

**О комплексных исследованиях
опасных природных явлений
в Азово-Черноморском бассейне**

© 2017 В.Н. Белокопытов*, В.В. Фомин, А.В. Ингерев

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

**E-mail: v.belokopytov@gmail.com*

Поступила в редакцию 23.01.2017 г.

Представлены некоторые результаты исследований опасных явлений и потенциальных природных катастроф в Азово-Черноморском бассейне. Снижение штормовой активности в Черном море, происходившее в конце XX в., было вызвано уменьшением общего количества и интенсивности проходящих циклонов. В соответствии с многолетними тенденциями атмосферных индексов Североатлантического и Восточноатлантического колебаний следует ожидать в будущем увеличения количества штормов в Черном море. Эффективными генераторами штормовых нагонов в Азовском море являются атмосферные циклоны, при уменьшении скорости перемещения которых происходит интенсификация штормовых нагонов в Таганрогском заливе. При уменьшении расхода р. Дон ниже порогового значения ветровой нагон оказывает блокирующее воздействие и способствует подъему уровня воды в рукавах дельты. Наибольшую потенциальную опасность для северного побережья Черного моря представляют очаги цунами, расположенные в Крымско-Кавказской сейсмоактивной зоне. Цунамиопасность северо-западной части моря существенно ниже.

Ключевые слова: штормовые ветры, сгонно-нагонные явления, цунами, численное моделирование, Черное море, Азовское море

DOI: 10.22449/0233-7584-2017-3-32-48

Введение. Одним из направлений научной деятельности, в котором плодотворно работал С.Ф. Доценко, было изучение природных катастроф в Азово-Черноморском бассейне. Долгое время он руководил проектами комплексных исследований стихийных явлений различной природы. В ходе этих исследований применялся широкий набор методов – от анализа данных натурных наблюдений до математического моделирования. Среди различных типов природных катастроф – геофизических, геологических, метеорологических, гидрологических, биологических, космических и др. – по частоте возникновения лидируют катастрофы гидрометеорологической природы. С учетом этого факта и специфики ФГБУН «Морской гидрофизический институт РАН» основное внимание при изучении природных катастроф уделялось экстремальным явлениям, возникающим в морской среде. Круг изучаемых вопросов [1] был достаточно широк: штормовые ветры и волны [2, 3], сгонно-нагонные колебания [4], цунами [5], сейши [6], тягун в портах, волны-убийцы [7], риск сероводородного заражения и др. Целью этих исследований было не дублировать регулярно выполняющиеся оценки опасных гидрометеорологических явлений, основанные

на традиционных методах анализа данных гидрометеорологической сети, а расширить их и дополнить. Некоторые результаты работы в данном направлении, которые неоднократно и подробно обсуждались вместе с С.Ф. Доценко, кратко изложены далее.

Штормовые ветры над открытой частью Черного моря. Характеристики штормовых ветров черноморского побережья достаточно хорошо изучены по данным береговых гидрометеорологических станций северной части моря [2, 8]. Оценки характеристик полей ветра над открытой частью моря гораздо более неопределенны по причине отсутствия регулярных прямых измерений. Перспективным видом наблюдений является спутниковая скаттерометрия, но длина рядов измерений с повышенной точностью пока недостаточна для климатических оценок. Поэтому основным источником информации для анализа ветра над морем служат глобальные и региональные массивы реанализа атмосферных полей.

Несмотря на количественные различия, картины пространственного распределения повторяемости штормовых ветров (> 15 м/с) по акватории Черного моря, полученные по различным источникам, в качественном плане имеют сходные черты (рис. 1). В западной и северо-восточной частях моря штормовые ситуации возникают наиболее часто, юго-восточная часть наименее подвержена штормам.

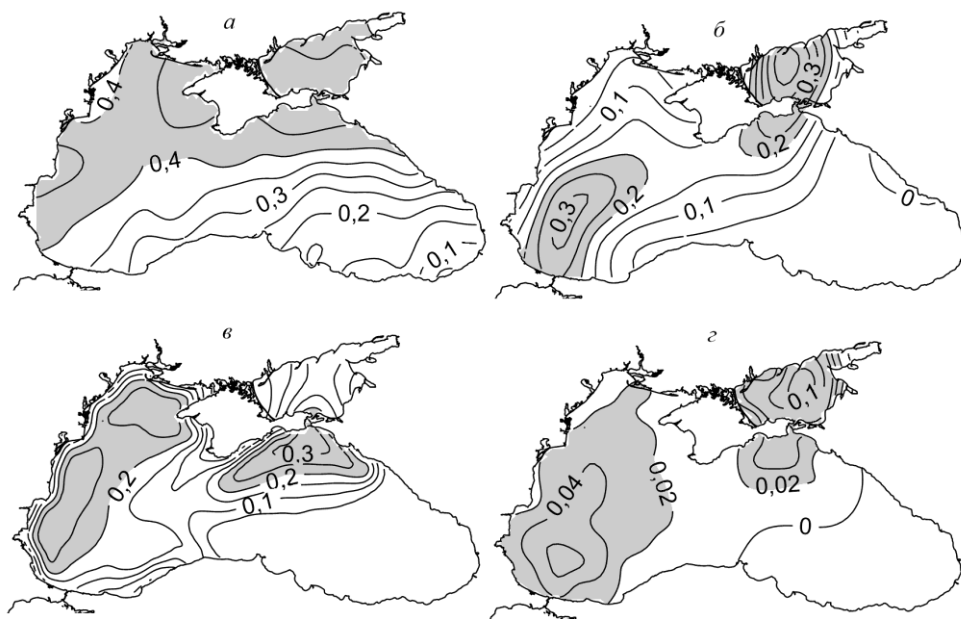


Рис. 1. Средняя повторяемость (%) штормовых ветров (>15 м/с) по различным источникам: *a* – по синоптическим картам [9]; *б* – по массиву данных ERA-40; *в* – по массиву данных ВАО МГИ [10]; *г* – по массиву данных MERRA

Штормовое усиление скорости ветра над Черным морем обусловлено в основном циклонической деятельностью. Локализация максимальных

значений штормовой активности вблизи Керченского пролива связана с частым прохождением средиземноморских циклонов через Малую Азию и южную часть Черного моря, при этом штормовые ветры имеют северное и северо-восточное направления. В западной части моря к сильным штормам приводят несколько типов развития синоптических ситуаций. Если средиземноморские циклоны выходят на запад Черного моря или циклоны из района Скандинавии смещаются на Балканы, то возникают штормы южного и юго-западного направлений. При смещении атлантических циклонов к югу Украины преобладающими направлениями штормовых ветров становятся западное и северо-западное. Следует отметить, что существуют процессы возникновения сильных ветров, не фиксируемые на синоптических картах и не реализуемые в атмосферных моделях. Это касается в первую очередь Кавказского побережья, где, по данным дистанционного зондирования, может возникать узкая зона прибрежных штормовых ветров по типу горно-долинной циркуляции.

Средний годовой цикл штормов в Черном море можно разделить на три сезона: осенне-зимний сезон с октября по март, когда количество дней со штормовым ветром максимально (6 – 9 в месяц) с преобладанием северного и северо-восточного направлений ветра (20 – 25 % от общего количества штормов); летний сезон с мая по август с минимальным количеством дней со штормовым ветром (0,5 – 1 в месяц) и преобладанием западного направления ветра (20 %) и переходный период в апреле и сентябре, когда количество дней со штормовым ветром 2 – 4 в месяц и преобладают ветры северного сектора. Для всех сезонов наименьшая повторяемость сохраняется для штормовых ветров юго-восточного направления (< 2 %), что связано с преобладающими траекториями циклонов. Несмотря на то что штормовая активность в регионе подвержена существенной межгодовой изменчивости, явных изменений в структуре сезонной изменчивости штормов для Черного моря, кроме уменьшения амплитуды сезонного хода, не выявлено.

