

Численное исследование процесса проникновения соленых вод из Таганрогского залива в устье Дона

А. Л. Чикин^{1, ✉}, Л. Г. Чикина²

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

² Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

✉ chikin1956@gmail.com

Поступила в редакцию 16.06.2020 г., после доработки – 30.08.2020 г.

Цель. Целью данной работы является численное исследование на модельном примере процесса поступления соленой воды из Таганрогского залива в рукав Старый Дон вследствие ветрового нагона воды.

Методы и результаты. Приводится описание комплексной математической модели течения и распространения соли в открытом русле реки. Рассматривается участок реки Дон, состоящий из рукава Старый Дон и части основного русла. Поступление соли происходит через принимающий водоем – Таганрогский залив. Модель описывается системой уравнений Сен-Венана и уравнением конвекции – диффузии. Задача решается конечно-разностными методами. Получены результаты численного исследования влияния величины уровня поверхности воды в Таганрогском заливе на характер течения в дельтовой части Дона, а также на степень проникновения соли вверх по течению реки. Численно установлено, что величина расхода не оказывает существенного влияния на концентрацию соли в основном русле Дона.

Выводы. Проведенные вычислительные эксперименты показали, что при поступлении соленой воды из Таганрогского залива в дельту Дона решающее значение имеет существенное повышение уровня воды. К этому приводят экстремальные ветровые нагоны, а предшествующие им сгоны еще более усиливают этот эффект. Приведенная модель дает представление об общей тенденции развития процесса возможного осолонения дельты Дона при нагонных явлениях.

Ключевые слова: русловой поток, дельта реки, уравнения Сен-Венана, уравнение конвекции – диффузии, сгонно-нагонные колебания, вычислительный эксперимент

Благодарности: публикация подготовлена в части постановки задачи в рамках реализации государственного задания ЮНЦ РАН № государственной регистрации проекта АААА-А18-118122790121-5, в части разработки методов численного моделирования в рамках научного проекта РФФИ 18-05-80025 «Опасные явления». Расчеты выполнены на кластере ЦКП ЮФУ «Высокопроизводительные вычисления».

Для цитирования: Чикин А. Л., Чикина Л. Г. Численное исследование процесса проникновения соленых вод из Таганрогского залива в устье Дона // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 2. С. 247–257. doi:10.22449/0233-7584-2021-2-247-257

Numerical Study of the Process of Salt Water Inflow to the Don Mouth from the Taganrog Bay

A. L. Chikin¹, ✉, L. G. Chikina²

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

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

Purpose. Numerical study based on the model example is aimed at examining the process of the salt water inflow to the Stary Don sleeve from the Taganrog Bay due to the wind water surge.

Methods and Results. Complex mathematical model of the flow and salt distribution in the open riverbed is described. The section of the River Don, consisting of the Stary Don sleeve and a part of the main channel was considered. Salt is delivered through the host reservoir – the Taganrog Bay. The model is described by the system of Saint-Venant equations and the convection-diffusion equation. The problem is solved by the finite-difference methods. The results of the numerically studied influence of the sea surface level in the Taganrog Bay both on the flow nature in the Don Delta area and the degree of salt penetration upstream of the river are obtained. It was numerically established that the flow rate did not significantly affect salt concentration in the Don main channel.

Conclusions. The computational experiments showed that the decisive factor in the process of the salt water inflow to the Don Delta from the Taganrog Bay consisted in the sea level significant increase resulting from extreme wind surges; and the preceding runoffs enhanced this effect even greater. The represented model gives an idea of the general trend in the process of the Don Delta possible salinization as a result of the surge phenomena.

Keywords: channel flow, river delta, Saint-Venant equations, convection-diffusion equation, tide-storm surge oscillations, computational experiment

Acknowledgements: The problem of the study was posed within the framework of the state task to the Southern Scientific Center of Russian Academy of Sciences, project No. AAAA-A18-118122790121-5, the numerical modeling methods were developed within the framework of the RFBR scientific project No. 18-05-80025 “Dangerous phenomena”. Calculations were performed at the Center for Collective Use of the Southern Federal University “High Performance Computing”.

