

РАСЧЕТЫ УРОВНЯ И ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ В ТАГАНРОГСКОМ ЗАЛИВЕ НА ОСНОВЕ СОВМЕСТНОЙ МОДЕЛИ

Фомин В.В.

С использованием совместной численной модели проведены расчеты уровня и ветрового волнения в Таганрогском заливе. Модель реализована на неструктурированной сетке с высоким пространственным разрешением. В качестве форсинга использованы данные атмосферной модели, соответствующие экстремальному шторму 24–25 сентября 2014 г. Показано, что наибольшие затопления происходят в западной и северной частях дельты Дона. Учет взаимодействия штормового нагона и ветрового волнения увеличивает площадь затопления дельты и приводит к интенсификации ветрового волнения в заливе вследствие общего подъема уровня моря.

Сгонно-нагонные колебания уровня и ветровое волнение являются одними из наиболее важных гидрологических характеристик, определяющих динамику Азовского моря на синоптических масштабах. В Таганрогском заливе под воздействием сильных и продолжительных ветров западных румбов могут формироваться экстремальные штормовые нагоны высотой 2–3 м [1,2] и вызывающие наводнения в дельте Дона. За последние 20 лет имели место несколько таких случаев: 12 апреля 1997 г.; 1 марта 2005 г.; 30 сентября 2010 г.; 24 марта 2013 г.; 24 сентября 2014 г. Два последних случая подробно описаны в [2, 3].

В работах [5,9] реализована технология численного моделирования штормовых нагонов и ветрового волнения в Азовском море, использующая совместную модель ADCIRC+SWAN [8]. Валидация модели показала, что она адекватно описывает вариации уровня Азовского моря в период интенсивных штормов.

В данной работе указанная технология применяется для исследования характеристик штормовых нагонов и ветрового волнения в Таганрогском заливе в период экстремального шторма 24–25 сентября 2014 г. Для этого используется неструктурированная расчетная сетка высокого разрешения, которая подробно описывает батиметрию и топографию дельты Дона, что дает возможность моделировать процессы осушения дна и затопления суши.

Описание модели

Совместная модель ADCIRC+SWAN объединяет две модели – ADCIRC (Advanced Circulation Model for Shelves Coasts and Estuaries) [13,14] и SWAN (Simulation Waves Nearshore) [6,15], которые широко используются для расчета штормовых нагонов и ветрового волнения. Исходные уравнения модели ADCIRC для осредненных по глубине характеристик имеют вид

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - fV = -g \frac{\partial}{\partial x} \left[\eta + \frac{P_a}{g\rho_0} \right] + \frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho_0 H} + \frac{M_x - D_x}{H}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + fU = -g \frac{\partial}{\partial y} \left[\eta + \frac{P_a}{g\rho_0} \right] + \frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{\rho_0 H} + \frac{M_y - D_y}{H}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} + \tau_0 \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{\partial J_y}{\partial y} - Q_x \frac{\partial \tau_0}{\partial x} - Q_y \frac{\partial \tau_0}{\partial y} = 0, \quad (3)$$

$$J_x = -Q_x \frac{\partial U}{\partial x} - Q_y \frac{\partial U}{\partial y} + fQ_y - \frac{g}{2} \frac{\partial \eta^2}{\partial x} - \frac{H}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial x} + \frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho_0} + (M_x - D_x) + \tau_0 Q_x + U \frac{\partial \eta}{\partial t} - gH \frac{\partial \eta}{\partial x},$$

$$J_y = -Q_x \frac{\partial V}{\partial x} - Q_y \frac{\partial V}{\partial y} - fQ_x - \frac{g}{2} \frac{\partial \eta^2}{\partial y} - \frac{H}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial y} + \frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{\rho_0} + (M_y - D_y) + \tau_0 Q_y + V \frac{\partial \eta}{\partial t} - gH \frac{\partial \eta}{\partial y}.$$

Здесь x, y, t – горизонтальные координаты и время; U, V – средние по глубине компоненты вектора скорости течений по осям x и y соответственно; η – отклонение свободной поверхности моря от невозмущенного состояния; f – параметр Кориолиса; g – ускорение силы тяжести; P_a – атмосферное давление; ρ_0 – средняя плотность морской воды; $H = h + \eta$ – динамическая

глубина моря; h – глубина моря; M_x, M_y – горизонтальная турбулентная вязкость; D_x, D_y – слагаемые, полученные в результате дифференциальных преобразований исходной системы уравнений [14]; τ_{bx}, τ_{by} – компоненты напряжений донного трения; τ_0 – весовой множитель, влияющий на фазовые характеристики и устойчивость численного алгоритма; $Q_x = UH, Q_y = VH$ – компоненты вектора полных потоков.

