

Моделирование проникновения соленых вод в основные рукава дельты Дона в зависимости от ветровой ситуации

А. Л. Чикин^{1*}, А. В. Клещенков¹, Л. Г. Чикина²

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Федеральный исследовательский центр Южный научный центр
Российской академии наук», Ростов-на-Дону, Россия

² Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Южный федеральный университет», Ростов-на-Дону, Россия

*e-mail: chikin1956@gmail.com

Аннотация

Представлена математическая модель, объединяющая в себе модель распределения солености в Азовском море и модель транспорта вещества в рукавах дельты Дона. В русловой модели дельтовой области Дона входными данными являются уровень воды и соленость в принимающем водоеме – Таганрогском заливе. Гидродинамическая составляющая модели для Азовского моря описывается уравнениями мелкой воды, а движение в рукавах дельты Дона – уравнениями Сен-Венана. Распределение концентрации соли в море и в рукавах Дона определяется с помощью уравнений конвекции – диффузии, записанных соответственно для двухмерного и одномерного случаев. Задача решается конечно-разностными методами на равномерных сетках. В морской модели полученные системы линейных алгебраических уравнений решаются с помощью пакета *Aztec*. В речной модели используется пакет *LAPACK*. Предлагаемая модель позволяет в зависимости от ветровой ситуации над акваторией Азовского моря рассчитать параметры течения и распределение солености во всем Азовском море, включая Таганрогский залив. Эти параметры являются входными данными для русловой модели с дальнейшим определением скорости течения, уровня водной поверхности и солености в основных рукавах дельты Дона. Приводится сравнение расчетных значений гидрофизических параметров с данными, зафиксированными в ходе морских экспедиций. Сравнение показало достаточную адекватность модели.

Ключевые слова: устьевая область, уравнения мелкой воды, уравнения Сен-Венана, уравнение переноса, уровень свободной поверхности, вычислительный эксперимент

Благодарности: публикация подготовлена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН, № госрегистрации проекта 122011900153-9. Работа выполнена на оборудовании ЦКП «Объединенный центр научно-технологического оборудования ЮНЦ РАН (исследование, разработка, апробация)» № 501994. Расчеты выполнены на кластере ЦКП Южного федерального университета «Высокопроизводительные вычисления».

© Чикин А. Л., Клещенков А. В., Чикина Л. Г., 2023



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0
International (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0
International (CC BY-NC 4.0) License

Для цитирования: Чикин А. Л., Клещенков А. В., Чикина Л. Г. Моделирование проникновения соленых вод в основные рукава дельты Дона в зависимости от ветровой ситуации // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 4. С. 56–72. EDN KFZQNW.

Modelling Salt Water Intrusion into Main Branches of the Don Delta depending on Wind Situation

A. L. Chikin^{1*}, A. V. Kleshchenkov¹, L. G. Chikina²

¹ Federal State Budgetary Institution of Science "Federal Research Center Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences", Rostov-on-Don, Russia

² Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Southern Federal University", Rostov-on-Don, Russia

* e-mail: chikin1956@gmail.com

Abstract

The paper presents a mathematical model that combines a model of salinity distribution in the Sea of Azov and a model of substance transport in branches of the Don delta. In the channel model of the Don delta area, the input data are the water level and salinity in the recipient water body, Taganrog Bay. The hydrodynamic component of the model for the Sea of Azov is described by the shallow water equations, and the movement in branches of the Don delta is described by the Saint-Venant equations. The distribution of salt concentration in the sea and in the Don branches is determined using the convection–diffusion equations written for two-dimensional and one-dimensional cases, respectively. The problem was solved by finite difference methods on uniform grids. In the marine model, the resulting systems of linear algebraic equations were solved using the Aztec package. In the channel model, the LAPACK package was used. Depending on the wind situation over the Sea of Azov, the proposed model allows calculating the current parameters and salinity distribution in the entire Sea of Azov, including Taganrog Bay. These parameters are input data for the channel model which further determines the velocity of currents, the water surface level, and salinity in the main branches of the Don delta. The paper compares the calculated values of hydrophysical parameters with the observed data obtained during sea expeditions. The comparison showed the adequacy of the model.

Keywords: mouth area, shallow water equations, Saint-Venant equations, transport equation, free surface level, computational experiment

Acknowledgments: The publication has been prepared under state assignment; state registration no. 122011900153-9. The work was performed on the equipment of the Joint Center for Scientific and Technological Equipment of the SSC RAS (research, development, approbation) No. 501994. The calculations were performed on the cluster of the High-Performance Computing Center of Southern Federal University.

For citation: Chikin, A.L., Kleshchenkov, A.V. and Chikina, L.G., 2023. Modelling Salt Water Intrusion into Main Branches of the Don Delta depending on Wind Situation. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 56–72.

Введение

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, с которыми связано поступление морских трансформированных вод в рукава дельты Дона [1, 2].

Серьезную угрозу затопления 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 такой ситуации затопление происходит быстрее и оно сильнее по масштабу, чем при постоянно действующем западном ветре. Подобная картина наблюдалась 23.03.2013, когда восточный ветер (3–11 м/с) сменился на юго-западный (15 м/с с порывами 20–22 м/с). В проведенных численных экспериментах, в которых направление ветра меняется на противоположное, данное явление подтверждается [3]. Такие экстремальные нагоны возможны только при сильных ветрах юго-западного направления. Кроме того, на сгонно-нагонные явления могут влиять сейшевые колебания, которые значительны в Азовском море [4], но в представленной модели не учитываются.