For citation: Chikin, A.L. and Chikina, L.G., 2021. Numerical Study of the Process of Salt Water Inflow to the Don Mouth from the Taganrog Bay. *Physical Oceanography*, [e-journal] 28(2), pp. 228-237. doi:10.22449/1573-160X-2021-2-228-237

Введение

В последнее время в бассейне Азовского моря стали наблюдаться такие явления, как осолонение Таганрогского залива, обмеление русла Дона, экстремальные сгоны и нагоны воды на взморье и зарастание авандельты, миграция представителей азовоморской фауны в дельту Дона [1]. Под воздействием стока Дона формируется опресненная водная масса Таганрогского залива.

Для Таганрогского залива Азовского моря и устьевой области Дона в настоящее время характерно сложное сочетание пресных, слабосоленоватых и солоноватых вод. Установлено, что в устьевой области даже во время сгонов фиксируется значительное повышение солености (до 5‰), что свидетельствует о резко возросшей роли Азово-Черноморского компенсационного течения [2, 3].

В результате сокращения стока впадающих в Азовское море рек уменьшается перепад уровня Азовского и Черного морей, что приводит к увеличению

поступления соли из Черного моря через Керченский пролив и изменению общего баланса соленых и пресных вод в бассейне. Эти изменения особенно заметны в Таганрогском заливе, где в отдельные промежутки времени наблюдается значительное осолонение вод [4]. При определенных гидрометеорологических условиях соленые воды проникают даже в устье реки Дон, где находится водозабор пресной воды.

Моделирование распространения вод Дона в Азовском море без учета внешних воздействий проведено в [5]. Установлено, что стоковые течения представляют собой вдольбереговую струю циклонического направления, опоясывающую Азовское море. Показано, что фронтальная зона в Таганрогском заливе, обусловленная стоком Дона, является наиболее динамически активным районом.

Анализ особенностей гидрохимического режима акватории Нижнего Дона в условиях различной водности и влияния стока р. Дон на продуктивность Таганрогского залива проведен в работе [6].

Серьезную угрозу представляют значительные сгонные явления при экстремальных восточных и нагонные – при западных ветрах. Установлено [7], что особенно опасна ситуация, когда перед нагоном наблюдается сгон воды. При резкой смене восточного ветра на западный затопление происходит быстрее и оно сильнее по масштабу, чем при постоянно действующем западном ветре. Подобная картина наблюдалась 23 сентября 2013 г., когда восточный ветер 3–11 м/с сменился на юго-западный 15 м/с с порывами 20–22 м/с.

Во время экстремального нагона в июне 2014 г. наблюдался подъем уровня моря до 1,7 м, а соленость в устье Дона достигала 5‰ [8]. В сентябре 2014 г. в результате нагона воды с повышенной (5–9‰) соленостью были прижаты к авандельте. Вода с соленостью до 6‰, характерная для района косы Должанская – Мариуполь, проникла по Дону по крайней мере до г. Азов, где закачивалась в городской водопровод.

Причины сгонов воды аномального масштаба и осолонения Азовского моря в 2015–2016 гг. исследуются в [2]. Здесь же приводятся новые схемы стратификации и адвекции соленых морских вод в устье Дона при различных метеоусловиях, расходах и уровнях воды.

Устьевая область Дона состоит из устьевого участка реки (от ст-цы Раздорская до вершины дельты в районе г. Ростов-на-Дону), ее дельты и Таганрогского залива и характеризуется проявлением здесь сгонно-нагонных колебаний уровня, поступлением морских трансформированных вод в рукава дельты Дона, что особенно ярко проявилось в период маловодья 2007–2017 гг. [9, 10].

