

УДК 532.543.2:556
DOI: 10.7868/S25000640210203

ПРОНИКНОВЕНИЯ СОЛЕННЫХ ВОД ИЗ ТАГАНРОГСКОГО ЗАЛИВА В РУКАВА ДЕЛЬТЫ ДОНА (ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НА ПРИМЕРЕ СОБЫТИЯ В ПЕРИОД 23–27.09.2014 г.)

© 2021 г. А.Л. Чикин¹, А.В. Клещенков¹, Л.Г. Чикина²

Аннотация. Устьевая область Дона – ключевой район бассейна Азовского моря, где происходят сложные процессы взаимодействия речных и морских вод. Здесь особенно сильно проявляются сгонно-нагонные колебания уровня и связанное с этим поступление морских трансформированных вод в рукава дельты Дона. Соленные воды Таганрогского залива при определенных гидрометеорологических условиях проникают даже в устье р. Дон, где находятся водозаборы Азова и Таганрога.

В работе описана математическая модель процесса поступления соленой воды Таганрогского залива в дельту Дона. Гидродинамическая составляющая модели основана на уравнениях Сен-Венана, записанных в характеристическом виде. Транспортная составляющая описана одномерным уравнением конвекции – диффузии в случае консервативного вещества. В качестве области расчета был выбран участок Нижнего Дона от ст. Раздорская до устьев дельты Дона, включая рукава Старый Дон, Мокрая Каланча и Большая Кутерьма. Задача решается конечно-разностными методами с использованием неявных схем.

Расчеты проведены с учетом метеорологической обстановки в период 23–27.09.2014 г., когда наблюдался наиболее сильный за последние годы ветровой нагон. Приведены результаты расчетов скорости течения воды и солёности в рукавах Дона в зависимости от уровня воды в Таганрогском заливе. Сравнение расчетных значений солёности воды в районе азовского порта с зарегистрированными показало, что представленная математическая модель достаточно адекватно описывает процесс поступления соленой воды из Таганрогского залива в основные рукава р. Дон. В то же время модель дает представление об общей тенденции развития процесса возможного осолонения дельты Дона при нагонных явлениях, что может быть использовано для прогноза таких явлений и принятия оперативных решений для обеспечения устойчивого водоснабжения приморских городов.

Ключевые слова: неустановившееся течение, солёность, математическая модель, вычислительный эксперимент, сгонно-нагонные явления, конвективный перенос.

PENETRATION OF SALINE WATERS FROM THE TAGANROG BAY INTO THE BRANCHES OF THE DON RIVER DELTA (NUMERICAL MODELING ON THE EXAMPLE OF AN EVENT IN THE PERIOD FROM 23 TO 27 SEPTEMBER 2014)

A.L. Chikin¹, A.V. Kleshchenkov¹, L.G. Chikina²

Abstract. The mouth area of the Don is a key area of the Sea of Azov basin, where complex processes of interaction between river and sea waters take place. Wind-induced water level fluctuations and the related inflow of transformed sea waters into the Don River delta branches are especially manifested here. Under certain hydrometeorological conditions, the salty waters of the Taganrog Bay penetrate even into the mouth of the Don River, where fresh water intake is located.

¹ Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук (Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: chikin@sfedu.ru

² Южный федеральный университет (Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42

The paper describes a mathematical model of the process of the salt water inflow of the Taganrog Bay into the Don River delta. The hydrodynamic component of the model is based on the equations of Saint-Venant, written in characteristic form. The transport component is described by the one-dimensional convection-diffusion equation in the case of a conservative substance. The mouth section of the Lower Don from the village of Razdorskaya to the mouths of the Don River delta, including the Sary Don, Mokraya Kalancha, and Bolshaya Kuterma branches, was chosen as the calculation area. The problem is solved by finite-difference methods using implicit schemes.

The calculations were carried out taking into account the meteorological situation in the period from 23 to 27 September 2014, when the strongest wind surge in recent years was observed. The results of calculations of the water flow rate and salt concentration in the Don branches depending on the water level in the Taganrog Bay are presented. Comparison of the calculated values of the salt concentration in the Azov port area with the observed values showed that the presented mathematical model adequately describes the process of salt water inflow from the Taganrog Bay into the main branches of the Don River. At the same time, the model gives an idea of the general trend of possible salinization of the Don River delta during surges, which can be used for prediction of such phenomena and taking executive decisions for sustainable water supply of seaside cities.

Keywords: unsteady flow, salinity, mathematical model, computational experiment, surge phenomena, convective transfer.

ВВЕДЕНИЕ

Устьевая область Дона – ключевой район бассейна Азовского моря, где происходят сложные процессы взаимодействия речных и морских вод. Она состоит из устьевого участка реки (от ст. Раздорской до вершины дельты в районе Ростова-на-Дону), дельты Дона и Таганрогского залива до условной линии, соединяющей Должанскую и Белосарайскую косы [1; 2]. Здесь особенно сильно проявляются сгонно-нагонные колебания уровня и связанное с этим поступление морских трансформированных вод в рукава дельты Дона [3]. Установлено, что в устьевой области даже во время сгонов фиксируется значительное повышение солёности (до 5 ‰), что свидетельствует о резко возросшей роли Азово-Черноморского компенсационного течения [4; 5]. Сокращение стока Дона наряду с интенсивной циклонической деятельностью и аномальной адвекцией черноморских вод также привело к тому, что в Таганрогском заливе стала возможной высокая солёность (до 12 ‰) [6].

Серьезную угрозу представляют экстремальные сгонные явления при восточных и нагонные явления при западных ветрах. Особенно опасна ситуация, когда перед нагоном наблюдался сгон воды. Это происходит при резкой смене восточного ветра на западный. При таком стечении обстоятельств затопление происходит быстрее, и оно сильнее по масштабу, чем при постоянно действующим западном ветре. Подобная картина наблюдалась 23.03.2013 г., когда восточный ветер (3–11 м/с) сменился на юго-западный (15 м/с с порывами 20–22 м/с) [7].