Соленые воды Таганрогского залива при определенных гидрометеорологических условиях проникают в дельту р. Дон, где находятся водозаборы крупнейших городов Ростовской агломерации, таких как Азов и Таганрог. Кроме того, введен в эксплуатацию новый водовод в ДНР. Во время сильного нагона в июне 2014 г. наблюдался подъем уровня моря до 1.7 м, а соленость в устье Дона достигала 5 ЕПС [5, 6]. В сентябре 2014 г. вода с повышенной (5–9 ЕПС) соленостью проникла по Дону до Азова и поступила в городской водопровод. Впоследствии подобное повторялось несколько раз, наиболее значительно в феврале 2021 г. [7].

В последние десятилетия мы наблюдаем масштабные изменения климата, которые привели к существенным изменениям условий окружающей среды в бассейне Дона и Азовском море. Маловодье Дона продолжается уже 17 лет и является самым длительным за последние 100 лет. Это привело к значительному сокращению пресного стока в Таганрогский залив Азовского моря и увеличению солености как в самом море, так и в Таганрогском заливе. Средняя соленость морской воды увеличилась до 14 ЕПС (в 1970-е гг. такая соленость считалась критической для экосистемы моря), а в Таганрогском заливе достигла 10 ЕПС [8]. Анализ экспедиционных данных океанологических исследований ЮНЦ РАН свидетельствует о продолжающемся росте солености. Сокращение стока Дона до исторических минимумов, наряду с аномальной адвекцией черноморских вод, привело к тому, что в течение 2014–2016 гг. в Таганрогском заливе наблюдалась аномально высокая соленость (до 12 ЕПС) [2]. Следует отметить, что скорость увеличения среднегодовой солености воды в море в настоящее время превышает темпы, наблюдавшиеся в середине 1970-х гг., в предыдущий период низкого уровня воды в Доне [9]. В связи с этим становится все более актуальным исследование проникновения соленой морской воды в дельту р. Дон.

В настоящее время появилось много работ по моделированию проникновения соленых вод в устья рек. В основном эти работы связаны с приливными процессами. Так, в работе [10] описывается модель поступления соли в устье р. Сан-Франсиско. При этом используется численное решение задач адвекции – диффузии в гидродинамике на неструктурированной сетке [11].

Численная модель для изучения сезонной изменчивости течений и солености в устье р. Инд в Пакистане приведена в [12]. Модель откалибрована с учетом наблюдаемого уровня воды, скорости течения и данных о солености. Результаты моделирования показывают, что соленая вода вторгается далеко вверх по течению – примерно на 65 км.

Устье Дона не подвержено приливным процессам. Проникновение соленых вод в основные русла Дона происходит при нагонных явлениях, когда уровень воды в Таганрогском заливе существенно повышается. Поэтому проникновение соленых вод в основные рукава Дона непосредственно связано с соленостью воды в устье рукавов, а также движением воды в русловых каналах. Здесь на течение воды в русле реки влияет в первую очередь уровень воды в принимающем водоеме, в данном случае в Таганрогском заливе.

Целью представленной работы является численное исследование именно этого явления. Использование математической модели, основанной на уравнениях движения несжимаемой жидкости, а также уравнения конвекции – диффузии (переноса), позволяет изучить проникновение соленой воды в дельту Дона в процессе ее затопления.

По этим причинам при моделировании процесса проникновения соленых вод в основные русла Дона необходимо сделать следующие шаги для вычисления необходимых параметров.

1. Определить уровень воды в устьях рукавов при заданной ветровой ситуации над Азовским морем и Таганрогским заливом.
2. Определить величину солености воды в устьях рукавов.
3. Определить скорость движения воды в основных рукавах Дона и распределение в них солености.

Первые две задачи решаются с помощью двухмерной модели гидродинамики ветровых течений в Азовском море, а также модели распределения в нем солености [13]. Третья задача решается с помощью одномерных моделей движения воды в руслах и переноса вещества [14].

Материалы и методы

С начала 2000-х гг. в ходе морских экспедиций ЮНЦ РАН ведет систематические наблюдения за термохалинной структурой вод устьевого взморья и дельты р. Дон. Начиная с лета 2014 г. исследования динамики изменения солености и температуры воды совместно с измерением направления и скорости течения регулярно проводили комплексным измерителем течений *Aanderaa RSM-9LW* (URL: https://www.aanderaa.com/media/pdfs/Seaguard_RCM-TD262b_001.pdf) на стационарной буйковой станции на взморье в 5 км от края дельты (первый створный знак Азово-Донского морского канала) и в устье Дона (х. Донской, с. Кагальник), а также в дельте Дона на сети судовых океанологических станций. Параллельно с этим велись наблюдения за метеопараметрами и уровнем воды на гидропосту (ГП) х. Донской и уровнемерном посту в г. Таганроге.

Для исследования пространственного распределения температуры и солености морской воды в Азовском море и Таганрогском заливе проводилась непрерывная запись данных о температуре и электропроводности воды поверхностного горизонта термосоленографом *SBE 21 SEACAT* (<https://www.seabird.com/sbe-21-seacat-thermosalinograph/product?id=60762467702>) в ходе рейсов НИС «Денеб».

Областью расчета является устьевой участок Нижнего Дона от ст. Раздорской до Таганрогского залива, включая его восточную часть. Данный участок состоит из основного русла Дона и его основных рукавов – Старого Дона, Большой Каланчи, переходящей в Мокрую Каланчу и Большую Кутерьму (рис. 1). Белыми кружками обозначены точки в Таганрогском заливе, в которых брали рассчитанные значения уровня воды, черные треугольники соответствуют гидропостам, где проводили наблюдения.

