

Математическая модель процесса затопления дельты Дона при экстремальных нагонах

А. Л. Чикин ¹ ✉, Л. Г. Чикина ²

¹ Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН,
Ростов-на-Дону, Россия

² Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия
✉ chikin1956@gmail.com

Поступила в редакцию 10.05.2023; одобрена после рецензирования 16.10.2023;
принята к публикации 15.11.2023.

Аннотация

Цель. Создана математическая модель для исследования процесса затопления дельты Дона при экстремальных нагонах.

Методы и результаты. Расчеты колебаний уровня в Таганрогском заливе основываются на решении системы уравнений для длинных волн в однородной несжимаемой жидкости в поле силы Кориолиса. Задача решается конечно-разностными методами на высокопроизводительных вычислительных системах. Приводится алгоритм определения области затопления дельты Дона в процессе нагона. Алгоритм основан на сравнении высот местности в дельте с величиной уровня воды и принятии решения о затоплении или осушении расчетной ячейки. Результаты расчета сравниваются со значениями уровня воды на гидропосте, а также выводятся в виде карто-схемы затопленной области.

Выводы. Предлагаемую модель следует применять в случае экстремальных нагонов, когда затопляется значительная часть дельтовой области. Данная модель позволяет достаточно точно рассчитывать гидродинамические параметры течения, в том числе величину перепада уровня воды. Предложенный алгоритм определения затопления или осушения расчетной области позволяет устанавливать места подтопления дельты Дона в зависимости от ветровой ситуации.

Ключевые слова: уравнения мелкой воды, сгонно-нагонные колебания, вычислительный эксперимент, затопление

Благодарности: публикация подготовлена в рамках реализации госзадания ЮНЦ РАН, № госрегистрации проекта 122011900153-9. Расчеты выполнены на кластере ЦКП Южного федерального университета «Высокопроизводительные вычисления».

Для цитирования: Чикин А. Л., Чикина Л. Г. Математическая модель процесса затопления дельты Дона при экстремальных нагонах // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40, № 1. С. 146–159. EDN GWGSLU.

Mathematical Model of a Flooding Process in the Don Delta during Extreme Surges

A. L. Chikin¹ ✉, L. G. Chikina²

¹ Federal Research Center Southern Scientific Center of Russian Academy of Sciences,
Rostov-on-Don, Russia

² South Federal University, Rostov-on-Don, Russia
✉ chikin1956@gmail.com

Abstract

Purpose. The work consists in developing a mathematical model to study the flooding processes in the Don delta during extreme surges.

Methods and Results. The level fluctuations in the Taganrog Bay are calculated based on solving a system of equations for long waves in a homogeneous incompressible fluid in the Coriolis force field. The problem is solved by the finite-difference methods at the high-performance computing systems. The algorithm for determining the area of the Don delta flooding in the process of a surge is given. It is based on comparing the heights of the delta area to the water level and on taking a decision whether to flood or drain a computational cell. The calculation results are compared to the water level values observed at the gauging station, and are also displayed as a map diagram of the flooded area.

Conclusions. The proposed model should be applied in case of the extreme surges when a significant delta area is flooded. The model makes it possible to calculate accurately the hydrodynamic parameters of a flow including the magnitude of water level difference. The proposed algorithm determining whether flooding or draining is required for a computational domain, permits to reveal the areas in the Don delta where flooding depends on the wind conditions.

Keywords: shallow water equations, surge oscillations, computational experiment, flooding

Acknowledgements: The paper was prepared within the framework of state assignment of the Southern Scientific Center of RAS, state registration number of the project is 122011900153-9. The calculations were performed at the cluster in CCU “High-Performance Computing” of the Southern Federal University.

For citation: Chikin, A.L. and Chikina, L.G., 2024. Mathematical Model of a Flooding Process in the Don Delta during Extreme Surges. *Physical Oceanography*, 31(1), pp. 135-147.

Введение

Сгонно-нагонные колебания уровня воды в Дону существенно проявляются в его устьевой области, которая простирается от условной линии, соединяющей Должанскую и Белосарайскую косы в Таганрогском заливе, на западе, до станицы Раздорской на востоке¹ [1]. В последнее время участились катастрофические наводнения в Таганрогском заливе и дельте Дона, что обуславливается экстремальной активностью черноморских циклонов [2–4]. Анализ экстремальных природных явлений (заток соленых трансформированных черноморских вод в дельту р. Дон, вторжение льда из Азовского моря в Керченский пролив и др.), наблюдавшихся в акватории Азовского моря в последние годы, представлен в статье [5]. В ней обсуждаются проблемы, связанные с безопасностью населения, которые возникают при сгонно-нагонных процессах в дельте реки Дон.

¹ Симов В. Г. Гидрология устьев рек Азовского моря. Москва : Гидрометеиздат, 1989. 326 с.
МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 40 № 1 2024

В конце марта 2013 г. в результате сильного штормового нагона значительная территория в дельте Дона чрезвычайно быстро была затоплена водой, в 21 населенном пункте более 2 тыс. домовладений и свыше 5 тыс. человек пострадали от наводнения. Материальные потери для населения и экономики региона оцениваются суммой более 500 млн руб. Значительный ущерб был нанесен и научно-экспедиционной базе Южного научного центра РАН, расположенной на берегу Свиного гирла. По предварительным оценкам зона затопления в низовье Дона составляла 40 км в ширину и 50 км в длину (вверх по Дону до Аксая).

