

Численное исследование сгонно-нагонных процессов и течений Азовского моря в период экстремальных ветров

© 2017 **Л. В. Черкесов**¹, **Т. Я. Шульга**^{1,*}, **Н. Н. Дьяков**²,
Р. Р. Станичная¹

¹Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

²Севастопольское отделение Государственного океанографического института имени Н. Н. Зубова, Севастополь, Россия

*E-mail: shulgaty@mail.ru

Поступила 24.10.2016 г. После доработки 31.01.2017 г.

В работе исследованы величины штормовых сгонно-нагонных колебаний уровня Азовского моря, возникающих во время экстремальных приазовских явлений («черноморка», или «оборотная низовка»), являющихся причиной наводнений в прибрежных районах и Таганрогском заливе. Совместный анализ результатов моделирования и данных наблюдений динамики уровня невого режима вод показал их хорошее соответствие в период прохождения сильных штормовых циклонов, перемещающихся с северо-востока Черного моря. Установлена взаимосвязь параметров восточных и западных штормовых ветров, наблюдавшихся в Азовском море во время сильных штормов 2013 – 2014 гг., с амплитудой колебаний скорости течений и уровня Азовского моря. Гидродинамическое моделирование выполнено с использованием трехмерной нелинейной модели *POM (Princeton Ocean Model)* при задании реального атмосферного воздействия, соответствующего экстремальным штормам, по данным модели *SKIRON*. Анализ течений, вызванных действием штормовых ветров, показал, что в поверхностном слое моря максимальное значение их скорости превышает 2 м/с (2,12 м/с в марте 2013 г. и 2,45 м/с в сентябре 2014 г.). При этом скорость течений в придонном слое моря, достигающая значений 0,59 и 0,44 м/с, способна вызвать интенсивные литодинамические процессы в прибрежной зоне.

Ключевые слова: Азовское море, Таганрогский залив, уровень моря, экстремальные приазовские явления, течения, сгонно-нагонные процессы, численное моделирование, штормовые циклоны.

DOI: 10.22449/0233-7584-2017-5-3-20

Введение

Одним из проявлений глобальных климатических изменений в последние годы является увеличение количества опасных (ОЯ) и стихийных гидрометеорологических (СГЯ) явлений в прибрежных зонах океанов и морей. По данным работы [1], с 1970 г. по настоящее время число интенсивных ураганов категории 4 и 5 почти удвоилось.

Последствия ОЯ и СГЯ на Азовском море часто имеют катастрофический характер. Штормы здесь нередко сопровождаются многочисленными трагедиями – гибелью судов, разрушением прибрежной инфраструктуры и человеческими жертвами [2 – 5]. Анализ собранных данных прибрежных наблюдений на морских гидрометеорологических станциях (МГ) побережья Азовского моря показал, что наибольшую повторяемость в процентах от общего числа явлений, достигших критериев ОЯ и СГЯ, имели те явления,

которые были связаны со штормовой деятельностью, – волнением (30 %), нагонными (46 %) и сгонными (21 %) колебаниями уровня моря. Развитию сгонно-нагонных колебаний уровня в Азовском море способствуют физико-географические условия Азовского бассейна: достаточно большая площадь моря (39 тыс. км²) при незначительной средней глубине (~ 7 м), а также существенная штормовая активность (среднее число дней со штормовым ветром скоростью 15 м/с и более составляет 24 – 34 дня в год) [3, 5, 6].

Действие характерных приазовских ветров, вызывающих наибольшие сгонно-нагонные колебания уровня Азовского моря, является определяющим фактором для безопасной эксплуатации морского хозяйства, включая морской транспорт. При аномальных спадах уровня происходит обмеление подходов к портам, штормовые нагоны приводят к затоплению прибрежных территорий, береговых складских помещений, а также гибели судов и людей [3, 5].

Исследование повторяемости сгонов и нагонов по районам Азовского моря выявило, что наиболее часто подвергаются катастрофическим нагонам (48 % всех случаев) и сгонам (60 %) восточное побережье моря и Таганрогский залив [5]. Амплитуда сгонно-нагонных колебаний уровня в этих районах Азовского моря нередко достигает значений 2,0 – 3,5 м. В Таганроге, где существенное влияние оказывает сток реки Дон, амплитуда сгонно-нагонных колебаний максимальна и составляет 6,87 м.

В ряде случаев (1739, 1831, 1843, 1877, 1914, 1969 гг.) штормовые нагоны приводили к многочисленным жертвам среди населения прибрежных районов Темрюкского залива, восточной части Азовского моря [2 – 4, 7]. В последнее десятилетие в результате штормовой деятельности регулярно наблюдаются катастрофические наводнения в Таганрогском заливе и дельте Дона (12 апреля 1997 г., 1 марта 2005 г., 30 сентября 2010 г., 23 – 24 марта 2013 г. и 24 сентября 2014 г.) [8 – 11]. В данной статье основное внимание будет уделено последним двум случаям наводнений в Таганрогском заливе (23 – 24 марта 2013 г. и 24 сентября 2014 г.), которые, как и штормовая ситуация 1997 г., характеризовались максимальными значениями подъема уровня моря за весь исторический период наблюдений (1882 – 2015 гг.). При этом исследование пространственной и временной изменчивости динамики вод в заливе во время этих ОЯ базировалось как на данных натурных наблюдений, так и на результатах численных экспериментов средствами математического моделирования.

Теоретические исследования динамики вод, экстремальных сгонов и нагонов в природном бассейне основываются на применении математических моделей. Численному моделированию динамики вод Азовского моря посвящен цикл работ [12 – 14], в которых на основе трехмерной нелинейной сигма-координатной модели *POM (Princeton Ocean Model)* [15], адаптированной к району Азовского моря [16], изучены основные характеристики ветровых течений, сгонно-нагонных процессов для типовых стационарных полей ветра. В работе [12] сделаны выводы о влиянии параметров модельных циклонов (направления, скорости перемещения, геометрических характеристик) на максимальную скорость генерируемых ими течений и экстремальные колебания уровня моря.

Результаты численного моделирования течений и колебаний уровня при экстремальном шторме, вызвавшем ОЯ в Керченском проливе, когда потерпели крушение 13 судов (11 ноября 2007 г.), приведены в работе [13]. Эти исследования выполнены с привлечением данных атмосферной модели *SKIRON* [17] (<http://forecast.uoa.gr>). В исследовании проведена верификация модели по данным прямых измерений уровня на МГ Геническ и Мариуполь.

С помощью двухслойной математической модели и по материалам гидрометеорологических наблюдений на береговой базе Южного научного центра РАН, рассмотрен случай аномального затопления дельты Дона с 20 по 26 марта 2013 г. [8, 10]. С использованием численных моделей *ADCIRC* и *SWAN* в работе [11] проведены расчеты штормовых нагонов и ветрового волнения в Таганрогском заливе Азовского моря, а также исследованы механизмы затопления дельты Дона.

В настоящей работе посредством математического моделирования исследуется влияние стационарных течений на сгонно-нагонные явления, вызываемые действием ветра, приповерхностные поля которого рассчитываются методом, использующим усвоение данных метеорологических наблюдений (*SKIRON*). Выполнено сравнение результатов проведенных численных расчетов с данными натурных наблюдений, полученными во время экстремальных штормов на ряде гидрометеорологических станций побережья Азовского моря и Таганрогского залива.