Перенос солености в Азовском море описывается системой, содержащей уравнения для длинных волн в однородной несжимаемой жидкости в поле силы Кориолиса и уравнение переноса в предположении консервативности распространяемого вещества [15]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - f \cdot v &= -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{H} - \frac{\tau_{bx}}{H}, \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + f \cdot u &= -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{H} - \frac{\tau_{by}}{H}, \\ \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial(Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(Hv)}{\partial y} &= 0, \\ \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial(uc)}{\partial x} + \frac{\partial(vc)}{\partial y} &= \varepsilon_{xy} \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right), \end{aligned} \quad (1)$$

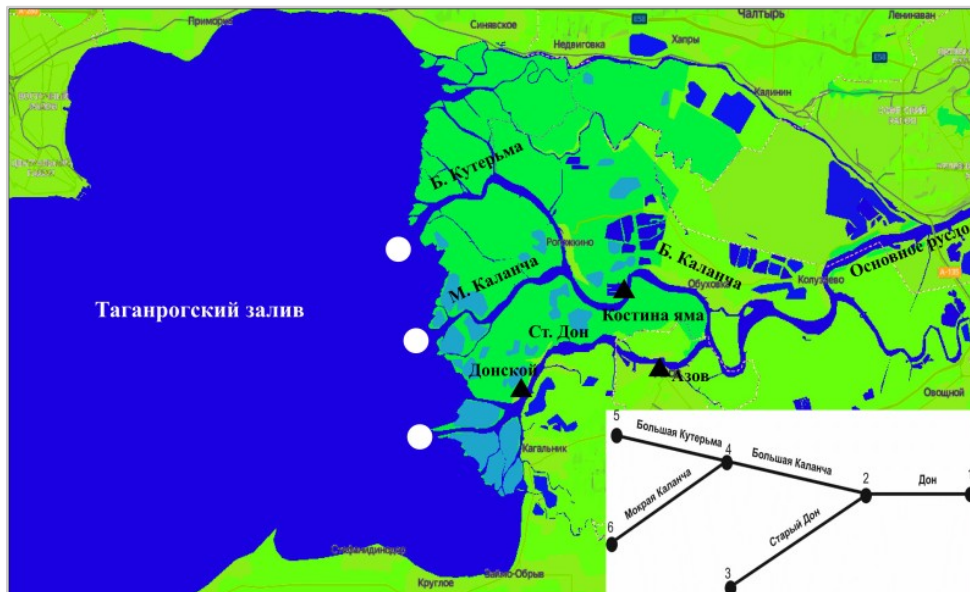
где $H = h + \zeta$; $h = h(x, y)$ – глубина; f – параметр Кориолиса; ζ – перепад уровня воды; $u = u(x, y, t)$, $v = v(x, y, t)$ – скорости; c – концентрация; ε_{xy} – коэффициент горизонтальной турбулентной диффузии; τ_{sx} , τ_{sy} – проекции на оси OX и OY силы трения ветра о поверхность водоема; τ_{bx} , τ_{by} – проекции на оси OX и OY силы трения воды о дно. Эти величины зависят от скорости ветра $\mathbf{W}_B = \{W_x; W_y\}$ и течения $\mathbf{W}_T = \{u; v\}$ и определяются так [16]:

$$\tau_s = \gamma |\mathbf{W}_B| \mathbf{W}_B, \quad \tau_b = \beta |\mathbf{W}_T| \mathbf{W}_T,$$

где $|\mathbf{W}_B| = \sqrt{W_x^2 + W_y^2}$, $|\mathbf{W}_T| = \sqrt{u^2 + v^2}$, γ – коэффициент трения ветра о свободную поверхность; β – коэффициент трения жидкости о дно.

Вдоль твердой границы ставятся условия скольжения или задаются скорости втекания или вытекания воды (например, для устьев рек). Предполагается, что поток через свободную поверхность и боковую границу отсутствует.

Следуя работе [17], дельту Дона представим в виде графа (врезка на рис. 1), состоящего из пяти ребер и шести вершин. Ребра соответствуют участкам открытых русел – основному руслу Дона и его рукавам. Четыре вершины соответствуют концевым узлам (1, 3, 5, 6), а две – узлам разветвлений (2, 4).



Р и с. 1. Область расчета устьевого участка р. Дон. На врезке схема дельтовой части: 1, 3, 5, 6 – концевые узлы; 2, 4 – узлы разветвлений

Fig. 1. The area of calculation of the Don River mouth section. The inset shows the diagram of the delta part: 1, 3, 5, 6 – end nodes; 2, 4 – branch nodes

Проникновение соленой воды в рукава Дона описывается одномерными уравнениями движения воды в открытом русле и переноса консервативного вещества [18]. Предполагается, что на исследуемом участке русла Дона зоны резкого изменения живого сечения, а также распределенный боковой приток в силу его незначительности отсутствуют. В случае, когда поперечное сечение русла имеет параболический профиль, данную систему можно переписать в виде

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

$$b \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0,$$

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

где x – координата; t – время; Q – расход воды; z – уровень воды; W – площадь живого сечения; K – модуль расхода; g – ускорение свободного падения; b – ширина русла; S – концентрация; v – скорость движения воды в русле; μ – коэффициент турбулентной диффузии. Модуль расхода K вычисляется по формуле $K = \omega \cdot C \sqrt{R}$, здесь R – гидравлический радиус; C – коэффициент Шези, найденный по формуле Маннинга $C = \sqrt[4]{R}/n$, n – шероховатость дна.

Первые два уравнения системы (2) (гидродинамическая составляющая) сводятся к характеристическим уравнениям

$$\begin{aligned} \frac{gW}{c_*} \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial t} + gW \frac{\partial z}{\partial x} + c_* \frac{\partial Q}{\partial x} &= -gW \frac{Q|Q|}{K^2}, \\ -\frac{gW}{c_*} \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial t} + gW \frac{\partial z}{\partial x} - c_* \frac{\partial Q}{\partial x} &= -gW \frac{Q|Q|}{K^2}, \end{aligned}$$

где $c_* = \sqrt{gW/b}$.