Опасные для дельты реки Дон подъемы уровня могут быть вызваны полями ветра над морем со значительными величинами градиента давления и скорости ветра (10–15 м/с и более). Особенно опасны юго-западные ветры над всем Азовским морем, вызывающие наибольший подъем уровня в Таганрогском заливе и дельте реки Дон [3].

Одним из способов объективного анализа возникающих в природе проблем являются методы, основанные на построении и изучении математических моделей природных систем.

Расчету колебаний уровня воды в русле Дона посвящено немало работ. В работе ² расчет уровней свободной поверхности для основного русла Дона предлагается вести по формуле, где искомый нагон в заданном сечении зависит от нагона у Азова. Данная методика дает удовлетворительные результаты только в годы, когда расход воды в реке Дон близок к норме.

По данным наблюдений стандартной гидрометеорологической сети исследованы нагонные и сгонные явления в устьевой области Дона, а также составлен каталог максимальных годовых и опасных нагонов и сгонов по пунктам наблюдений на устьевом взморье и устьевом участке Дона с начала периода наблюдений по 2014 г. Выявлена возможность прогноза сгонов и нагонов по синоптической ситуации над Азовским морем с заблаговременностью в три суток с помощью гидродинамических моделей, что позволило создать прогнозную схему расчета трансформации нагонов и сгонов [6, 7].

Робастная система прогнозирования прибрежно-речных затоплений представлена в [8]. Методика объединяет статистические и гидродинамические модели для определения вероятности наводнений, вызванных множественными факторами. Метод включает анализ экстремальных значений, оценку зависимостей и взаимодействий между факторами наводнения, многомерное совместное определение вероятности с учетом зависимостей, гидродинамическое моделирование сценариев наводнения, полученных на основе многомерного статистического анализа, и, в конечном итоге, картирование наводнения [8].

Появилось много работ, в которых для моделирования наводнений используются нейронные сети и методы машинного обучения [9]. Выявлению подверженных наводнениям участков в городской среде с использованием нейронных сетей посвящена работа [10]. Такие модели можно использовать для картирования подверженным наводнениям городских районов, для которых гидравлические модели не подходят из-за нехватки данных. Кроме того,

² Михайлов В. Н., Rogov M. M., Чистяков А. А. Речные дельты: Гидролого-морфологические процессы. Ленинград : Гидрометеиздат, 1986. 280 с.

объединение искусственных нейронных сетей и гидродинамической модели *HEC-RAS* позволяет определять гидродинамические параметры течений, а также картировать наводнения в руслах [11, 12]. Для обучения и тестирования модели используются данные метеорологических станций, а также индекс топографической влажности.

На основании анализа данных наблюдений и результатов моделирования в работах [13, 14] исследованы величины штормовых сгонно-нагонных колебаний уровня Азовского моря, приводящие к экстремальным наводнениям в прибрежных районах Азовского моря и Таганрогского залива, когда атмосферные циклоны становятся эффективными генераторами значительных повышений уровня моря.

В работе [15] «исследованы сгонно-нагонные колебания уровня Азовского моря, возникающие во время длительных атмосферных воздействий одного типа и являющиеся причиной наводнений/осушений в прибрежных районах. На основе анализа результатов трехмерной гидродинамической модели *Princeton Ocean Model* созданы пространственные карты и справочные массивы данных протяженности затопления/осушения побережья Азовского моря» [15, с. 185]. Области затопления рассматриваются с плоским дном постоянного наклона. Предполагается, что в зоне затопления отсутствуют каналы, ерики и овраги.

Геометрический подход к моделированию зон затопления с использованием электронных векторных карт территорий приводится в [16]. Рассматривается один из промежуточных этапов формирования вспомогательных картографических данных на основе использования псевдопостов, а также демонстрируется фрагмент карты с зоной затопления в 2D-виде.

Численному исследованию процесса затопления поймы Нижнего Дона в результате высоких половодий посвящена работа [17]. Данная модель основана на двумерных дифференциальных уравнениях Сен-Венана с использованием цифровых 3D-моделей рельефа. Кроме того, подобная модель использовалась для уточнения гидродинамических зависимостей водотока и оценки влияния преобразования поймы реки Дон [18].

Многолетние наблюдения показали, что затопление дельты Дона происходит не столько из-за половодий, сколько в результате экстремальных нагонов воды из Таганрогского залива под действием ветров западных направлений. Целью представленной работы является численное исследование именно этого явления. Использование математической модели, основанной на уравнениях движения несжимаемой жидкости, позволяет получать картины дельты Дона в процессе ее затопления. При этом используется цифровая модель рельефа дельты с учетом рукавов, ериков и протоков.

Материалы и методы

Вниз по течению после Ростова-на-Дону русло Дона разделяется на протоки и рукава. Дельта Дона характеризуется пересеченными прирусловыми рукавами и многочисленными ериками, где дельтовые острова поднимаются невысоко над уровнем воды. С учетом указанных особенностей предлагаемая модель применяется в случае экстремальных нагонов, т. е. когда затопляется вся пойма и необходимо применять двухмерные уравнения движения воды.

В случае, когда повышение уровня воды происходит только в рукавах Дона, надо рассматривать модель, содержащую уравнения движения воды в открытом русле.