В системе уравнений (1) – (3) введены следующие обозначения

$$\tau_{sx} = \tau_{sx,wind} + \tau_{sx,wave}, \quad \tau_{sy} = \tau_{sy,wind} + \tau_{sy,wave}, \quad (4)$$

$$\tau_{sx,wind} = \rho_a C_a W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2}, \quad \tau_{sy,wind} = \rho_a C_a W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2}, \quad (5)$$

$$\tau_{bx} = \rho_0 C_d U \sqrt{U^2 + V^2}, \quad \tau_{by} = \rho_0 C_d V \sqrt{U^2 + V^2}, \quad (6)$$

где $(\tau_{sx,wind}, \tau_{sy,wind})$ и $(\tau_{sx,wave}, \tau_{sy,wave})$ – компоненты напряжений трения, обусловленные ветром и волнами соответственно; ρ_a – плотность воздуха; W_x, W_y – компоненты вектора скорости приводного ветра; C_a – коэффициент поверхностного трения; C_d – коэффициент донного трения.

Коэффициенты поверхностного и донного трения в (5), (6) задаются соотношениями

$$C_a = 0,001 \left(0,75 + 0,067 \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \right), \quad C_d = gn^2 / H^{1/3}, \quad (7)$$

где n – параметр шероховатости Маннинга. В общем случае n является функцией пространственных координат и определяется типом подстилающей поверхности и свойствами почвенно-растительного покрова.

В основу модели SWAN положена концепция частотно-углового спектра $E(x, y, t, \varphi, \omega)$, где φ, ω – угловая и частотная переменные. Эволюционное уравнение для определения спектральной плотности волнового действия $N = E/\omega$ имеет вид

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(c_x N) + \frac{\partial}{\partial y}(c_y N) + \frac{\partial}{\partial \varphi}(c_\varphi N) + \frac{\partial}{\partial \omega}(c_\omega N) = \frac{S}{\omega}, \quad (8)$$

где $c_x, c_y, c_\varphi, c_\omega$ – скорости переноса волновой энергии, определяемые на основе метода геометрической оптики; величина S – источники и стоки волновой энергии [11].

В SWAN волновые характеристики вычисляются на основе полей скорости ветра, а также полей течений и уровня моря, получаемых из ADCIRC. В свою очередь, в ADCIRC используются волновые напряжения из SWAN, которые определяются соотношениями

$$\tau_{sx,waves} = -\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} - \frac{\partial S_{xy}}{\partial y}, \quad \tau_{sy,waves} = -\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} - \frac{\partial S_{yy}}{\partial y}, \quad (9)$$

где S_{xx}, S_{xy}, S_{yy} – компоненты тензора радиационных напряжений.

Для параметризации донного трения в SWAN применяется метод Гранта-Мадсена [9], в котором масштаб шероховатости дна k_N согласован с донным трением в ADCIRC и определяется формулой [12]

$$k_N = 30H \exp \left[- \left(1 + 0,4 \frac{H^{1/6}}{n\sqrt{g}} \right) \right]. \quad (10)$$

Программные коды ADCIRC и SWAN выполняются последовательно на одной и той же неструктурированной сетке и используют один и тот же набор процессоров. В обеих моделях

применяется интерфейс передачи сообщений MPI (Message Passing Interface), что дает возможность использовать параллельные вычисления.

Следует отметить, что совместная модель позволяет рассматривать полный уровень моря (TSL) в виде суммы $TSL = SL + CW$. Здесь первая компонента (SL) – вариации, обусловленные суммарным действием касательных напряжений ветра, градиентов атмосферного давления и волновых напряжений, т.е. η из ADCIRC. Вторая компонента (CW) – высота гребней ветровых волн, которая дает положительную добавку к SL . В первом приближении CW можно оценить как $H_s/2$, где $H_s = 4\sqrt{E}$ – высота значительных волн (SWH) из модели SWAN. С прикладной точки зрения, TSL дает более адекватную оценку вариаций уровня моря, поскольку включает низкочастотную и высокочастотную составляющие.

Анализ результатов численных экспериментов

В численных экспериментах использовалась неструктурированная расчетная сетка из 178 565 узлов (348 735 треугольных элементов), которая включает Азовское море и Керченский пролив (рис. 1). Размер сторон треугольных ячеек изменялся в пределах 50–800 м. Шаги интегрирования по времени в ADCIRC и SWAN составляли 1 и 600 с соответственно. Угловое разрешение в SWAN принималось равным 10° . По частотной координате применялась сетка с 40 узлами в диапазоне частот 0,03 – 1,4 Гц. Использовались два значения параметра Маннинга: 0,025 – для морского дна; 0,10 – для суши. С целью повышения устойчивости численного алгоритма весовой множитель τ_0 в уравнении (3) задавался в виде $\tau_0 = 0,03 + 1,5C_d \sqrt{U^2 + V^2}/H$.