В качестве граничных условий в начальной точке (узел 1) задается расход поступающей воды $Q_0(0, t)$, в конечных точках (узлы 3, 5, 6) задается уровень в принимающем водоеме $z_k(X_k, t)$. В узлах ветвления граничные условия задаются следующим образом: сумма притоков – оттоков равна нулю $\sum_i Q_i = 0$ (i – число рукавов, приходящих в узел разветвления), а уровни водной поверхности равны между собой: $z_i = z$.

На концах рукавов граничные условия задаются в зависимости от знака скорости течения. В случае поступления воды в рукав задается условие $\frac{\partial S}{\partial x} = \frac{v}{\mu}(S - S^*)$, где S^* – значение концентрации соли на конце рукава.

В случае, когда вода покидает рукав, ставится условие $\frac{\partial S}{\partial x} + S \frac{v}{\mu} = 0$, которое соответствует удалению соли из рукава.

Так, во время сильных нагонов на границе рукавов, совпадающих с устьями в Таганрогском заливе, ставится условие $\frac{\partial S}{\partial x} = \frac{v}{\mu}(S - S_{zal})$, где S_{zal} – концентрация соли в Таганрогском заливе. Если 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.

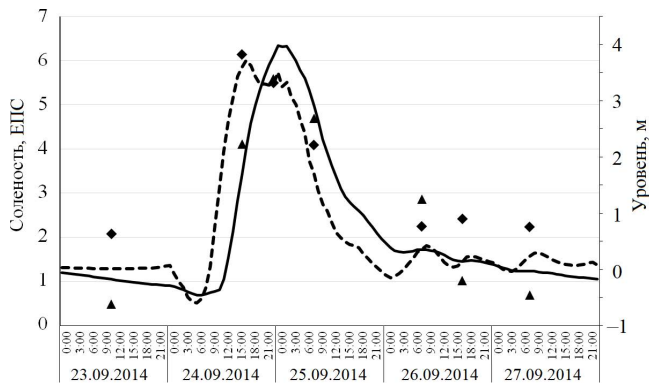
Задача решается конечно-разностными методами с использованием неявных схем. В «морской» модели (1) строится сетка с шагами $\Delta x = 660$ м, $\Delta y = 685$ м, в «русловой» модели (2) шаг $\Delta x = 1000$ м. Устойчивый счет соблюдается при шаге по времени $\Delta t = 30$ с. На каждом временном шаге сначала вычисляются гидрофизические параметры во всем Азовском море, затем выбираются значения солености и уровня воды в точках, соответствующих устьям рукавов Дона. Эти точки обозначены кружками на рис. 1. Далее продолжается расчет в русловой области Дона. После этого осуществляется переход на новый временной слой.

Результаты расчетов и обсуждение

С использованием данных наблюдений за соленостью были проведены расчеты при соответствующих ветровых ситуациях. Данные о ветре брались с береговых метеостанций, расположенных вокруг Азовского моря. Для каждой расчетной точки определяли три ближайшие метеостанции, а затем с помощью линейной интерполяции определяли в ней зональную и меридиональную координаты скорости ветра.

С 23.09.2014 по 27.09.2014 наблюдался экстремальный нагон, который сопровождался затоком соленой воды в рукава Дона [6]. В начале периода действовал ветер восточного направления скоростью 2–4 м/с. С 10:00 24.09.2014 ветер изменил направление на юго-западное и усилился до 20 м/с. Это привело к резкому подъему воды и повышению солености. Максимальные значения уровня и солености воды в районе азовского порта пришлось на 24–25 сентября и составили соответственно 3.82 м и 5.59 ЕПС. Изменение солености воды и уровня водной поверхности в районе азовского порта представлено на рис. 2. Расчеты подтверждают тот факт, что изменение солености прямо пропорционально изменению уровня воды. Погрешность расчетов составляет 19.1 % для солености и 22.8 % для уровня воды.

Один из последних относительно сильных нагонов с поступлением соленой воды в рукава Дона наблюдался 12–16 февраля 2021 г. В этот период подъем воды наблюдался дважды. С 15:00 12.02.2021 после действия западного ветра скоростью 13–16 м/с был первый подъем воды, затем с ослаблением ветра до 4–6 м/с уровень снизился. Но начиная с 12:00 13.02.2021 ветер



Р и с. 2. Соленость воды и уровень водной поверхности в акватории порта Азов с 24.09.2014 по 27.09.2014. Треугольники – зафиксированная концентрация; сплошная линия – расчетная концентрация; ромбы – зафиксированный уровень; штриховая линия – расчетный уровень

F i g. 2. Water salinity and water level in the water area of the port of Azov from 24.09.2014 to 27.09.2014. The triangles are observed concentration; the solid line is calculated concentration. The diamonds are the observed level; the dashed line is the calculated level

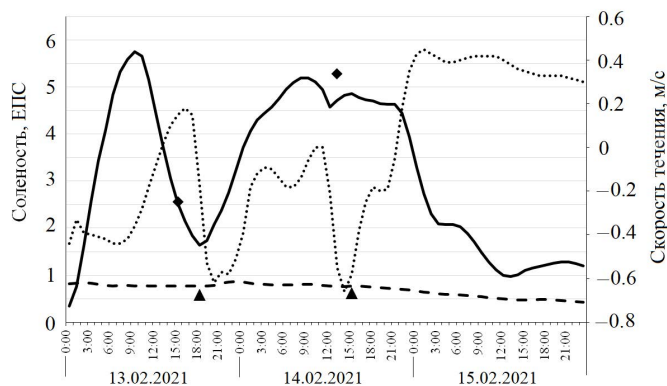
снова усилился до 12–16 м/с, что привело к новому подъему воды. Затем ветер ослаб до 1–2 м/с и принял северо-западное направление.