Следует отметить, что конфигурация береговой линии приводит к тому, что режимно-климатические характеристики штормового ветра и волнения часто не соответствуют друг другу. В частности, наиболее часто возникающие штормы северного и северо-восточного направлений создают максимальное волнение у берегов Болгарии и Турции. Наибольшую опасность для судоходства у северного побережья моря представляют юго-западные штормы, такие как, например, в ноябре 1981 и 2007 гг. У Южного берега Крыма значительное волнение развивается при штормовых ветрах южного и юго-восточного направлений.

Тенденции многолетней изменчивости штормовой активности, по данным береговых станций, свидетельствуют об общей тенденции снижения штормовой активности в Черном море за последние 50 лет, когда повторяемость сильных и штормовых ветров снизилась в среднем в два раза. Общее уменьшение скорости ветра сопровождалось уменьшением повторяемости умеренных (6 – 9 м/с) и сильных (≥ 10 м/с) ветров и значительным увеличением повторяемости слабых (2 – 5 м/с) ветров. С начала XXI в. в определенных районах моря и побережья вновь началось усиление ветра.

Для данных, полученных в открытой части моря, долговременные тенденции не столь явно выражены, как для данных береговых станций.

На рис. 2 представлен график среднегодовой повторяемости штормовых ветров, каждому источнику информации соответствует отдельная вертикальная ось. Более всего уменьшение повторяемости сильных ветров после 1970-х гг. проявляется в реанализе ERA-40 и массиве синоптических карт [9]. Сокращение количества штормов в этот период в большой степени связано с уменьшением повторяемости северных и северо-восточных ветров. Если рассматривать сезонную составляющую межгодовой изменчивости скорости ветра, то определяющую роль в ней играет устойчивое сокращение количества штормов в зимний период. В остальные сезоны уменьшение средней скорости ветра и повторяемости сильных ветров не столь очевидно и часто статистически незначимо.

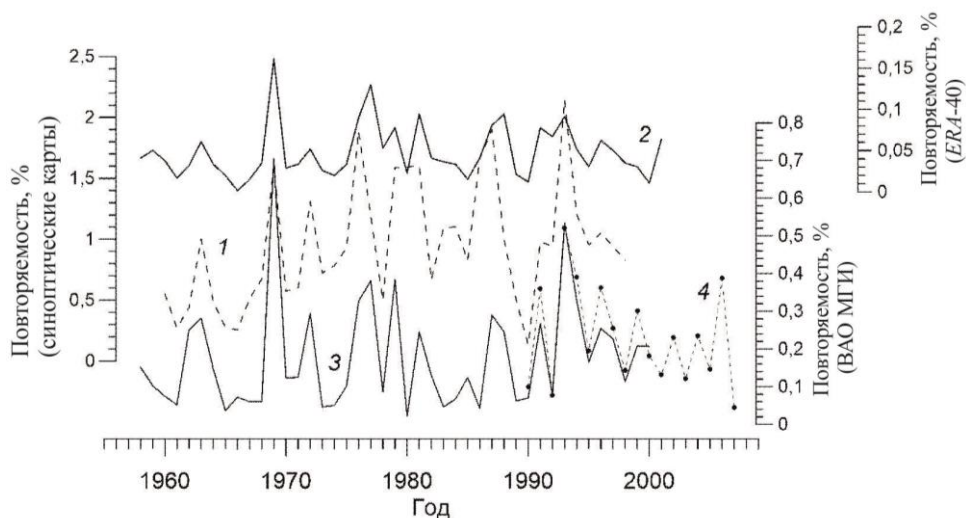


Рис. 2. Среднегодовые значения повторяемости штормовых ветров (> 15 м/с) над Черным морем по различным источникам: 1 – по синоптическим картам [9]; 2 – по массиву данных ERA-40; 3 – по массиву данных ВАО МГИ / ERA-40 [10]; 4 – по массиву данных ВАО МГИ / ERA-interim

Снижение штормовой активности в Черном море, происходившее в период 1960 – 1990-х гг., было связано с уменьшением общего количества и интенсивности проходящих циклонов, что сопровождалось хорошо выраженным ростом индексов Североатлантического и Восточноатлантического колебаний. После 1990-х гг. данные индексы крупномасштабной атмосферной циркуляции имеют отрицательную тенденцию, в связи с чем можно ожидать увеличения количества штормов в Черном море.

Моделирование сгонно-нагонных процессов в Азовском море. В работах [11, 12] на основе численной гидродинамической модели ADCIRC [13] исследовались сгонно-нагонные колебания уровня Азовского моря и связанные с ними процессы затопления и осушения дельты Дона. В частности, было установлено, что наиболее интенсивное затопление дельты возникает при западном и юго-западном направлениях ветра. Процесс затопления дельты начинает происходить при скоростях ветра не менее 15 м/с.

Ниже представлены некоторые новые результаты, касающиеся особенностей генерации сгонно-нагонных колебаний уровня воды в дельте Дона движущимися циклонами и сопоставления вклада речного стока и ветрового нагона в затопление дельты Дона. Моделирование выполнялось на неструктурированной расчетной сетке, включающей Азовское море и Керченский пролив. На южной границе пролива применялось условие свободного прохождения. Характеристики сетки и выбор параметров модели *ADCIRC* описаны в работах [11, 12].

Вначале исследовалась генерация сгонно-нагонных колебаний уровня и процессов затопления-осушения дельты Дона движущимся атмосферным циклоном без учета речного стока. Скорость ветра в циклоне определялась по формуле градиентного ветра

$$W_g = \left[\frac{r}{\rho_a} \frac{dP_A}{dr} + \left(\frac{fr}{2} \right)^2 \right]^{1/2} - \frac{fr}{2}, \quad (1)$$

где $r = \sqrt{r_x^2 + r_y^2}$ – расстояние от центра циклона (x_c, y_c) до точки (x, y) , в которой вычисляется W_g ; $r_x = x - x_c$; $r_y = y - y_c$; ρ_a – плотность воздуха; f – параметр Кориолиса. Атмосферное давление P_A в формуле (1) задавалось выражением

$$P_A = \begin{cases} P_0 - \delta P_A \cos^2 \left(\frac{\pi r}{2R} \right) & \text{при } r \leq R \\ P_0 & \text{при } r > R \end{cases}. \quad (2)$$

Здесь P_0 – фоновое значение атмосферного давления; δP_A – перепад давления между центром и периферией циклона; R – радиус циклона. В соответствии с оценками, приведенными в работе [14], $R = 300$ км, $\delta P_A = 15$ гПа.

С учетом выражений (1), (2) компоненты вектора скорости ветра в приземном слое определялись следующими формулами ($\alpha = 90^\circ + \gamma$):

$$W_x = -\frac{\mu W_g}{r} (r_x \sin \alpha + r_y \cos \alpha), \quad W_y = \frac{\mu W_g}{r} (r_x \cos \alpha - r_y \sin \alpha). \quad (3)$$

В формулах (3) предполагается, что ветер в приземном слое в результате трения отклоняется от касательных к изобарам на угол γ , равный 20° , против часовой стрелки, а его скорость меньше скорости градиентного ветра, что учитывается коэффициентом $\mu = 0,7$.