Солёные воды Таганрогского залива при определенных гидрометеорологических условиях проникают даже в устье р. Дон, где находятся водозаборы таких городов, как Азов и Таганрог. Во время экстремального нагона в июне 2014 г. наблюдался подъем уровня моря на 1,7 м, а солёность в устье Дона достигала 5 ‰ [8]. В сентябре 2014 г. вода с повышенной (5–9 ‰) солёностью проникла по Дону до Азова, где закачивалась в городской водопровод. Впоследствии подобное повторялось несколько раз, последнее наблюдалось в феврале 2021 г.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Подробное описание численной реализации гидродинамической составляющей приведено в работе [9] для расчета уровня свободной поверхности русла. В вышеупомянутом исследовании был выбран участок Нижнего Дона от ст. Раздорская до второго узла дельты Дона (исток рукава Каланча). В данной работе рассматривается дельтовая область Дона от ст. Раздорская до Таганрогского залива, состоящая из основного русла Дона и его основных рукавов – Старого Дона, Большой Каланчи, переходящей в Мокрую Каланчу и Большую Кутерьму. Следуя работе [10], дельту Дона представим в виде графа (рис. 1), состоящего из пяти ребер, соответствующих участкам открытых русел, и шести вершин, четыре из которых соответствуют концевым узлам, а две – узлам разветвлений.

Математическая модель состоит из гидродинамической и транспортной составляющих. Будем рассматривать исследуемый участок русла Дона в

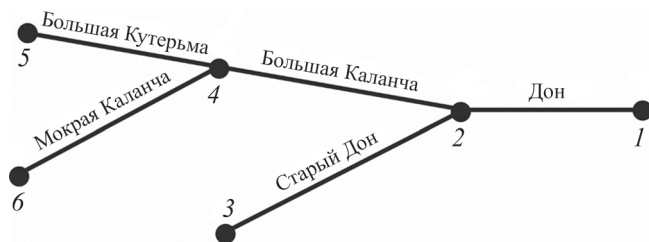


Рис. 1. Схема дельты Дона (основные рукава). Числа означают последовательность узлов.

Fig. 1. Diagram of the Don River delta (main reaches). Numbers mean a sequence of nodes.

предположении, что на нем зоны резкого изменения живого сечения, а также распределенный боковой приток в силу его незначительности отсутствуют. Гидродинамическая составляющая описывается уравнением движения

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial t} + gW \left(\frac{\partial z}{\partial x} + \frac{Q|Q|}{K^2} \right) = 0, \\ \frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0, \end{cases}$$

где x – координата; t – время; Q – расход воды; z – уровень воды; W – площадь живого сечения; K – модуль расхода; g – ускорение свободного падения.

В случае, когда поперечное сечение русла имеет параболический профиль, данную систему можно переписать в виде:

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial t} + gW \left(\frac{\partial z}{\partial x} + \frac{Q|Q|}{K^2} \right) = 0, \\ b \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где b – ширина русла.

Систему (1) запишем в операторном виде

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial t} + A \frac{\partial \bar{U}}{\partial x} = \bar{b}, \quad (2)$$

где $\bar{U} = \begin{pmatrix} z \\ Q \end{pmatrix}$, $A = \begin{pmatrix} 0 & 1/B \\ gW & 0 \end{pmatrix}$, $\bar{b} = \begin{pmatrix} 0 \\ \varphi \end{pmatrix}$,

$$\varphi = -gW \frac{Q|Q|}{K^2}.$$

Собственные значения оператора A равны

$$c^* = \pm \sqrt{\frac{gW}{B}}, \text{ а собственные векторы } \bar{I}_1 = (gW; c^*),$$

$$\bar{I}_2 = (gW; -c^*) \text{ соответственно.}$$

Умножая (2) слева на собственные векторы, получим характеристическую форму системы (1):

$$\begin{cases} \frac{gW}{c^*} \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial t} + gW \frac{\partial z}{\partial x} + c^* \frac{\partial Q}{\partial x} = -gW \frac{Q|Q|}{K^2}, \\ -\frac{gW}{c^*} \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial t} + gW \frac{\partial z}{\partial x} - c^* \frac{\partial Q}{\partial x} = -gW \frac{Q|Q|}{K^2}, \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{где } c^* = \sqrt{\frac{gW}{b}}.$$

В качестве граничных условий в начальной точке задается расход поступающей воды $Q_0(0, t)$, в конечных точках X_k задается уровень в принимающем водоеме $z_k(X_k, t)$. В узлах ветвления граничные условия задаются следующим образом: сумма притоков – оттоков равна нулю $\sum_i Q_i^i = 0$ (i – число рукавов, приходящих в узел разветвления), а уровни водной поверхности равны между собой: $z_i = z_j$.

Транспортная составляющая консервативного вещества описывается уравнением переноса:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + v \frac{\partial S}{\partial x} - \mu \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} = 0, \quad (4)$$

где S – концентрация; v – скорость движения воды в русле; μ – коэффициент турбулентной диффузии.

На концах рукавов граничные условия задаются в зависимости от знака скорости течения. В случае поступления воды в рукав задается условие

$$\frac{\partial S}{\partial x} = \frac{v}{\mu} (S - S^*), \quad (5)$$

где S^* – значение концентрации соли на конце рукава.

В случае, когда вода покидает рукав, ставится условие

$$\frac{\partial S}{\partial x} + S \frac{v}{\mu} = 0, \quad (5a)$$

которое соответствует удалению соли из рукава.

Так, во время сильных нагонов на границе рукавов, совпадающих с устьями в Таганрогском заливе, ставится условие

$$\frac{\partial S}{\partial x} = \frac{v}{\mu} (S - S_{zal}), \text{ где } S_{zal} - \text{значение концентрации соли в Таганрогском заливе.}$$

В случае, когда конец рукава содержит сосредоточенные параметры, в частности концентрацию, S_{zal} надо заменить на S^* – концентрацию в точке ветвления, которая вычисляется следующим образом:

$$S^* = \frac{\sum S_i Q_i}{\sum Q_i}.$$

Суммирование проводится только по втекающим в точку ветвления рукавам.