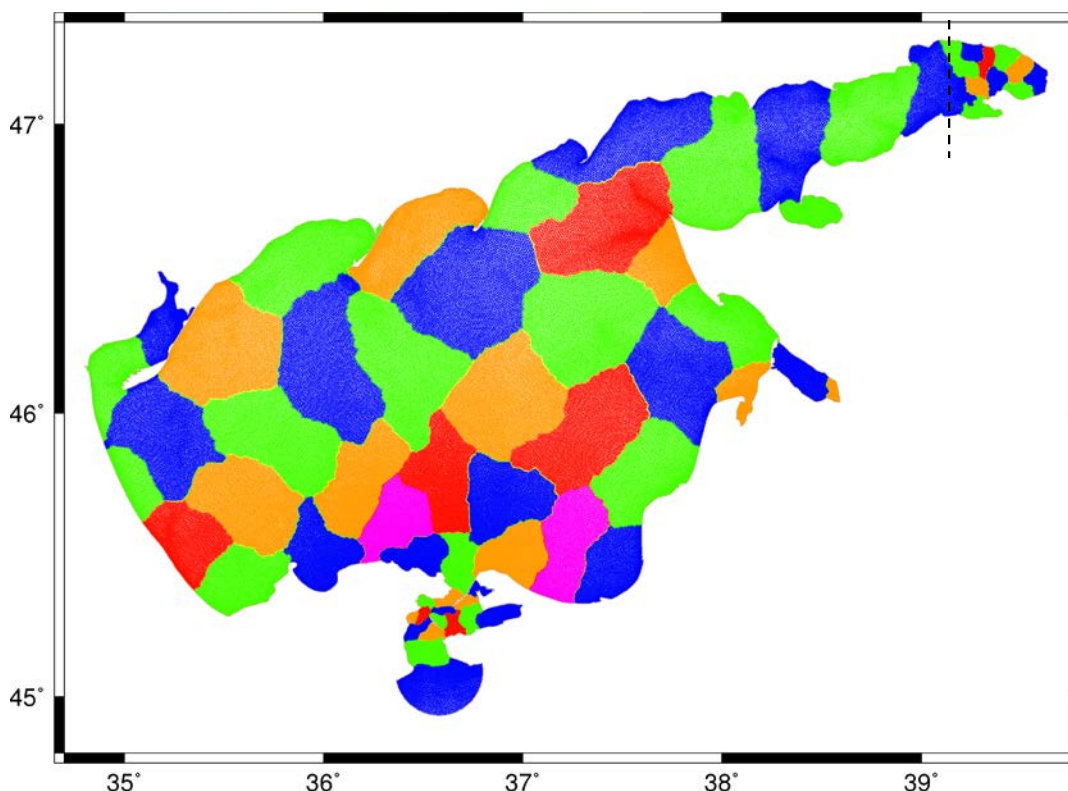


Рис.1. Неструктурированная расчетная сетка.

Модель ADCIRC содержит два настроечных параметра: H_{\min} – глубина моря, при которой расчетная ячейка считается закрытой и не используется в вычислениях; U_{\min} – пороговое значение скорости течений, при котором ячейка открывается для заполнения. Следуя рекомендациям [7], эти параметры принимались равными 0,1 м и 0,01 м/с соответственно.

На южной границе Керченского пролива использовалось условие свободного прохождения. Поскольку в настоящей работе исследовались только морские наводнения, то влияние речного стока на затопление дельты Дона не учитывалось. Как показали

предварительные численные эксперименты, при средних величинах расхода воды р. Дон (~700 м³/с) [4] речной сток не оказывает заметного влияния на исследуемые ниже процессы.

Была выполнена серия численных экспериментов по моделированию ветрового волнения и уровня Азовского моря для экстремальной штормовой ситуации, которая возникла 24–25 сентября 2014 г и была вызвана прохождением над морем быстрого и достаточно глубокого циклона, который сформировался в западной части Черного моря.

В качестве атмосферного форсинга использовались поля приводного ветра и атмосферного давления из региональной модели WRF (сайт esobase.org.ua) за 20–28 сентября 2014 г с шагом 7 км по пространству и дискретностью 3 ч по времени. По данным WRF максимальная скорость ветра в Таганрогском заливе в указанный период времени изменялась в пределах от 17 м/с в районе дельты Дона до 21 м/с в Должанском проливе.

На рис.2 показан временной ход скорости и направления ветра из модели WRF для района дельты Дона за период 20–28 сентября 2014 г. Здесь направление ветра отсчитывается относительно *x* оси направленной на восток против часовой стрелки. Как видно, в первые 90 ч преобладал восточный и юго-восточный ветер со скоростью ~7, 5 м/с. Далее в течение суток скорость ветра увеличилась до 17 м/с. Затем произошла резкая смена направления ветра с юго-восточного на западное, что создало благоприятные условия для формирования в вершине залива сильного штормового нагона.