Для оценки площади затопления дельты (FI) и среднего уровня моря в дельте (SL) использовались следующие выражения:

$$FI(t) = 100\% \left(1 - \frac{S(t)}{S(0)} \right), \quad SL(t) = \frac{\iint_{\Omega} \eta(x, y, t) \delta_w(x, y, t) dx dy}{\iint_{\Omega} \delta_w(x, y, t) dx dy}, \quad (4)$$

$$S(t) = \iint_{\Omega} \delta_d(x, y, t) dx dy, \quad \delta_d(x, y, t) = \begin{cases} 1, & H(x, y, t) \leq H_{\min} \\ 0, & H(x, y, t) > H_{\min} \end{cases},$$

$$\delta_w(x, y, t) = \begin{cases} 0, & H(x, y, t) \leq H_{\min} \\ 1, & H(x, y, t) > H_{\min} \end{cases}.$$

Здесь величина $S(t)$ – площадь суши в момент времени t ; $S(0)$ – площадь суши в начальный момент времени; $H = h(x, y) + \eta(x, y, t)$ – динамическая глубина бассейна; h – глубина моря; η – отклонение уровня моря от невозмущенного состояния; $H_{\min} = 0,1$ м – минимальная глубина в алгоритме затопления-осушения модели ADCIRC. В выражениях (4) интегрирование выполняется по прямоугольной области $\Omega = \{39,0^\circ \text{ в. д.} \leq x \leq 39,63458^\circ \text{ в. д.}; 46,5^\circ \text{ в. д.} \leq y \leq 47,28910^\circ \text{ с. ш.}\}$, включающей дельту Дона.

В первом цикле численных экспериментов предполагалось, что циклон движется по зональной траектории: $x_c = x_0 + ct$; $y_c = y_0$, где $x_0 = 29,25^\circ \text{ в. д.}$, $y_0 = 46,25^\circ \text{ с. ш.}$ Скорость движения циклона c принимала следующие значения: $c_1 = 20$ км/ч; $c_2 = 30$ км/ч; $c_3 = 40$ км/ч. Общее время интегрирования составило 72 ч.

На рис. 3, а, б показаны зависимости скорости ($W = \sqrt{W_x^2 + W_y^2}$) и направления ветра (D) от времени в точке с координатами $(x_d, y_d) = (39,375^\circ \text{ в. д.}, 47,175^\circ \text{ с. ш.})$, которая расположена на внешней границе дельты Дона. Значения D отсчитываются относительно оси x , направленной на восток против часовой стрелки. Кривые скорости ветра имеют два максимума: первый возникает при подходе циклона к дельте, второй – при выходе циклона за ее пределы. Общее время воздействия циклона на дельту (t_d) представляет собой интервал времени, в течение которого в точке (x_d, y_d) выполняется условие $W > 0$. Как видно, t_d уменьшается с ростом скорости перемещения циклона и его значение составляет 27 ч для $c = c_1$; 18 ч для $c = c_2$; 14 ч для $c = c_3$. По мере прохождения циклона над дельтой ветер последовательно меняет свое направление с юго-восточного на восточное, затем на северное. Такие изменения направления ветра приводят к понижению среднего уровня, что прослеживается на кривых SL (рис. 3, в). Максимальные понижения уровня достигают следующих значений: $-1,05$ м для $c = c_1$; $-0,74$ м для $c = c_2$; $-0,69$ м для $c = c_3$. Согласно рис. 3, г, осушение дельты вследствие общего понижения уровня достигает 16 – 27 %.

В следующем цикле расчетов точка имеет координату $y_0 = 47,50^\circ \text{ с. ш.}$ (центр циклона смещается вдоль Таганрогского залива). В рассматриваемом случае перепад скорости ветра между максимумами и минимумами составляет ~ 10 м/с (рис. 4, а). Направление ветра меняется с южного и юго-западного на северо-западное (рис. 4, б). Генерируемые циклоном подъемы уровня в дельте составляют $\sim 0,9$ м (рис. 4, в), а значение FI не превышает 3,5 % (рис. 4, г). То есть при такой траектории циклона затопления дельты незначительны.

Результаты расчетов при $y_0 = 48,50^\circ \text{ с. ш.}$ показали, что, по сравнению с предыдущим расчетом (при $y_0 = 47,50^\circ \text{ с. ш.}$), высота нагонов в дельте возросла в 1,5 – 2 раза (рис. 5). Кроме того, при $c = c_1$ произошло значительное

затопление дельты ($FI \sim 70\%$). Таким образом, наиболее благоприятные условия для возникновения экстремальных штормовых нагонов в Таганрогском заливе, приводящих к значительному затоплению дельты Дона, возникают в случаях, когда циклон воздействует на акваторию моря своей южной периферией.

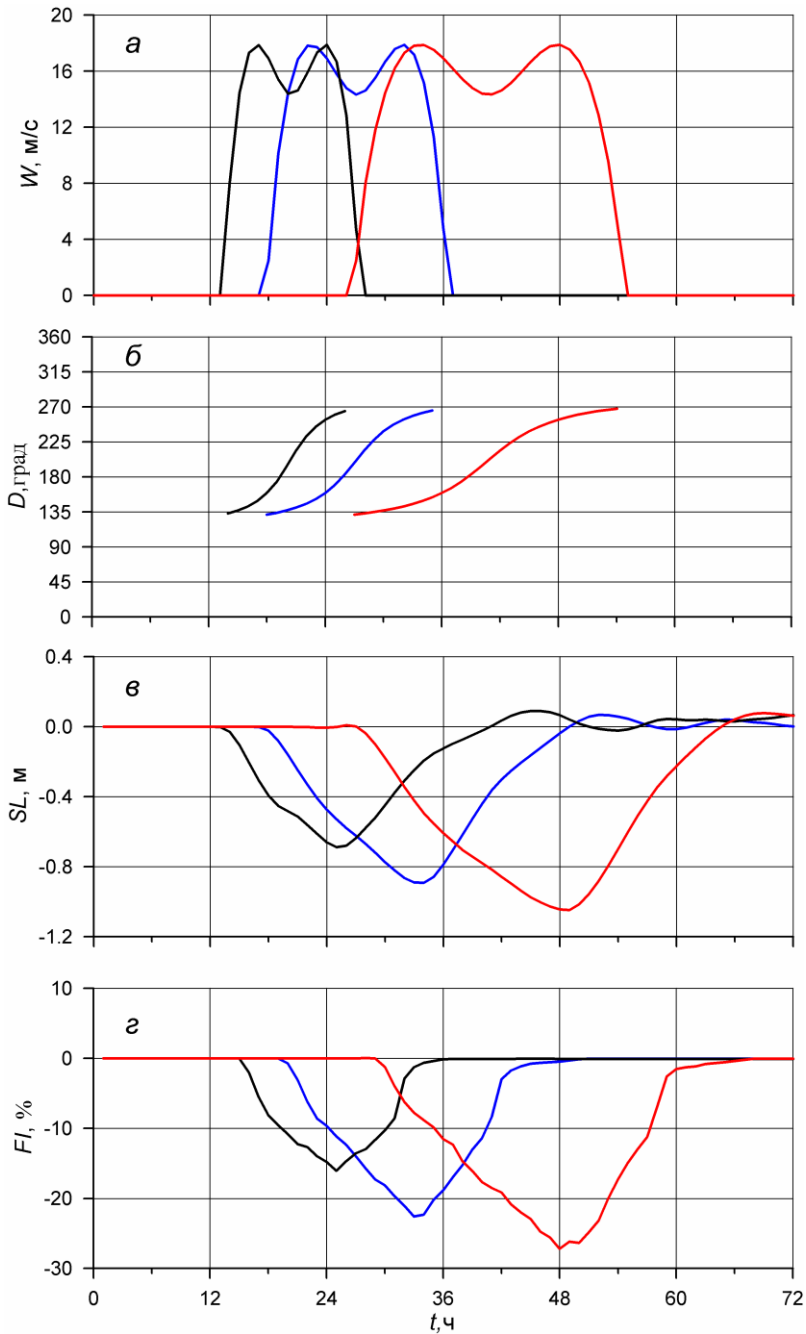


Рис. 3. Зависимости от времени скорости и направления ветра, среднего уровня воды и площади затопления дельты Дона при $R = 300$ км, $\delta P_A = 15$ гПа, $x_0 = 29,25^\circ$ в. д., $y_0 = 46,25^\circ$ с. ш. Красные кривые – $c = 20$ км/ч; синие кривые – $c = 30$ км/ч; черные кривые – $c = 40$ км/ч