Расчету гидрологических параметров русловых потоков на устьевых участках рек посвящена работа [11], где предложен подход к оценке расходов и уровней в дельте Дона на основе представлений о нестационарности водного потока, но практически не рассматривается вопрос их изменений при колебаниях объемов стока. В работе [12] приводится пример совместного рассмотрения изменчивости речного стока и сгонно-нагонных колебаний уровня замыкающего водоема.

Модель, содержащая как гидродинамическую составляющую, так и транспортную, приводится в [13], где описывается проникновение солёности в приливные устья рек. В этой работе, посвященной аллювиальным лиманам, учитывается форма лимана, его гидродинамика, смешивание и проникновение соли. Солёность воды в устье реки является результатом баланса между двумя противоположными потоками: потоком морской воды, генерируемым приливом и проникающим в устье, и потоком пресной воды, поступающим из русла.

В [14] исследуются одномерные усредненные по времени решения, связанные с приливным проникновением солёности в устья с переменной шириной и глубиной.

Целью данной работы является численное исследование на модельном примере процесса поступления солёной воды Таганрогского залива в рукав Старый Дон вследствие ветрового нагона воды. Влияющими факторами являются изменение уровня воды и концентрации соли в заливе, а также изменение расхода поступающей в русло воды из Цимлянского водохранилища.

Основные уравнения

Процесс проникновения солёных вод из Таганрогского залива в устье Дона рассматривается на примере основного русла и рукава Старый Дон протяженностью от ст-цы Раздорская до места впадения в Таганрогский залив.

Математическая модель состоит из двух составляющих – гидродинамической и транспортной. Гидродинамическая составляющая описывается уравнением движения [15, 16]

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

где s – координата; t – время; Q – расход воды; z – уровень воды; W – площадь поперечного сечения; q – распределенный боковой приток; K – модуль расхода; g – ускорение свободного падения.

Данная система замыкается граничными и начальными условиями:

$$\begin{aligned} Q(0, t) &= Q_1(t), & z(L, t) &= z_1(t), \\ Q(s, 0) &= Q_0(s), & z(x, 0) &= z_0(s). \end{aligned}$$

В случае, когда живое сечение русла имеет параболический профиль, система (1) может быть записана в виде

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

где b – текущая ширина русла. Подробное описание численной реализации гидродинамической составляющей (2) приведено в работе [17].

Транспортная составляющая консервативного вещества при отсутствии внутренних источников описывается уравнением конвекции – диффузии в не-дивергентной форме:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial s} - \mu \frac{\partial^2 C}{\partial s^2} = 0, \quad (3)$$

где C – концентрация; u – скорость движения воды в русле; μ – коэффициент вязкости. Предполагается, что коэффициент вязкости не зависит от точки пространства ($\mu = \text{const}$).

На верхней границе русла (входе) задается значение концентрации, например, можно считать, что соль отсутствует ($C = 0$). На нижней границе (устье) условие меняется в зависимости от знака скорости течения. При поступлении воды из залива в устье ($u < 0$), как это происходит во время сильных нагонов, ставится условие $\frac{\partial C}{\partial s} = \frac{u}{\mu}(C - C_{\text{зал}})$ – поступление соли из залива в устье. При нормальном состоянии или сгоне, когда вода поступает из устья в залив ($u > 0$), ставится условие $\frac{\partial C}{\partial s} + C \frac{u}{\mu} = 0$, которое соответствует удалению соли из устья.

Конечно-разностная аппроксимация уравнения (3) на равномерной сетке имеет вид

$$\frac{\delta C}{\delta t} + u \frac{\delta C}{\delta s} - \mu \frac{\delta^2 C}{\delta s^2} = 0, \quad (4)$$

а общий вид разностного уравнения следующий:

$$a_1 C_{j-1} + a_2 C_j + a_3 C_{j+1} = f_j, \quad j = 1, 2, \dots, M. \quad (5)$$