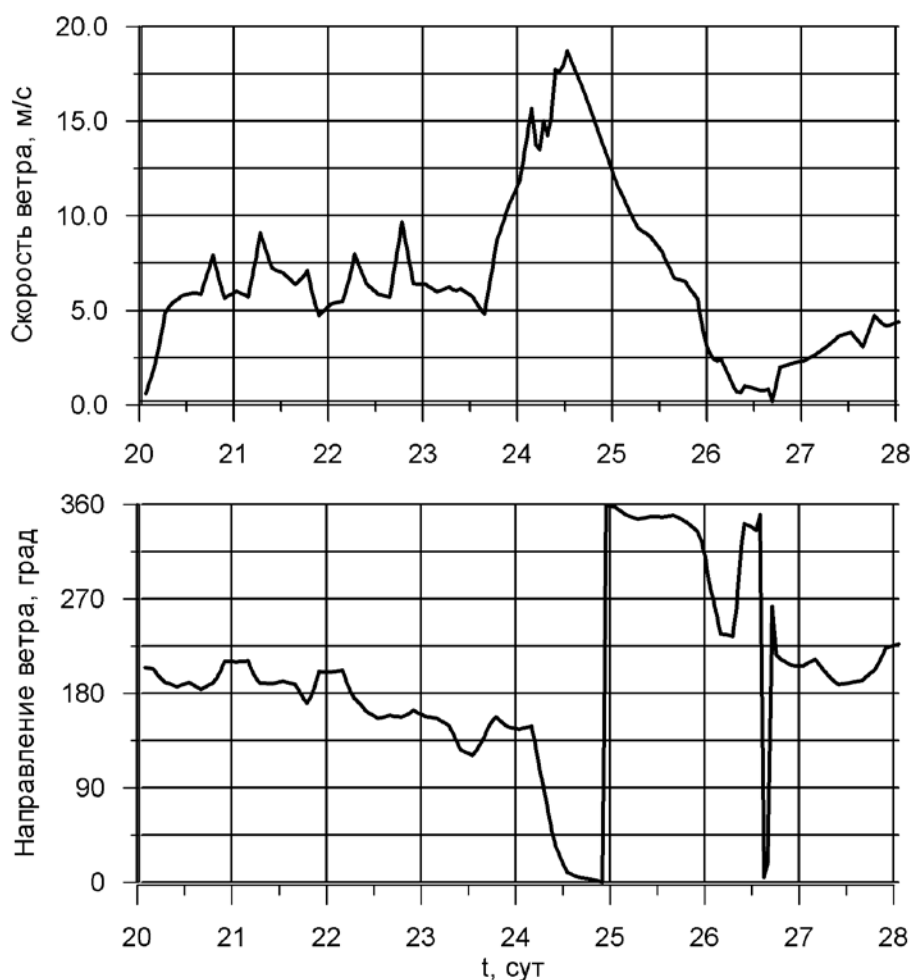


Рис. 2. Модельные значения скорости и направления ветра в районе дельты Дона в период 20–28 сентября 2014 г.

Численные эксперименты проводились с нулевыми начальными условиями. В первом эксперименте (E1) связи между ADCIRC и SWAN не включались и, таким образом, механизмы взаимодействия между течениями, уровнем моря и ветровым волнением не учитывались. Во втором эксперименте (E2) эти механизмы были учтены. Кроме того, в эксперименте E1 задавался постоянный масштаб шероховатости дна $k_N = 0,01$ м, а в эксперименте E2 для параметра k_N использовалась формула (10).

Анализ результатов численных экспериментов показал, что на протяжении первых 3,5 сут в заливе происходил общий спад уровня моря и на его фоне возникали затухающие колебания. Далее 24 сентября в первой половине дня начался подъем уровня моря, обусловленный резкой сменой направления ветра со сгонного на нагонное. Начиная с 25 сентября, скорость ветра стала уменьшаться, что привело к постепенному спаду уровня в заливе.

На рис. 3–6 показана конфигурация дельты Дона для 4-х характерных моментов времени. При построении этих полей использовалась следующая процедура. В каждый момент времени динамическая глубина H во всех узлах сетки сопоставлялась с константой H_{\min} . Если одновременно для всех 3-х узлов ячейки сетки выполнялось условие $H > H_{\min}$, то эта ячейка считалась затопленной. Как видно, заметные очаги затопления в дельте Дона начинают возникать, начиная с 25 сентября. При этом большему затоплению подвержены западная и северная части дельты.

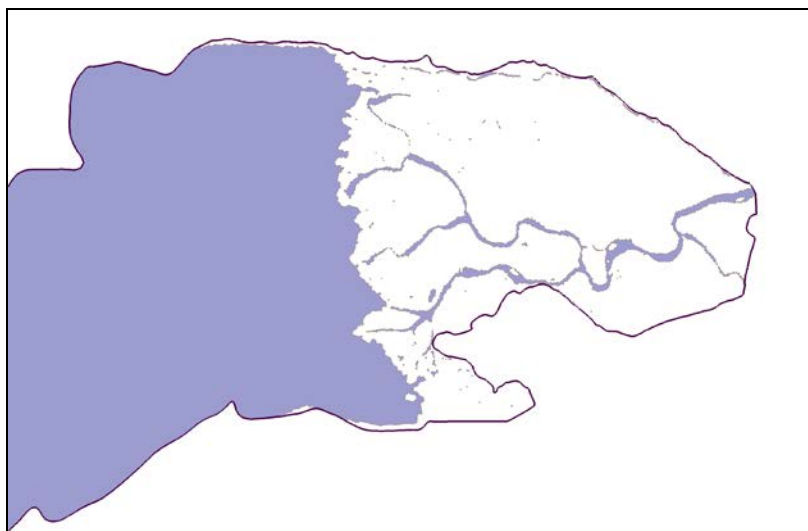


Рис. 3. Конфигурация дельты Дона 24 сентября 2014 г в 00:00.

