

ПРОНИКНОВЕНИЕ МОРСКИХ ВОД В ДЕЛЬТУ ДОНА В МАЛОВОДНЫЙ ПЕРИОД

© 2025 г. А. В. Клещенков*, В. А. Костюк, А. Ю. Московец, Е. Г. Алешина

Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону, 344006 Россия

**e-mail: kle-aleksej@yandex.ru*

Поступила в редакцию 16.04.2024 г.

После доработки 11.07.2024 г.

Принята к публикации 11.07.2024 г.

В условиях сокращения пресного стока р. Дон в период наблюдающегося в последние годы сильного маловодья, роста солёности Азовского моря и Таганрогского залива и уровня моря отмечается увеличение количества и интенсивности опасных проникновений солёных вод в дельту Дона. Ретроспективный анализ поступления солёных вод в дельту показывает увеличение солёности при одинаковых уровнях подъёма воды во время нагонов. Особенно четко это проявляется в наиболее маловодные годы, когда фронтальная зона градиента солёности в Таганрогском заливе приближается к морскому краю дельты. Полученные результаты проведенного анализа дальности проникновения солёных вод в рукава дельты Дона позволяют утверждать, что изменения природных условий привели к увеличению расстояния, на которое проникают солёные воды, в 2–3 раза по сравнению с XX в.

Ключевые слова: дельта Дона, Азовское море, интрузия морских вод, нагон, дальность проникновения солёных вод.

DOI: 10.31857/S0321059625010086 EDN: UXXJRP

ВВЕДЕНИЕ

Устьевая область Дона представляет собой ключевой район бассейна Азовского моря, где происходят сложные взаимодействия речных и морских вод. Этот район простирается на 291 км от условной линии, соединяющей Должанскую и Белосарайскую косы в Таганрогском заливе, на западе до ст. Раздорской на востоке. Он включает в себя устьевую участок от ст. Раздорской до вершины дельты в районе г. Ростова-на-Дону, дельту Дона и Таганрогский залив. Устьевая область Дона относится к бесприливному типу с многорукавной дельтой выполнения залива и отмелым полузакрытым устьевым взморьем [15].

Дельта Дона хорошо освоена в хозяйственном отношении. Этот район активно используется для судоходства и хозяйственной деятельности. Через порты Ростов-на-Дону и Азов ежегодно происходит перевалка значительной части рос-

сийского зерна, идущего на экспорт. В дельте Дона расположены водозаборные сооружения, обеспечивающие хозяйственно-бытовое водоснабжение Азова и части Азовского района, Таганрога, а с 2023 г. и Донецкой Народной Республики.

Устье Дона подвержено различным опасным гидрологическим явлениям. Здесь в XIX–XXI вв. наблюдались стоковые и нагонные наводнения, опасные обмеления, опасные ледовые и морфодинамические процессы, ухудшение качества речных вод, заиление рукавов и морских каналов, а также сильные проникновения морских солёных вод в рукава дельты Дона.

Интрузия морских солёных и солоноватых вод в устьях рек – распространенный процесс [7, 14, 21]. Согласно руководящим документам, к сильному проникновению морских солёных вод относят проникновение солёных вод по водотокам устьевому участку реки на значительное расстояние от моря, при котором создается угроза нормальному водоснабжению из реки промышленных предприятий и населенных пунктов [18]. Вода, имеющая солёность > 1‰, как правило,

¹ Работа выполнена в рамках тематик НИР ГЗ ЮНЦ РАН (FMRE-2022-0045; FMRE-2025-0050); работа выполнена на оборудовании ЦКП “Объединенный центр научно-технологического оборудования ЮНЦ РАН (исследование разработка апробация)”, № 501994.

не пригодна для питьевого и промышленного водоснабжения. В ней наблюдаются повышенные показатели хлоридов, сульфатов и общей жесткости [4]. В настоящее время к категории опасных гидрологических процессов принято относить превышение соленостью воды 1‰, а особо опасных – превышение 3‰ [7]. Однако стоит отметить, что в дельте Дона порою наблюдается естественный фон минерализации самих речных вод > 1‰ в силу климатических и антропогенных преобразований речного стока [4, 10].

В исследованиях ЮНЦ РАН неоднократно было зафиксировано проникновение соленых вод в дельту Дона. Во время сильного 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. вода с повышенной (5–9‰) соленостью проникла по Дону до Азова, где она закачивалась в городской водопровод. Впоследствии подобное повторялось несколько раз, наиболее значительно в феврале 2021 г. [4].