В уравнении (4) разности представлены следующим образом:

$$\frac{\delta C}{\delta t} = \frac{C_j^{n+1} - C_j^n}{\Delta t}, \quad \frac{\delta^2 C}{\delta s^2} = \frac{C_{j+1}^{n+1} - 2C_j^{n+1} + C_{j-1}^{n+1}}{\Delta s^2}.$$

Коэффициенты a_1, a_2, a_3 , а также правая часть f_j в (5) без учета конвективной составляющей имеют вид

$$a_1 = -\frac{\mu}{\Delta s^2} \Delta t, \quad a_2 = 1 + \frac{2\mu}{\Delta s^2} \Delta t, \quad a_3 = -\frac{\mu}{\Delta s^2} \Delta t, \quad f_j = c_j^n.$$

К коэффициентам a_1, a_2, a_3 добавляются слагаемые, полученные из аппроксимации конвективной составляющей с помощью второй противопотоковой схемы [18]:

$$u \frac{\delta C}{\delta s} = \frac{u_R C_R - u_L C_L}{\Delta s},$$

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

$$C_R = \begin{cases} C_j^{n+1}, & u_R > 0, \\ C_{j+1}^{n+1}, & u_R < 0, \end{cases} \quad C_L = \begin{cases} C_{j-1}^{n+1}, & u_L > 0, \\ C_j^{n+1}, & u_L < 0. \end{cases}$$

Расчеты на модельной задаче

Расчетная сетка состояла из 154 узлов с шагом 1000 м, морфометрические данные русла брались из [19]. В качестве начального распределения параметров течения были взяты параметры, полученные при установившемся течении для медианного значения расхода $535 \text{ м}^3/\text{с}$ [17] и уровне воды в Таганрогском заливе 0 м (по Балтийской системе). Расчеты проводились для промежутка времени, равного 48 ч. Было рассмотрено несколько сценариев, характерных для устьевой части Дона. По сценарию I уровень воды на правой границе сначала резко, а потом плавно повышался (случай нагона), затем оставался некоторое время в покое, а потом снижался. Предполагалось, что концентрация соли постоянна и равна 2‰, поступающий расход воды равен $535 \text{ м}^3/\text{с}$. Зависимость изменения уровня воды в устьевой точке z (см) от времени t (ч) представлена следующей формулой:

$$z(t) = \begin{cases} 0,15t, & t \leq 12, \\ 1,80 + 0,10(t - 12), & 12 < t \leq 18, \\ 2,40, & 18 < t \leq 20, \\ 2,40 - 0,15(t - 20), & 20 < t \leq 26, \\ 1,50 - 0,05(t - 26), & 26 < t \leq 48. \end{cases} \quad (6)$$

По сценарию II к изменению уровня воды добавлялось изменение концентрации соли в устьевой точке. Этот сценарий предполагал при постоянном расходе $535 \text{ м}^3/\text{с}$ изменение уровня воды в устьевой точке по формуле (6) и изменение концентрации соли в устьевой области по формуле

