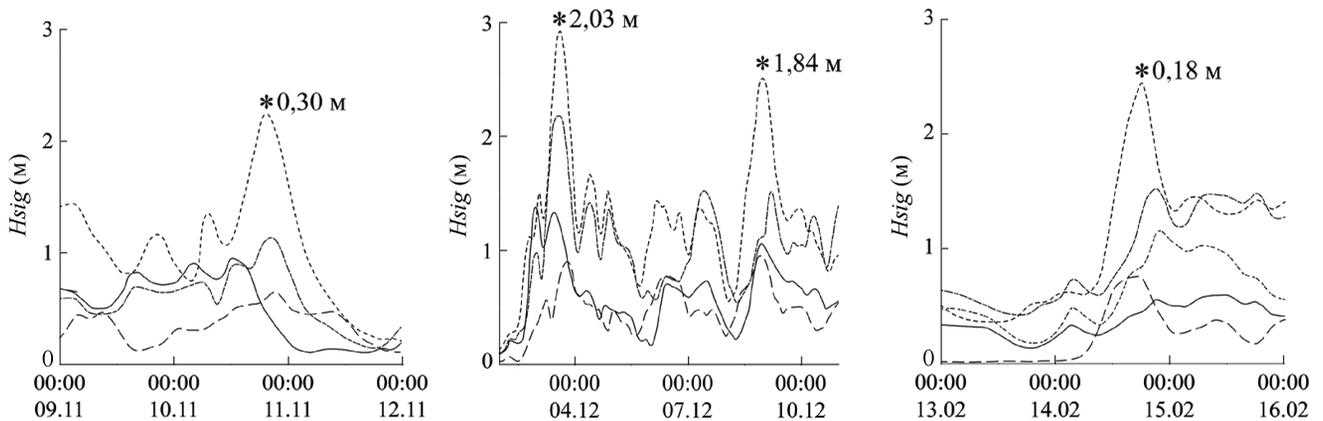
**Рис. 4.** Реанализ развития и затухания штормового волнения в Азовском море 21–27.09.2014 г.: *а* – карты высот значительных волн (24.09.2014 г.); *б* – динамика ветро-волновых параметров (21–27.09.2014 г.). Скорость ветра более 20 м/с.

**Fig. 4.** Reanalysis of the storm wave growth and attenuation in the Sea of Azov, September 21–27, 2014: *a* – maps of significant wave height (24.09.2014); *b* – dynamics of wind wave parameters (21–27.09.2014). Wind speed more than 20 m/s.

2015–2016 гг.



2016–2017 гг.



**Рис. 5.** Штормовые ситуации в Азовском море по результатам расчетов для зимних периодов 2015–2016 и 2016–2017 гг.;  $H_{sig}$  – высота значительных волн.

**Fig. 5.** Storm situations in the Sea of Azov by the calculation results for winter periods 2015–2016, 2016–2017;  $H_{sig}$  – significant wave height.

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 [20], 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 мультипасное явление.

Для Азовского моря, как и для Северного Каспия [21], при среднем по силе волнении отсутствует значительная контрастность полей ветрового волнения, что, по-видимому, может объясняться небольшой площадью и глубиной обеих акваторий. Парные линейные регрессии, рассчитанные для разных районов Азовского моря, показали, что в параметрах волнения пар (Таганрогский залив – собственно море; Керченский пролив (северная часть, центр, южная часть) – собственно море) выделяется две моды волнения – при северо-восточ-

ных (сгонных) и юго-западных (нагонных) ветрах. Для этих сочетаний коэффициенты детерминации составляют более 0,7.

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). Продолжающиеся исследования и ретроспективный анализ ветрового волнения с 1950 г. могут подтвердить или опровергнуть такие выводы. Восстановление многолетнего хода пространственного распределения параметров волнения поможет изучить многолетнюю изменчивость и пространственно-временную неоднородность волновых параметров.