Постановка задачи. Граничные и начальные условия

Математическая модель основывается на системе уравнений турбулентного движения вязкой жидкости [15] в декартовых координатах, где ось x направлена на восток, y – на север, z – вертикально вверх:

$$\frac{du}{dt} - fv + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} = 2 \frac{\partial}{\partial x} \left(A_m \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[A_m \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial u}{\partial z} \right), \quad (1)$$

$$\frac{dv}{dt} + fu + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} = 2 \frac{\partial}{\partial y} \left(A_m \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[A_m \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial v}{\partial z} \right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} + g\rho = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (4)$$

Здесь u, v, w – проекции скорости по осям x, y, z ; t – время; $P(x, y, z, t) = P_{\text{атм}} + g\rho_0(\zeta - z)$ – давление на глубине z на основании интегрирования уравнения (3) по вертикали; $P_{\text{атм}} = 1013,25$ гПа – стандартное атмосферное давление при температуре 0°C на широте 45° ; ρ – плотность; g – ускорение свободного падения; f – параметр Кориолиса; $d/dt = \partial/\partial t + u\partial/\partial x + v\partial/\partial y + w\partial/\partial z$ – полная производная. Параметризация коэффициентов вертикальной вязкости K_m

в уравнениях (1) и (2) производится в соответствии с полуэмпирической дифференциальной моделью Меллора – Ямады [18]. Коэффициент горизонтальной вязкости A_M вычисляется с использованием модели подсеточной вязкости [19] в зависимости от горизонтальных градиентов скорости.

Граничные условия на свободной поверхности имеют вид

$$w|_{z=\zeta} = \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y}, \quad K_M \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) \Big|_{z=\zeta} = (\tau_{0x}, \tau_{0y}), \quad (5)$$

где $\zeta(x, y, t)$ – отклонение свободной поверхности от невозмущенной горизонтальной плоскости; $\tau_{0x} = C_a W_x |\mathbf{W}|$ и $\tau_{0y} = C_a W_y |\mathbf{W}|$ – проекции касательных напряжений ветра, \mathbf{W} – вектор скорости ветра на высоте 10 м над уровнем моря, C_a – эмпирический коэффициент поверхностного трения [20] для скорости ветра меньше 22 м/с, в других случаях C_a – константа, предложенная в работе [21]:

$$10^3 C_a = \begin{cases} 2,5, & |\mathbf{W}| > 22 & \text{м/с,} \\ 0,49 + 0,065|\mathbf{W}|, & 8 \leq |\mathbf{W}| \leq 22 & \text{м/с,} \\ 1,2, & 4 \leq |\mathbf{W}| \leq 8 & \text{м/с,} \\ 1,1, & 1 \leq |\mathbf{W}| \leq 4 & \text{м/с.} \end{cases} \quad (6)$$

Граничные условия в придонном слое имеют вид [15]

$$\left(w + u \frac{\partial H}{\partial x} + v \frac{\partial H}{\partial y} \right) \Big|_{z=-H} = 0, \quad K_M \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) \Big|_{z=-H+h_b} = (\tau_{1x}, \tau_{1y}), \quad (7)$$

где $\tau_{1x} = C_b u \sqrt{u^2 + v^2}$; $\tau_{1y} = C_b v \sqrt{u^2 + v^2}$; C_b – коэффициент донного трения, который находится по формуле $C_b = k^2 / (\ln^2 h_b / z_0)$; h_b – шаг по вертикали в придонном слое; $z_0 = 0,003$ м – параметр шероховатости, характеризующий гидродинамические свойства подстилающей донной поверхности. Значение z_0 определяется с помощью теории Гранта – Мадсена [22], описывающей механизм влияния волн на течения в придонном пограничном слое.

На боковых границах выполняются условия прилипания. В качестве начальных (при $t = 0$) принимаются условия отсутствия движения жидкости и горизонтальности свободной поверхности до начала действия атмосферных возмущений:

$$u(x, y, z, 0) = 0, \quad v(x, y, z, 0) = 0, \quad w(x, y, z, 0) = 0, \quad \zeta(x, y, z, 0) = 0. \quad (8)$$

Численные эксперименты выполнены на основании применения модели *POM*, для этого в исходных уравнениях (1) – (4), граничных условиях (5), (7) и начальных условиях (8) осуществляется переход от координаты z к σ -координате [15]. Выбор шагов интегрирования по временным и пространственным координатам осуществляется в соответствии с критерием устойчивости для баротропных волн [23]. Топография дна интерполирована на модельную сетку с использованием массива глубин, приведенного на навигационных

картах. Ее разрешение по широте и долготе составляет $1/59 \times 1/84^\circ$. При этом линейные размеры ячейки $\Delta x = \Delta y = 1,4$ км, количество узлов горизонтальной сетки 276×176 , по вертикали 11 расчетных уровней. Уравнения интегрировались по времени с шагом $\Delta t = 18$ с для нахождения осредненных двумерных компонент скорости и уровня, а также с шагом $\Delta t_A = 10\Delta t = 3$ мин для вычисления отклонений от найденных средних и вертикальной компонент скорости. Источником данных для построения расчетной сетки явилась карта батиметрии и конфигурации береговой линии Азовского моря, построенная на основе оцифровки последних крупномасштабных гидрографических карт Гидрографической службы.

Атмосферный форсинг, используемый в вычислительных экспериментах

Экстремальное приазовское явление “черноморка”, или “оборотная низовка” (по терминологии местных рыбаков), возникает при сильных штормовых циклонах, перемещающихся с северо-востока Черного моря. Длительное действие ветров, направленных с юго-юго-востока на юго-юго-запад, с умеренной или ураганной скоростью приводит к экстремальным сгонам и подъемам уровня, являющимся причиной разрушительных наводнений на Азовском побережье. Для понимания особенностей этих повторяющихся явлений выполнен анализ метеорологических ситуаций, продемонстрировавших разрушительную силу штормовых нагонов и приведших к катастрофическим наводнениям в Таганрогском заливе и дельте Дона (23 – 24 марта 2013 г. и 24 сентября 2014 г.).

Как следует из данных наблюдений, ОЯ 23 – 24 марта 2013 г. возникло при прохождении глубокого циклона над южной частью европейской территории России (ЕТР) и усилении юго-западного ветра над акваторией Азовского моря. Прохождение циклона сопровождалось штормовым нагоном и затоплением обширных территорий дельты Дона и восточного побережья Азовского моря [1, 9, 10]. Экстремально опасное явление 24 сентября 2014 г. было вызвано мощным циклоническим вихрем, образовавшимся в районе Крыма в глубокой тропосферной ложбине, ориентированной из Арктики на юг Европы. Формированию вихря способствовала большая термодинамическая неустойчивость атмосферы, возникшая в результате столкновения холодного воздуха, поступившего с севера и из средней тропосферы, и теплого влажного воздуха, следующего из акватории Черного моря. При перемещении циклона в ночь на 24 сентября произошла интенсификация вихря, что сопровождалось ураганым ветром, интенсивными осадками и ветровым волнением, а также штормовым нагоном на восточном побережье Азовского моря и в Таганрогском заливе.

В вычислительных экспериментах, воспроизводящих ОЯ в качестве атмосферного форсинга, использованы поля приводного ветра и атмосферного давления, полученные по данным региональной атмосферной модели *SKIRON*. Эта модель, базирующаяся на *ETA* модели, первоначально разработанной в университете Белграда [24], в дальнейшем создавалась и развивалась на основе *NCEP* в Афинском университете группой атмосферного моделирования и прогноза погоды (*Atmospheric Modeling and Weather Forecasting Group*) [17]. Результаты прогноза по модели *SKIRON*, используемые в данной

работе, были получены Морским гидрофизическим институтом в качестве полноправного участника проекта *MFSTEP*. Данный вариант модели представляет детальный 72-часовой прогноз метеорологических параметров для Азово-Черноморского и Средиземноморского бассейнов. Первые 48 часов вывод данных осуществляется через 2 ч, далее значения выводятся через 6 ч. Расчет параметров производится на сетке с шагом $0,1^\circ$ по осям x и y . Всего выводится 16 различных параметров, в том числе данные по атмосферному давлению и скорости приводного ветра. Эти данные интерполированы на расчетную сетку бассейна Азовского моря с указанным горизонтальным разрешением и использованы при задании граничных условий (5) с использованием уравнения (6).