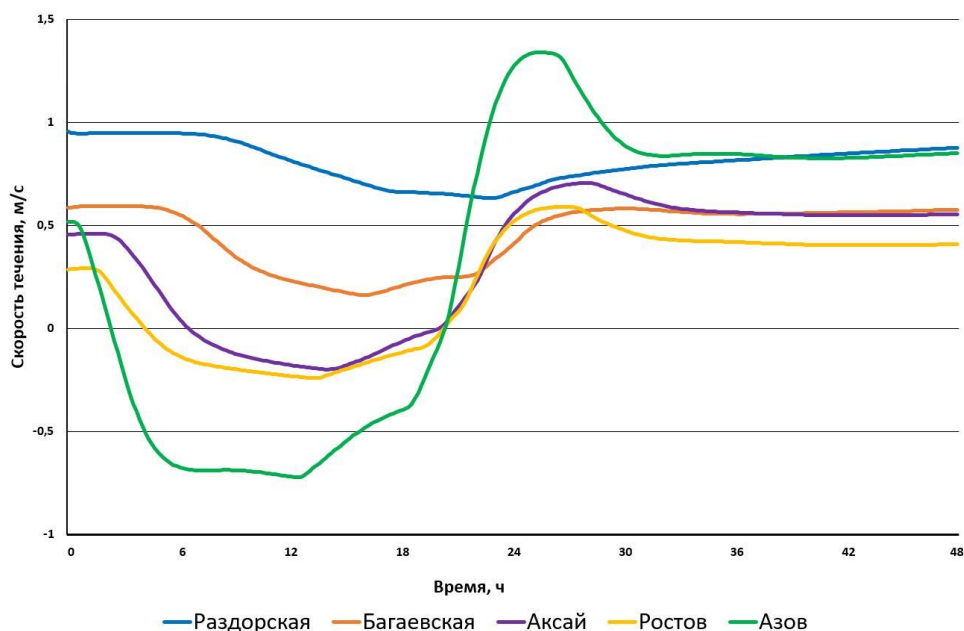
$$C(t) = \begin{cases} 0,2t, & t \leq 12, \\ 2,4 + 0,5(t - 12), & 12 < t \leq 20, \\ 6,4 - 0,9(t - 20), & 20 < t \leq 26, \\ 1,0 - 0,08(t - 26), & 26 < t \leq 48. \end{cases} \quad (7)$$

Такие значения концентрации соли возможны при поступлении морской воды в случае экстремальных ветровых нагонов [20].

Сценарий III предполагает изменение не только уровня воды в принимающем водоеме (6) и солености в устьевой точке (7), но и расхода поступающей в русло воды. Сначала расход воды увеличивался от пониженного значения $250 \text{ м}^3/\text{с}$ до повышенного $610 \text{ м}^3/\text{с}$, затем уменьшался до $412 \text{ м}^3/\text{с}$, что соответствует нормальному значению расхода воды [1], и оставался таким неизменным до окончания эксперимента. Зависимость изменения расхода поступающей воды ($\text{м}^3/\text{с}$) от времени t (ч) представлена следующей формулой:

$$Q(t) = \begin{cases} 250 + 10t, & t \leq 12, \\ 370 + 30(t - 12), & 12 < t \leq 20, \\ 610 - 33(t - 20), & 20 < t \leq 26, \\ 412, & 26 < t \leq 48. \end{cases} \quad (8)$$

Так как распространение солёности связано в основном с конвекционным процессом, особое внимание было уделено численному исследованию влияния расхода поступающей воды и уровня в принимающем водоеме на скорость течения в русле. Численное исследование показало, что на скорость течения в точках, близких к устью реки, расход воды оказывает не такое сильное влияние, как изменение уровня воды в принимающем водоеме. Причем влияние уровня воды ослабевает при продвижении вверх по течению, что соответствует выводам, приведенным в [10]. На рис. 1 показаны значения скорости течения в точках, соответствующих пунктам наблюдения, расположенным вдоль основного русла: Азов (16 км от устья Дона), Ростов-на-Дону (44 км), Аксай (64 км), Багаевская (112 км), Раздорская (152 км). Видно, что изменение уровня воды в Таганрогском заливе, происходящее по зависимости (6), оказывает наибольшее влияние на скорость течения в районе Азова и выше по течению слабо влияет на него в районе ст-цы Раздорская. Образование обратного течения (графики соответствуют отрицательным значениям скорости) по данному сценарию возможно вплоть до г. Аксай.



Р и с. 1. Изменение скорости течения в различных точках русла Дона при изменении уровня воды в Таганрогском заливе

F i g. 1. Changes in the current velocity in different points of the Don channel when the sea level in the Taganrog Bay alters

На рис. 2 кроме графика уровня воды в принимающем водоеме показаны графики скорости течения в точке, расположенной от устья на расстоянии 16 км, что соответствует расположению Азовского порта. Сценарий I предполагает изменение уровня воды по зависимости (6) при постоянном расходе, сценарий III – изменение уровня воды и величины расхода по зависимости (8). Видно, что кривые скоростей течения по этим двум сценариям ведут себя почти одинаково, что говорит о незначительном влиянии расхода поступающей в русло воды на скорость течения в устье реки. Различие в скоростях течения в районе Азова, вычисленных по сценариям I и III, составляет 14%. Погрешность вычислялась по формуле

$$\delta = \frac{\sqrt{\sum_j (v_j^I - v_j^{III})^2}}{\sqrt{\sum_j (v_j^I)^2}} \cdot 100\%$$

где v_j^I – скорости по сценарию I; v_j^{III} – скорости по сценарию III.