Наблюдаемые в последние десятилетия климатические изменения привели к значительной трансформации условий среды в бассейне Дона и в Азовском море. Маловодье Дона, начавшееся в 2007 г. и являющееся самым длительным за последние 100 лет, привело к значительному сокращению пресного стока и увеличению солености в Таганрогском заливе и собственно Азовском море. Средняя соленость воды в Азовском море после 2020 г. стала > 14‰, что ранее не наблюдалось, и подтверждает переход Азовского моря в новое состояние [2]. Анализ экспедиционных данных океанологических исследований ЮНЦ РАН свидетельствует о том, что сокращение стока Дона до исторических минимумов наряду с аномальной адвекцией черноморских вод привело к росту средней солености Таганрогского залива в 2014–2016 и 2020–2021 гг. до 10‰ [3]. Помимо этого, на развитие интрузии соленых вод в дельту Дона влияет рост уровня Азовского моря [13].

Таким образом, указанные выше факты определяют необходимость изучения и прогнозирования гидрофизических процессов для эффективного управления природными ресурсами и минимизации негативных последствий

опасных гидрологических явлений. Отдельное внимание стоит уделить оценке изменчивости поступления соленых вод в дельту Дона, а также определению дальности проникновения относительно устьевого створа, продолжительности опасного осолонения вод и максимальной величине солености в пунктах гидрологических наблюдений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

С целью изучения поступлений соленых вод в дельту Дона использованы материалы наблюдений за уровнем воды на гидропосту (ГП) ЮНЦ РАН, расположенном в х. Донском, и ГП Эмерсит-0239 [19], расположенном в устье р. Темерник (рис. 1), за 2018, 2020 и 2021 гг.; промеры глубин рукавов Старый (Ст.) Дон, Большая (Б.) Каланча и Б. Кутерьма дельты р. Дон, выполненных ЮНЦ РАН; данные АИС ГМВО о ежесуточных расходах воды в вершине устьевой области на ГП Раздорская и о среднесуточных уровнях воды ГП Ростов, Дугино и Азов за 2018, 2020 и 2021 гг.; а также фондовые данные об уровнях на ГП Перебойный за 2015 г. и о случаях поступления соленых вод в дельту за период 1970–1990 гг. Кроме того, использованы результаты собственных измерений авторами статьи температуры и электропроводности воды, выполненных с помощью океанологических зондов “SBE-19”, “CTD-60M”, “CTD-90M”, “CTD-48M” (измерение гидростатического давления, температуры воды, электропроводности и солености) и измерителя течений “AANDERAA RCM 9LW” в рамках специальных наблюдений и экспедиционных работ на НИС “Профессор Панов”. Также использованы данные автоматических измерений с дискретностью 10 мин системой датчиков уровня, электропроводности и температуры воды на ГП Донской (кондуктометр “СЛ15-10Т” (с датчиком электропроводности и температуры “ДЭТ9-10Т”) производства ООО ОКБ “СОЛИС”, кондуктометрический датчик солености конструкции П.С. Пляки [16]). Значения температуры и электропроводности воды, измеренные зондами и датчиками, пересчитывались в значения солености в единицах практической солености (е.п.с.) по уравнению состояния морской воды УС-80. С целью сравнения фондовых данных о поступлении соленых вод и со-