## 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 волны. 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.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность к.б.н. Г.В. Ковалевой (Институт аридных зон Южного научного центра РАН, Ростов-на-Дону) за предоставленные данные наблюдений за ветровым волнением в Черном и Азовском морях и д.н. профессору Г. Зодиатису (Океанографический центр Университета Кипра) за возможность использования прогноза ветрового волнения в Черном море, а также сотруднице отдела информационных технологий и математического моделирования ИАЗ ЮЦН РАН И.А. Третьяковой за предоставленные сведения о высоте уровня воды в Азовском море по результатам математического моделирования.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-35-00318 мол\_а.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матишов Г.Г., Гаргопа Ю.М., Чикин А.Л. 2012. Моделирование ледостава в Азовском море с учетом климатического тренда в начале XXI века. *Доклады Академии наук*. 445(5): 590–593.
2. Матишов Г.Г., Матишов Д.Г., Бердников С.В., Яицкая Н.А. 2017. *Природные катастрофы в Азово-Черноморском бассейне в начале XXI века*. Ростов н/Д, изд-во ЮНЦ РАН: 160 с.
3. *Гидрометеорологический справочник Азовского моря*. 1962. Л., Гидрометеиздат: 853 с.
4. *Атлас волнения, течений и уровня Азовского моря*. 2012. Киев, Морское отделение Украинского научно-исследовательского гидрометеорологического института: 238 с.
5. Матишов Г.Г. 2006. Геоморфологические особенности шельфа Азовского моря. *Вестник Южного научного центра*. 2(1): 44–48. doi: 10.23885/1813-4289-2006-2-1-44-48
6. ETOPO1 Global Relief Model. 2017. NOAA. National Centers for Environmental Information of the National Oceanic and Atmospheric Administration. URL: <https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/etopo1sources.html> (дата обращения: 17.08.2017).
7. Матишов Г.Г. 2006. Батиметрия и закономерности формирования рельефа дна Азовского моря. В кн.: *Экосистемные исследования Азовского, Черного, Каспийского морей. Т. VIII*. Под ред. Г.Г. Матишова. Апатиты, изд-во КНЦ РАН: 31–42.
8. Магаева А.А., Третьякова И.А. 2015. Создание цифровой модели рельефа дна Азовского моря. В кн.: *Экология. Экономика. Информатика. Т. 3: Геоинформационные технологии и космический мониторинг*. Ростов н/Д, изд-во ЮФУ: 266–269.
9. *ArcGIS Desktop*. URL: <http://desktop.arcgis.com/ru/> (дата обращения: 17.08.2017).
10. 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. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 77(3): 437–471. doi: 10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2
11. Booij N., Ris R.C., Holthuijsen L.H. 1999. A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation. *Journal of Geophysical Research*. 104(C4): 7649–7666. doi: 10.1029/98JC02622
12. Yaitskaya N., Tretyakova I. 2014. The study of hazardous natural phenomena in the Sea of Azov basin by mathematical modeling and GIS technologies. In: *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: 152–165.
13. Yaitskaya N., Tretyakova I. 2016. Mathematical Modeling of Dangerous Storm and Surge Phenomena in the Basin of the Sea of Azov (March 24, 2013). In: *SGEM2016 Conference Proceedings "16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2016" (Albena, Bulgaria, June 28 – July 6, 2016)*: 481–488. doi: 10.5593/SGEM2016/B31/S12.063
14. Единая государственная система информации об обстановке в Мировом океане. URL: <http://esimo.ru> (дата обращения: 17.08.2017).
15. Cyprus Coastal Ocean Forecasting and Observing System. URL: <http://www.oceanography.ucy.ac.cy/cycofos/index.html> (дата обращения: 17.08.2017).
16. 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
17. Komen G.J., Hasselmann S., Hasselmann K. 1984. On the existence of a fully developed wind-sea spectrum. *Journal of Physical Oceanography*. 14(8): 1271–1285. doi: 10.1175/1520-0485(1984)014<1271:OTEQAF>2.0.CO;2
18. 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. 1973. Measurements of Wind-Wave Growth and Swell Decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Ergänzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift*. 8(12): 1–95.
19. Матишов Г.Г. 2015. Керченский пролив и дельта Дона: безопасность коммуникаций и населения. *Вестник Южного научного центра*. 11(1): 6–15.
20. Матишов Г.Г., Чикин А.Л., Бердников С.В., Шевердяев И.В., Клещенков А.В., Кириллова Е.Э. 2014. Экстремальное затопление дельты Дона весной 2013 г.: хронология, условия формирования и последствия. *Вестник Южного научного центра*. 10(1): 17–24.
21. Яицкая Н.А. 2017. Ретроспективный анализ ветрового волнения в Каспийском море во второй половине XX – начале XXI вв. и связь с региональными проявлениями изменения климата. *Географический вестник*. 41(2): 57–70.
- trend in the early twenty-first century. *Doklady Earth Sciences*. 445(2): 1011–1014. doi: 10.1134/S1028334X12080132
2. Matishov G.G., Matishov D.G., Berdnikov S.V., Yaitskaya N.A. 2017. *Prirodnye katastrofy v Azovo-Chernomorskom bassejne v nachale XXI veka*. [Natural hazards in the Azov-Black Sea basin in the beginning of the XXI century]. Rostov-on-Don, Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences Publishers: 160 p. (In Russian).
3. *Gidrometeorologicheskii spravochnik Azovskogo morya*. [Hydrometeorological handbook of the Sea of Azov]. 1962. Leningrad, Gidrometeoizdat: 853 p. (In Russian).
4. *Atlas volneniya, techeniy i urovnya Azovskogo morya*. [Atlas of the wave, currents and level of the Sea of Azov]. 2012. Kiev, Marine Department of the Ukrainian Scientific Research Hydrometeorological Institute: 238 p. (In Russian).
5. Matishov G.G. 2006. [Geomorphologic Peculiarities of the Azov Sea Shelf]. *Vestnik Yuzhnogo nauchnogo tsentra*. 2(1): 44–48. (In Russian). doi: 10.23885/1813-4289-2006-2-1-44-48
6. ETOPO1 Global Relief Model. 2017. NOAA. National Centers for Environmental Information of the National Oceanic and Atmospheric Administration. Available at: <https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/etopo1sources.html> (accessed 17 August 2017).
7. Matishov G.G. 2006. [Bathymetry and patterns of formation of the relief of the bottom of the Sea of Azov]. In: *Ekosistemnyye issledovaniya Azovskogo, Chernogo, Kaspiyskogo morey*. [Ecosystem studies of the Sea of Azov, Black Sea, Caspian Sea. Vol. 8]. Apatity, Kola Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences Publishers: 31–42. (In Russian).
8. Magaeva A.A., Tretyakova I.A. 2015. [Creation of digital elevation model of the bottom of the Sea of Azov]. In: *Ecologiya. Ekonomika. Informatika. T. 3: Geoinformatsionnyye tekhnologii i kosmicheskii monitoring*. [Ecology. Economics. Informatics. Vol. 3: Geoinformational technologies and space monitoring]. Rostov-on-Don, Southern Federal University: 266–269. (In Russian).
9. *ArcGIS Desktop*. Available at: <http://desktop.arcgis.com/en/> (accessed 17 August 2017).
10. 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. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 77(3): 437–471. doi: 10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2
11. Booij N., Ris R.C., Holthuijsen L.H. 1999. A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation. *Journal of Geophysical Research*. 104(C4): 7649–7666. doi: 10.1029/98JC02622
12. Yaitskaya N., Tretyakova I. 2014. The study of hazardous natural phenomena in the Sea of Azov basin by mathematical modeling and GIS technologies. In: *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: 152–165.
13. Yaitskaya N., Tretyakova I. 2016. Mathematical Modeling of Dangerous Storm and Surge Phenomena in the Basin of the