На основании анализа метеорологической информации по данным *SKIRON* сделаны выводы о характере ветрового режима над акваторией Азовского моря во время экстремальных событий 23 – 24 марта 2013 г. и 24 сентября 2014 г., а также в течение месяца, предшествующего им. Средненная по пространству скорость ветра при развитии экстремальных «низовок» определялась по формуле

$$|\overline{\mathbf{W}}(t)| = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |\mathbf{W}_{\text{SKIRON}_k}(t)|, \quad (9)$$

где N – число узлов расчетной сетки; $|\mathbf{W}_{\text{SKIRON}_k}(t)| = \sqrt{W_{\text{SKIRON}_x}^2(t)_k + W_{\text{SKIRON}_y}^2(t)_k}$ – модуль скорости ветра в ее k -ом узле. Рассчитанная таким образом средняя по акватории моря скорость ветра (10,2 м/с) находится между ее наибольшим (2,7 м/с) и наименьшим (17,6 м/с) значениями в марте 2013 г., а для сентября 2014 г. составляет 13,6 м/с (между наименьшим и наибольшим значениями, равными соответственно 2,5 и 24,7 м/с), что в 1,3 и 1,8 раза превышает ее среднегодовую климатическую величину [6]. На рис.1 представлены графики эволюции осредненной скорости ветра.

Отметим, что в марте 2013 г. (рис. 1, а) сравнимое с максимальным, но кратковременное (в течение 3 ч) увеличение средней скорости ветра от 16 до 17,2 м/с (14 марта 2013 г.) не явилось причиной экстремальных колебаний уровня моря. Длительное же действие ветра с почти той же скоростью (от 16 до 17,6 м/с) в течение 12 ч привело к ОЯ 23 – 24 марта 2013 г.

Как следует из рис. 1, б, в целом на протяжении всего месяца (сентябрь 2014 г.) над Азовским морем преобладали умеренные ветры. Увеличение средней скорости ветра до 24,7 м/с произошло при прохождении циклона 24 сентября 2014 г. В этом случае действие ветра со скоростью выше 16 м/с в течение 22 ч вызвало экстремальные сгонно-нагонные явления на побережье Азовского моря. Таким образом, действие ветра штормовой скорости длительностью менее 3 ч не приводит к возникновению штормовых нагонов.

По данным наблюдений на МГ Таганрог и Темрюк, средняя скорость ветра 23 – 24.03.2013 юго-западного направления составила 9 – 13 м/с при максимальных значениях 21 – 22 м/с. На МГ Ейск и Должанская максимальные значения скорости ветра составили соответственно 21 и 19 м/с при средних значениях 9 – 10 м/с. На западном и южном побережьях Азовского моря (Геническ, Мысовое) средняя скорость ветра запад-

ного, северо-западного направлений составила 16 – 22 м/с при максимальных значениях 23 – 28 м/с. Следует отметить, что данные натуральных наблюдений близки к расчетным величинам *SKIRON* или превышают их.

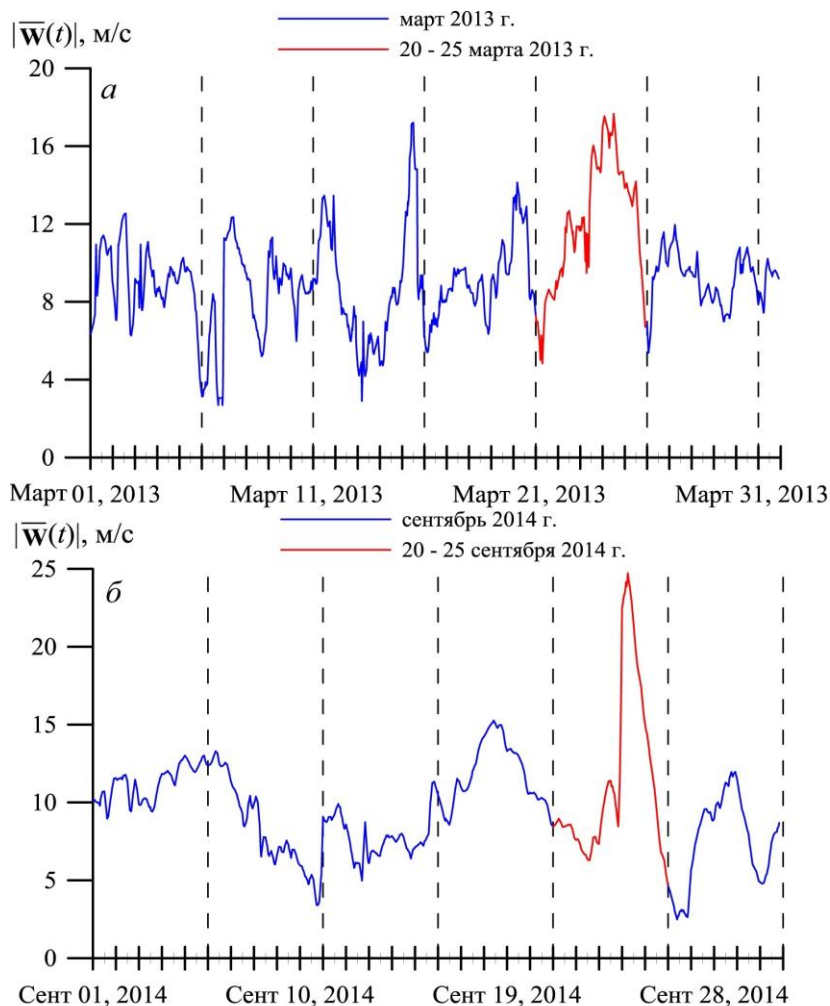


Рис. 1. Средняя скорость ветра по акватории Азовского моря в течение штормовых месяцев: 1 – 31 марта 2013 г. (а); 1 – 30 сентября 2014 г. (б). Вертикальные пунктирные линии проведены с дискретностью 5 сут

При средней скорости ветра по акватории 11 – 15 м/с ее максимальные значения на МГ в Таганроге, Должанской и Темрюке достигали 33 – 37 м/с. Такие экстремальные значения скорости ветра на этих станциях были зафиксированы впервые за весь исторический период наблюдений. В результате действия ураганного ветра на побережье Таганрогского залива были повреждены линии электропередач, поломаны деревья, повреждена кровля домов, повалены опоры ЛЭП, в портах Ейск и Таганрог повалены вышки и высотный кран.

Пространственное распределение полей приводного ветра над Азовским морем, полученных по данным модели (W_{SKIRON}) во время штормовых ситуаций в марте 2013 г. и сентябре 2014 г., представлены на рис. 2. Заметно, что в рассматриваемых ситуациях наблюдалась значительная пространственная неоднородность полей ветра над морем как по скорости, так и по направлению.