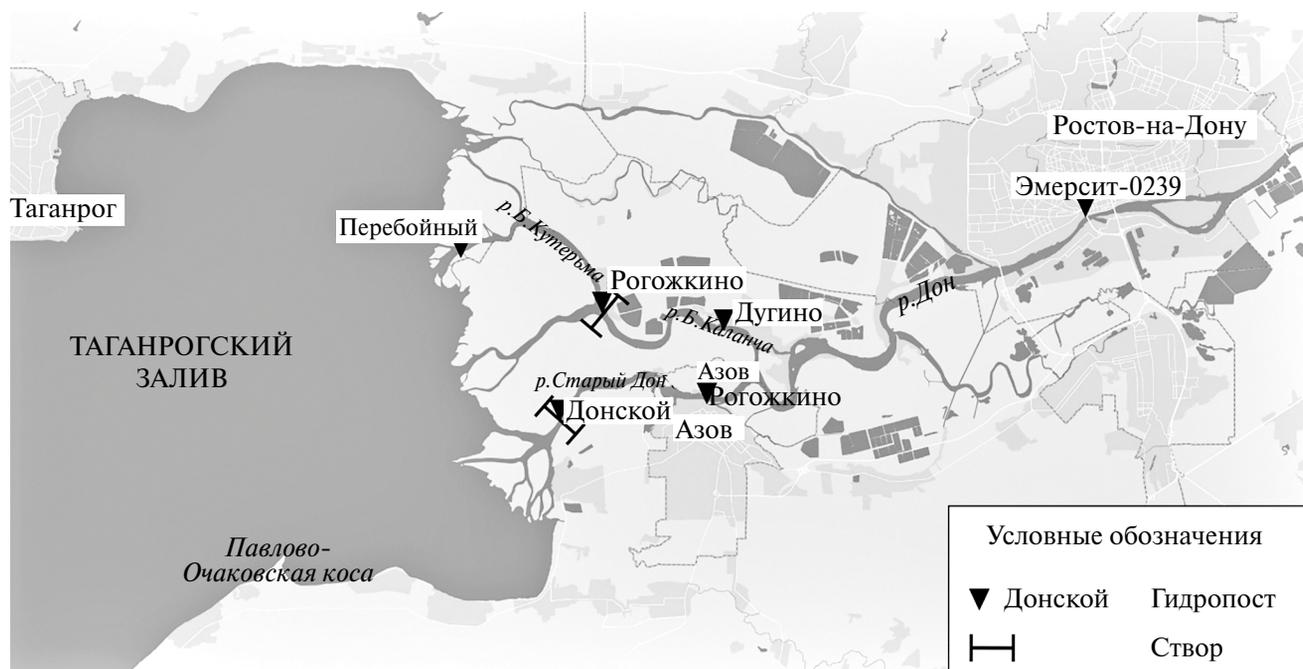


Рис. 1. Картограмма территории расположения гидропостов и расчетных створов в дельте Дона.

временных значений определялась соленость по хлорности в отобранных во время нагонов пробах воды в створе ГП Азов.

Вопросы дальности проникновения осолоненных вод в дельты рек (далее – проникновение L_s) в отечественной литературе подробно рассмотрены в работах [11, 12, 14], в которых условно можно выделить два подхода к определению L_s : на основании гидравлических соотношений – “гидравлический” метод и с использованием коэффициента продольной дисперсии – “дисперсионный” метод.

В первом случае расчет проникновения L_s и связанных с ней предела распространения нагона L и дальности проявления обратных течений L_v выполнялся согласно подходам, изложенным в [11, 12], по формулам (1)–(3):

дальность проникновения обратных течений

$$L_v = L - \sqrt{\frac{2Q_p L \Delta t}{B \Delta H}}, \quad (1)$$

B – ширина устьевое участка реки; L – предел распространения подпора; ΔH – подъем уровня воды на морском крае дельты; Q_p – расход воды

на верхней границе (в вершине) устьевой области; Δt – время развития нагона;

предел распространения нагона (точка, в которой $\Delta H \leq 10$ см), здесь ΔH – изменение уровня воды в заданном створе на расстоянии L

$$L = \frac{1}{m} \ln \left(\frac{\Delta H}{0.1} \right), \quad (2)$$

$$m = 1.21 \times 10^{-5} Q_p + 0.011,$$

проникновение

$$L_s = LA - \sqrt{[L^2 A^2 - L_v(2L - L_v)]}, \quad (3)$$

$$A = 1 + \frac{h_0}{\Delta H},$$

h_0 – глубина русла при нормальном уклоне водной поверхности.

Во втором случае использовалось решение уравнения конвективно-диффузионного переноса в одномерной постановке задачи (ось x направлена в сторону реки)

$$\frac{\partial S}{\partial t} + v \frac{\partial S}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial S}{\partial x} \right). \quad (4)$$

При осреднении за весь период нагона получаем

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -\frac{Q_p}{\omega D x} S, \text{ или}$$

$$D x = -\frac{Q_p S_{cp} \partial x}{\omega \partial S}, \text{ или}$$

при $D = \text{const}$ $S_p = S_m e^{-\frac{Qx}{BhD}},$ (5)

после логарифмирования (5)

$$L_s = \ln \frac{S_m}{S_p} \frac{BhD}{Q}, \quad (6)$$

Dx – коэффициент продольной дисперсии; Q_p – расход воды; ω – площадь поперечного сечения; B, h – ширина и глубина русла (соответственно); ∂x – расстояние от устьев створа до расчетного створа; t – время; v – скорость потока; S – соленость (S_m – моря, S_p – реки); $\partial S = S$ устьевого створа – S расчетного створа.