Математическое моделирование гидрофизических процессов в дельтовой области Дона проводилось по классической схеме:

- выражение в математической форме важнейших связей и законов, присущих изучаемому природному объекту (водоему);
- разработка алгоритмов для реализации модели на современной ЭВМ;
- создание и отладка программного обеспечения, необходимого для проведения большого числа расчетов и реализующего выбранные математические модели и алгоритмы на высокопроизводительных вычислительных системах;
- установление адекватности построенной модели исходному объекту;
- проведение вычислительных экспериментов, которые позволяют получить все требуемые качественные и количественные свойства и характеристики объекта ³.

Расчеты колебаний уровня в Таганрогском заливе основываются на решении системы уравнений для длинных волн в однородной несжимаемой жидкости в поле силы Кориолиса [19]

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - \Omega v &= -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{H} - \frac{\tau_{bx}}{H}, \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \Omega u &= -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{H} - \frac{\tau_{by}}{H}, \\ \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial(Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(Hv)}{\partial y} &= 0,\end{aligned}$$

где $H = h + \zeta$; $h = h(x, y)$ – глубина водоема; $u = u(x, y, t)$, $v = v(x, y, t)$ – скорости; τ_{sx}, τ_{sy} – проекции на оси OX и OY силы трения ветра о поверхность воды; τ_{bx}, τ_{by} – проекции на оси OX и OY силы трения жидкости о дно. Эти величины зависят от скорости ветра $\bar{W}_B = \{W_x; W_y\}$ и течения $\bar{W}_T = \{u; v\}$ и определяются так [20]:

$$\bar{\tau}_s = \gamma |\bar{W}_B| |\bar{W}_B|, \quad \bar{\tau}_b = \beta |\bar{W}_T| |\bar{W}_T|,$$

где $|\bar{W}_B| = \sqrt{W_x^2 + W_y^2}$, $|\bar{W}_T| = \sqrt{u^2 + v^2}$, $\beta(x, y)$ – коэффициент трения жидкости о дно; γ – коэффициент трения ветра о свободную поверхность воды.

На твердой границе $\partial\Omega_b$ задаются условия скольжения:

³ Чикин А. Л. Разработка и реализация двухслойной математической модели гидрофизических процессов в водоемах с обширными районами мелководья на высокопроизводительных вычислительных системах : диссертация ... доктора физико-математических наук. Москва, 2009. 233 с.

$$\mathbf{V}_n|_{\partial\Omega_b} = 0, \quad \left. \frac{\partial \mathbf{V}_\tau}{\partial \bar{n}} \right|_{\partial\Omega_b} = 0,$$

а в местах втекания или вытекания воды $\partial\Omega_r$ задаются соответствующие значения скоростей:

$$u|_{\partial\Omega_r} = u_1, v|_{\partial\Omega_r} = v_1,$$

где $\mathbf{V}_n$ – нормальная составляющая вектора скорости; $\mathbf{V}_\tau$ – касательная составляющая вектора скорости.

В качестве начальных данных можно задавать какое-либо известное распределение скоростей:

$$u = u^0, v = v^0, \zeta = \zeta^0 -$$

или считать эти скорости нулевыми.

Алгоритм изменения береговой линии в результате/вследствие осушения или затопления области расчета довольно простой и основан на определении принадлежности расчетных ячеек к суше или к воде.

На акваториальной поверхности исследуемого водоема вместе с предполагаемой областью затопления строится равномерная по каждому направлению двумерная прямоугольная сетка с шагами h_1 и h_2 . В узлы плоской прямоугольной разностной сетки, покрывающей акваторию, заносятся значения глубин, а в узлы сетки, покрывающей предполагаемую область затопления, заносятся значения высот.

С учетом значения глубин в узлах плоской сетки определяются ячейки, находящиеся в воде или на суше. Логический массив $KG0$, характеризующий тип ячеек («вода», «суша»), задает первоначальную конфигурацию всей расчетной области и не изменяется до конца расчета.

В процессе расчета некоторые ячейки с малой глубиной могут осушаться в силу сгонного явления и переходить в разряд «суша». Это происходит в том случае, если величина $H + \zeta$ перестает быть положительной. Ячейки, перешедшие в разряд «суша», в силу сгонного явления могут возвращаться в разряд «вода». В разряд «вода» могут также попадать ячейки «суша» в предполагаемой области затопления. Это происходит в случае, если наблюдается повышение уровня воды и средняя по соседним ячейкам глубина не меньше устанавливаемого критического значения h_{cr} . Значение глубины в текущей ячейке задается с учетом закона сохранения массы. Логический массив KG может изменяться в процессе расчета и характеризует тип ячеек («вода», «суша»), которые могут осушаться или затопляться.

На рис. 1 представлена блок-схема алгоритма определения береговой линии водоема в случае сгонно-нагонных явлений. Алгоритм основан на определении глубины водоема в зависимости от значения перепада уровня водной поверхности. При переборе всех расчетных ячеек по значениям логической переменной $KG0$ сразу отбрасываются те, что заведомо не входят в расчетную область ($KG0 = false$). Затем по переменной KG определяется, какой процесс в ячейке идет: осушение, затопление или с ячейкой ничего не происходит.