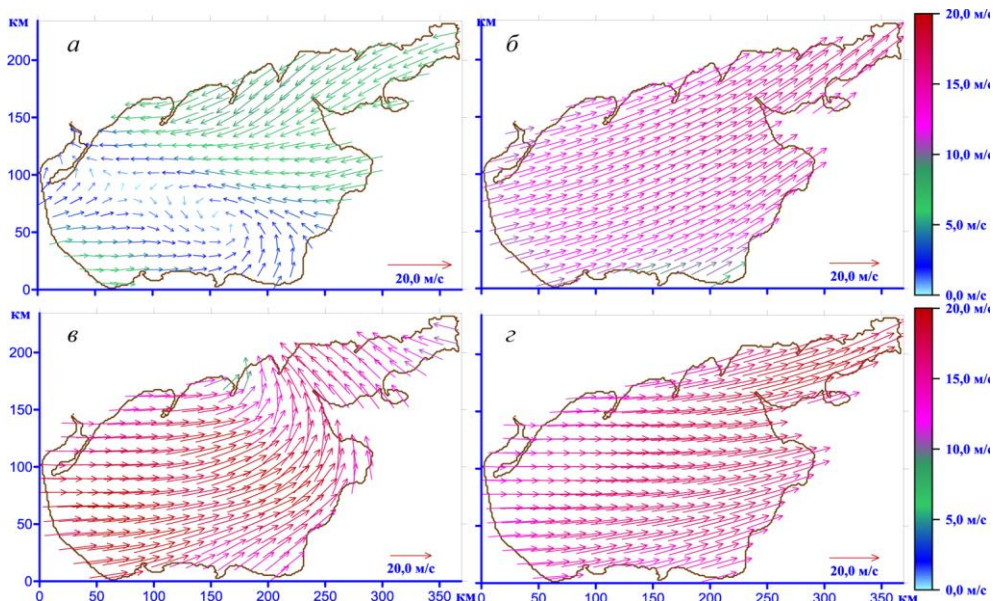


Рис. 2. Поля приводного ветра во время шторма 23-24 марта 2013 г.: 23 марта 12:00 (а); 24 марта 20:00 (б); во время шторма 24 сентября 2014 г.: в 12:00 (в); 20:00 (з)

В случае ОЯ 2013 г., по данным модели *SKIRON* (рис. 2, а), усиление ветра до 10 м/с произошло в 12:00 23 марта 2013 г. при прохождении циклона через центральную часть моря, при этом ветер изменил свое направление с северо-восточного на юго-западное. Следующий максимум скорости пришелся на середину суток 24 марта 2013 г. На рис. 2, б видно перемещение с северо-востока Чёрного моря обширного циклонического образования с высокой (до 20 м/с) скоростью ветра, направление которого неоднородно в различных частях Азовского моря. Максимальное развитие шторма произошло на следующие сутки (24 марта 2013 г.), в течение которых ветер не менял направления и действовал вдоль оси Таганрогского залива (юго-юго-западное направление (рис. 2, в)), а максимальная скорость ветра достигала 25 м/с.

На рис. 2, д, е показаны направления полей ветра во время шторма 24 сентября 2014 г. по данным реанализа *SKIRON*. В течение суток, как и в случае шторма 2013 г., наблюдался устойчивый ветер юго-юго-западного направления (вдоль оси Таганрогского залива) со скоростью до 28 м/с. Полученные поля ветра, по данным *SKIRON*, в целом неплохо согласуются с данными натурных наблюдений на прибрежных МГ и подтверждают тот факт, что наибольшее усиление скорости ветра произошло над акваторией Таганрогского и Темрюкского заливов.

Исследовано изменение приземного атмосферного давления, резкое падение которого при одновременном воздействии на морскую поверхность сильного ветра приводит к значительным подъемам уровня моря. Временной ход осредненных по акватории Азовского моря значений атмосферного давления ($\bar{P}(t)$), рассчитанных по формуле, аналогичной (9), в течение штормовых ситуаций 2013 и 2014 гг., приведен на рис. 3.

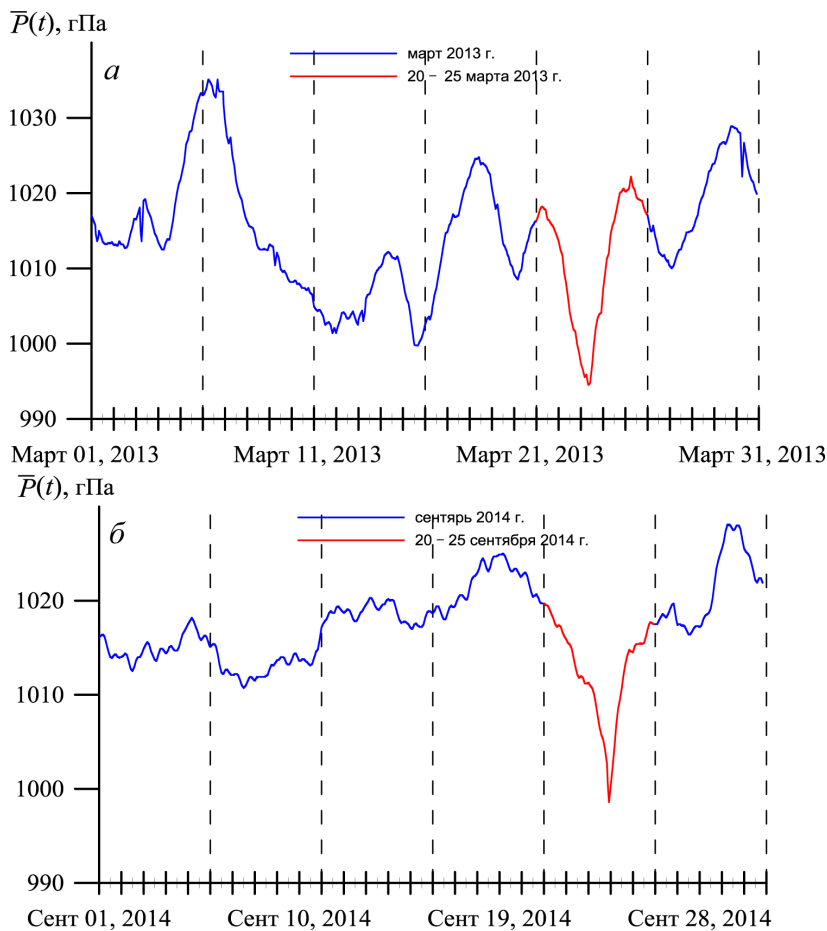


Рис. 3. Атмосферное давление, по данным модели *SKIRON*, осредненное по акватории Азовского моря в марте 2013 г. (а) и сентябре 2014 г. (б). Вертикальные пунктирные линии проведены с дискретностью 5 сут

Как следует из анализа кривых, отмеченных на рис. 3 красным цветом (в период с 20 по 25 число рассматриваемых временных интервалов), штормовые ситуации сопровождалось значительным падением атмосферного давления. Видно, что атмосферное давление марта 2013 г. изменялось от минимального (995 гПа) до максимального значения 1035 гПа. В течение сентября 2014 г. перепад атмосферного давления был незначительным, но резкое понижение атмосферного давления до 998 гПа выделяется на графике (рис. 3, б) при прохождении циклона 24 сентября.

Анализ результатов численных экспериментов и данных наблюдений

С целью описания и изучения особенностей циркуляции вод Азовского моря при экстремальных приазовских явлениях проведены исследования на основании анализа данных наблюдений и результатов моделирования. Прогнозирование последствий повторяющихся ураганных штормов (23 – 24 марта 2013 г. и 24 сентября 2014 г.) и выявление причин, которые их обуславливают, в рамках численного моделирования основано на определении критических параметров атмосферного воздействия.