Данная задача решается конечно-разностными методами с использованием неявных схем. Приведем конечно-разностную аппроксимацию системы (3) на произвольном отрезке, соответствующем отдельному открытому руслу. Разобьем отрезок на $M + 2$ узлов (рис. 2) с шагом $\Delta = x_{j+1} - x_j, j = 1, 2, \dots, M$ (число M для каждого отрезка может быть различным). Шаг по времени обозначим через τ .

$$\begin{cases} \frac{gW_j^n}{c_*\tau}(z_j^{n+1} - z_j^n) + \frac{1}{\tau}(Q_j^{n+1} - Q_j^n) + \frac{gW_j^n}{\Delta}(z_j^{n+1} - z_{j-1}^{n+1}) + \\ + \frac{c_*}{\Delta}(Q_j^{n+1} - Q_{j-1}^{n+1}) = -gW_j^n \frac{|Q_j^n|}{K^2} Q_j^{n+1}, \\ -\frac{gW_j^n}{c_*\tau}(z_j^{n+1} - z_j^n) + \frac{1}{\tau}(Q_j^{n+1} - Q_j^n) + \frac{gW_j^n}{\Delta}(z_{j+1}^{n+1} - z_j^{n+1}) - \\ - \frac{c_*}{\Delta}(Q_{j+1}^{n+1} - Q_j^{n+1}) = -gW_j^n \frac{|Q_j^n|}{K^2} Q_j^{n+1}. \end{cases} \quad (6)$$

Систему (6) представим в виде:

$$\begin{cases} c_1 z_{j-1} + c_2 Q_{j-1} + c_3 z_j + c_4 Q_j = f_j^n, \\ m_3 z_j + m_4 Q_j + m_5 z_{j+1} + m_6 Q_{j+1} = g_j^n, \end{cases} \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} c_1 &= -\frac{gW_j^n}{\Delta}; c_2 = -\frac{c_*}{\Delta}; c_3 = \frac{gW_j^n}{c_*\tau} + \frac{gW_j^n}{\Delta}; \\ c_4 &= \frac{1}{\tau} + \frac{c_*}{\Delta} + \frac{gW_j^n |Q_j^n|}{K^2}; \\ f_j^n &= \frac{gW_j^n}{c_*\tau} z_j^n + \frac{Q_j^n}{\tau}; \\ m_3 &= -\frac{gW_j^n}{c_*\tau} - \frac{gW_j^n}{\Delta}; m_4 = \frac{1}{\tau} + \frac{c_*}{\Delta} + \frac{gW_j^n |Q_j^n|}{K^2}; \\ m_5 &= \frac{gW_j^n}{\Delta}; m_6 = -\frac{c_*}{\Delta}; \\ g_j^n &= -\frac{gW_j^n}{c_*\tau} z_j^n + \frac{Q_j^n}{\tau}. \end{aligned}$$

При аппроксимации на левом конце каждого отрезка ($j = 1$ – его начало) берем второе уравнение из (6):

$$\begin{aligned} -\frac{gW_1^n}{c_*\tau}(z_1^{n+1} - z_1^n) + \frac{1}{\tau}(Q_1^{n+1} - Q_1^n) + \frac{gW_1^n}{\Delta}(z_2^{n+1} - z_1^{n+1}) - \\ - \frac{c_*}{\Delta}(Q_2^{n+1} - Q_1^{n+1}) = -gW_1^n \frac{|Q_1^n|}{K^2} Q_1^{n+1}. \end{aligned}$$

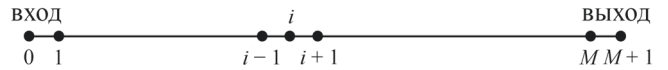


Рис. 2. Конечно-разностная сетка для отдельного русла.
Fig. 2. Finite-difference grid for a separate reach.

При аппроксимации на правом конце каждого отрезка ($j = L$ – его конец) берем первое уравнение из (6):

$$\begin{aligned} \frac{gW_L^n}{c_*\tau}(z_L^{n+1} - z_L^n) + \frac{1}{\tau}(Q_L^{n+1} - Q_L^n) + \frac{gW_L^n}{\Delta}(z_L^{n+1} - z_{L-1}^{n+1}) + \\ + \frac{c_*}{\Delta}(Q_L^{n+1} - Q_{L-1}^{n+1}) = -gW_L^n \frac{|Q_L^n|}{K^2} Q_L^{n+1} \end{aligned}$$

При конечно-разностной аппроксимации всей области расчета нумерация узлов сетки ведется сквозным образом, и для каждого отрезка в системе (7) будет свой индекс j .

Получаемая матрица системы (7) будет иметь преимущественно пятидиагональный вид. Исключение составляют строки, соответствующие узлам разветвления, где кроме элемента на главной диагонали находится элемент, отстоящий от главной диагонали на расстоянии, равном удвоенному количеству узлов рукава плюс один.

Конечно-разностная аппроксимация уравнения (4) имеет вид:

$$\frac{\delta S}{\delta t} + v \frac{\delta S}{\delta x} - \mu \frac{\delta^2 S}{\delta x^2} = 0, \quad (8)$$

а общий вид разностного уравнения следующий:

$$a_1 S_{j-1} + a_2 S_j + a_3 S_{j+1} = f_j, j = 1, 2, \dots, M. \quad (9)$$

В уравнении (8) разности представлены следующим образом:

$$\frac{\delta S}{\delta t} = \frac{S_j^{n+1} - S_j^n}{\Delta t}, \quad \frac{\delta^2 S}{\delta x^2} = \frac{S_{j+1}^{n+1} - 2S_j^{n+1} + S_{j-1}^{n+1}}{\Delta x^2}.$$

Коэффициенты a_1, a_2, a_3 , а также правая часть f_j в (9) без учета конвективной составляющей имеют вид:

$$\begin{aligned} a_1 &= -\frac{\mu}{\Delta x^2} \Delta t, \\ a_2 &= 1 + \frac{2\mu}{\Delta x^2} \Delta t, \\ a_3 &= -\frac{\mu}{\Delta x^2} \Delta t, \\ f_j &= S_j^n. \end{aligned}$$

К коэффициентам a_1, a_2, a_3 добавляются слагаемые, полученные из аппроксимации конвективной составляющей, которая аппроксимируется второй противоточковой схемой [11]:

$$u \frac{\delta S}{\delta x} = \frac{u_R S_R - u_L S_L}{\Delta x},$$

где

$$u_R = \frac{u_{j+1}^{n+1} + u_j^{n+1}}{2}; u_L = \frac{u_{j-1}^{n+1} + u_j^{n+1}}{2},$$

$$S_R = \begin{cases} S_j^{n+1}, & u_R > 0 \\ S_{j+1}^{n+1}, & u_R < 0 \end{cases}, S_L = \begin{cases} S_{j-1}^{n+1}, & u_L > 0 \\ S_j^{n+1}, & u_L < 0 \end{cases}.$$

Рассмотрим все случаи знаков скорости.