Р и с. 1. Блок-схема алгоритма расчета области затопления и осушения ⁴

F i g. 1. Block diagram of the algorithm for calculating the area of flooding and drainage ⁴

Если ячейка находилась в водоеме ($KG = true$), то в случае $H + \zeta \leq 0$ эта ячейка переходит в разряд «суша», а переменная KG принимает значение *false*. В противном случае осушение в данной ячейке не происходит.

Если ячейка, находящаяся в области расчета ($KG0 = true$), и в данный момент является сушей ($KG = false$), то возможно ее затопление. Это произойдет, если $\zeta_m + H \geq h_{cr}$, где ζ_m – среднее по соседним ячейкам значение перепада уровня воды. В этом случае ячейка переходит в разряд «вода», а переменная KG принимает значение *true* ⁴.

Во всех случаях изменения характера разностных ячеек необходимо проводить переиндексацию всей расчетной области. При индексации надо учитывать тот факт, что ширина ленты в матрице, полученной после аппроксимации

⁴ Чикин А. Л., Чикина Л. Г. Численное исследование затопления дельты Дона при нагонах // Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и промышленных вызовов («Опасные явления - III»): материалы III Международной научной конференции памяти члена-корреспондента РАН Д. Г. Матишова, Ростов-на-Дону, 15–19 июня 2021 года. Ростов-на-Дону: ЮНЦ РАН, 2021. С. 142–145. EDN GKHHGN.

системы линейных алгебраических уравнений, зависит от порядка перебора индексов. Для сужения ленты необходимо начинать перебор узлов с индекса, соответствующего самой малой размерности области расчета, и заканчивать индексом, соответствующим самой большой размерности.

Задача решается конечно-разностными методами. Алгоритм вычисления параметров течения воды на $(n + 1)$ -ом временном слое основан на том принципе, что каждое уравнение является «определяющим» для своего неизвестного. Все остальные переменные считаются известными и берутся с n -го слоя.

Первый шаг: перепад уровня на $(n + 1)$ -м временном слое вычисляется по схеме

$$\frac{\zeta_{i,j}^{n+1} - \zeta_{i,j}^n}{\Delta t} = - \left[\frac{u_{i+1,j} \frac{f_{i,j} + f_{i+1,j}}{2} - u_{i,j} \frac{f_{i-1,j} + f_{i,j}}{2}}{\Delta x} + \frac{v_{i,j} \frac{f_{i,j} + f_{i,j+1}}{2} - v_{i,j-1} \frac{f_{i,j-1} + f_{i,j}}{2}}{\Delta y} \right]^n,$$

где $f_{ij} = H_{ij} + \zeta_{ij}$.

Второй шаг: значения компонентов скорости u и v находятся из разностных уравнений количества движения⁵

$$\begin{aligned} & \frac{u_{s_{i,j}}^{n+1} - u_{s_{i,j}}^n}{\tau} + \frac{u_{s_{i,j}}^n + |u_{s_{i,j}}^n|}{2} \frac{u_{s_{i,j}}^{n+1} - u_{s_{i-1,j}}^{n+1}}{h_1} + \frac{u_{s_{i,j}}^n - |u_{s_{i,j}}^n|}{2} \frac{u_{s_{i+1,j}}^{n+1} - u_{s_{i,j}}^{n+1}}{h_1} + \\ & + \frac{v_{s_{i,j}}^n + |v_{s_{i,j}}^n|}{2} \frac{u_{s_{i,j}}^{n+1} - u_{s_{i,j-1}}^{n+1}}{h_2} + \frac{v_{s_{i,j}}^n - |v_{s_{i,j}}^n|}{2} \frac{u_{s_{i,j+1}}^{n+1} - u_{s_{i,j}}^{n+1}}{h_2} - \Omega \tilde{v}_{s_{i,j}} = \\ & = -g \frac{\zeta_{i,j}^n - \zeta_{i-1,j}^n}{h_1} + \left(\frac{\tau_{sx}}{H_{ij}} - \frac{\tau_{bx}}{H_{ij}} \right) \Big|_{i,j}^n, \end{aligned}$$

$$\tilde{v}_{s_{i,j}} = \frac{1}{4} \left(v_{s_{i,j}}^n + v_{s_{i-1,j}}^n + v_{s_{i-1,j-1}}^n + v_{s_{i,j-1}}^n \right).$$

$$\begin{aligned} & \frac{v_{s_{i,j}}^{n+1} - v_{s_{i,j}}^n}{\tau} + \frac{v_{s_{i,j}}^n + |v_{s_{i,j}}^n|}{2} \frac{v_{s_{i,j}}^{n+1} - v_{s_{i-1,j}}^{n+1}}{h_1} + \frac{v_{s_{i,j}}^n - |v_{s_{i,j}}^n|}{2} \frac{v_{s_{i+1,j}}^{n+1} - v_{s_{i,j}}^{n+1}}{h_1} + \\ & + \frac{v_{s_{i,j}}^n + |v_{s_{i,j}}^n|}{2} \frac{v_{s_{i,j}}^{n+1} - v_{s_{i,j-1}}^{n+1}}{h_2} + \frac{v_{s_{i,j}}^n - |v_{s_{i,j}}^n|}{2} \frac{v_{s_{i,j+1}}^{n+1} - v_{s_{i,j}}^{n+1}}{h_2} - \Omega \tilde{u}_{s_{i,j}} = \\ & = -g \frac{\zeta_{i,j+1}^n - \zeta_{i,j}^n}{h_2} + \left(\frac{\tau_{sx}}{H_{ij}} - \frac{\tau_{bx}}{H_{ij}} \right) \Big|_{i,j}^n, \end{aligned}$$