1. Сравнительный анализ *максимальных значений скорости течений* ($|U|_{\max}$) в период штормов марта 2013 г. и сентября 2014 г. выполнен на основании анализа результатов численных расчетов, представленных в табл. 1. Здесь указаны горизонты и координаты точек, в которых были зафиксированы наибольшие значения скорости в течение всего расчетного периода t ($0 \leq t \leq 744$ и $0 \leq t \leq 720$ ч), а также время достижения максимальных значений скорости.

Т а б л и ц а 1

Максимальные значения скорости течений ($|U|_{\max}$) на различных горизонтах Азовского моря, время их достижения (t_{\max}) и соответствующие им координаты (x_{\max} , y_{\max}) в периоды экстремальных штормов

Расчетный период	Горизонт, м	$ U _{\max}$, м/с	x_{\max} , км	y_{\max} , км	t_{\max} , ч
1 – 31 марта 2013 г.	1	2,12	230,23	42,85	24 марта 17:00 мск.
	3	1,37	240,32	168,72	24 марта 17:30 мск
	5	1,33	150,37	41,511	24 марта 23:00 мск
	10	0,59	235,34	173,00	24 марта 05:00 мск
1 – 30 сентября 2014 г.	1	2,45	221,52	100,43	24 сентября 05:00 мск
	3	1,57	220,18	100,43	24 сентября 17:00 мск
	5	0,89	285,96	194,17	24 сентября 17:00 мск
	10	0,44	89,951	14,73	24 сентября 19:00 мск

Анализ максимумов скорости течений (табл. 1), вызванных действием штормовых ветров при значительном падении атмосферного давления, показал, что в поверхностном слое значения $|U|_{\max}$ превышали 2 м/с (2,12 м/с в марте 2013 г. и 2,45 м/с в сентябре 2014 г.). Скорость течений в придонном слое хотя и была несколько меньше (0,59 и 0,44 м/с), но достигала величин, способных вызвать интенсивные литодинамические процессы в прибрежной зоне моря. Экстремумы скорости поверхностных течений наблюдались в Таганрогском заливе и в районе Должанского пролива. Максимальная скорость течений в придонном слое отмечалась вблизи Таганрогского залива и в районе Геническа.

На рис. 4 и 5 представлены пространственные распределения скорости течений в Азовском море на различных горизонтах в моменты времени, соответствующие экстремальным значениям поверхностной скорости течений, приведенным в табл. 1.

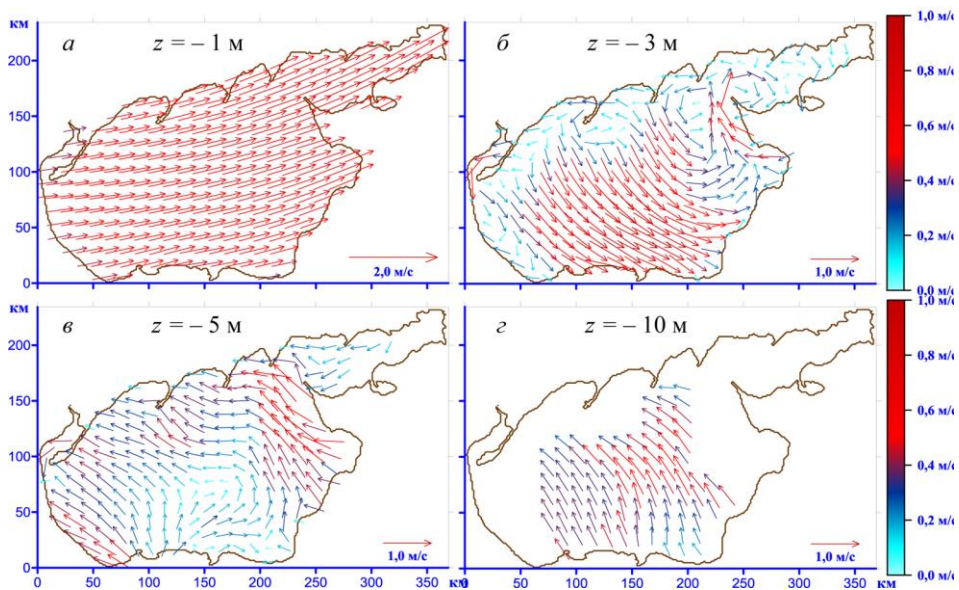


Рис. 4. Поля течений во время шторма 24 марта 2013 г. на горизонтах 1 м (*а*), 3 м (*б*), 5 м (*в*) и 8 м (*г*)

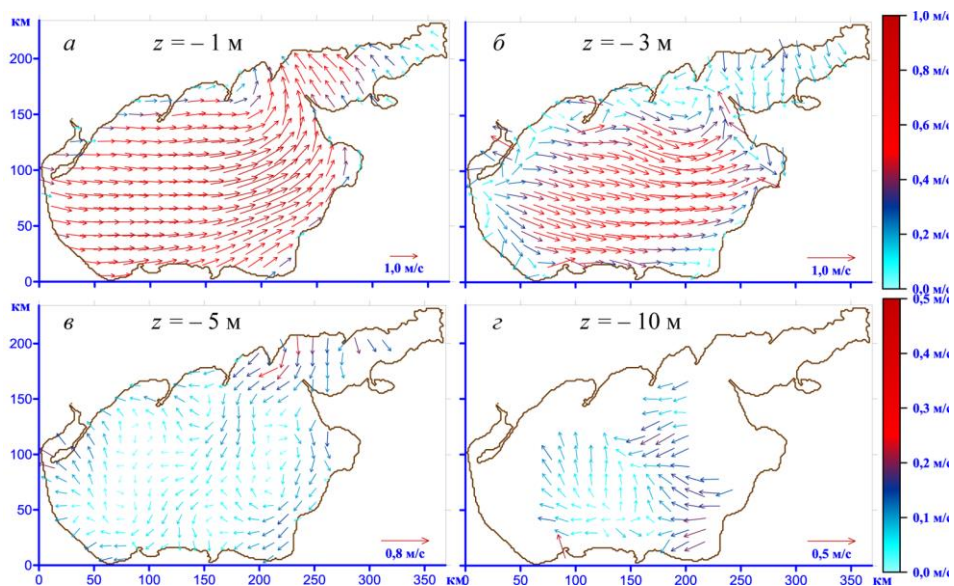


Рис. 5. Поля течений во время шторма 24 сентября 2014 г. на горизонтах 1 м (*а*), 3 м (*б*), 5 м (*в*) и 8 м (*г*)

В период действия по всей акватории моря штормового устойчивого юго-западного ветра (рис. 2, *г*) направление течений в поверхностном слое совпадает с направлением ветра (рис. 4, *а*). Начиная с глубины 3 м (рис. 4, *б*) течения отклоняются на 90° и более от направления ветра, прослеживаются вихри разных знаков на входе в Таганрогский залив (в Должанском проливе).

В центральной части акватории в слое 5 м формируется хорошо выраженное компенсационное течение, направленное против ветра (рис. 4, в), на глубине 8 м наблюдаются течения, которые отклоняются на 135° и более от направления течений в поверхностном слое моря и направления действующего ветра (рис. 4, г). Как следует из рис. 4, течения в поверхностных (1 – 3 м) и придонных слоях (5 – 8 м) направлены противоположно.