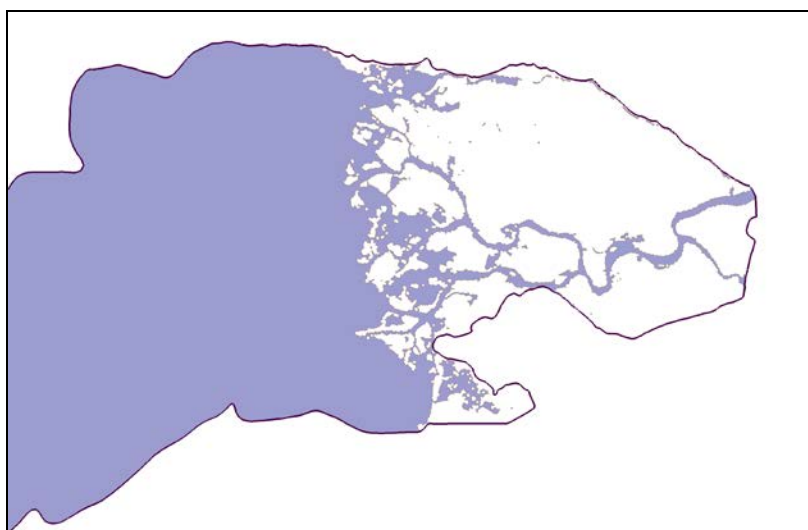


Рис. 4. Конфигурация дельты Дона 25 сентября 2014 г в 00:00.

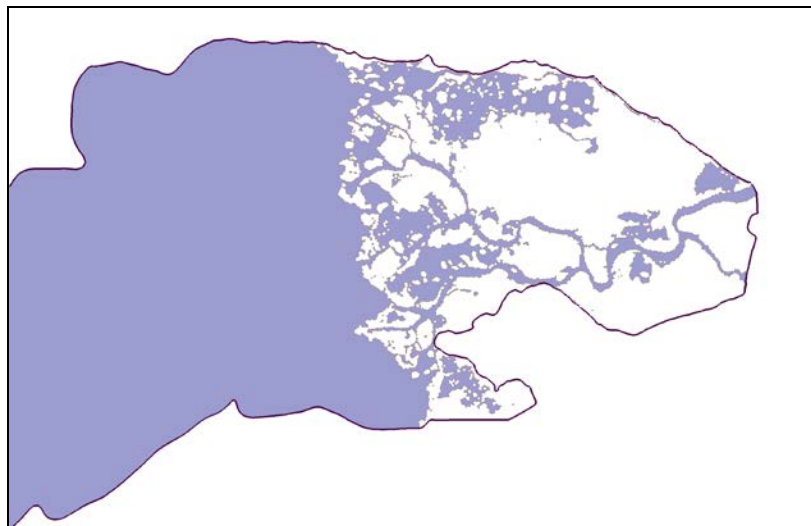


Рис. 5. Конфигурация дельты Дона 25 сентября 2014 г в 12:00.

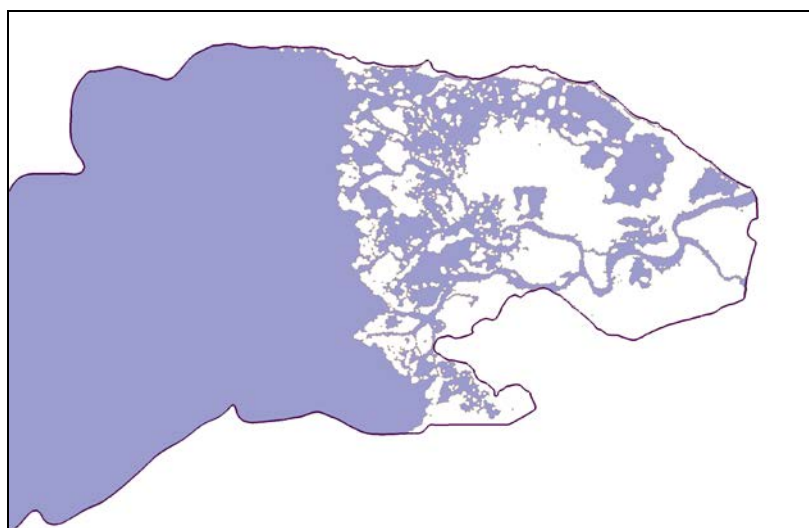


Рис. 6. Конфигурация дельты Дона 27 сентября 2014 г в 00:00.

Для количественной оценки изменения во времени площади затопления дельты Дона рассматривался интегральный показатель

$$FI(t) = \left(1 - \frac{S(t)}{S(0)}\right) \cdot 100\%, \text{ где } S(t) = \iint_{\Omega} \delta_d(x, y, t) dx dy, \quad \delta_d(x, y, t) = \begin{cases} 1, & H(x, y, t) \leq H_{\min} \\ 0, & H(x, y, t) > H_{\min} \end{cases}. \quad (11)$$

Здесь величина $S(t)$ – площадь суши в момент времени t ; $S(0)$ – площадь суши в начальный момент времени. H_{\min} – минимальная глубина в алгоритме затопления-осушения модели ADCIRC. Интегрирование проводится по области Ω , западная граница которой показана на рис. 1 вертикальной штриховой линией. Показатель FI дает в процентном выражении изменение во времени суммы площадей всех участков суши, которые входят в дельту. Если происходит осушение дна, то $S(t) > S(0)$ и показатель FI становится отрицательным.