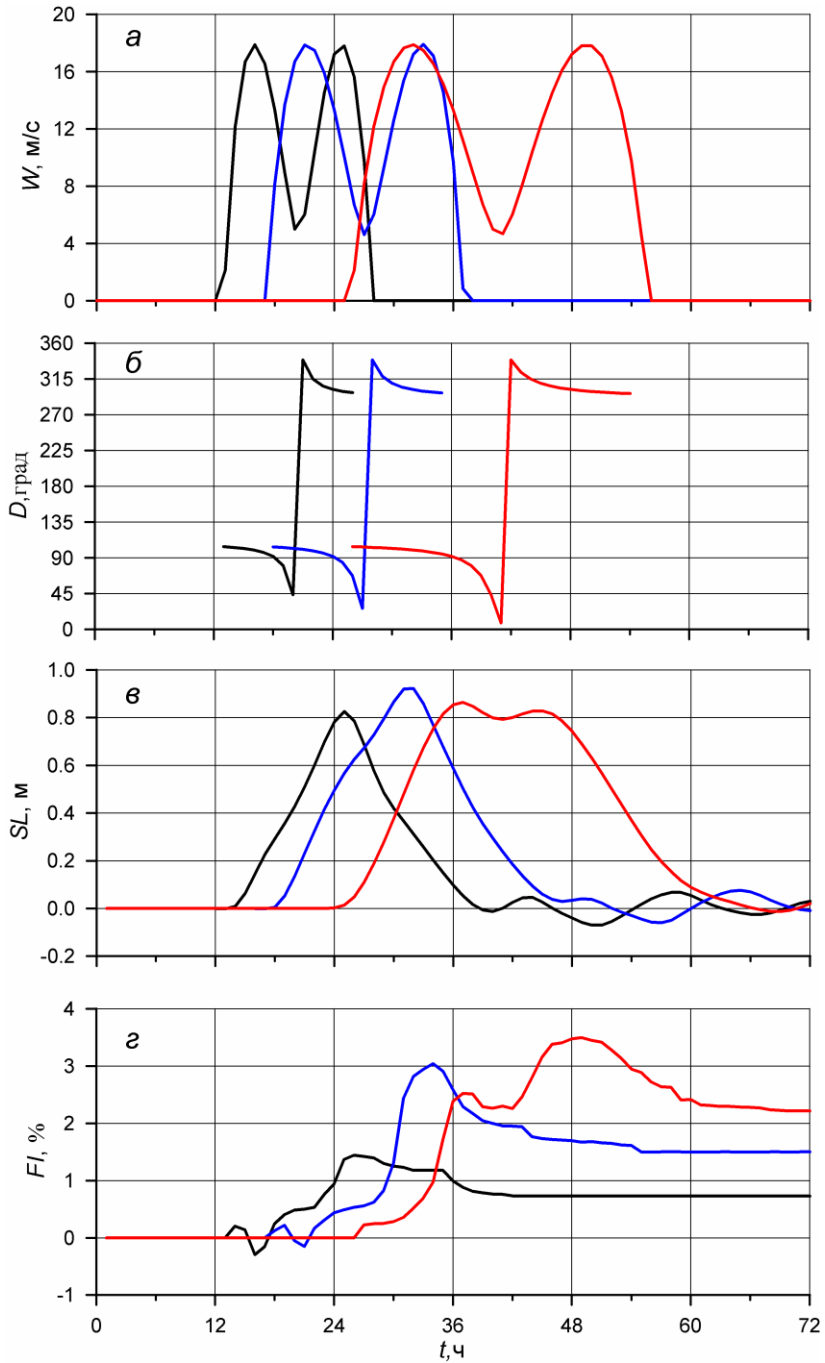


Рис. 4. Зависимости от времени скорости и направления ветра, среднего уровня воды и площади затопления дельты Дона при $R = 300$ км, $\delta P_A = 15$ гПа, $x_0 = 29,25^\circ$ в. д., $y_0 = 47,50^\circ$ с. ш. Соответствие цветов кривых такое же, как на рис. 3