2. Перейдем теперь к анализу *экстремальных сгонно-нагонных колебаний уровня* Азовского моря и их последствий. По данным Росгидромета и МЧС, наводнение 14 марта 2013 г. (ОЯ 23 – 24 марта 2013 г.) охватило территорию дельты р. Дон (площадь 538 км²) и восточное побережье Таганрогского залива. В зону подтопления попал 21 населенный пункт в Азовском, Неклиновском и Мясниковском районах Ростовской области, были подтоплены пригороды Ростова-на-Дону, Таганрога и Азова. Общий ущерб населению и административным объектам составил около 76 млн. руб. Максимальное повышение уровня 24 марта достигло отметок на МГ Тагарог – 7,51 м, Очаковской косе – 7,41 м, Азове – 7,40 м, Ейске – 6,10 м и Приморско-Ахтарске – 6,04 м. При нагоне превышение максимального уровня над среднемноголетним значением за март составило в Кагальнике 3,40 м, Таганроге – 2,84 м, Ейске – 1,40 м и Приморско-Ахтарске – 1,30 м. В Геническе наблюдался сгон с спадом уровня 0,81 м.

Во время штормового нагона 24 сентября 2014 г. в Таганроге, Ейске и Азове были зафиксированы абсолютные максимумы уровня (соответственно 7,96; 7,81 и 6,56 м) за все время наблюдений. Превышение максимального уровня над среднемноголетним значением за сентябрь в Кагальнике достигло 3,60 м, Таганроге – 3,35 м, Ейске – 1,93 м и Приморско-Ахтарске – 1,85 м. По сообщениям МЧС России в Краснодарском крае, в зоне подтопления находилось пять населенных пунктов (Садки, Морозовский, Должанская, Ясенская переправа, Ейск). В Ростовской области в зону подтопления попали 26 населенных пунктов (г. Азов, г. Таганрог, Неклиновский, Мясниковский и Азовский районы), было подтоплено 3091 домов, проводилась эвакуация населения (971 человек).

Данные наблюдений сравниваются с полученными в результате моделирования значениями нагонов и сгонов, вызванных действием ураганных штормов, на береговых станциях Азовского моря. В табл. 2 приведены значения наибольших нагонов и сгонов во время штормов 2013 и 2014 гг., полученные по данным наблюдений (с учетом средних многолетних значений) и численным расчетам, в зависимости от скорости и направления ветра на береговых станциях. Данные о ветре представлены на основании данных Росгидромета и МЧС. Значения, приведенные со знаком минус, соответствуют сгону.

Из приведенных данных видно, что под действием ветра со скоростью от 17 до 32 м/с наибольшие отклонения (1,81 и 1,36 м) в Таганроге возникают при ЗЮЗ и ЮЮЗ направлениях ветра. Максимальные по величине сгоны, по расчетным данным, наблюдаются в Геническе и Мысовом (0,99 и 0,49 м соответственно). Следует отметить, что, несмотря на большую интенсивность ветра по данным *SKIRON*, величины нагонов и сгонов, вызванных штормом 23 – 24 марта 2013 г., превышали экстремальные колебания уровня во время ОЯ 24 сентября 2014 г. Такое различие объясняется большей продолжительностью действия штормового ветра (см. рис. 1).

Таблица 2

Зависимость экстремальных отклонений уровня (м) Азовского моря от направления и скорости действующего ветра в период штормов 2013, 2014 гг., по данным береговой сети гидрометеорологических станций и результатам моделирования

Береговые станции	23 – 24 марта 2013 г.				24 сентября 2014 г.			
	Скорость ветра, м/с	Направление ветра, град	Отклонения уровня моря		Скорость ветра, м/с	Направление ветра, град	Отклонения уровня моря	
			$\zeta_{\text{набл}}$, м	$\zeta_{\text{мод}}$, м			$\zeta_{\text{набл}}$, м	$\zeta_{\text{мод}}$, м
Геничск	28	СЗ, ССЗ (315, 292)	-0,94	-0,99	25	ЮЗ, З (250, 270)	–	-0,87
Бердянск	19	ЮЮЗ, З (200, 270)	0,39	0,28	24	ЮЗ, З (250, 270)	–	-0,52
Маргуполь	19	З, ССЗ (270, 292)	0,95	0,82	25	ЮЮЗ, ЮЗ (225, 250)	–	0,88
Таганрог	22	ЗЮЗ, ЮЮЗ (200)	1,58	1,81	32	ЮЗ (205, 225)	–	1,36
Ейск	21	ЮЮЗ, З (200, 270)	–	0,96	27	ЮЗ, ССЗ (225, 290)	1,12	1,06
П.-Ахтарск	17	З (270)	0,61	0,79	24	ЮЮЗ, ЮЗ (225, 250)	1,20	1,11
Темрюк	22	ЮЮЗ, З (200, 270)	0,32	0,31	30	ЮЗ, З (250, 270)	0,45	0,51
Опасное	20	З, ССЗ (270, 292)	-0,19	-0,27	28	ЮЮЗ, З (200, 270)	–	-0,47
Мысовое	28	З, ССЗ (270, 292)	-0,61	-0,49	25	ЮЗ (225, 250)	–	-0,53

Из анализа карт изолиний уровня моря следует, что при развитии шторма (рис. 6, *a*) область понижения уровня вдоль западного побережья повторяет геометрию антициклонического вихря поля ветра (см. рис. 2, *a*), имеет эллиптическую форму и смещается от центра.

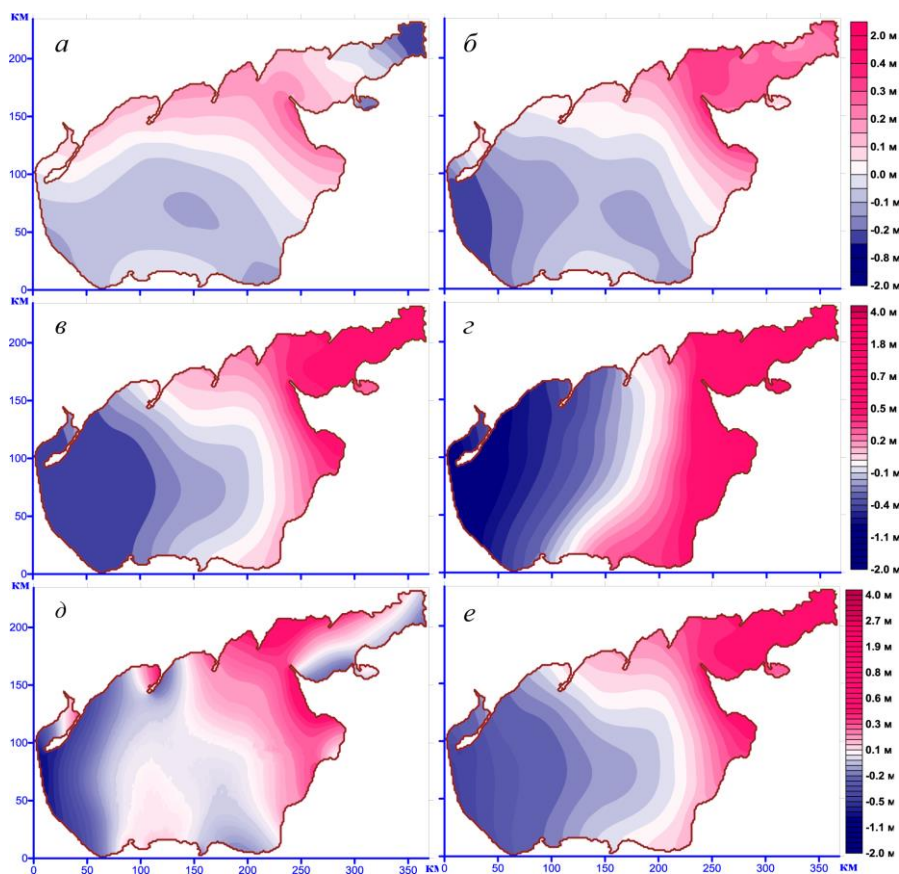


Рис. 6. Поля уровня Азовского моря в те же моменты времени, что и на рис. 2

Область повышенных значений (до 0,7 м) уровня сосредоточена у входа в Таганрогский залив (у Должанского пролива). Спустя 8 ч после начала шторма (рис. 6, *б*) изолиния нулевых амплитуд уровня смещается от центра к востоку. Область нагона перемещается к дельте Дона, а области существенных понижений уровня смещаются к северо-западному району моря (вблизи Геническа). Последующее развитие ОЯ и пик шторма в марте 2013 г. (рис. 6, *в*, *з*) приводят к разделению акватории на отдельные области повышения и понижения уровня в западной и восточной частях бассейна, разделенных линией нулевых амплитуд, ориентированной в меридиональном направлении. Видно, что наиболее сильному воздействию нагонных процессов подвержен Таганрогский залив. Здесь максимальные отклонения уровня моря достигают 4 м.