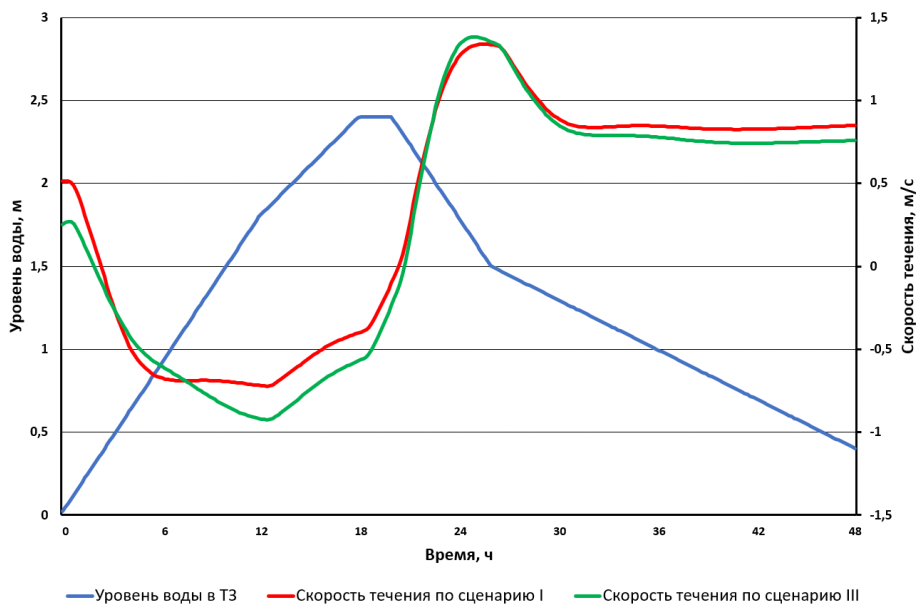
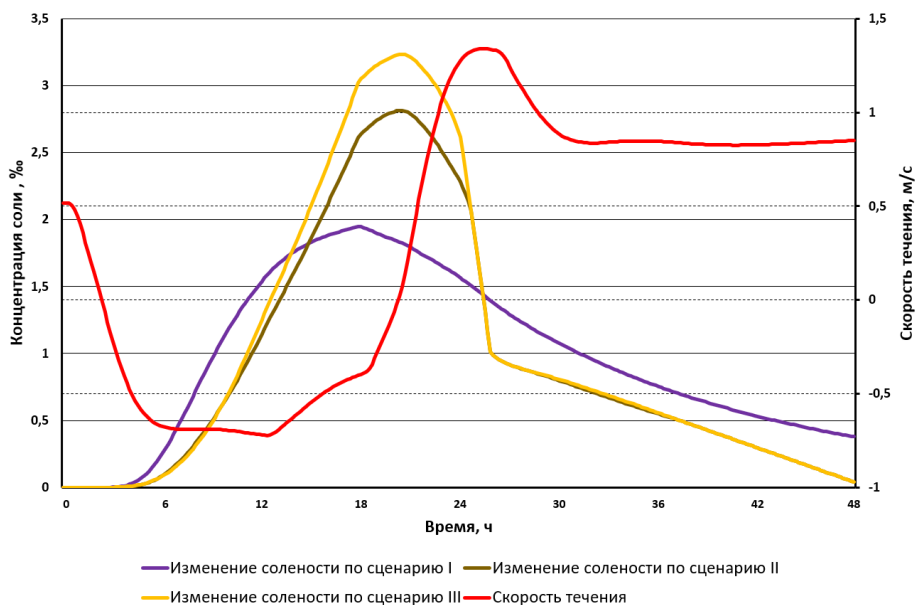