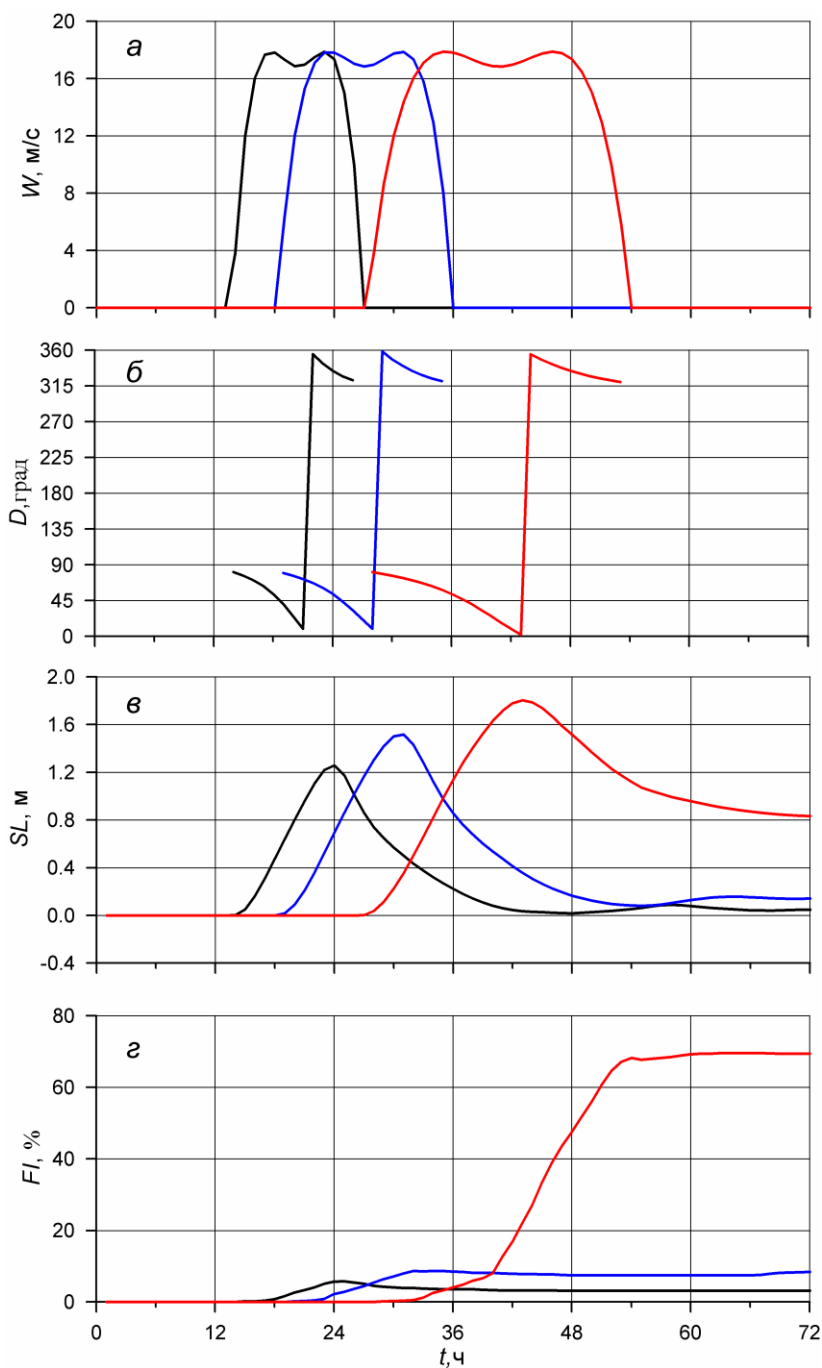


Рис. 5. Зависимости от времени скорости и направления ветра, среднего уровня воды и площади затопления дельты Дона при $R = 300$ км, $\delta P_A = 15$ гПа, $x_0 = 29,25^\circ$ в. д., $y_0 = 48,50^\circ$ с. ш. Соответствие цветов кривых такое же, как на рис. 3

Представляет интерес получить оценки вкладов речного стока и ветрового нагона в затопление дельты Дона. Следует отметить, что в дельте

действуют два разнонаправленных механизма. С одной стороны, речной сток повышает общий уровень воды в дельте. С другой стороны, направленные на запад стоковые течения уменьшают скорость нагонных течений. Поэтому представить даже качественную картину протекающих в дельте процессов достаточно сложно.

В первом цикле численных экспериментов ставилась задача оценить величину расхода воды Дона, при которой происходит существенное затопление его дельты. Расчеты проводились с разными значениями расхода воды Q при допущении об отсутствии ветра. Расход воды за первые 12 ч линейно возрастал от нуля до своего максимального значения и далее оставался неизменным. Общее время интегрирования составляло 168 ч.

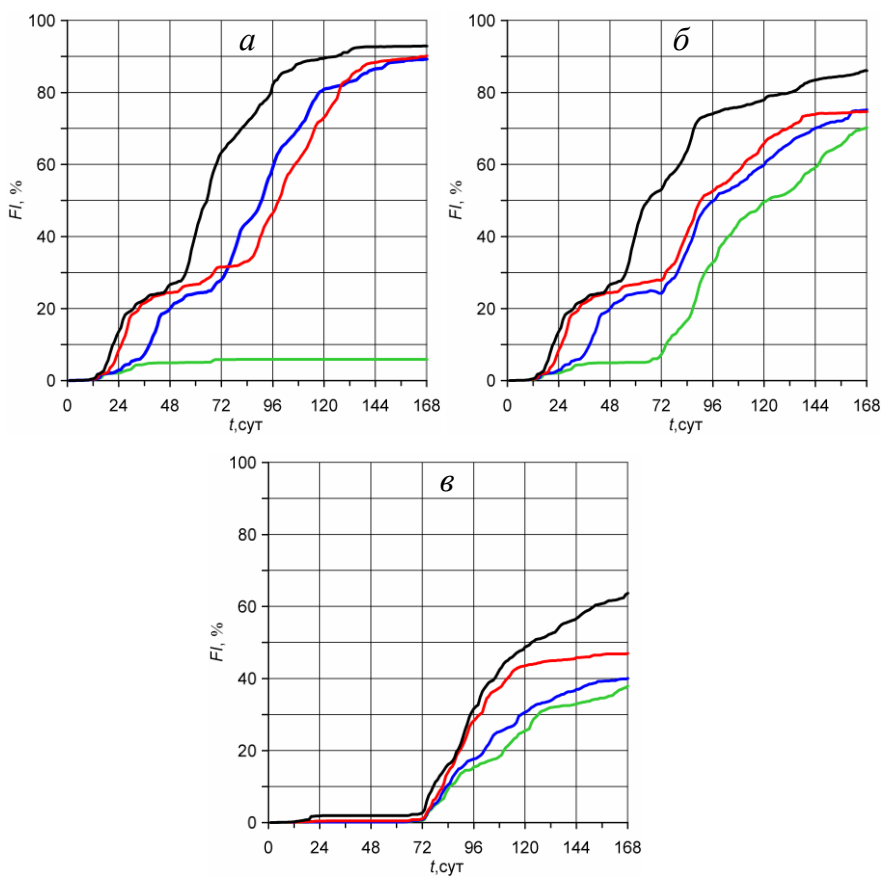


Рис. 6. Зависимость от времени площади затопления дельты Дона при разных расходах воды: *а* – без учета ветрового нагона: зеленая кривая – $Q = 1600 \text{ м}^3/\text{с}$, синяя кривая – $Q = 1700 \text{ м}^3/\text{с}$, красная кривая – $Q = 1800 \text{ м}^3/\text{с}$, черная кривая – $Q = 2000 \text{ м}^3/\text{с}$; *б* – с учетом ветрового нагона: зеленая кривая – $Q = 1600 \text{ м}^3/\text{с}$, синяя кривая – $Q = 1700 \text{ м}^3/\text{с}$, красная кривая – $Q = 1800 \text{ м}^3/\text{с}$, черная кривая – $Q = 2000 \text{ м}^3/\text{с}$; *в* – при учете ветрового нагона: зеленая кривая – $Q = 400 \text{ м}^3/\text{с}$, синяя кривая – $Q = 700 \text{ м}^3/\text{с}$, красная кривая – $Q = 1000 \text{ м}^3/\text{с}$, черная кривая – $Q = 1400 \text{ м}^3/\text{с}$

Как показали результаты расчетов параметра FI (рис. 6, *a*), процесс затопления дельты в режиме паводка (в отсутствие ветрового нагона) имеет неравномерный ступенчатый характер. Лавинообразное увеличение площади затопления начинается со значений $FI > 30$ %. Тотальное затопление ($FI > 80$ %) происходит при значениях Q , превышающих $Q^* = 1600$ м³/с, что примерно в два раза больше среднего значения расхода Дона в теплое время года [15]. Для тотального затопления дельты условие $Q > Q^*$ должно выполняться в течение не менее чем 4 – 6 сут.

В следующей серии численных экспериментов, кроме Q , учитывался также ветровой нагон. Расчеты проводились по следующему сценарию. Значение Q за первые 12 ч линейно возрастало от 0 до своего максимума и далее оставалось неизменным. После 3 сут действия речного стока включался ветер, имеющий направление $D = 30^\circ$. На интервале времени 72 – 84 ч скорость ветра W увеличивалась от 0 до 15 м/с и далее оставалась неизменной.

Графики площади затопления дельты Дона при $W = 15$ м/с для характерных значений $Q \geq Q^*$ показаны на рис. 6, *б*. Как видно, после включения ветра ($t > 72$ ч) при $Q = Q^*$ происходит увеличение площади затопления от 6 до 70 % за четверо суток. Когда $Q > Q^*$, происходит сокращение площади затопления дельты на 8 – 14 % по сравнению со случаем без ветрового нагона. Графики площади затопления дельты Дона при $W = 15$ м/с для характерных значений $Q < Q^*$ даны на рис. 6, *в*, на котором видно, что с ростом значений Q от 400 до 1400 м³/с площадь затопления дельты монотонно увеличивается от 37 до 64 %.