1. Случай $u_R > 0, u_L < 0$.

$$\text{Получаем } u \frac{\delta S}{\delta x} = \frac{u_R S_j^{n+1} - u_L S_j^{n+1}}{\Delta x} = \frac{S_j^{n+1}}{\Delta x} (u_R - u_L).$$

В коэффициент a_2 добавляется слагаемое $\frac{(u_R - u_L)}{\Delta x}$.

2. Случай $u_R < 0, u_L > 0$.

$$\text{Получаем } u \frac{\delta S}{\delta x} = \frac{u_R S_{j+1}^{n+1} - u_L S_{j-1}^{n+1}}{\Delta x}. \text{ В } a_1 \text{ добавля-$$

ется слагаемое $-\frac{u_L}{\Delta x}$, а в коэффициент a_3 добавля-

ется слагаемое $\frac{u_R}{\Delta x}$.

3. Случай $u_R > 0, u_L > 0$.

$$\text{Получаем } u \frac{\delta S}{\delta x} = \frac{u_R S_j^{n+1} - u_L S_{j-1}^{n+1}}{\Delta x}. \text{ В } a_1 \text{ добавля-$$

ется слагаемое $-\frac{u_L}{\Delta x}$, а в коэффициент a_2 добавля-

ется слагаемое $\frac{u_R}{\Delta x}$.

4. Случай $u_R < 0, u_L < 0$.

$$\text{Получаем } u \frac{\delta S}{\delta x} = \frac{u_R S_{j+1}^{n+1} - u_L S_j^{n+1}}{\Delta x}. \text{ В } a_2 \text{ добавля-$$

ется слагаемое $-\frac{u_L}{\Delta x}$, а в коэффициент a_3 добавля-

ется слагаемое $\frac{u_R}{\Delta x}$.

На левом конце каждого отрезка ($j = 0$ – его начало) в зависимости от знака скорости u_L аппроксимация граничного условия в соответствии с (5) или (5а) будет следующей:

$$\frac{S_1^{n+1} - S_0^{n+1}}{\Delta x} - \frac{u_L}{\mu} S_0 = -\frac{u_L}{\mu} S^*, (u_L > 0),$$

$$\frac{S_1^{n+1} - S_0^{n+1}}{\Delta x} + \frac{u_L}{\mu} S_0 = 0, (u_L < 0).$$

или

$$S_0 = \frac{1}{1 + \frac{u_L}{\mu} \Delta x} S_1 + \frac{\frac{u_L}{\mu} \Delta x S^*}{1 + \frac{u_L}{\mu} \Delta x}, (u_L > 0),$$

$$S_0 = \frac{1}{1 - \frac{u_L}{\mu} \Delta x} S_1, (u_L < 0).$$

На правом конце ребра ($j = M + 1$ – его конец) в зависимости от знака скорости u_R аппроксимация граничного условия в соответствии с (5) или (5а) будет следующей:

$$\frac{S_{M+1}^{n+1} - S_M^{n+1}}{\Delta x} - \frac{u_R}{\mu} S_{M+1} = -\frac{u_R}{\mu} S_{zal}, (u_R < 0),$$

$$\frac{S_{M+1}^{n+1} - S_M^{n+1}}{\Delta x} + \frac{u_R}{\mu} S_{M+1} = 0, (u_R > 0).$$

или

$$S_{M+1} = \frac{1}{1 - \frac{u_R}{\mu} \Delta x} S_M - \frac{\frac{u_R}{\mu} \Delta x S_{zal}}{1 - \frac{u_R}{\mu} \Delta x}, (u_R < 0),$$

(10)

$$S_{M+1} = \frac{1}{1 + \frac{u_R}{\mu} \Delta x} S_M, (u_R > 0).$$

В случае, когда правый конец рукава содержит сосредоточенные параметры, в частности концентрацию, в формулах (10) надо S_{zal} заменить на S^* – концентрацию в точке ветвления.

Полученные системы линейных алгебраических уравнений решались с использованием пакета LAPACK с помощью подпрограмм для ленточных матриц общего вида.

Расчет гидродинамических параметров осуществляли на уже откалиброванной ранее модели течений в дельте Дона [9], где калибровку модели проводили путем подбора коэффициентов шероховатости. Морфометрические значения глубины и ширины русла были заданы в соответствии с «Навигационным атласом единой глубоководной системы России» [12] и данными промерных работ, выполненных Южным научным центром Российской академии наук (ЮНЦ РАН) в ходе рейсов

на научно-исследовательском судне «Профессор Панов».

Данные по изменению уровня воды на гидрометеопосту в х. Донской (Азовский район Ростовской области) взяты из открытой базы данных ЮНЦ РАН, точка наблюдения 1001 [13].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для верификации данной модели была рассмотрена ситуация, сложившаяся в период 23–27.09.2014 г., когда в результате действия сильного юго-западного ветра вода из Таганрогского залива стала поступать в русло Дона. Был выбран временной интервал длиной 96 часов, что соответствовало четырем суткам наблюдения.

Данные по солености в области устьевого взморья и расхода воды в рукаве Старый Дон представлены в таблице 1.

Данные по солености в акватории порта Азов приведены в таблице 2.

Из-за сложной штормовой ситуации данные, приведенные в таблицах 1 и 2, нерегулярны по времени. Кроме того, для солености в области взморья и расхода поступающей в рукав воды указаны среднесуточные значения. Все это налагало определенные трудности при верификации модели.