Отбор проб проводился повторно в Ростове-на-Дону (городской пляж) и Азова (порт). В пунктах Ростова-на-Дону (Нахичеванская протока), х. Колузаево, х. Дугино, х. Рогожкино отборы были проведены только один раз. На рис. 3 приведено изменение солености в районе ростовского пляжа и азовского порта, а также скорости течения в районе азовского порта.

В таблице приведено время отбора проб воды, расчетное и зафиксированное значения солености, а также погрешность расчета.

Изменение солености напрямую зависит от колебаний уровня воды в устьях рукавов, что вполне естественно. Видно, что изменение солености в азовском порту, который расположен в 15 км от устья, происходит с большими амплитудами, чем в районе Ростовского пляжа, расположенного в 50 км от того же устья (рис. 3). Здесь же можно видеть, что соленость увеличивается почти сразу после того, как скорость течения становится отрицательной (обратное течение), и уменьшается с восстановлением прямого течения.

С 22.11.2022 по 23.11.2022 на ГП Донской проводились замеры солености и скорости течения. В начале этого периода был ветер юго-западного направления скоростью 4–5 м/с, затем он усилился до 12–14 м/с, что привело к нагону с проникновением соленой воды в дельту Дона. Сравнение результатов расчета солености и скорости течения с зафиксированными данными

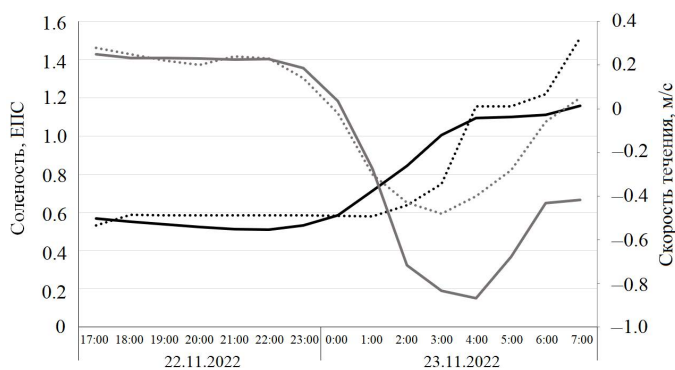


Р и с. 3. Соленость и скорость течения в районе порта Азов с 13.02.2021 по 15.02.2021. Треугольники – Ростовский пляж (наблюдение); штриховая линия – Ростовский пляж (расчет); ромбы – азовский порт (наблюдение); сплошная линия – азовский порт (расчет); пунктирная линия – скорость течения (азовский порт)

Fig. 3. Salinity and velocity of current in the area of the Azov port from 13 February 2021 to 15 February 2021. The triangles are the Rostov beach (observed). The dashed line is the Rostov beach (calculated). The diamonds are the port of Azov (observed). The solid line is the port of Azov (calculated). The dotted line is the velocity of current (the port of Azov)

Сравнение расчетных значений солености (ЕПС) с наблюдениями
Comparison of calculated salinity values (PSU) with observations

Место отбора пробы / Sampling location	Расстояние от устья, км / Distance from the mouth, km	Дата, время / Date, time	Соленость по результатам / Salinity		Погрешность, % / Error, %
			наблюдений / Observed	расчета / Calculated	
г. Ростов-на-Дону (Нахичеванская протока) / Rostov-on-Don (Nakhichevan Duct)	52.3	13.02.2021 14:54	0.79	0.756	4.30
г. Ростов-на-Дону (городской пляж) / Rostov-on-Don (city beach)	49.4	13.02.2021 15:41	0.79	0.768	2.78
г. Ростов-на-Дону (городской пляж) / Rostov-on-Don (city beach)	49.4	14.02.2021 12:27	0.83	0.760	8.43
х. Колузаево / Khutor of Koluzaevo	34.5	14.02.2021 16:35	0.85	0.694	18.35
х. Дугино / Khutor of Dugino	22.3	13.02.2021 17:48	3.24	0.768	76.30
х. Рогожино / Khutor of Rogozhkinno	11.7	13.02.2021 17:22	3.97	1.023	74.23
г. Азов (порт) / City of Azov (port)	15.0	13.02.2021 14:36	2.56	2.534	1.02
г. Азов (порт) / City of Azov (port)	15.0	14.02.2021 12:15	5.28	4.72	10.61



Р и с. 4. Соленость и скорость течения на ГП Донской с 22.11.2022 по 23.11.2022. Черные линии – соленость; серые линии – скорость; сплошные линии – расчет; пунктирные линии – наблюдение

Fig. 4. Salinity and velocity of current at the hydrological station of Donskoy from 22 November 2022 to 23 November 2022. The black lines are salinity; the grey lines are velocity; the solid lines are calculations; the dotted lines are observations

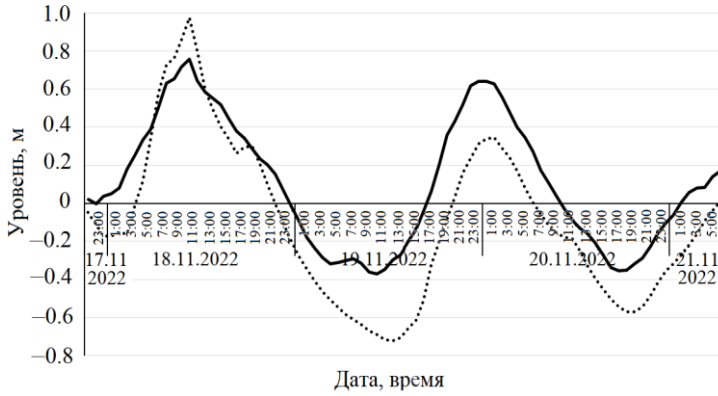
приведено на рис. 4. Заметный рост солености начинается в момент, когда течение меняет направление на противоположное, из моря в реку, а скорость становится отрицательной (рис. 4).