Рис. 2. Изменение скорости течения в Таганрогском заливе в зависимости от уровня воды (по Балтийской системе) в принимающем водоеме

Fig. 2. Changes in the current velocity in the Taganrog Bay depending on the sea level (according to the Baltic system) in the host reservoir

Отсюда следует, что изменение солёности в рукаве Старый Дон в большей степени зависит от изменения уровня воды в Таганрогском заливе, а не от расхода поступающей воды. Кроме того, численно установлено, что при медленном повышении уровня воды в принимающем водоеме обратное течение не возникает. Солёные воды могут попасть в устье реки только при резком повышении уровня воды в принимающем водоеме.

Возвращаясь к рис. 2, рассмотрим скорость течения в районе Азова в зависимости от изменения уровня воды в Таганрогском заливе. Видно, что при достаточно резком повышении уровня воды скорость течения начинает падать до нуля, а затем принимает отрицательные значения, соответствующие обратному течению реки. Затем при прекращении подъема воды обратное течение тормозится и при последующем понижении уровня воды скорость начинает возрастать до положительных значений, что соответствует возникновению прямого течения, которое стабилизируется по мере возвращения уровня к первоначальному значению.



Р и с. 3. Изменение солёности по трем сценариям в районе Азова в зависимости от скорости течения

F i g. 3. Changes of salinity in the Azov region by three scenarios depending on the current velocity

Изменение скорости течения и солёности показано на рис. 3. Так как скорости течения, как ранее установлено, по сценариям I, II и III отличаются незначительно, на рисунке представлена скорость течения только для сценария I. Изменение концентрации соли зависит как от скорости течения, так и от направления потока. В начальный момент концентрация была равна нулю, что соответствует пресной воде, а затем стала возрастать, как только скорость течения приобрела отрицательные значения. Возрастание концентрации соли проходило до тех пор, пока обратное течение не прекратилось ($V = 0$). Затем концентрация соли стала снижаться при появлении прямого течения в русле. Существенное различие в значениях концентрации для сценариев II и III в первые 12 ч расчетного времени объясняется тем, что первоначальный расход воды по сценарию III был существенно ниже рассматриваемого среднего. По этой причине скорость течения в русле изначально была меньше, что привело к более быстрому поступлению соленой воды в рукав Дона. В последующие

часы (с 12-го по 26-й), когда наблюдалось резкое изменение уровня воды, различие концентраций составляло 9,5%. Начиная с 26-го часа и до конца эксперимента более высокая концентрация в сценарии III объясняется пониженным расходом поступающей воды, что приводит к меньшей скорости течения и, следовательно, к более медленному удалению соли из русла.