⁵ Чикин А. Л. Двухслойная математическая модель ветровых течений в водоемах, имеющих большие площади мелководья // Математическое моделирование. 2009. Т. 21, № 12. С. 152–160. EDN RXPIJH.

$$\tilde{u}_{s_{i,j}} = \frac{1}{4} \left(u_{s_{i,j}}^n + u_{s_{i+1,j}}^n + u_{s_{i,j+1}}^n + u_{s_{i+1,j+1}}^n \right).$$

Затем эти шаги повторяются на новом временном слое, пока не будет выполняться условие окончания счета. Таким условием может быть определенный промежуток времени (в часах, сутках и т. д.), в течение которого надо проводить расчет.

Аналитическое исследование на устойчивость представленного алгоритма не проводилось, однако проведенные численные исследования показали, что устойчивый счет наблюдается при временном шаге $\tau \leq 120$ с.

Программа написана на языке *FORTRAN*, численная реализация модели осуществлялась на высокопроизводительных вычислительных системах в среде *MPI* с использованием пакета параллельных подпрограмм *Aztec*.

Результаты расчетов и обсуждение

В исследуемой области, включающей в себя Азовское море, Таганрогский залив, а также дельту Дона, была построена сетка глубин и высот в Балтийской системе высот. Шаг сетки составлял $\Delta x = 660$ м, $\Delta y = 685$ м с числом узлов 550×342 , что дало порядка 190000 ячеек. После индексации число ячеек в расчетной области с неизвестными параметрами гидродинамики стало примерно 84000.

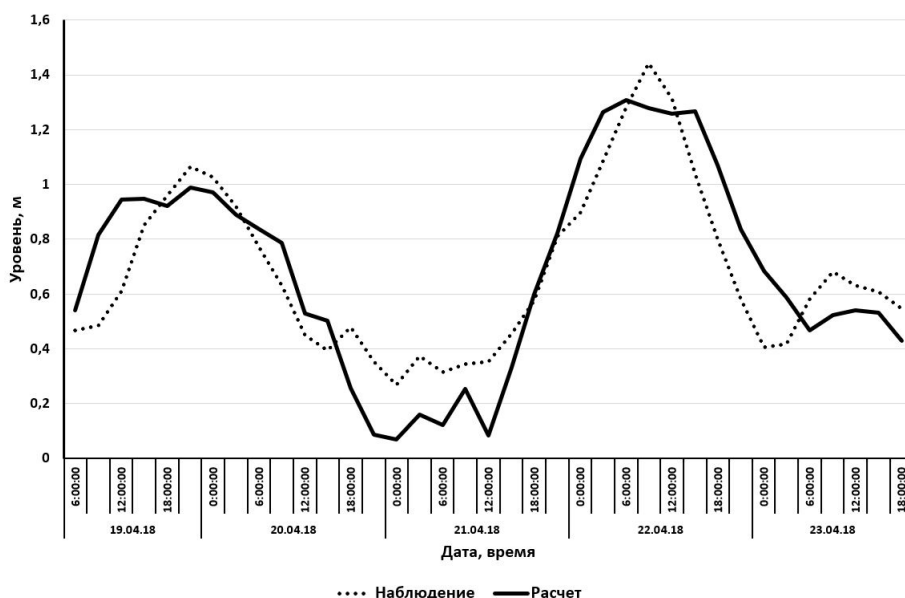
Верификация модели проводилась как численным сравнением расчетных и измеренных значений уровня воды на наблюдательных пунктах, так и визуальным сравнением расчетной и реально затопленной площади дельты Дона. Значения уровня воды снимались на гидропосте в хуторе Донском, расположенном в рукаве Старый Дон. Были рассмотрены ветровые ситуации при нагонах в сентябре 2014 г. и в апреле 2018 г.

При визуализации области затопления была построена более мелкая сетка с разрешением 100 м в дельте Дона, на которую были перенесены результаты расчета уровня воды. Это позволило более четко отобразить ландшафт затопляемой области. Использование этой сетки при расчетах потребовало бы примерно в 50 раз больше машинных ресурсов и времени счета, поэтому расчеты проводились на более грубой сетке.

В начале периода с 19.04.2018 по 23.04.2018 дул ветер западных направлений скоростью 9–11 м/с. Затем он сменил направление на северное и ослабел до 4–6 м/с, но потом снова усилился до 11–13 м/с и стал юго-западным. Это привело к повторному увеличению нагона. На рис. 2 приведены расчетные и измеренные колебания уровня воды на гидропосту Донской с 19.04.2018 по 23.04.2018. Сравнение измеренных и расчетных значений уровня воды в хуторе Донском показало, что погрешность расчетов составляет 23 %.

В двадцатых числах сентября 2014 г. ветровая ситуация сложилась таким образом, что 23.09.2014 дул ветер восточных направлений скоростью 3–4 м/с, что привело к некоторому сгону воды в Таганрогском заливе. Затем направление ветра резко изменилось на юго-западное, и стал дуть ветер скоростью 2–

24 м/с, что привело к экстремальному нагону воды в дельту Дона. Во время экстремального нагона воды 24–25 сентября 2014 г. были зафиксированы не только колебания уровня воды, но и затопленная площадь в дельте Дона, что дало возможность визуально сравнить реальную и расчетную картины затопления. Во время этого нагона наблюдалась также необычайно высокая соленость в районе Азовского порта (5,6 ‰) [21].