Погрешности расчетов для уровня воды составляют 27.7 %, для солености – 16.8 %, для скорости течения – 92.6 %. Большая погрешность при расчете скорости течения объясняется допущением о параболичности профиля дна, что в данном гидрологическом створе не вполне соответствует действительности.

При сопоставлении зафиксированных и расчетных значений обращает на себя внимание большая погрешность в расчетах солености в х. Дугино и х. Рогожкино, которые стоят на рукаве Большая Каланча, в то время как в остальных пунктах, расположенных в основном русле Дона и рукаве Старый Дон, эта погрешность приемлемая (таблица).

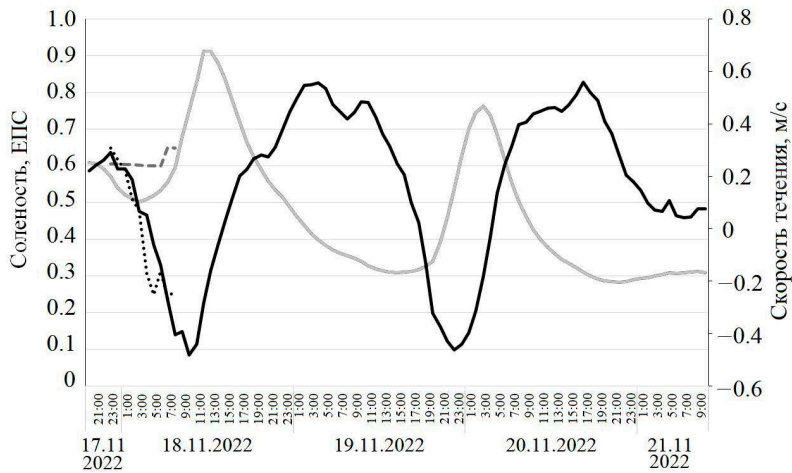
Для уточнения причин этого были проведены дополнительные расчеты гидродинамики в дельтовой области Дона по ветровой ситуации для умеренного нагона в ноябре 2022 г. В это время проводились измерения скорости и направления течений и солености воды с борта НИС «Денеб» в рукаве Старый Дон (ГП х. Донской, 7.2 км от устья) и в рукаве Большая Каланча (ниже ГП х. Дугино, 18 км от устья). Ход уровня воды в дельте во время нагона измерялся на уровнемере в х. Донском. На рис. 5 приведены зафиксированные и расчетные значения уровня воды на период наблюдений 17.11.2022–21.11.2022.

На рис. 6 показаны изменения расчетных и зафиксированных скоростей течения и солености на ГП х. Донской за период 17.11.2022–21.11.2022. Причем наблюдения здесь представлены только с 19:00 17.11.2022 по 7:00 18.11.2022, а дальше приведены расчетные значения, полученные с учетом ветровой ситуации на указанный период.



Р и с. 5. Ход уровня воды на ГП Донской в период с 17.11.2022 по 21.11.2022. Пунктирная линия – наблюдения; сплошная линия – расчет

F i g. 5. Change in the water level at the hydrological station of Donskoy from 17 November 2022 to 21 November 2022. The dotted line is observations. The solid line is calculations



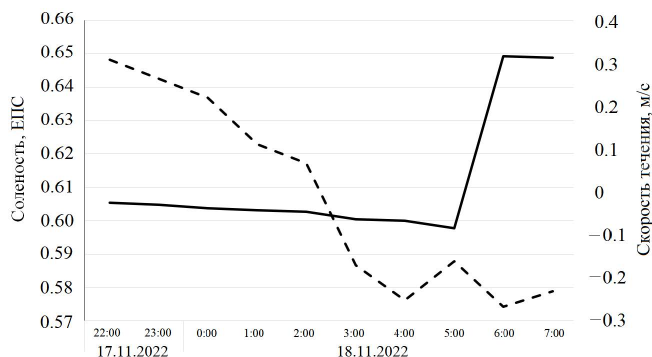
Р и с. 6. Расчетные и зафиксированные значения скорости течения и солености на ГП Донской в период с 17.11.2022 по 21.11.2022. Штриховая линия – зафиксированная соленость; сплошная серая линия – расчетная соленость; пунктирная линия – зафиксированная скорость; сплошная черная линия – расчетная скорость

F i g. 6. Calculated and observed values of the current velocity and salinity at the hydrological station of Donskoy from 17 November 2022 to 21 November 2022. The dashed line is observed salinity; the solid grey line is calculated salinity. The dotted line is observed velocity; the solid black line is calculated velocity

Здесь прослеживается четкая связь между направлением течения и изменением солёности: при отрицательной скорости, когда наблюдается обратное течение, из моря в реку, солёность увеличивается, а при положительной скорости солёность уменьшается. Эта связь подтверждается наблюдениями (рис. 6).