На первом этапе работы были проведены расчеты “гидравлическим” методом по формулам (1), (2), (3) для 29 случаев проникновения осолоненных вод в дельту р. Дон, зафиксированных на ГП Донской в 2018, 2020 и 2021 гг., на втором этапе – “дисперсионным” методом по формуле (6). При расчете “дисперсионным” методом использованы максимальные значения параметров, входящих в расчетную формулу.

При расчетах принимались следующие параметры. Среднее время добегания расхода воды от ГП Раздорская до ГП Азов (ГП Рогожкино) принято 2 сут (из практики работы отдела гидрологических прогнозов Ростовского ЦГМС) с добавлением боковой приточности в размере меженного расхода р. Маныч, равного 20 м³/с. Распределение стока по рукавам дельты с учетом маловодного периода и малых величин расходов (211–569 м³/с), согласно [5], принято 40% (рук. Ст. Дон) 60% (рук. Б. Каланча – Б. Кутерьма). Коэффициент продольной дисперсии Dx , согласно [17], рассчитывался по формулам:

$$D_{\max} = 43000 R V_{\max} C^{-2.63}, \quad (7)$$

$$D_{\min} = 43000 R V_{cp} C^{-2.63}, \quad (8)$$

R – гидравлический радиус расчетного створа (при $R \geq 3$ принимается равным H_{cp}); C – коэффициент Шези; V_{cp} и V_{\max} – средняя и максимальные скорости соответственно.

Среднее время добегания осолоненных вод от устьевого створа до ГП Донской по результатам наблюдений составляет 1 ч. Коэффициент шероховатости русла n , согласно [21], принят равным 0.025. Уклон водной поверхности в рукавах Ст. Дон и Б. Каланча – Б. Кутерьма принимался единым по уклону ГП Донской – ГП Эмерсит-0239. Высотная и плановая привязка мгновенных уровней воды и уровней подвеса уровнемера на гидропостах проводилась с помощью приемника “EFT M4” и полевого контроллера “EFT H3” в режиме “Real Time Kinematic” (RTK) с привязкой к базовым станциям “EFT Course” (Ростов-на-Дону и Таганрог). Предварительно по параллельным наблюдениям в период с 27.05.2015 по 31.12.2015 между постами Донской и Перебойный была вычислена связь между уровнями воды в устье рукава Ст. Дон и в устье рук. Б. Каланча – Б. Кутерьма (коэффициент корреляции $r = 0.86$).

В качестве расчетных створов приняты створы ГП Донской (7.1 км от устья рук. Старый Дон) и ГП Рогожкино (12.1 км от устья рук. Б. Кутерьма) (рис. 1) для которых были определены средняя глубина створа, ширина створа, площадь поперечного сечения и их связь с уровнями воды на этих постах.

Как отмечено выше, для “дисперсионного” метода в формуле (6) приняты максимальные параметры солености во время нагона. Вместе с тем представилось целесообразным задать ход солености на устьевом створе исходя из времени добегания осолоненных вод от устьевого створа до ГП Донской, принимая соленость на устьевом створе как соленость морских вод, а соленость на ГП Донской как соленость речных, а затем осолоненных вод. Таким образом, на основе уравнения (6) проведены расчеты проникновения L_s с дискретностью 1 ч для каждого из 29 случаев проникновения осолоненных вод в динамике (“динамический” метод).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Дельта Дона относится к неприливым устьям рек [11]. Вместе с тем стоит отметить, что

основная движущая сила и механизм интрузии соленых вод в рукава дельты Дона – штормовые нагоны, высота которых для нагонов обеспеченности 1, 50 и 75% составляет 3.2, 1.4 и 1.1 м БС соответственно. Средняя высота подъема уровня среди пятидесяти нагонов с максимальным уровнем > 1 м в 2015–2020 гг., которые были зафиксированы уровнемером на ГП Донской, составляет 1.2 м. Мелководность Таганрогского залива (средняя глубина 4.9 м) и штормовая погода во время развития нагонов, как правило, обеспечивают хорошее вертикальное перемешивание водных масс и слабую стратификацию в зоне смешения морских и речных вод. Параметр стратификации n , вычисленный по формуле (9) на основе данных вертикального профилирования водной толщи океанологическими зондами во время нагонов в сентябре 2014 г., декабре 2015 г., июле 2019 г. и апреле 2021 г., 2014 г., составляет 0.19, 0.028, 0.002 и 0.011 соответственно:

$$n = \Delta S / S_{\text{cp}}, \quad (9)$$

где ΔS – вертикальный градиент солености, S_{cp} – средняя соленость по вертикальному профилю.