Можно дать следующую интерпретацию полученных результатов моделирования. Имеется некоторое пороговое значение $Q \sim Q^*$, зависящее от особенностей морфометрии дна и суши дельты Дона. При $Q < Q^*$ ветровой нагон оказывает блокирующее влияние на речные воды, что способствует более быстрому подъему уровня воды в рукавах и ее растеканию по низменным участкам дельты. При $Q > Q^*$ часть речных вод, благодаря большей скорости стоковых течений, вытекает из дельты в море, что вызывает некоторое снижение уровня воды в дельте и уменьшение площади ее затопления.

Результаты численного моделирования показали, что распространяющиеся со скоростью 20 – 40 км/ч атмосферные циклоны являются эффективными генераторами штормовых нагонов в Азовском море. Интенсивность нагонов в значительной степени определяется траекторией движения циклонов. Значительные подъемы уровня в Таганрогском заливе и дельте Дона возникают в случаях, когда траектория центра циклона лежит выше северной границы моря на $\sim 2,5 - 3^\circ$, то есть когда циклон воздействует на акваторию моря своей южной периферией, создавая интенсивный ветер западного и юго-западного направлений.

Уменьшение скорости перемещения циклона при прочих равных условиях вызывает интенсификацию штормовых нагонов в Таганрогском заливе и увеличение площади затопления дельты. При уменьшении скорости движения циклона с 40 до 20 км/ч площадь затопления увеличивается в $\sim 1,5 - 2$ раза.

Изучен вклад речного стока и ветрового нагона в затопление дельты Дона. Выявлено некоторое пороговое значение расхода Дона $Q^* \sim 1600$ м³/с. Когда

расход воды $Q \leq Q_*$, ветровой нагон оказывает блокирующее воздействие на речные воды, что способствует подъему уровня воды в рукавах и ее растеканию по низменным участкам дельты. Если $Q > Q_*$, часть речных вод за счет интенсивных стоковых течений вытекает из дельты в море, что приводит к некоторому снижению уровня воды в дельте и уменьшению площади ее затопления.

Система прогноза эволюции волн цунами в бассейне Черного моря.

Цунами – опасное природное явление, представляющее собой систему длинных поверхностных гравитационных волн, вызванных сравнительно кратковременными внешними возмущениями естественного и техногенного происхождения. В качестве естественных источников подобных волн выступают подводные землетрясения, землетрясения на суше, взрывы вулканов, обвалы скал, подводные оползни и атмосферные воздействия (метеоцунами). Наиболее подвержены сильным цунами прибрежные и островные районы Тихого и Индийского океанов, Средиземного моря, Восточной Атлантики, Карибского бассейна и ряда других районов Мирового океана. В Черном море повторяемость и интенсивность волн типа цунами существенно ниже, однако, по историческим сведениям, эти волны наблюдались вдоль всего черноморского побережья. Большинство событий было вызвано землетрясениями с эпицентром в море, некоторые были генерированы землетрясениями на суше, наблюдались так же и метеоцунами (например, событие в районе Одессы 27 июня 2014 г.). За последние две тысячи лет в регионе отмечено 22 события [16, 17], восемь из которых носили катастрофический характер и сопровождалась волнами высотой 2 – 3 м. Только четыре из них зарегистрированы инструментально: 26 июня 1927 г. и 11 сентября 1927 г. к юго-западу и югу от Южного берега Крыма, 26 декабря 1939 г. с эпицентром на суше в 150 км от северо-восточного побережья Турции и 12 июля 1966 г. в районе Анапы у восточного побережья Черного моря. При столь малом объеме данных наблюдений единственным инструментом исследования цунами в регионе становится численное моделирование.

Для предварительной оценки цунамиопасности черноморского побережья, экстремальных подъемов и понижений уровня моря в прибрежной зоне, исследования характеристик цунами, особенностей их распространения была создана первая версия системы прогноза эволюции цунами в Черном море. В основе этой системы лежит компьютерная реализация баротропной нелинейной эволюционной модели длинных волн с учетом квадратичного по скорости донного трения [18, 19]. В системе использовалась расчетная сетка с пространственным шагом 1000 м. Модельные очаги цунами эллиптической формы располагались в зонах повышенной сейсмической активности (рис. 7), начальное смещение уровня задавалось знакопостоянным. Параметры сейсмических источников определялись в зависимости от магнитуды землетрясения M : размеры эллиптической зоны генерации – по обобщенным эмпирическим соотношениям для Евразийского региона [20], а максимальное смещение уровня моря в эпицентре – по эмпирической формуле, приведенной в работе [21].

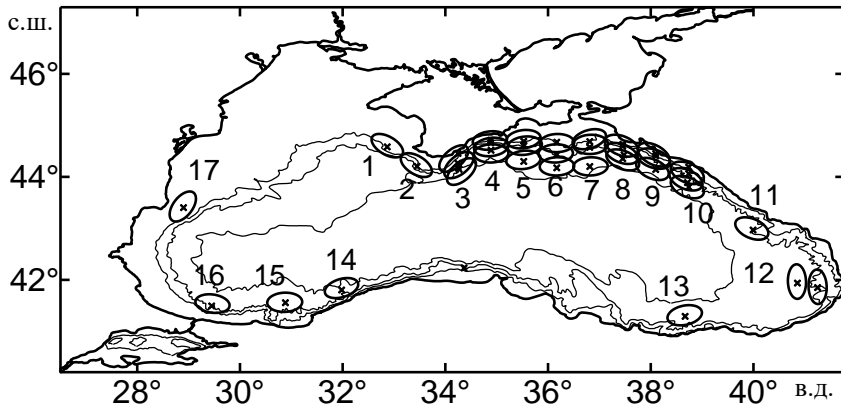


Рис. 7. Расчетная область и схема расположения модельных сейсмических источников

В частности, для магнитуды $M = 7$ длина большой оси эллипса составляет 50,1 км, малой – 29,5 км, максимальное смещение уровня моря в сейсмическом источнике – 1 м. Цифрами 3 – 10 (рис. 7) обозначены группы по три сейсмических источника с различным удалением от берега, центры которых лежат на изобатах 200, 1000 и 1800 м соответственно. Расчеты велись до глубины 5 м. На рис. 8 приведены примеры карт эволюции волн цунами из зоны генерации 3 для различных моментов времени.