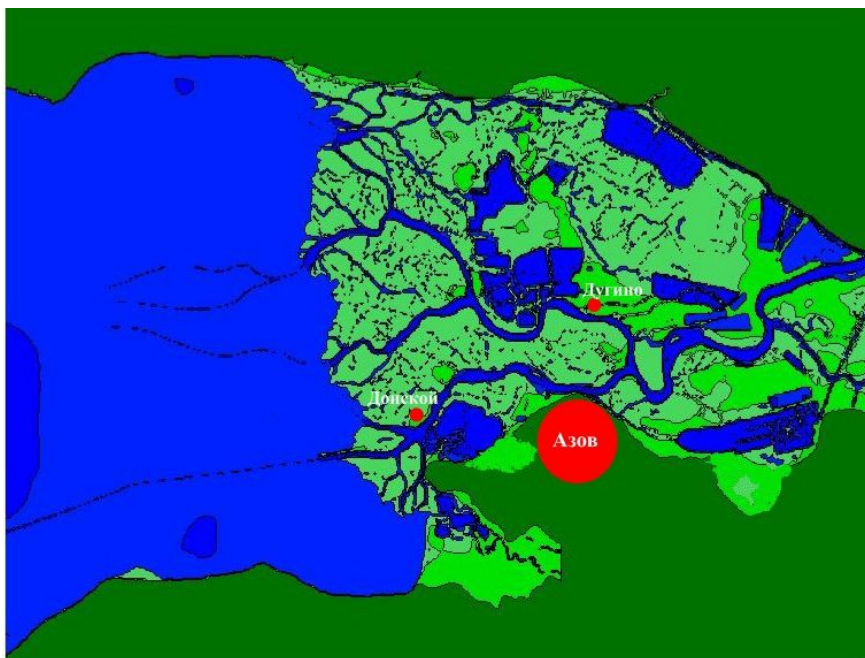


Р и с. 2. Уровень воды в Донском в период с 19.04.2018 по 23.04.2018

F i g. 2. Changes of water level in the Donskoy from 19.04.2018 to 23.04.2018

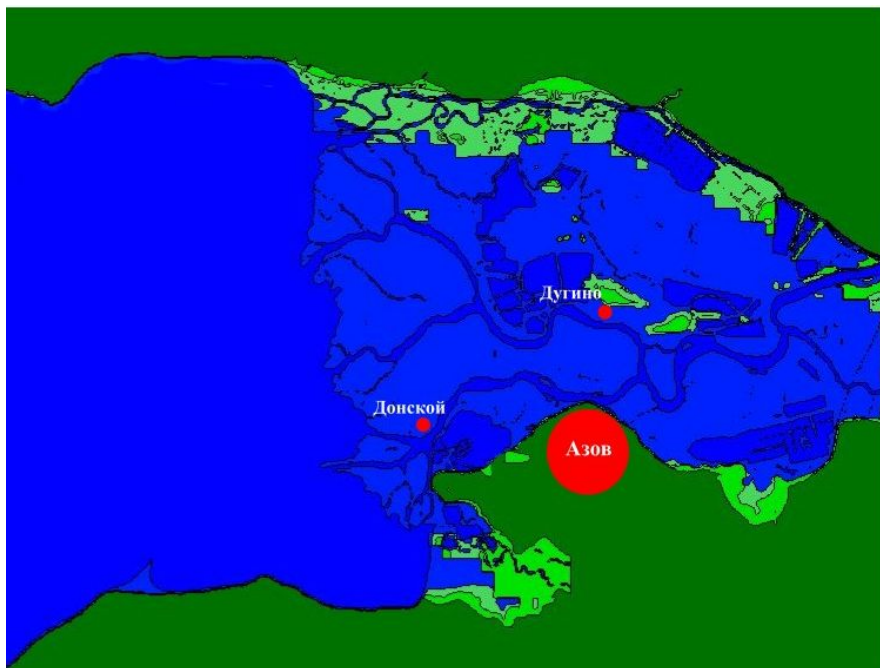
На рис. 3 показана дельтовая область Дона в исходном состоянии, когда колебания уровня воды незначительны. Синим цветом выделена водная поверхность, включая рукава Дона и рыбоводческие пруды, светло-зеленым цветом выделена область с возможным затоплением. На рис. 4 показана эта же область в момент максимального подъема уровня воды 18:00 24.09.2014. Погрешность расчетов уровня вода в хуторе Донском составила 17 %.

Специалистом Южного научного центра А. Ю. Московцом была отслежена зона подтопления в дельтовой области Дона. Реальная картина подтопления представлена на рис. 5. Штриховкой указаны затопленные зоны. Красным контуром выделены незатопленные места дельты. Зона затопления, полученная в результате моделирования нагона, достаточно хорошо согласуется с реальной картиной в указанной области, хотя количественная оценка различий между смоделированной картиной и реальной не проводилась. Существующие различия в затопленных областях объясняются тем, что расчеты проводились на достаточно грубой сетке, а на мелкую сетку результаты счета переносились только для визуализации.