Специальные наблюдения за интрузией соленых вод, проведенные на НИС “Профессор Панов” в рук. Ст. Дон во время двух нагонов в ноябре 2022 г., показали, что вдоль продольной оси рукава параметр n принимает значения в диапазоне от 0 до 0.43 (рис. 2).

Это свидетельствует о том, что в большинстве случаев преобладает первый тип вертикального

перемешивания, стратификации и проникновения соленых вод и реже наблюдается второй тип, характеризующийся частичным вертикальным перемешиванием и умеренной стратификацией [14].

Основные параметры проникновения соленых вод в дельту определяются гидрологической структурой и гидродинамикой вод Таганрогского залива, объемом пресного речного стока в Таганрогский залив, качеством речной воды, главным образом минерализацией, на устьевом участке Дона и стонно-нагонными колебаниями уровня [1, 9]. Современные изменения этих условий приводят к усилению роли морских факторов в развитии дельты и увеличению частоты заток соленых вод и абсолютных значений солености воды, поступающей в дельту Дона.

В [6, 20] отмечено, что в 1976 г. при нагоне была достигнута соленость воды > 1‰ у Ростова-на-Дону, а в 1979, 1981 и 1990 гг. у г. Азова и х. Дурино ветровые нагоны обуславливали соленость воды до 2–3‰. Однако уже в 2014 г. во время экстремального нагона в Азове была зафиксирована соленость 5.6‰, а во время сильного нагона в феврале 2021 г. – 6.9‰. Более того, за период 2018–2021 гг. авторами статьи на ГП Донской были инструментально зафиксированы не менее 29 случаев проникновения соленых вод в рук. Ст. Дон во время нагонов.

Ретроспективный анализ случаев поступления соленых вод в дельту показывает увеличение солености при одинаковом подъеме уровня воды во время нагонов в створе ГП Азов (рис. 3).

В целом, можно отметить, что сокращение пресного стока Дона приводит к росту солености поступающих в дельту вод вследствие увеличения солености в Таганрогском заливе и смещения фронтальной зоны 7–10‰ на восток. Так, зимой 2021 г. в условиях формирования указанной фронтальной зоны в районе траверза Павло-Очаковской косы в восточной части залива и зимней межени без навигационных попусков с характерными расходами в вершине дельты порядка 220–230 м³/с при сильном нагоне с достижением неблагоприятных отметок в период с 12 по 14 февраля – в открытом русле р. Дон на ГП Азов 14.02.2021 была зафиксирована соле-

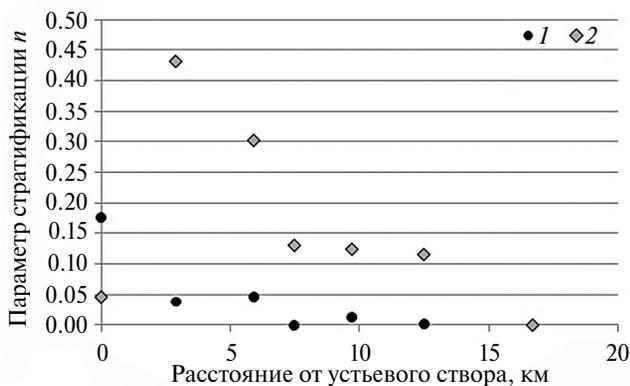


Рис. 2. Распределение параметра стратификации n в рук. Ст. Дон во время нагона 18.11.2022 (1) и 23.11.2022 (2).

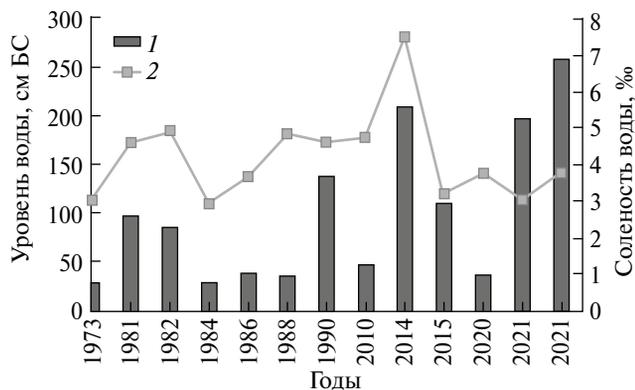


Рис. 3. Соленость (1) и уровень воды (2) во время нагонов на ГП Азов в 1973–2021 гг.