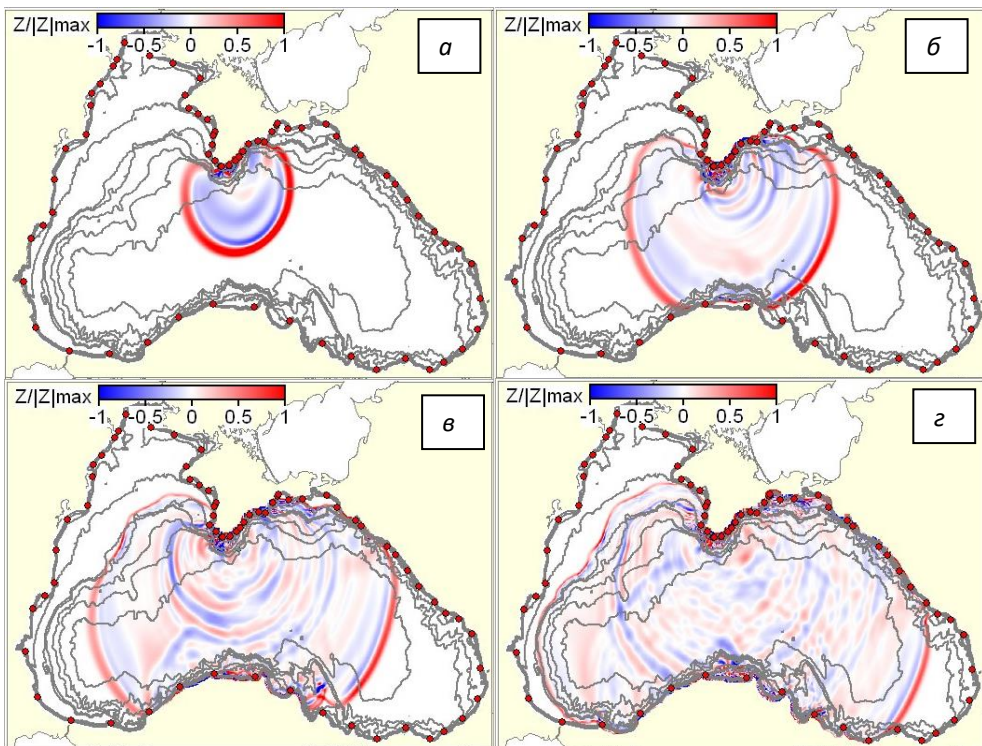


Рис. 8. Примеры карт эволюции цунами из сейсмического источника 3 для различных моментов времени: а – 15 мин, б – 30 мин, в – 45 мин, г – 60 мин

Регистрация колебаний уровня моря осуществлялась в ячейках расчетной сетки, расположенных вблизи 5-метровой изобаты и образующих непрерывную границу (рис. 9, а). По результатам расчета оценивались экстремальные подъемы и понижения уровня моря и строились их распределения вдоль этой границы, на основе которых делались предварительные выводы о цунамиопасности различных участков побережья Черного моря. Проведенные исследования показали, что положение зон генерации цунами существенно влияет на распределение высот волн вдоль побережья. На начальном этапе наибольшие высоты волн и величины волновых скоростей отмечаются в направлении, перпендикулярном большой оси эллиптической зоны генерации. В дальнейшем существенное влияние на распространение волн оказывает батиметрия бассейна. Рассмотренные сейсмические источники цунами расположены на свале глубин, и поэтому в большинстве случаев наиболее интенсивные волны формируются в направлении ближайшего участка береговой черты. Это свойство волн проявляется тем заметнее, чем ближе зона генерации к берегу.

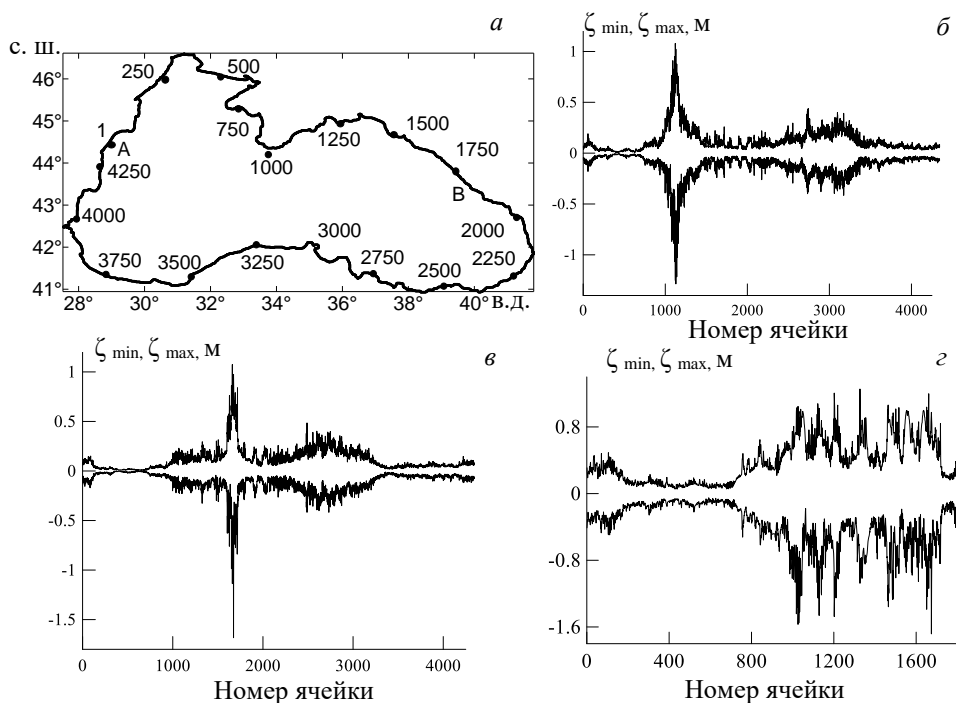


Рис. 9. Оценки экстремальных подъемов и понижений уровня моря, ζ_{\min} , ζ_{\max} : а – граница, образованная ячейками расчетной сетки, в которых регистрируются колебания уровня моря; б, в – распределения максимальных повышений и понижений уровня моря вдоль границы для очагов 3 и 10 соответственно; з – распределения максимальных повышений и понижений уровня моря вдоль участка границы АВ для всех сейсмических источников

Волна, распространяющаяся в направлении глубоководной части моря, как правило, вызывает на противоположном участке побережья (с учетом рефракции волн) заметные колебания уровня моря (рис. 9, б, в), что является

следствием ограниченности бассейна. В редких случаях амплитуды колебаний на противоположном берегу моря и в ближайших к зоне генерации береговых пунктах могут быть соизмеримы. Из рассмотренных сейсмических источников (рис. 9) наибольшую потенциальную опасность для участка черноморского побережья *AB* (рис. 9, *a*) представляют очаги цунами, расположенные в северо-восточной части Черного моря (Крымско-Кавказская сейсмоактивная зона). Северо-западная часть моря характеризуется менее высокой цунамиопасностью. Экстремальные повышения и понижения уровня моря для северо-западного участка побережья по абсолютной величине существенно меньше максимального смещения уровня в зоне генерации цунами. Наибольшее усиление волн отмечено на участке побережья от Южного берега Крыма до точки *B* (рис. 9, *a*). Заметные колебания уровня моря в ряде пунктов Южного берега Крыма возможны также в результате захвата волн, распространяющихся в северо-западном, северном и северо-восточном направлениях от очагов *13 – 17*.

Работы по оценке цунамиопасности черноморского побережья продолжаются, рассматриваются отдельные участки прибрежной зоны с использованием сеток более высокого разрешения, изучаются особенности распространения волн цунами в проливах, бухтах и заливах Черного моря [22, 23], в том числе с учетом наката волн на берег.

Заключение. Штормовые ситуации наиболее часто возникают в западной и северо-восточной частях Черного моря в осенне-зимний сезон с октября по март с преобладанием ветров северного и северо-восточного направлений. Снижение штормовой активности в Черном море, происходившее в конце XX в., было связано с уменьшением общего количества и интенсивности проходящих циклонов. В связи с многолетними тенденциями атмосферных индексов Североатлантического и Восточноатлантического колебаний следует ожидать в будущем увеличения количества штормов в Черном море.

Эффективными генераторами штормовых нагонов в Азовском море являются распространяющиеся со скоростью 20 – 40 км/ч атмосферные циклоны. Уменьшение скорости перемещения циклона приводит к интенсификации штормовых нагонов в Таганрогском заливе и увеличению площади затопления дельты Дона. При снижении расхода р. Дон ниже порогового значения $\sim 1600 \text{ м}^3/\text{с}$ ветровой нагон оказывает блокирующее воздействие на речные воды, что способствует подъему уровня воды в рукавах и ее растеканию по низменным участкам дельты.