## REFERENCES

1. Matishov G.G., Gargora M.Yu., Chikin A.L. 2012. Modeling of ice formation in the Sea of Azov with account for the climatic

- Sea of Azov (March 24, 2013). In: *SGEM2016 Conference Proceedings "16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2016"* (Albena, Bulgaria, June 28 – July 6, 2016): 481–488. doi: 10.5593/SGEM2016/B31/S12.063
14. *Edinaya gosudarstvennaya sistema informatsii ob obstanovke v Mirovom okeane*. [Unified state information system on the situation in the World Ocean]. Available at: <http://esimo.ru> (accessed 17 August 2017). (In Russian).
15. *Cyprus Coastal Ocean Forecasting and Observing System*. Available at: <http://www.oceanography.ucy.ac.cy/cycofos/index.html> (accessed 17 August 2017).
16. 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
17. Komen G.J., Hasselmann S., Hasselmann K. 1984. On the existence of a fully developed wind-sea spectrum. *Journal of Physical Oceanography*. 14(8): 1271–1285. doi: 10.1175/1520-0485(1984)014<1271:OTEAF>2.0.CO;2
18. 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. 1973. Measurements of Wind-Wave Growth and Swell Decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Ergänzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift*. 8(12): 1–95.
19. Matishov G.G. 2015. [The Kerch Strait and the Don delta: the security of communications and population]. *Vestnik Yuzhnogo nauchnogo tsentra*. 11(1): 6–15. (In Russian).
20. Matishov G.G., Chikin A.L., Berdnikov S.V., Sheverdyayev I.V., Kleshchenkov A.V., Kirillova E.E. 2014. [Extreme flooding of the Don delta in spring of 2013: chronology, formation conditions, and consequences]. *Vestnik Yuzhnogo nauchnogo tsentra*. 10(1): 17–24. (In Russian).
21. Yaitskaya N.A. 2017. [Retrospective analysis of wind waves in the Caspian Sea in the second half of the XX – beginning of the XXI century and its connection with the regional climate changes]. *Geograficheskiy vestnik*. 41(2): 57–70. (In Russian).

Поступила 30.08.2017