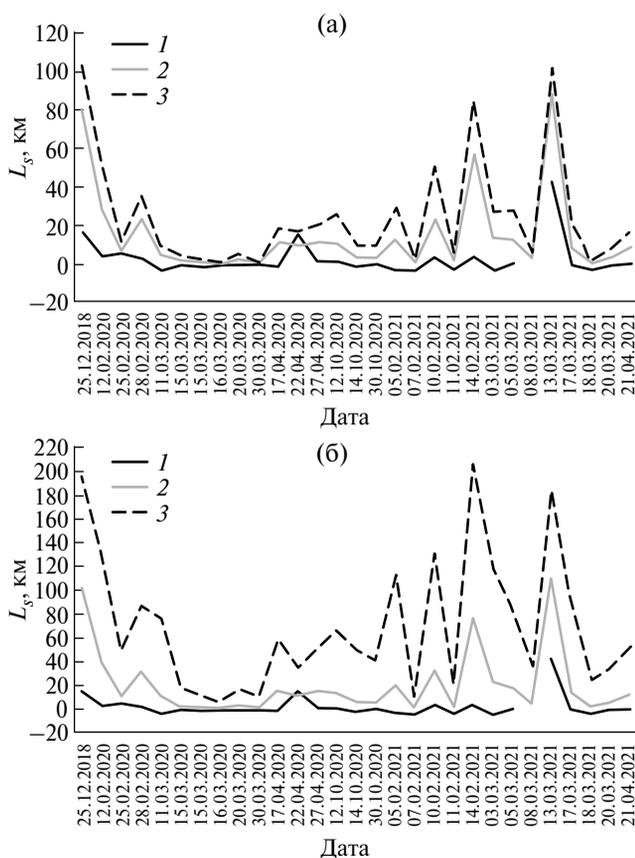


Рис. 4. Средняя (а) и максимальная (б) дальность проникновения осолоненных вод в рук. Старый Дон, рассчитанные “гидравлическим” (1), “дисперсионным” (2) и “динамическим” (3) методами.

ность воды 5.3‰, а к концу дня в водопроводной сети г. Азова – 6.9‰. Годом ранее, в апреле 2020 г. при почти таких же расходах воды (~240 м³/с) в вершине дельты и уровнях воды соленость в створе ГП Азов поднялась всего до 1‰, так как градиентная зона располагалась значительно западнее. Это было обусловлено тем, что сред-

немесячные величины расхода воды в октябре–декабре 2019 г. на ГП Раздорская составляли 434–513 м³/с, а в октябре–декабре 2020 г. – лишь 287–309 м³/с. При прохождении “шторма века” через Азовское море и развитии третьего по высоте за последние 30 лет нагона в дельте Дона 27.11.2023 (уровень воды на ГП Азов составил 747 см при отметке опасного явления в 700 см) соленость воды в створе ГП Рогожкино была ≤2‰ в силу того, что в предшествующий наго-ну период изогалина 2‰ находилась на траверзе Чумбур-Косы в 30 км к западу от устьевого створа. Такое распределение солености в Таганрогском заливе осенью 2023 г. стало следствием повышенного стока пресных вод. Средний расход воды на ГП Раздорская за август–ноябрь 2023 г. составил 572 м³/с.

С целью оценки дальности проникновения соленых вод в дельту Дона выполнены расчеты тремя описанными выше методами для 29 случаев проникновения соленых вод в период с 2018 по 2021 г. Параметры интрузии соленых вод и результаты расчетов приведены в табл. 1, на рис. 4 (для рук. Ст. Дон) и рис. 5 (для рук. Б. Каланча – Б. Кутерьма).

В целом, результаты расчетов “дисперсионным” и “динамическим” методами имеют один порядок величин, в то время как при применении “гидравлического” метода значения L_s занижены из-за не учета динамики процесса. Принятая ранее в [11] максимальная $L_s = 15$ км на фоне существенного снижения стока р. Дон, осолонения Азовского моря и Таганрогского залива должна быть откорректирована до величин 30–35 км. Последнее подтверждается материалами наблюдений ЮНЦ РАН, полученными в ходе экспедиции 13.02.2021, когда в районе х. Колузаево (34.5 км от устьевого створа), ГП Дугино (22.3 км) и ГП Рогожкино (11.7 км) была зафиксирована соленость 0.85, 3.24 и 3.97 е.п.с. соответственно. Максимальная же соленость, равная 9.91 е.п.с., зафиксирована на ГП Донской (7.1 км от устьевого створа) в 00 ч 00 мин 14.02.2021.