На рис. 7 приведена зависимость показателя затопления дельты Дона от времени для периода 20–28 сентября 2015 г. Черная кривая – эксперимент E2, серая кривая – эксперимент E1. Как видно, с 20 по 23 сентября включительно в районе дельты преобладали стгонные процессы, что проявлялось в периодическом увеличении площади суши на 5–8%. Далее, после

смены направления ветра, началось резкое затопление дельты и в течение следующих суток площадь дельты сократилась примерно на 40%. После этого скорость затопления уменьшилась и в продолжении следующих двух суток площадь суши сократилась еще на 10%. Сопоставление кривых на рис. 7 показывает, что учет механизмов взаимодействия ускоряет процесс затопления и увеличивает площадь затопления дельты на 4 %.

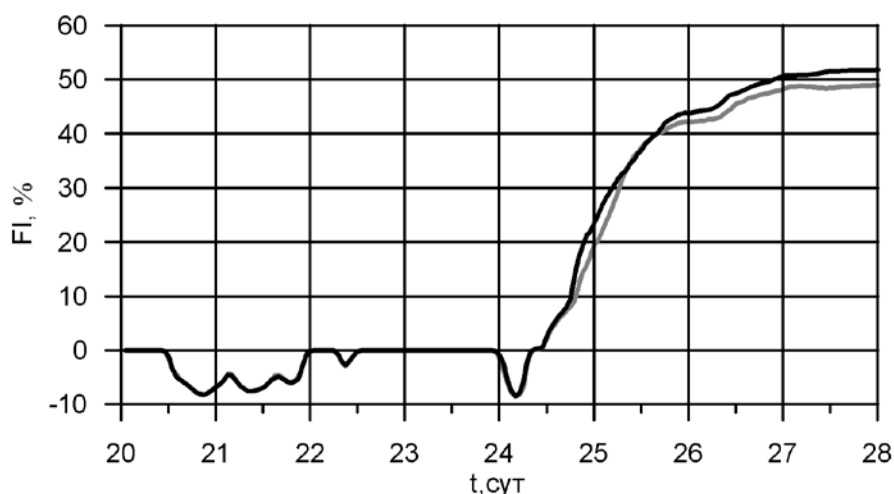


Рис. 7. Зависимость показателя затопления дельты Дона FI от времени для периода 20–28 сентября 2014 г.

Для оценки средних по области Ω значений SL , SWH , TSL использовался функционал вида

$$\bar{\psi}(t) = \frac{\iint_{\Omega} \psi(x, y, t) \cdot \delta_w(x, y, t) dx dy}{\iint_{\Omega} \delta_w(x, y, t) dx dy}, \text{ где } \delta_w(x, y, t) = \begin{cases} 0, & H(x, y, t) \leq H_{\min} \\ 1, & H(x, y, t) > H_{\min} \end{cases}. \quad (12)$$

На рис. 8 приведены зависимости \overline{SL} от времени для эксперимента E2 (черная кривая) и E1 (серая кривая). В эксперименте E2 значения \overline{SL} во всех точках на 5–6 см больше соответствующих максимумов SL в эксперименте E1. Таким образом, для рассматриваемой акватории вклад волновых напряжений в возвышение уровня моря незначителен, что вполне согласуется с классическими представлениями о малой величине волнового нагона в бассейнах с отмелым дном, каковым является Таганрогский залив.

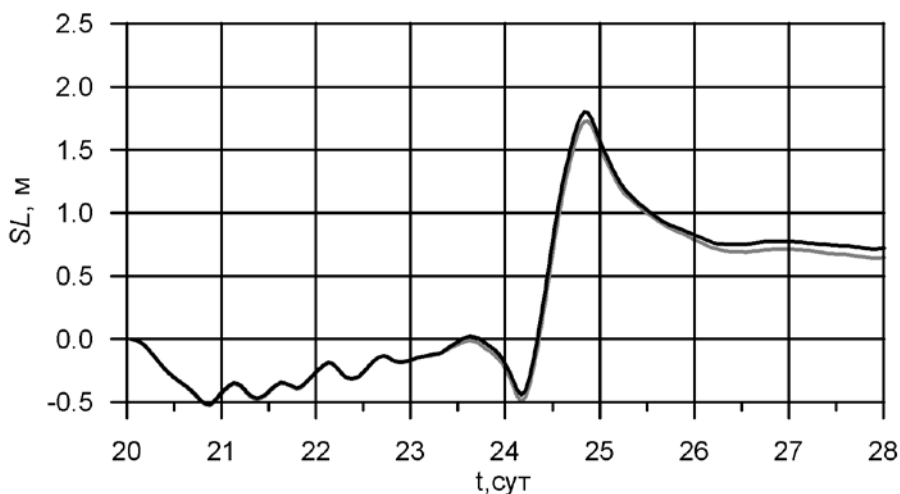


Рис. 8. Зависимость \overline{SL} (м) от времени для периода 20–28 сентября 2014 г.