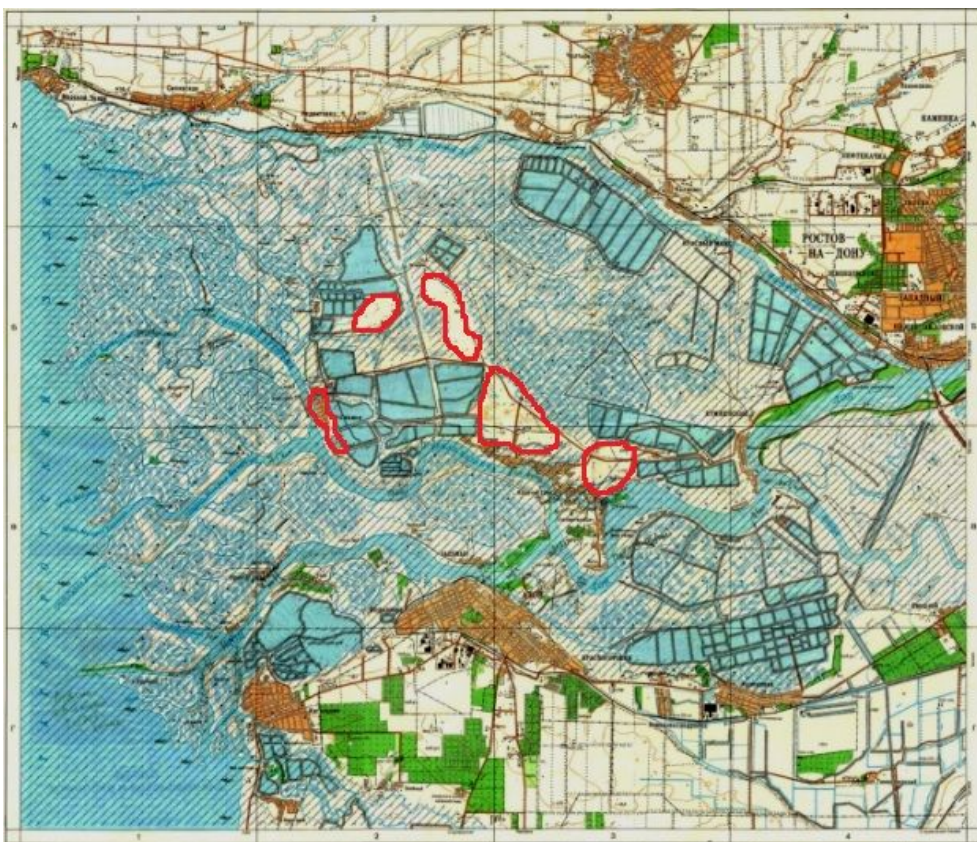
Р и с. 3. Дельтовая область Дона в начале нагона 24 сентября 2014 г.

Fig. 3. Region of the Don delta at the beginning of the surge on September 24, 2014



Р и с. 4. Дельтовая область Дона в момент максимального подъема уровня воды 24 сентября 2014 г.

Fig. 4. Region of the Don delta at the time of the water level maximum rise on September 24, 2014



Р и с. 5. Схема зоны подтопления дельты р. Дон 24.09.2014 (выделена штриховкой). Выполнил А. Ю. Московец

F i g. 5. Scheme of the flooded zone of the river Don delta on 24.09.2014 (highlighted by hatching) performed by A. Yu. Moskovets

Выводы

Предлагаемую модель следует использовать в случае экстремальных нагонов, когда уровень воды в рукавах Дона поднимается настолько, что затопливает всю дельтовую область. В этом случае уместно применение двухмерных уравнений гидродинамики. В случае небольших колебаний уровня воды в Таганрогском заливе течение воды в русле Дона определяется уравнениями для русловых потоков.