Для выяснения причин явного завышения средних и максимальных значений L_s 25.12.2018, 12.02.2020, 10.02.2021, 14.02.2021 и 13.03.2021 были проанализированы зависимости сред-

Таблица 1. Сводные данные об интрузиях и дальности проникновения соленых вод в дельту Дона в 2018–2021 гг.

Дата	Время S_{max}	Расход, м ³ /с		Соленость, е.п.с.		Максимальный уклон, ‰		“Гидравлический” метод		Дальность проникновения осолоненных вод, км							
		Раздорская	Ст. Дон (40%)	Каланча (60%)	моря (max)	реки (min)	Ст. Дон	Каланча	Ст. Дон	Каланча	“Дисперсионный” метод		“Динамический” метод (при $\Delta = 1$ ч)				
											Ст. Дон (Донской)	Б. Кутерьма (Рогожкино)	Ст. Дон (Донской)	Б. Кутерьма (Рогожкино)			
25.12.2018	21:40	378	151	227	4.61	0.72	-0.030	16.14	13.65	79.38	101.06	55.98	57.41	101.56	195.33	39.97	52.39
12.02.2020	20:10	362	145	217	3.02	0.58	-0.008	3.59	2.58	28.52	38.87	30.07	50.58	51.46	126.03	16.24	23.13
25.02.2020	8:10	371	144	227	2.2	0.86	-0.001	5.15	3.81	6.78	10.98	7.56	29.37	11.97	48.54	8.20	13.09
28.02.2020	18:40	347	117	230	2.82	0.8	-0.007	2.43	1.59	22.97	31.81	20.25	30.29	33.79	87.01	4.83	8.30
11.03.2020	19:30	275	100	175	3.54	0.8	0.000	-3.53	-5.45	5.18	11.88	5.78	12.47	9.70	77.61	9.45	15.11
15.03.2020	8:00	249	100	149	1.12	0.89	-0.002	-1.04	-1.57	1.75	2.84	2.54	3.62	4.51	17.39	1.98	3.16
15.03.2020	18:50	246	98	148	1.15	0.96	-0.001	-1.46	-1.96	0.88	1.63	1.31	2.06	2.33	12.10	1.51	2.69
16.03.2020	18:10	246	98	148	1.03	0.92	0.000	-0.82	-1.31	0.19	0.58	0.28	2.00	0.52	6.20	1.38	2.50
20.03.2020	2:20	211	84	127	0.97	0.8	-0.002	-0.64	-1.16	1.74	2.76	2.42	5.45	4.62	16.91	0.73	1.21
30.03.2020	5:00	255	102	153	1.08	0.9	0.000	-0.83	-1.43	0.48	1.12	0.70	3.74	1.28	10.29	0.75	1.23
17.04.2020	10:00	321	128	193	1.94	0.89	-0.003	-1.60	-2.94	10.83	15.94	13.29	18.06	18.45	58.74	8.54	12.57
22.04.2020	16:50	330	132	198	1.08	0.78	-0.020	15.40	14.21	9.07	11.79	9.65	2.77	17.12	35.00	0.46	0.92
27.04.2020	7:50	314	126	188	1.32	0.72	-0.006	1.29	-0.10	10.68	14.85	12.87	15.02	19.95	52.34	5.50	7.74
12.10.2020	16:00	350	140	210	1.37	0.55	-0.007	0.98	-0.18	10.03	13.94	13.49	8.31	25.86	65.16	0.90	2.56
14.10.2020	18:20	362	145	217	1.64	0.51	-0.001	-1.74	-2.39	3.37	6.32	4.94	17.34	9.68	50.32	2.37	4.52
30.10.2020	11:10	396	158	238	1.11	0.43	-0.001	-0.42	-0.65	3.48	5.89	5.10	10.76	9.75	41.10	0.41	0.79
05.02.2021	16:10	447	179	268	3.58	0.28	-0.002	-3.12	-4.68	12.85	20.63	17.93	20.97	29.21	112.62	7.29	11.98
07.02.2021	4:40	463	181	282	2.78	2.09	-0.001	-3.52	-4.81	1.10	1.83	1.49	3.58	2.70	10.96	8.21	13.46
10.02.2021	3:40	376	150	226	2.41	0.35	-0.007	3.57	2.13	22.72	31.59	28.07	34.14	50.92	130.18	14.43	20.05
11.02.2021	6:20	286	114	172	2.19	1.54	-0.001	-2.84	-3.97	1.55	2.87	2.12	8.83	3.86	20.04	12.23	17.37
14.02.2021	1:10	394	158	236	9.91	0.65	-0.008	3.70	0.19	56.73	77.04	58.04	96.34	83.67	207.43	46.80	63.67
03.03.2021	3:40	383	153	230	4.77	0.39	-0.001	-3.44	-4.88	13.31	22.30	16.04	69.10	27.46	118.60	6.17	11.27
05.03.2021	4:50	404	162	242	2.57	0.6	-0.004	0.27	-0.50	12.26	17.93	16.81	6.04	27.72	83.27	2.87	5.51
08.03.2021	2:20	463	185	278	2.08	0.74	0.000	-	-	2.65	5.24	3.56	18.13	5.99	36.26	3.16	5.46
13.03.2021	7:30	324	130	194	1.7	0.5	-0.055	41.88	38.78	88.22	110.16	54.94	11.08	104.05	183.91	14.95	20.34
17.03.2021	14:30	280	112	168	2.14	0.5	-0.001	-0.78	-1.68	8.08	13.70	10.83	38.87	20.76	88.62	8.68	13.76
18.03.2021	16:10	251	100	151	1.35	0.85	0.000	-2.81	-3.80	0.55	2.08	0.79	10.33	1.47	23.88	3.05	5.81
20.03.2021	17:40	292	117	175	1.07	0.6	-0.001	-1.10	-1.49	3.10	5.35	4.29	13.03	7.69	34.49	0.30	0.61
21.04.2021	4:30	356	142	214	1.25	0.57	-0.004	-0.21	-0.95	8.53	12.42	10.36	19.93	16.99	51.01	3.28	4.95