На рис. 9 представлены зависимости \overline{SWH} от времени для экспериментов E2 (черная кривая) и E1 (серая кривая). Как видно, для штормового периода (24–25 сентября) эксперимент E2 дает более интенсивное ветровое волнение по сравнению с экспериментом E1. Максимум \overline{SWH} в эксперименте E2 на 35% больше соответствующего максимума в эксперименте E1. Для выяснения причины возникновения этого эффекта был выполнен дополнительный численный эксперимент (E3) в котором, в отличие от E2 в модели SWAN не учитывался уровень моря η . Зависимость \overline{SWH} от времени для эксперимента E3 показана штриховой кривой. Она практически совпадает с кривой для эксперимента E1.

Физический смысл этого результата вполне очевиден. Для Таганрогского залива типичны участки дна с глубинами ~ 2 м, где ветровое волнение не может быть значительным вследствие сильных диссипативных эффектов. В тоже время при подъемах уровня моря на 1,5–2 м и более динамические глубины здесь могут увеличиваться в 2 раза. Очевидно, что ветровые волны на глубинах 3–4 м будут иметь большие высоты по сравнению с ветровыми волнами на глубинах 2 м. Иными словами, штормовой нагон создает условия для интенсификации ветрового волнения в заливе вследствие общего подъема уровня моря.

Зависимость \overline{TSL} от времени для эксперимента E2 показана на рис. 10. Как видно, максимальное значение $\overline{TSL} = 2,25$ м достигается 24 сентября во второй половине дня. Это хорошо согласуется с измерениями на гидрометеорологической станции Таганрог, где максимальное повышение уровня наблюдалось 24 сентября в 18 ч и составило 2,5 м. Сравнение кривых на рис. 8 и 10 показывает, что в период максимального развития шторма вклад ветрового волнения в полный уровень достигает 20%.

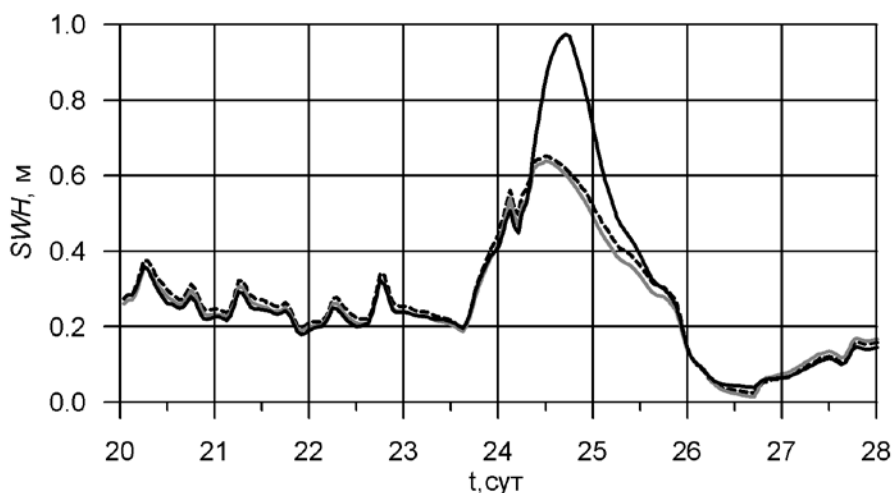


Рис. 9. Зависимость \overline{SWH} от времени для периода 20–28 сентября 2014 г.

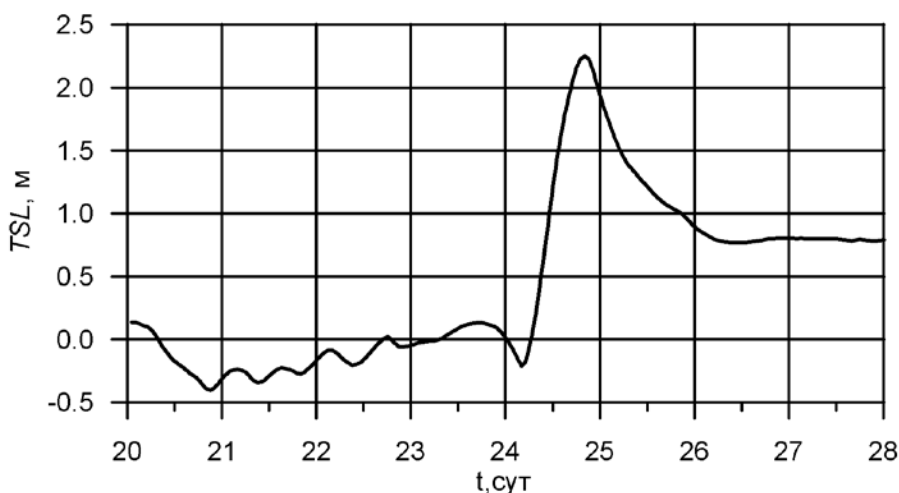


Рис.10. Зависимость \overline{TSL} от времени для периода 20–28 сентября 2014 г.