Пространственный шаг равен 1000 м вдоль основного судового хода. Аналитическая оценка допустимого шага по времени в используемых разностных схемах не проводилась, но численные расчеты показали устойчивость счета при $\Delta t < 1200$.

Расчетные значения снимались каждые 10 минут модельного времени. На рисунке 3 приведен график расчетных значений солености в указанный период в районе азовского порта, а также зарегистрированные значения в отдельные моменты времени. Здесь же приводится график изменения уровня воды. Концентрация соли зависит как от скорости течения, так и от направления потока. Соленая вода может попасть в русло реки при наличии обратного течения воды снизу вверх по руслу. Видно, что с резким повышением уровня воды повышается и концентрация соли. Снижение концентрации соли наблюдается при появлении прямого течения в русле (скорость течения меняет знак с минуса на плюс).

Изменение скорости течения в рукаве Старый Дон в районе азовского порта представлено на рисунке 4. Там же приведен график изменения уровня воды в Таганрогском заливе.

Таблица 1. Изменение солености в устьевом взморье в период 23–27.09.2014 г. и расхода воды, поступающей в рукав Старый Дон

Table 1. Changes in salinity in the estuary seaside for the period from 23 to 27 September 2014 and the flow rate of water entering the Stary Don branch

Дата Date	Павло-Очаковская коса, соленость, ‰ Pavlo-Ochakovskaya foreland, salinity, ‰	Таганрог, соленость, ‰ Taganrog, salinity, ‰	Рукав Старый Дон, расход воды, м ³ /с Stary Don, discharge, m ³ /s
23.09.2014	0,92	4,92	260,4
24.09.2014	3,82	4,96	301,2
25.09.2014	6,33	4,97	426,6
26.09.2014	6,52	4,95	375,6
27.09.2014	5,94	4,94	–

Таблица 2. Изменение солености в акватории порта Азов в период 23–27.09.2014 г.

Table 2. Changes in salinity in the water area of the port of Azov for the period from 23 to 27 September 2014

Дата Date	Время Time	Соленость, ‰ Salinity, ‰
23.09.2014	–	0,48
24.09.2014	15:42	4,1
24.09.2014	23:00	5,59
25.09.2014	8:30	4,69
26.09.2014	8:30	2,86
26.09.2014	17:00	1,18
27.09.2014	8:30	0,69

Видно, что 24.09.2014 г. с резким поднятием уровня воды в Таганрогском заливе возникает обратное течение с увеличением скорости до 0,85 м/с. Затем, к утру 25.09, с понижением уровня воды в Таганрогском заливе обратное течение начинает сильно замедляться до нулевого значения, и далее восстанавливается прямое течение в рукаве с положительным значением скорости. Кроме того, на графике прослеживается периодическое изменение скорости. Это связано, скорее всего, с длинноволновыми колебаниями уровня в Таганрогском заливе при сгонно-нагонном процессе. Так, увеличение скорости прямого течения 26.09.2014 г. с 12:00 до 18:00 определяется резким понижением уровня воды с 1,29 м до 0,75 м.

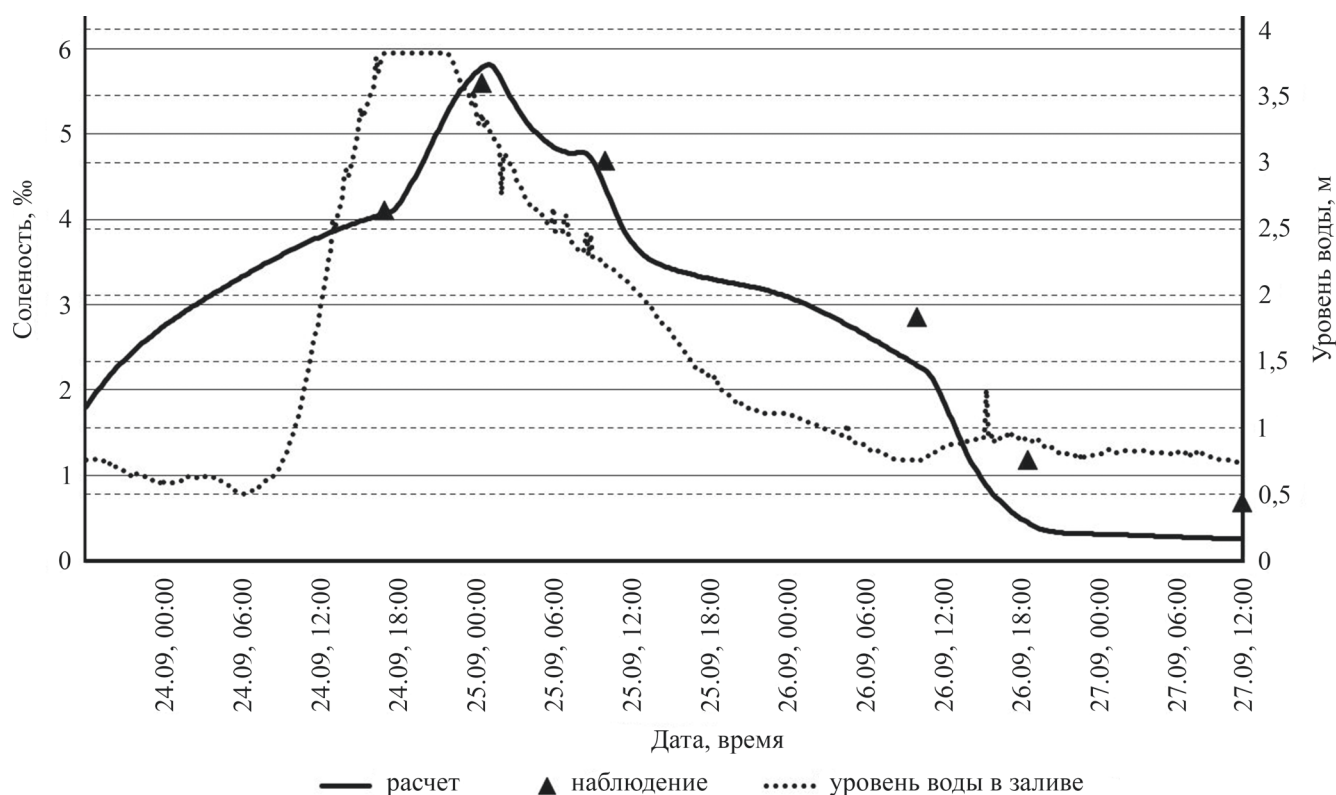


Рис. 3. Графики расчетных значений солёности и уровня воды в устье Дона.
 Fig. 3. Graphs of the calculated values of salinity and water level at the mouth of the Don River.