На рис. 6, *д*, *e* приведены изолинии уровня Азовского моря при ОЯ в сентябре 2014 г. Заметно (рис. 6, *д*), что сложные колебания уровня формируются в Таганрогском заливе. Здесь, в достаточно мелководном (средняя глубина

залива составляет 9 м) полузамкнутом бассейне, происходят разные по знаку колебания уровня с узловой линией, проходящей по его центру.

Наибольший подъем уровня имеет место при входе в эстуарий. Под действием юго-западного ветра со скоростью 25 м/с (рис. 6, *e*) поля отклонения уровня моря приобретают общие черты с картами уровня шторма 2013 г. (рис. 6, *z*) с разделением акватории на области повышений и понижений (в восточной и западной частях моря).

3. Выполнено сравнение значений сгонов и нагонов, полученных в результате моделирования, с данными натурных измерений за тот же период, приведенными в таблицах ежечасных значений высоты уровня моря государственной гидрометеорологической службой. Для этой цели привлечены данные наблюдений за уровнем на береговых гидрометеорологических станциях и постах Азовского моря и Таганрогского залива в марте 2013 г. и сентябре 2014 г. Наблюдения представляют собой измерения уровня с помощью самописцев на МГ Таганрог, Темрюк, Ейск и Приморско-Ахтарск, а также измерения с 6-часовой дискретностью по футштоку в других пунктах побережья Азовского бассейна.

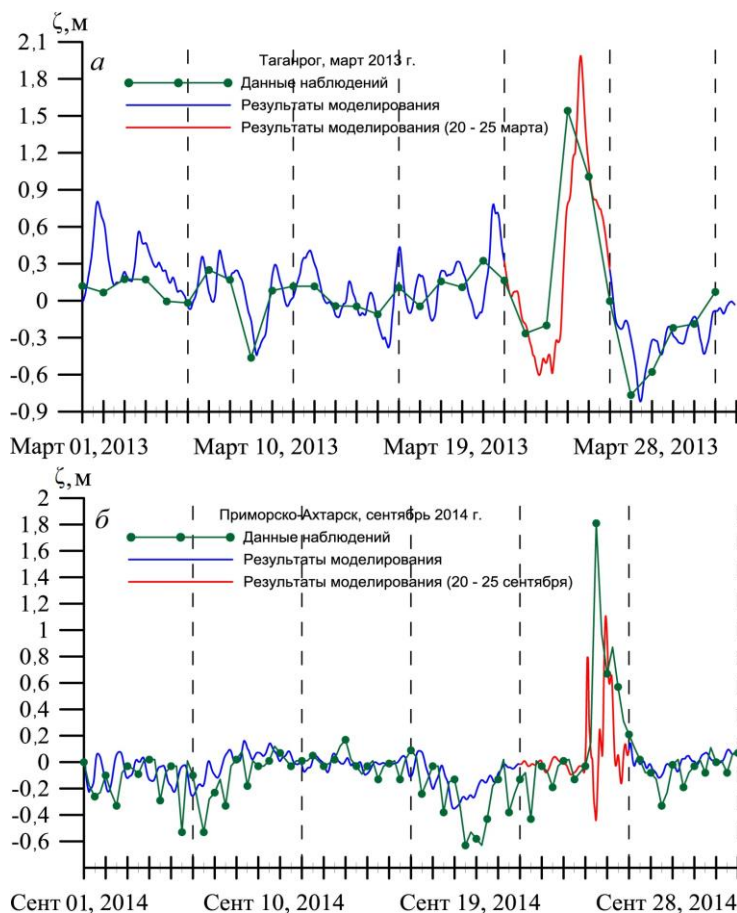


Рис. 7. Отклонения уровня моря (м) по данным прямых измерений и результатам моделирования: на ст. Таганрог в марте 2013 г. (*a*); на ст. Приморско-Ахтарск в сентябре 2014 г. (*б*). Вертикальные пунктирные линии проведены с дискретностью 5 сут

Графики хода уровня моря в течение марта 2013 г. на ст. Таганрог и Приморско-Ахтарск, полученные по данным наблюдений и в результате моделирования, приведены на рис. 7. Анализ графиков уровня свидетельствует о сравнительно хорошем соответствии трендов колебаний. Некоторые отличия, например по значениям максимумов сгонов и нагонов, объясняются определенными погрешностями при измерениях и вычислениях. Так, в Таганроге (2013 г.) рассчитанный максимум нагона на 14 % больше, чем по данным наблюдений, а в Приморско-Ахтарске (2014 г.) максимальное значение нагона на 8 % меньше измеренного.

Заключение

На основании анализа данных наблюдений и результатов моделирования выполнено исследование особенностей циркуляции вод Азовского моря, возникающей при экстремальных приазовских явлениях. Исследование повторяемости сгонов и нагонов по районам Азовского моря выявило, что наиболее часто подвержены катастрофическим нагонам (48 % всех случаев) и сгонам (60 %) восточное побережье моря и Таганрогский залив. Данные расчетов показали, что во время ОЯ 2013 – 2014 гг. вся акватория Азовского моря в результате действия штормового ветра условно делится на отдельные области повышений и понижений уровня в западной и восточной частях бассейна, разделенных линией нулевых амплитуд, ориентированной в меридиональном направлении. Наиболее сильному воздействию нагонных процессов подвержен Таганрогский залив, где максимальные отклонения уровня моря, по данным численных расчетов, составляют 1,8 – 2,2 м.

Полученные поля ветра, по данным региональной атмосферной модели *SKIRON*, в целом неплохо согласуются с данными натуральных наблюдений на прибрежных МГ и подтверждают тот факт, что наибольшее усиление скорости ветра во время ОЯ марта 2013 г. и сентября 2014 г. произошло над акваторией Таганрогского и Темрюкского заливов.

Анализ максимальных значений скорости течений, вызванных действием штормовых ветров во время этих ОЯ, показал, что в поверхностном слое максимальные значения скорости течений превышали 2 м/с (2,12 м/с в марте 2013 г. и 2,45 м/с в сентябре 2014 г.). Скорость течений в придонном слое хотя и была несколько меньше (0,59 и 0,44 м/с), но достигала значений, способных вызвать интенсивные литодинамические процессы в прибрежной зоне моря. Экстремумы скорости поверхностных течений наблюдались в Таганрогском заливе и в районе Должанского пролива. Максимальные значения скорости течений в придонном слое отмечались вблизи Таганрогского залива и в районе Геническа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Матишов Г.Г., Матишов, Д.Г.* Современные природные и социальные риски в Азово-Черноморском регионе // Вестник РАН. – 2013. – 83, № 12. – С. 1059 – 1067. – doi:10.7868/s0869587313100071
2. *Доценко С.Ф., Иванов В.А.* Природные катастрофы Азово-Черноморского региона. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010. – 174 с.