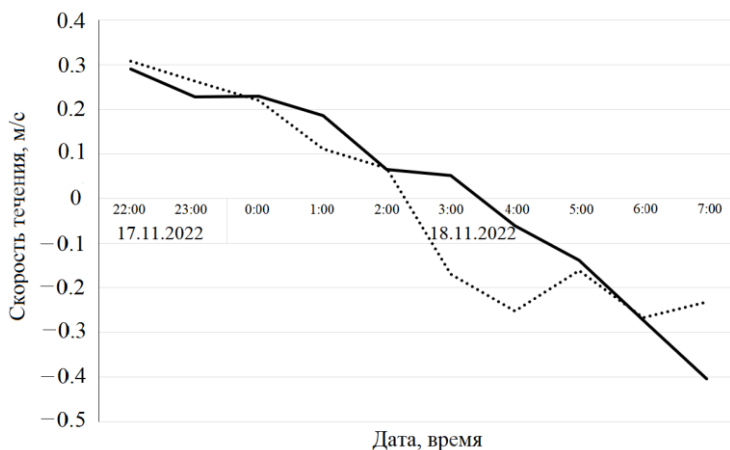
С 22:00 17.11.2022 скорость течения уменьшалась, оставаясь положительной примерно до 2:30. В это время солёность принимала значения, близкие к 0.60 ЕПС. Затем стало развиваться обратное течение, в 5:00 18.11.2022 произошло резкое повышение солёности. Разница во времени между началом обратного течения и скачком солёности объясняется тем, что Донской расположен в 6.5 км от Таганрогского залива и требуется время, чтобы солёная вода поступила к пункту наблюдения. Видно (рис. 7), что при обратном течении, начиная с 5:00 18.11.2022, солёность резко возрастает. Данный рисунок является увеличенной копией начальной части графика, представленного на рис.6.

На рис. 8 представлено изменение расчетных и зафиксированных значений скорости течения в период наблюдения с 22:00 17.11.2022 по 7:00 18.11.2022. Динамика расчетных значений хорошо согласуется с динамикой зафиксированных значений. Однако наблюдается рассогласование данных наблюдения и результатов моделирования в ночной период, когда зафиксированные значения уровня носят колебательный характер. Возможно, это объясняется погрешностью при интерполяции ветрового поля или возникновением собственных колебаний.



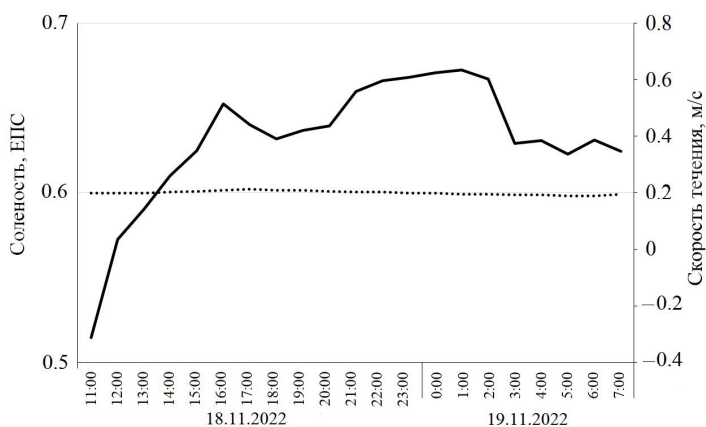
Р и с. 7. Зависимость солёности на ГП Донской от скорости течения в период с 17.11.2022 по 18.11.2022 (зафиксированные значения). Сплошная линия – зафиксированная солёность; штриховая линия – зафиксированная скорость

F i g. 7. The dependence of salinity at the hydrological station of Donskoy on the current velocity from 17 November 2022 to 18 November 2022 (observed values). The solid line is observed salinity. The dashed line is observed velocity



Р и с. 8. Расчетные и зафиксированные значения скорости течения на ГП Донской в период с 22:00 17.11.2022 по 7:00 18.11.2022. Пунктирная линия – зафиксированная скорость; сплошная линия – расчетная скорость

Fig. 8. Calculated and observed values of the current velocity at the hydrological station of Donskoy from 10 p. m. on 17 November 2022 to 7 a. m. on 18 November 2022. The dotted line is observed velocity. The solid line is calculated velocity



Р и с. 9. Зависимость солености от скорости течения в районе Костиной ямы в период с 18.11.2022 по 19.11.2022 (зафиксированные значения). Пунктирная линия – зафиксированная соленость; сплошная линия – зафиксированная скорость

Fig. 9. The dependence of salinity on the velocity of current in the area of Kostina Yama from 18 November 2022 to 19 November 2022 (observed values). The dotted line is observed salinity. The solid line is observed velocity

На участке наблюдения в районе Костиной Ямы связь между направлением течения и изменением солености не такая явная, как в Донском. Фактически на данном участке русла Большой Каланчи инструментально фиксируются изменения скорости и направления течения в условиях нагона, удовлетворительно совпадающие с расчетными значениями, однако изменения солености почти не происходит (рис. 9).

Это объясняется тем, что пункты наблюдений х. Донской и Костина Яма находятся на разном расстоянии от устья соответствующих рукавов дельты. Кроме того, распределение стока по рукавам также неравномерно – на Старый Дон приходится 40 % стока Дона, на Большую Каланчу – 60 %. И наконец, продольный профиль русла Старого Дона более равномерный, в этом рукаве проходит Азово-Донской морской судоходный канал и регулярно проводятся дноуглубительные работы, то есть формируются благоприятные условия для проникновения соленых вод. При этом профиль русла Большой Каланчи характеризуется меньшими средними глубинами и чередованием плесов и перекатов, что затрудняет интрузию соленых вод в этот рукав.

Выводы

Проблемной частью решаемой задачи является правильное задание начального поля солености в Таганрогском заливе. От этого зависит дальнейшее распределение значений солености на устьевом взморье, а затем и в рукавах Дона, что существенно влияет на результаты расчетов. По данным, полученным за весеннюю, летнюю и осеннюю съемки в ходе рейсов НИС «Денеб», были рассчитаны значения солености по маршруту следования судна от устья Дона в Таганрогском заливе до Керченского пролива. С использованием полученных данных Азовское море и Таганрогский залив были разбиты на зоны, где соленость считалась постоянной. В случае отсутствия таких данных возможно использование соответствующих карт солености на определенное время года. Это позволит получать начальное распределение солености воды с некоторым приближением. Однако такой подход не может гарантировать приемлемое начальное распределение солености в период времени, когда проводится расчет, тем более для будущего прогноза.