На рисунке 5 представлено изменение скоростей течения в точке разветвления основного русла Дона на рукава Старый Дон и Каланча. Расчеты показали, что во время нагона существует интервал времени, на протяжении которого вода из рукава Старый Дон перетекает в рукав Каланча. На графике это проявляется различием знаков скоростей в руслах. Так, весь день 24.09.2014 г. и ночь 25.09.2014 г. наблюдалось обратное течение по обоим рукавам и основному руслу Дона, скорости течения имели отрицательные значения. Однако 25.09.2014 г. примерно с 04:00 на протяжении двух часов течение в Каланче прямое, а в основном русле и в Старом Дону обратное. Это означает, что часть воды из Старого Дона при обратном течении поступает в Каланчу, а часть в основное русло. После 06:00 картина течения меняется. Теперь уже в основном русле и в Каланче прямые течения, а в Старом Дону все еще обратное. Это означает, что из основного русла вся вода идет в Каланчу плюс в Каланчу попадает вода из Старого Дона. После 08:00, когда во всех рукавах восстанавливается прямое течение, вода из основного русла частично идет в Каланчу, а частично в Старый Дон.

Погрешность расчетов, оцениваемая как относительная погрешность $\delta = \sqrt{\frac{\sum_i (C_i - C_i^0)^2}{\sum_i (C_i^0)^2}}$, где

C_i – расчетные значения, C_i^0 –зарегистрированные значения, составляла 11,3 %.

Если проводить оценку меры существенности различий расчетных значений солёности и зарегистрированных данных по критерию

$$J_R = \sqrt{\frac{\sum_i (C_i - C_i^0)^2}{\sum_i (C_i + C_i^0)^2}},$$

то данная оценка дает значение 0,057. Согласно шкале оценки меры существенности различий структур [14] полученный результат соответствует весьма низкому уровню различий (табл. 3).

ВЫВОДЫ

Исследование стонно-нагонных явлений в устье Дона показало, что в данном явлении присутствуют

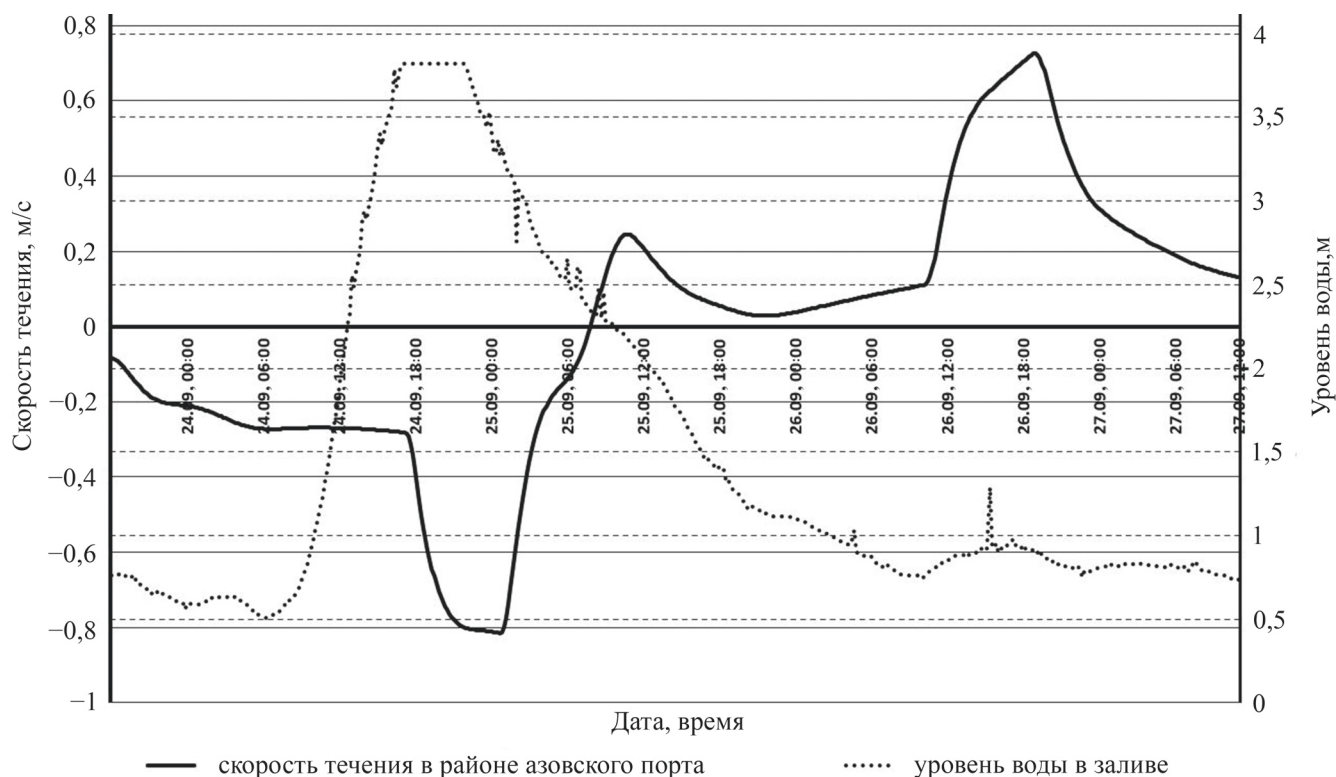


Рис. 4. Графики расчетных значений солёности и уровня воды в устье Дона.
 Fig. 4. Graphs of the calculated values of salinity and water level at the mouth of the Don River.