Наибольшую потенциальную опасность для северного побережья Черного моря представляют очаги цунами, расположенные в северо-восточной части бассейна – Крымско-Кавказской сейсмоактивной зоне. Цунамиопасность северо-западной части моря существенно ниже.

Работа выполнена в рамках государственного задания по темам № 0827-2015-0001 «Фундаментальные исследования процессов в системе океан-атмосфера-литосфера, определяющих пространственно-временную изменчивость природной среды и климата глобального и регионального масштабов»

и № 0827-2014-0010 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем Черного и Азовского морей на основе современных методов контроля состояния морской среды и гридтехнологий».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Доценко С.Ф., Иванов В.А.* Природные катастрофы Азово-Черноморского региона. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010. – 174 с. – URL: http://meteo.geofaq.ru/books/612759_D9E3-D_docenko_s_f_ivanov_v_a_prirodnye_katastrofy_azovo_chemomors.pdf (дата обращения: 20.12.2016).
2. *Репетин Л.Н., Белокопытов В.Н.* Режим ветра над побережьем и шельфом северо-восточной части Черного моря // Науч. тр. УкрНИГМИ. – 2008. – Вып. 257. – С. 84 – 105.
3. *Ефимов В.В., Комаровская О.И.* Атлас экстремального ветрового волнения Черного моря. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. – 59 с.
4. *Ильин Ю.П., Фомин В.В., Дьяков Н.Н. и др.* Гидрометеорологические условия морей Украины. Т. 1. Азовское море. – Севастополь, 2009. – 401 с.
5. *Доценко С.Ф.* Черноморские цунами // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 1994. – 30, № 4. – С. 513 – 519.
6. *Доценко С.Ф., Миклашевская Н.А.* Генерация сейш в ограниченных бассейнах перемещающимися барическими фронтами // Морской гидрофизический журнал. – 2008. – № 2. – С. 3 – 18.
7. *Доценко С.Ф., Иванов В.А., Побережный Ю.А.* Волны-убийцы в северо-западной части Черного моря // Доповіді НАН України. – 2009. – № 9. – С. 113 – 117.
8. *Наумова В.А., Евстигнеев М.П., Евстигнеев В.П. и др.* Ветро-волновые условия Азово-Черноморского побережья Украины // Тр. УкрНИГМИ. – 2010. – Вып. 259. – С. 263 – 283.
9. *Белокопытов В.Н., Кудрявцева Г.Ф., Липченко М.М.* Атмосферное давление и ветер над Черным морем (1961 – 1990 гг.) // Там же. – 1998. – Вып. 246. – С. 174 – 181.
10. *Ефимов В.В., Анисимов А.Е.* Климатические характеристики изменчивости поля ветра в Черноморском регионе – численный реанализ региональной атмосферной циркуляции // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 2011. – 47, № 3. – С. 380 – 392.
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. – Вып. 1. – С. 74 – 82.
12. *Фомин В.В.* Расчеты уровня и ветрового волнения в Таганрогском заливе на основе совместной модели // Труды ГОИН. – 2016. – № 217. – С. 254 – 267.
13. *Luettich R.A., Westerink J.J., Scheffner N.W.* ADCIRC: an Advanced Three-dimensional Circulation Model for Shelves, Coasts, and Estuaries. Report 1. Theory and Methodology of ADCIRC-2DDI and ADCIRC-3DL. – Vicksburg, Mississippi, USA: Army Engineers Waterways Experiment Station, 1992. – 141 p. – URL: http://www.unc.edu/ims/adcirc/publications/1992/1992_Luettich02.pdf (дата обращения 20.02.2017).
14. *Гришин Г.А., Баянкина Т.М., Калинин Е.И. и др.* Об эволюции южных циклонов, выходящих на Черное море и территорию Украины, по данным спутниковых и наземных наблюдений // Исследования Земли из космоса. – 1991. – № 3. – С. 89 – 94.
15. *Филиппов Ю.Г.* Расчеты уровня в восточной части Таганрогского залива // Труды ГОИН. – 2014. – № 215. – С. 136 – 143.
16. *Никонов А.А.* Цунами на берегах Черного и Азовского морей // Изв. РАН. Физика Земли. – 1997. – 33, № 1. – С. 86 – 96.
17. *Yalçiner A., Pelinovsky E., Talipova T. et al.* Tsunamis in the Black Sea: comparison of the historical, instrumental, and numerical data // J. Geophys. Res. – 2004. – 109, Issue C12. – P. C12023. – doi:10.1029/2003JC002113

18. *Liu P.L.-F., Cho Y.-S., Briggs M.J. et al.* Runup of solitary waves on a circular island // *J. Fluid Mech.* – 1995. – 302. – P. 259 – 285. – doi:<https://doi.org/10.1017/S0022112095004095>
19. *Доценко С.Ф., Ингеров А.В.* Характеристика волн цунами сейсмического происхождения в бассейне Черного моря по результатам численного моделирования // *Морской гидрофизический журнал.* – 2013. – № 3. – С. 25 – 34.
20. *Уломов В.И., Полякова Т.П., Шумилина Л.С. и др.* Опыт картирования очагов землетрясений // *Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии.* – М.: ОИФЗ РАН, 1993. – Вып. 1. – С. 99 – 108.
21. *Пелиновский Е.Н.* Нелинейная динамика волн цунами. – Горький: ИПФ АН СССР, 1982. – 226 с.
22. *Доценко С.Ф., Санникова Н.К.В.* Анализ особенностей распространения цунами в шельфовой зоне бассейна // *Морской гидрофизический журнал.* – 2011. – № 6. – С. 3 – 15.
23. *Vazykina A.Yu., Dotsenko S.F.* Propagation of tsunami-like surface long waves in the bays of a variable depth // *Physical Oceanography* – 2016. – No. 4. – С. 3 – 12. – doi:[10.22449/1573-160X-2016-4-3-11](https://doi.org/10.22449/1573-160X-2016-4-3-11)

On multidisciplinary investigations of dangerous natural phenomena in the Azov-Black Sea basin

V.N. Belokopytov*, V.V. Fomin, A.V. Ingerov

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
*e-mail: v.belokopytov@gmail.com

Some results of investigating dangerous phenomena and potential natural disasters in the Azov – Black Sea basin are represented. Decrease of storm activity in the Black Sea observed in the end of the XX century is due to diminution of total amount and intensity of the passing cyclones. Based on long-term tendencies of the North Atlantic Oscillation and the East Atlantic Oscillation atmosphere indices, future increase of the storm amount in the Black Sea would be expected. The effective sources of storm surges in the Sea of Azov are the atmospheric cyclones spreading with the speed 20 – 40 km/hour. Decrease of a cyclone movement speed results in a storm surge intensification in the Gulf of Taganrog and increase of the flooded area in the Don delta. When the Don discharge becomes lower than the threshold value $\sim 1600 \text{ m}^3/\text{s}$, the wind surge exerts a blocking impact upon the river water that promotes the sea level rise in the branches and the delta lowland. The highest potential tsunami hazard for the Black Sea northern coast is represented by the earthquake epicenters located in the Crimea – Caucasus seismic zone. Noticeable sea level oscillations can arise in some locations of the Crimea Southern Coast as a result of the trapped waves propagating to the northwest, north and northeast from the seismic centers nearby the southern coast of the sea.

Keywords: storm winds, storm surge, tsunamis, numerical modeling, Black Sea, Sea of Azov.