Заключение

Проведенные вычислительные эксперименты на модельной задаче показали, что на поступление соленой воды из Таганрогского залива в дельту Дона решающее влияние оказывает резкое повышение уровня воды, что может приводить к проникновению соленой воды до Ростова и Аксая. К существенным повышениям уровня воды приводят экстремальные ветровые нагоны, а предшествующие им сгоны еще более усиливают этот эффект. Кроме того, нагоны могут приводить к затоку более соленой воды с юга Азовского моря, что в свою очередь существенно увеличивает соленость в устьевой области Таганрогского залива. Исследование сгонно-нагонных явлений в устье Дона показало присутствие в них сложных гидродинамических процессов. Предложенная модель дает представление об общей тенденции развития процесса возможного осолонения дельты Дона при нагонных явлениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матишов Г. Г., Григоренко К. С., Московец А. Ю. Механизмы осолонения Таганрогского залива в условиях экстремально низкого стока Дона // Наука Юга России. 2017. Т. 13, № 1. С. 35–43. doi:10.23885/2500-0640-2017-13-1-35-43
2. Матишов Г. Г., Григоренко К. С. Причины осолонения Таганрогского залива // Доклады Академии наук. 2017. Т. 477, № 1. С. 92–96.
3. Матишов Г. Г., Ковалева Г. В., Ясакова О. Н. Аномальное осолонение в Таганрогском эстуарии и дельте Дона // Наука Юга России (Вестник Южного научного центра). 2016. Т. 12, № 1. С. 43–50.
4. Долгопериодная изменчивость термохалинных характеристик Азовского моря на основе численной вихреразрешающей модели / А. И. Мизюк [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 5. С. 496–510. doi:10.22449/0233-7584-2019-5-496-510
5. Фомин В. В., Полозок А. А., Фомина И. Н. Моделирование циркуляции вод Азовского моря с учетом речного стока // Морской гидрофизический журнал. 2015. № 1. С. 16–28. doi:10.22449/0233-7584-2015-1-16-28
6. Косенко Ю. В., Баскакова Т. Е., Картамышева Т. Б. Роль стока реки Дон в формировании продуктивности Таганрогского залива // Водные биоресурсы и среда обитания. 2018. Т. 1, № 3–4. С. 32–39.
7. Экстремальное наводнение в дельте Дона (23–24.03.13) и факторы, его определяющие / Г. Г. Матишов [и др.] // Доклады Академии наук. 2014. Т. 455, № 3. С. 342–345.
8. Матишов Г. Г. Случаи экстремальной адвекции соленых вод в дельту Дона и льда в Керченский пролив // Доклады Академии наук. 2015. Т. 465, № 1. С. 99–103. doi:10.7868/S0869565215310229
9. 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.
10. Симов В. Г. Гидрология устьев рек Азовского моря. М. : Гидрометеиздат, 1989. 328 с.
11. Мишин Д. В., Полонский В. Ф. Исследование нестационарных водных потоков в неприливном устье реки Дон // Труды государственного океанографического института. 2013. № 214. С. 166–179.

12. *Polonskii V. F., Ostroumova L. P.* Probabilistic Estimates of Water Level in the Ural River Mouth Reach at Interaction between the River Runoff and Positive Setups // *Water Resources*. 2002. Vol. 29, iss. 5. P. 497–505. <https://doi.org/10.1023/A:1020365512557>
13. *Savenije H. H. G.* Salinity and Tides in Alluvial Estuaries. Second Completely Revised Edition. 2012. URL: <http://www.salinityandtides.com> (date of access: 08.01.2015).
14. *Prandle D.* Salinity intrusion in estuaries // *Journal of Physical Oceanography*. 1981. Vol. 11, iss. 10. P. 1311–1324. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1981\)011<1311:SIE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1981)011<1311:SIE>2.0.CO;2)
15. *Грушевский М. С.* Волны попусков и паводков в реках. Л. : Гидрометеоиздат, 1969. 337 с.
16. *Корень В. И.* Математические модели в прогнозах речного стока. Л. : Гидрометеоиздат, 1991. 197 с.
17. Сгонно-нагонные колебания уровня воды устьевой области Дона: численное моделирование и сценарии изменения / А. Л. Чикин [и др.] // *Наука Юга России*. 2017. Т. 13, № 3. С. 39–49. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29946413> (дата обращения: 10.08.2020).
18. *Роуч П.* Вычислительная гидродинамика. М. : Мир, 1980. 616 с.
19. Атлас единой глубоководной системы Европейской части РФ. Том 8. Часть 2. Волго-Донской водный путь. От Волгодонска до устья Дона. СПб. : Волго-Балт, 2006. 40 с.
20. *Матишов Г. Г., Григоренко К. С.* Маловодье и роль грунтовых вод в осолонении авандельты Дона // *Доклады Академии наук*. 2018. Т. 483, № 4. С. 442–446. doi:10.31857/S086956520003284-5

Об авторах:

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

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