Расчеты показали: данная модель позволяет достаточно точно рассчитывать гидродинамические параметры ветрового течения, в том числе величину перепада уровня воды. Предложенный алгоритм определения затопления или осушения расчетной области позволяет устанавливать места подтопления дельты Дона в зависимости от ветровой ситуации. Сравнение измеренных значений уровня воды на гидропосте с расчетными значениями говорит о соответствии предложенной гидродинамической модели и алгоритма определения зон затопления при экстремальных нагонах воды в Таганрогском заливе реальной картине затопления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мишин Д. В., Полонский В. Ф. Исследование нестационарных водных потоков в неприливном устье реки Дон // Труды государственного океанографического института. 2013. № 214. С. 166–179. EDN RUQHGD.
2. Закономерности экосистемных процессов в Азовском море / Г. Г. Матишов [и др.]. Москва : Наука, 2006. 304 с. EDN RXMJY.
3. Экстремальное наводнение в дельте Дона (23–24 марта 2013 г.) и факторы, его определяющие / Г. Г. Матишов [и др.] // Доклады Академии наук. 2014. Т. 455, № 3. С. 342–345. EDN RXFPZT. doi:10.7868/S0869565214090229
4. Экстремальное затопление дельты Дона весной 2013 г.: хронология, условия формирования и последствия / Г. Г. Матишов [и др.] // Вестник Южного научного центра РАН. 2014. Т. 10, № 1. С. 17–24. EDN SAUKPB.
5. Матишов, Г. Г. Керченский пролив и дельта Дона: безопасность коммуникаций и населения // Вестник Южного научного центра РАН. 2015. Т. 11, № 1. С. 6–15. EDN TNRQTZ.
6. Вишневская И. А., Остроумова Л. П. Опасные (сгонно-нагонные) явления в устьевой области реки Дон // Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и индустриальных вызовов («Опасные явления») : материалы Международной научной конференции. Ростов н/Д : Издательство ЮНЦ РАН, 2019. С. 28–32. EDN BTNOIS.
7. Остроумова Л. П. Исследование нагонных и сгонных явлений в морских устьях рек на примере устьевой области р. Дон // Метеорология и гидрология. 2017. № 12. С. 69–82. EDN ZXOTRB.
8. Combined statistical and hydrodynamic modelling of compound flooding in coastal areas – Methodology and application / A. I. Olbert [et al.] // Journal of Hydrology. 2023. Vol. 620, part A. 129383. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129383>
9. Flood hydrograph prediction using machine learning methods / G. Tayfur [et al.] // Water. 2018. Vol. 10, iss. 8. 968. doi:10.3390/w10080968
10. Urban flood modeling using deep-learning approaches in Seoul, South Korea / X. Lei [et al.] // Journal of Hydrology. 2021. Vol. 601. 126684. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126684>
11. Tamiru H., Dinka M. O. Application of ANN and HEC-RAS model for flood inundation mapping in lower Baro Akobo River Basin, Ethiopia // Journal of Hydrology: Regional Studies. 2021. Vol. 36. 100855. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100855>
12. Tawfik A. M. River flood routing using artificial neural networks // Ain Shams Engineering Journal. 2023. Vol. 14, iss. 3. 101904. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101904>
13. Полозок А. А., Фомин В. В., Лемешко Е. Е. Пространственные характеристики штормовых нагонов в Азовском море при разных фазах движения циклона // Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и индустриальных вызовов («Опасные явления – II») : материалы II Международной научной конференции памяти члена-корреспондента РАН Д. Г. Матишова (г. Ростов-на-Дону, 6–10 июля 2020 г.). Ростов-на-Дону : Изд-во ЮНЦ РАН, 2020. С. 63–67. EDN TCDOZA.
14. Численное исследование сгонно-нагонных процессов и течений Азовского моря в период экстремальных ветров / Л. В. Черкесов [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2017. № 5. С. 3–20. EDN ZQKYXV. doi:10.22449/0233-7584-2017-5-3-20
15. Шульга Т. Я., Матузаева О. В. Численный прогноз протяженности затоплений/осушений побережья Азовского моря при сгонно-нагонных ветрах // Водные ресурсы: изучение и управление (школа-практика). Материалы VI Международной конференции молодых ученых, 1–5 сентября 2020 г., Петрозаводск / Отв. ред. Н. Е. Галахина, А. В. Толстиков, Т. И. Регеранд. Петрозаводск : КарНЦ РАН, 2020. С. 185–189. EDN GVTSA.

16. *Сиразетдинова Д. Д., Клеин А. Н., Абдуллин А. Х.* Моделирование затопления территорий с использованием ArcGIS Pro // Информационные технологии. Проблемы и решения : материалы Международной научно-практической конференции. Уфа : Изд-во УГНТУ, 2017. Т. 1(4). С. 195–199. EDN YREPBD.
17. Оценка изменения уровней затопления поймы Нижнего Дона под влиянием хозяйственной деятельности. Ретроспективное гидродинамическое моделирование / В. В. Беликов [и др.] // Водные ресурсы. 2022. Т. 49, № 6. С. 681–690. EDN NOSVNK. doi:10.31857/S0321059622060025
18. Исследование влияния на гидрологический режим хозяйственной деятельности человека в пойменной части реки Дон у г. Ростов-на-Дону / А. В. Глотко [и др.] // Сборник докладов международной научной конференции памяти выдающегося русского ученого Юрия Борисовича Виноградова «Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология: от познания к мировоззрению, Санкт-Петербург, 2020 год / Под ред. О. М. Макарьевой, А. А. Землянской. СПб. : Изд-во ВВМ, 2020. С. 584–588. EDN WHRTYL.
19. *Филиппов Ю. Г.* Расчеты уровня в восточной части Таганрогского залива // Труды Государственного океанографического института. Москва, 2014. Вып. 215. С. 136–143. EDN XEBAFB.
20. *Филиппов Ю. Г.* Об одном способе расчета морских течений // Труды Государственного океанографического института. Москва, 1970. Вып. 103. С. 87–94.
21. *Чикин А. Л., Клеценков А. В., Чикина Л. Г.* Моделирование изменения солёности в Таганрогском заливе при штормовых нагонах // Водные ресурсы. 2019. Т. 46, № 6. С. 592–597. EDN NTVFSG. doi:10.31857/S0321-0596466592-597

Об авторах:

Чикин Алексей Львович, главный научный сотрудник, ЮНЦ РАН (344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41), доктор физико-математических наук, **SPIN-код: 3845-9760**, **ORCID: 0000-0002-4065-010X**, **Scopus Author ID: 8240627300**, chikin1956@gmail.com

Чикина Любовь Григорьевна, профессор, ЮФУ (344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, 105), доктор физико-математических наук, **SPIN-код: 4295-3950**, **ORCID: 0000-0002-2935-5839**, **Scopus Author ID: 6506085787**, lchikina@sfnedu.ru