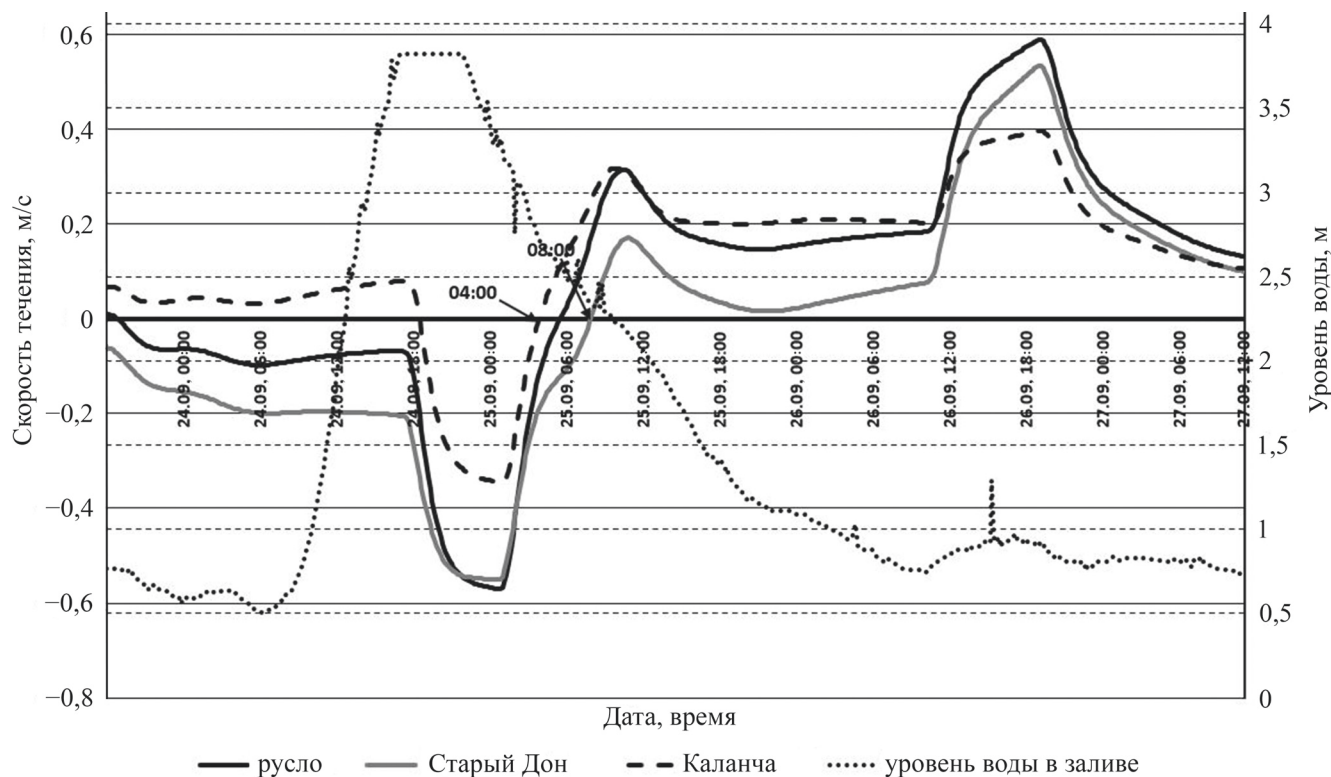


Рис. 5. Скорости течения в разветвлении основного русла на Старый Дон и Каланчу.
 Fig. 5. Current velocities in the branching of the main reach to the Staryy Don and Kalancha.

Таблица 3. Шкала оценки меры существенности различий структур по критерию J_R
Table 3. Scale for assessing the significance of differences in structures by the J_R criterion

Интервалы значений J_R Intervals of J_R values	Характеристика меры структурных различий Characteristic of the measure of structural differences
0,000–0,030	Тождественность структур / Identity of structures
0,031–0,070	Весьма низкий уровень различий / Very low level of differences
0,071–0,150	Низкий уровень различий / Low level of differences
0,151–0,300	Существенный уровень различий / Substantial level of differences
0,301–0,500	Значительный уровень различий / Significant level of differences
0,501–0,700	Весьма значительный уровень различий / Very significant level of differences
0,701–0,900	Противоположный тип структур / Opposite type of structures
0,901 и выше	Полная противоположность структур / The complete opposite of structures

сложные гидродинамические процессы, которые не всегда можно описать математической моделью, дающей результаты с достаточно высокой точностью. Существенным ограничением применения данной модели является предположение о параболической форме сечения русла. Кроме того, при экстремальных подъемах уровня воды, когда происходит затопление дельты Дона и рукава превращаются в один общий водоем, данная модель не может дать хорошего результата.

Предложенный математический подход позволяет достаточно точно аппроксимировать гидрологические параметры в узлах сопряжения. Предложенная математическая модель дает возможность учитывать распределения расходов воды по основным рукавам Дона при разных гидродинамических ситуациях. Проведенные расчеты подтвердили влияние резкого повышения уровня воды на поступление соленой воды из Таганрогского залива в дельту Дона, что может приводить к проникновению соленой воды вплоть до Ростова и Аксая. В то же время эта модель дает представление об общей тенденции развития процесса возможного осолонения дельты Дона при нагонных явлениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Остроумова Л.П. 2017. Исследование нагонных и сгонных явлений в морских устьях рек на примере устьевой области р. Дон. *Метеорология и гидрология*. 12: 69–82.
2. Симов В.Г. 1989. *Гидрология устьев рек Азовского моря*. М., Гидрометеоздат: 328 с.
3. Мишин Д.В., Полонский В.Ф. 2013. Исследование нестационарных водных потоков в неприливном устье реки Дон. *Труды государственного океанографического института*. 214: 166–179.

Важность изучения такого опасного явления, как нетипичные затоки соленых черноморских вод в дельту Дона, определяется необходимостью прогнозирования экстремальных наводнений и обеспечения безопасности населения азовского побережья. Предложенная нами модель может быть использована для прогноза таких явлений и принятия оперативных решений с целью создания устойчивого водоснабжения приморских городов.