Данная модель позволяет определять скорость течения, уровень водной поверхности и концентрацию соли в основных рукавах дельты Дона в зависимости от ветровой ситуации в Азовском море и Таганрогском заливе.

Сравнение расчетных значений уровня воды со значениями на станциях наблюдения показывает идентичную динамику их изменения, что говорит о достаточной адекватности представленной модели. Предлагаемая методика может применяться и для других водоемов при совместном расчете течений в устьевых руслах и ветровых течений в принимающем водоеме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мишин Д. В., Полонский В. Ф. Исследование нестационарных водных потоков в неприливном устье реки Дон // Труды Государственного океанографического института. Москва, 2013. № 214. С. 166–179. EDN RUQHGD.
2. 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. EDN YHEZPJ. doi:10.23885/2500-0640-2017-13-1-35-43
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. Матишов Г. Г., Матишов Д. Г., Инжебейкин Ю. И. Влияние сейш на формирование экстремальных уровней и течений в Азовском море // Вестник Южного научного центра РАН. 2008. Т. 4, № 2. С. 46–61. EDN KTMMMT.
5. Фомин В. В., Дианский Н. А. Расчет экстремальных нагонов в Таганрогском заливе с использованием моделей циркуляции атмосферы и океана // Метеорология и гидрология. 2018. № 12. С. 69–80. EDN VOGROA.
6. 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. EDN UVEZUJ. doi:10.7868/S0869565215310229
7. Клеценков А. В., Московец А. Ю. Интрузии соленых вод в дельту Дона: закономерности развития и последствия // Наука Юга России. 2021. Т. 17, № 3. С. 30–37. EDN QJLZDC. doi:10.7868/S25000640210304
8. Дашкевич Л. В., Бердников С. В., Кулыгин В. В. Многолетнее изменение средней солености Азовского моря // Водные ресурсы. 2017. Т. 44, № 5. С. 563–572. EDN ZDQIKH. doi:10.7868/S0321059617040046
9. Бердников С. В., Дашкевич Л. В., Кулыгин В. В. Климатические условия и гидрологический режим Азовского моря в XX – начале XXI в. // Водные биоресурсы и среда обитания. 2019. Т. 2, № 2. С. 7–19. EDN WHVLZP. doi:10.47921/2619-1024_2019_2_2_7
10. Andrews S. W., Gross E. S., Hutton P. H. Modeling salt intrusion in the San Francisco Estuary prior to anthropogenic influence // Continental Shelf Research. 2017. Vol. 146. P. 58–81. doi:10.1016/j.csr.2017.07.010
11. Casulli V., Zanolli P. High resolution methods for multidimensional advection–diffusion problems in free-surface hydrodynamics // Ocean Modelling. 2005. Vol. 10, iss. 1–2. P. 137–151. doi:10.1016/j.ocemod.2004.06.007
12. Numerical modelling study of seawater intrusion in Indus River Estuary, Pakistan / J. Wang [et al.] // Ocean Engineering. 2019. Vol. 184. P. 74–84.
13. Чикин А. Л., Клеценков А. В., Чикина Л. Г. Моделирование изменения солености в Таганрогском заливе при штормовых нагонах // Водные ресурсы. 2019. Т. 46, № 6. С. 592–597. EDN NTVFSG. doi:10.31857/S0321-0596466592-597
14. Чикин А. Л., Клеценков А. В., Чикина Л. Г. Численное исследование влияния расхода воды на уровенный режим в устьевой области Дона // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 4. С. 355–366. EDN MTFSEY. doi:10.22449/0233-7584-2019-4-355-366
15. Филиппов Ю. Г. Расчеты уровня в восточной части Таганрогского залива // Труды Государственного океанографического института. Москва, 2014. Вып. 215. С. 136–143. EDN XEBAFB.

16. *Филиппов Ю. Г.* Об одном способе расчета морских течений // Труды Государственного океанографического института. Москва, 1970. Вып. 103. С. 87.
17. *Воеводин А. Ф., Никифоровская В. С., Овчарова А. С.* Численные методы решения задачи о неустановившемся движении воды на устьевых участках рек // Труды Арктического и антарктического научно-исследовательского института. Ленинград : Гидрометеоздат, 1983. Т. 378. С. 23–34. EDN ZEXZDT.
18. *Savenije H. H. G.* Salinity and tides in alluvial estuaries. Elsevier, 2012. 194 p. doi:10.1016/B978-0-444-52107-1.X5000-X

Поступила 15.06.2023 г.; одобрена после рецензирования 2.10.2023 г.; принята к публикации 11.10.2023 г.; опубликована 20.12.2023 г.

Об авторах:

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

Клещенков Алексей Владимирович, ведущий научный сотрудник, Южный научный центр РАН (344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41), кандидат географических наук, **ResearcherID: E-6619-2014, ORCID ID: 0000-0002-7976-6951, Scopus Author ID: 57016697100**

Чикина Любовь Григорьевна, профессор, Южный федеральный университет, (344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, 105), доктор физико-математических наук, доцент, **SPIN-код: 4295-3950**

Заявленный вклад авторов:

Чикин Алексей Львович – инициация исследования, разработка математической модели, подготовка начального варианта текста, обзор литературы по проблеме исследования, доработка текста, построение таблиц, графиков и диаграмм

Клещенков Алексей Владимирович – формулировка целей и задач исследования, написание аннотации; анализ и обобщение результатов исследования, формулирование выводов, обзор литературы по проблеме исследования, сбор и систематизация данных, построение таблиц, графиков и диаграмм, компьютерные работы

Чикина Любовь Григорьевна – выбор и обоснование численных методов решения уравнений, коррекция математической модели и проведение вычислений, компьютерная реализация алгоритмов

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.