3. Шнюков Е.Ф., Митин Л.И., Цемко В.П. Катастрофы в Черном море. – Киев: Манускрипт, 1994. – 269 с.
4. Михайлов В.Н., Магрицкий Д.В., Иванов А.А. и др. Гидрология дельты и устьевого взморья Кубани / под ред. В.Н. Михайлова, Д.В. Магрицкого, А.А. Иванова. – М.: ГЕОС, 2010. – 728 с.
5. Фомин В.В., Дьяков Н.Н., Тимошенко Т.Ю. и др. Атлас волнения, течений и уровня Азовского моря. – Киев: Феникс, 2012. – 239 с.
6. Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. Том 3. Азовское море. – Л.: Гидрометеоиздат, 1986. – 218 с.
7. Дьяков Н.Н., Фомин В.В. Синоптические условия возникновения аномальных колебаний уровня Азовского моря // Наукові праці УкрНДГІ. – 2002. – Вып. 250. – 10 с. – URL: http://uhmi.org.ua/pub/np/250/28_Djakov.pdf (дата обращения 30.01.2017).
8. Матишов Г.Г., Чикин А.Л., Бердников С.В. и др. Экстремальное наводнение в дельте Дона (23–24 марта 2013 г.) и факторы, его определяющие // Доклады Академии наук. – 2014. – 455, № 3. – С. 342 – 345. – doi:10.7868/S0869565214090229
9. Матишов Г.Г., Бердников С.В., Беспалова Л.А. и др. Современные опасные экзогенные процессы в береговой зоне Азовского моря. – Ростов-на-Дону: Южный федеральный университет, 2015. – 323 с.
10. Матишов Г.Г., Бердников С.В. Экстремальное затопление дельты Дона весной 2013 г. // Изв. РАН. Сер. географическая. – 2015. – № 1. – С. 111 – 118. – <http://dx.doi.org/10.15356/0373-2444-2015-1-111-118>
11. Фомин В.В., Лазоренко Д.И., Алексеев Д.В. и др. Штормовые нагоны в Таганрогском заливе и затопление дельты Дона // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. – 2015. – № 1. – С. 74 – 82.
12. Иванов В.А., Черкесов Л.В., Шульга Т.Я. Динамические процессы и их влияние на распространение и трансформацию загрязняющих веществ в ограниченных морских бассейнах. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010. – 178 с.
13. Ivanov V.A., Cherkesov L.V., Shul'ga T.Ya. Investigation of effects of spatially and temporally variable wind on currents, surges, and admixture spread in the Sea of Azov // Rus. Meteorol. Hydrol. – 2012. – 37, Iss. 8. – P. 553 – 559. – doi:10.3103/S1068373912080079
14. Ivanov V.A., Cherkesov L.V., Shu'l'ga T.Ya. Dynamic processes and their influence on the transformation of the passive admixture in the Sea of Azov // Oceanology. – 2014. – 54, Iss. 4. – P. 426 – 434. – doi:10.1134/S0001437014030023
15. Blumberg A.F., Mellor G.L. A description of a three dimensional coastal ocean circulation model // Three-Dimensional Coastal Ocean Models / Ed. N. Heaps. – Washington, D.C.: American Geophysical Union, 1987. – 4. – P. 1 – 16.
16. Фомин В.В. Численная модель циркуляции вод Азовского моря // Научные труды УкрНИГМИ. – 2002. – Вып. 249. – С. 246 – 255.
17. Kallos G., Nickovic S., Jovic D. et al. The Regional Weather Forecasting System SKIRON and its capability for forecasting dust uptake and transport // Proceedings of the WMO conference on dust storms, Damascus, 1-6 Nov. 1997. – Damascus, 1997. – P. 9.
18. Mellor G.L., Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // Rev. Geophys. – 1982. – 20, Iss. 4. – P. 851 – 875. – doi:10.1029/RG020i004p00851
19. Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations. I. The basic experiment // Mon. Wea. Rev. – 1963. – 91, No. 3. – P. 99 – 164. – doi:10.1175/1520-0493(1963)091<0099:GCEWTP>2.3.CO;2

20. Wannawong W., Wongwises U., Vongvisessomjai S. Mathematical modeling of storm surge in three dimensional primitive equations // *Int. J. Math., Comput., Phys., Electr. Comput. Engineer.* – 2011. – 5, № 6. – P. 797 – 806. – URL: <http://waset.org/publications/6330/mathematical-modeling-of-storm-surge-in-three-dimensional-primitive-equations> (дата обращения 30.01.2017).
21. Large W.G., Pond S. Open ocean momentum flux measurements in moderate to strong winds // *J. Phys. Oceanogr.* – 1981. – 11, No. 3. – P. 324 – 336. – doi:10.1175/1520-0485(1981)011<0324:OOMFMI>2.0.CO;2
22. Grant W.D., Madsen O.S. Combined wave and current interaction with a rough bottom // *J. Geophys. Res.* – 1979. – 84, Iss. C4. – P. 1797 – 1808. – doi:10.1029/JC084iC04p01797
23. Courant R., Friedrichs K.O., Lewy H. On the partial difference equations of mathematical physics // *IBM J. Res. Develop.* – 1967. – 11, Iss. 2. – P. 215 – 234. – doi:10.1147/rd.112.0215
24. Janjić Z.I. Nonlinear advection schemes and energy cascade on semi-staggered grids // *Mon. Wea. Rev.* – 1984. – 112, No. 6. – P. 1234 – 1245. – doi:10.1175/1520-0493(1984)112<1234:NASAEC>2.0.CO;2

Numerical study of storm surge processes and currents of the Sea of Azov during a period of extreme winds

L. V. Cherkesov¹, T. Ya. Shul'ga^{1,*}, N. N. Dyakov², R. R. Stanichnaya¹

¹*Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russian Federation*
²*Sevastopol Branch of the N.N. Zubov State Oceanographic Institute, Sevastopol, Russian Federation*
**e-mail: shulgaty@mail.ru*

Magnitudes of storm surge fluctuations of the Azov Sea level occurring in this region during extreme winds and called "chernomorka" (reverse surface wind) are studied. These phenomena constitute a reason of floods in the coastal regions of the sea and the Taganrog Bay. Having been analyzed, the simulation results and the observation data of the sea level regime show their good compliance for the periods of strong storm cyclones moving from the northeast of the Black Sea. Interrelation between the parameters of the eastern and western storm winds observed in the Sea of Azov during the strong storms in 2013 – 2014, and the amplitudes both of the currents' velocities and the sea level fluctuations is defined. Hydrodynamic simulation is performed using the three-dimensional nonlinear Princeton Ocean Model (POM); at that real atmospheric forcing SKIRON corresponding to extreme storms is preset. Study of the storm surge frequency in different regions of the Azov Sea reveals the fact that the regions both of the sea eastern coast and the Taganrog Bay are exposed to catastrophic surges. Analysis of the currents induced by the storm winds demonstrates that in the sea surface layer the currents' maximum velocity exceeds 2 m/s (2.12 m/s in March, 2013 and 2.45 m/s in September, 2014). At the same time, the currents' velocities in the sea bottom layer achieving 0.59 and 0.44 m/s can cause intense lithodynamic processes in the coastal zone. The Taganrog Bay is subjected to the most intense forcing of the surge processes at the extreme winds over the Sea of Azov; at that the maximum sea level deviations here mount to 1.8 m.

Keywords: Sea of Azov, Taganrog Bay, sea level, extreme winds over the Sea of Azov, currents, surge phenomena processes, numerical simulation, storm cyclones.