Публикация подготовлена в части сбора и анализа данных об уровненом режиме и солености воды в рукавах Дона в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН № гр. проекта АААА-А18-118122790121-5, в части постановки задачи, разработки методов численного моделирования – в рамках научного проекта РФФИ 18-05-80010 «Исследование и прогноз опасных гидрометеорологических и геолого-геоморфологических процессов в районах функционирования стратегических объектов на Азово-Черноморском побережье (исторические и современные аспекты)». Расчеты выполнены на кластере Центра коллективного пользования Южного федерального университета «Высокопроизводительные вычисления».

4. Матишов Г.Г., Григоренко К.С. 2017. Причины осолонения Таганрогского залива. *Доклады Академии наук*. 477(1): 92–96. doi: 10.7868/S086956521731019X
5. Матишов Г.Г., Ковалева Г.В., Ясакова О.Н. 2016. Аномальное осолонение в Таганрогском эстуарии и дельте Дона. *Наука Юга России*. 12(1): 43–50.
6. Матишов Г.Г., Григоренко К.С., Московец А.Ю. 2017. Механизмы осолонения Таганрогского залива в условиях экстремально низкого стока Дона. *Наука Юга России*. 13(1): 35–43. doi: 10.23885/2500-0640-2017-13-1-35-43

7. Матишов Г.Г., Чикин А.Л., Бердников С.В., Шевердяев И.В. 2014. Экстремальное наводнение в дельте Дона (23–24 марта 2013 г.) и факторы, его определяющие. *Доклады Академии наук*. 455(3): 342–345. doi: 10.7868/S0869565214090229
8. Матишов Г.Г. 2015. Случаи экстремальной адвекции соленых вод в дельту Дона и льда в Керченский пролив. *Доклады Академии наук*. 465(1): 99–103. doi: 10.7868/S0869565215310229
9. Чикин А.Л., Клещенко А.В., Чикина Л.Г. 2019. Численное исследование влияния расхода воды на уровенный режим в устьевой области Дона. *Морской гидрофизический журнал*. 35(4): 355–366. doi: 10.22449/0233-7584-2019-4-355-366
10. Воеводин А.Ф., Никифоровская В.С., Овчарова А.С. 1983. Численные методы решения задачи о неустановившемся движении воды на устьевых участках рек. *Труды Арктического и антарктического научно-исследовательского института*. 378: 23–34.
11. Роч П. 1980. *Вычислительная гидродинамика*. М., Мир: 618 с.
12. Навигационный атлас единой глубоководной системы России. Том 8 (часть 2) – р. Дон от Волгодонска до устья. 2009. *DeckOfficer.ru*. URL: <https://deckofficer.ru/titul/handbook/item/navigatsionnyj-atlas-edinoj-glubokovodnoj-sistemy-rossii> (дата обращения: 21.03.2021).
13. *Мониторинг ЮНЦ РАН*. URL: <http://meteo.ssc-ras.ru> (дата обращения: 03.03.2021).
14. *Региональная статистика*. 2006. М., Финансы и статистика: 624 с.
15. *gosudarstvennogo okeanograficheskogo instituta*. 214: 166–179. (In Russian).
16. Matishov G.G., Grigorenko K.S. 2017. Causes of salinization of the Gulf of Taganrog. *Doklady Earth Sciences*. 477(1): 1311–1315. doi: 10.1134/S1028334X17110034
17. Matishov G.G., Kovaleva G.V., Yasakova O.N. 2016. [Anomalous high salinity in the Taganrog bay estuary and the Don delta]. *Nauka Yuga Rossii*. 12(1): 43–50. (In Russian).
18. Matishov G.G., Grigorenko K.S., Moskovets A.Yu. 2017. [The salinization mechanisms in the Taganrog Bay under the conditions of the Don River extremely low runoff]. *Nauka Yuga Rossii*. 13(1): 35–43. (In Russian). doi: 10.23885/2500-0640-2017-13-1-35-43
19. Matishov G.G., Chikin A.L., Berdnikov S.V., Sheverdyayev I.V. 2014. The extreme flood in the Don River delta, March 23–24, 2013, and determining factors. *Doklady Earth Sciences*. 455(1): 360–363. doi: 10.1134/S1028334X14030295
20. Matishov G.G. 2015. Extreme saline water advection into the Don River delta and ice advectations into Kerch strait. *Doklady Earth Sciences*. 465(1): 1154–1158. doi: 10.1134/S1028334X15110057
21. Chikin A.L., Kleshchenkov A.V., Chikina L.G. 2019. Numerical study of the water flow effect on the water level in the Don mouth. *Physical Oceanography*. 26(4): 316–325. doi: 10.22449/1573-160X-2019-4-316-325
22. Voevodin A.F., Nikiforovskaya V.S., Ovcharova A.S. 1983. [Numerical methods for solving the problem of unsteady water movement on river estuaries]. *Trudy Arkticheskogo i antarkticheskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta*. 378: 23–34 (In Russian).
23. Rouch P.J. 1976. *Fundamentals of Computational Fluid Dynamic*. Albuquerque, Hermosa Publishers: 446 p.
24. [Navigational atlas of the united deep-water system of Russia. Volume 8 (part 2) – the Don River from Volgodonsk to the mouth]. 2009. *DeckOfficer.ru*. Available at: <https://deckofficer.ru/titul/handbook/item/navigatsionnyj-atlas-edinoj-glubokovodnoj-sistemy-rossii> (accessed 21 March 2021). (In Russian).
25. *Monitoring YuNTs RAN*. Available at: <http://meteo.ssc-ras.ru> (accessed 3 March 2021). (In Russian).
26. *Regional'naya statistika*. [Regional statistics]. 2006. Moscow, Finansy i statistika: 624 p. (In Russian).

REFERENCES

1. Ostroumova L.P. 2017. Investigation of surges in marine estuaries (A case study for the Don River mouth). *Russian Meteorology and Hydrology*. 42(12): 792–802. doi: 10.3103/S106837391712007X
2. Simov V.G. 1989. *Gidrologiya ust'ev rek Azovskogo morya*. [Hydrology of the mouths of the rivers of the Sea of Azov]. Moscow, Gidrometeoizdat: 328 p. (In Russian).
3. Mishin D.V., Polonskiy V.F. 2013. [Research of non-stationary water streams in nontidal mouth of Don River]. *Trudy*

Поступила 16.03.2021