Заключение

С помощью совместной модели ADCIRC+SWAN выполнено численное моделирование колебаний уровня моря и ветрового волнения в Таганрогском заливе с учетом механизмов затопления и осушения. Расчеты проведены на неструктурированной сетке с высоким разрешением. В качестве форсинга использованы поля ветра и атмосферного давления для синоптической ситуации 20–28 сентября 2014 г из региональной атмосферной модели WRF.

Анализ результатов моделирования показал следующее. В период шторма наибольшему затоплению подвержены западная и северная части дельты Дона. Площадь затопления дельты превышает 50%. Учет взаимодействия штормового нагона и ветрового волнения ускоряет процесс затопления, увеличивает площадь затопления дельты и приводит к интенсификации ветрового волнения в вершине залива вследствие общего подъема уровня моря. Волновые напряжения не вносят заметного вклада в величину штормового нагона.

Представленная в работе совместная модель может быть адаптирована для задач оперативного прогноза штормовых нагонов и ветрового волнения в Азовском море, включая прогноз затопления прибрежных территорий.

Level and wind waves calculations in Taganrog Bay through use of coupling model

Fomin V.V.

The level and wind waves calculations in Taganrog Bay are carried out through the use of a coupling numerical model. The model is implemented on an unstructured mesh with high spatial resolution. The data of an atmospheric model that correspond to the extreme storm on September 24–25, 2014, are used as the forcing. It is shown that the western and northern parts of the Don delta are more flood prone. If the interaction of the storm surge and wind wave is taken into consideration, the area of the delta flooding is increased and the intensification of wind-generated waves in the bay takes place as a result of the general rise of the sea level.

Литература

1. Гидрометеорологические условия морей Украины: Т. 1. Азовское море / Ильин Ю.П., Фомин В.В., Дьяков Н.Н., Горбач С.Б. – Севастополь, 2009. – 401 с.
2. Матишов Г.Г. Керченский пролив и дельта Дона: безопасность коммуникаций и населения. – Вестник Южного научного центра РАН, 2015, Т. 11, № 1, с. 6 – 15.
3. Матишов Г.Г., Чикин А.Л., Бердников С.В., Шевердяев И.В., Клещенко А.В. Кириллова Е.Э. Экстремальное затопление дельты Дона весной 2013 г.: хронология, условия формирования и последствия. – Вестник Южного научного центра РАН, 2014, Т. 10, № 1, с. 17 – 24.
4. Филиппов Ю.Г. Л.П. Расчеты уровня в восточной части Таганрогского залива. – Труды ГОИН, 2014, Вып. 215, с. 136 – 143.
5. Фомин В.В., Полозок А.А. Технология моделирования штормовых нагонов и ветрового волнения в Азовском море на неструктурированных сетках. – Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа, 2013, Вып. 27, с. 39 – 145.
6. Booij N., Ris R.C., Holthuijsen L.H. A third-generation wave model for coastal regions. Model description and validation. – J. Geophys. Res., 1999, 104 (C4), pp. 7649 – 7666.
7. Dietrich J.C., Kolar R.L., Luettich R.A. Assessment of ADCIRC's Wetting and Drying Algorithm. – Proceedings of the XV International Conference on Computational Methods in Water Resources, 2004, vol. 2, pp. 1767 – 177.
8. Dietrich J.C., Zijlema M., Westerink J.J., Holthuijsen L.H., Dawson C., Luettich R.A., Jensen Jr.R., Smith J.M., Stelling G.S., Stone G.W. Modeling Hurricane Waves and Storm Surge using Integrally-Coupled, Scalable Computations. – Coastal Engineering, 2011, vol. 58, No. 1, pp. 45 – 65.

9. Fomin V.V., Polozok A.A., Kamyshnikov R.V. Wave and Storm Surge Modelling for Sea of Azov with use of ADCIRC+SWAN. – Collection of articles of the II International conference «Geoinformation Sciences and Environmental Development: New Approaches, Methods, Technologies», Rostov-on-Don, 2014, pp. 111 – 116.
10. Grant W.D., Madsen O.S. Movable bed roughness in unsteady oscillatory flow. – J. Geophys. Res., 1982, vol. 87, pp. 469 – 481.
11. Holthuijsen L.H. Waves in oceanic and coastal waters. Cambridge University Press: Cambridge, 2007, <http://www.cambridge.org/9780521860284>.
12. Kerr P.C., Martyr R.C., Donahue A.S., Hope M.E., Westerink J.J., Luettich R. A., Kennedy A.B., Dietrich J.C., Dawson C., Westerink H.J. U.S. IOOS coastal and ocean modeling testbed: Evaluation of tide, wave and hurricane surge response sensitivities to mesh resolution and friction in the Gulf of Mexico. – J. Geophys. Res. Oceans, 2013, 118, pp. 4633 – 4661, doi:10.1002/jgrc.20305.
13. Luettich R.A., Westerink J.J. Formulation and Numerical Implementation of the 2D/3D ADCIRC, 2004, URL: http://adcirc.org/adcirc_theory_2004_12_08.pdf.
14. 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. – Dredging Research Program Technical Report DRP-92-6, U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, 1992, 137 p.
15. Zijlema M. Computation of wind-wave spectra in coastal waters with SWAN on unstructured grids. – Coastal Engineering, 2010, vol. 57, No. 3, pp. 267 – 277.