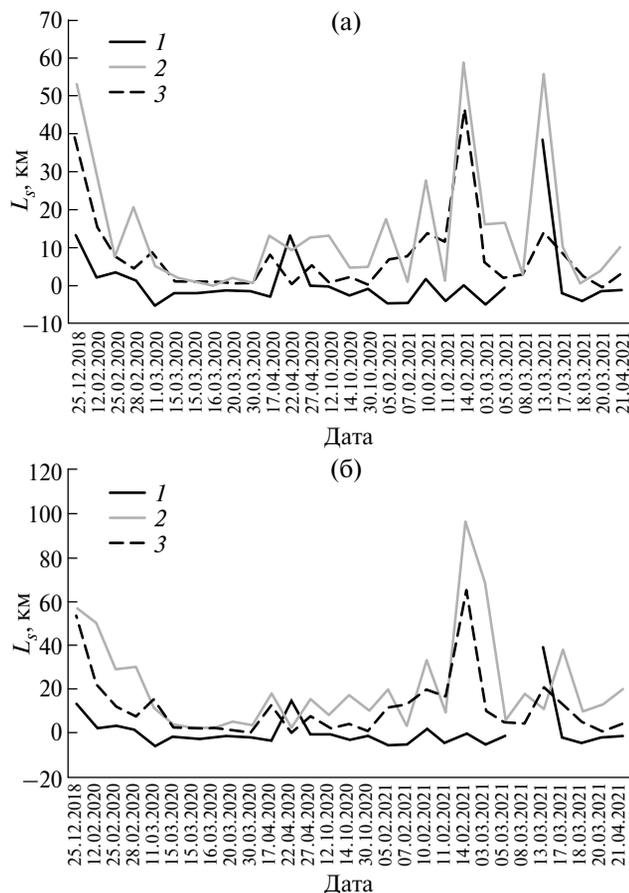


Рис. 5. Средняя (а) и максимальная (б) дальность проникновения осолоненных вод в рук. Б. Каланча – Б. Кутерьма, рассчитанные “гидравлическим” (1), “дисперсионным” (2) и “динамическим” (3) методами.

ней L_s ($L_{ср}$) от расчетных факторов при нагоне 25.12.2018–26.12.2018: гидравлического радиуса расчетного створа R ($H_{ср}$), ширины расчетного створа (B), площади поперечного сечения ω , коэффициента продольной дисперсии (D), соотношения солёности морской и речной воды (S_m/S_p) и уклона воды в дельте (i).

Из полученных соотношений, представленных на рис. 6 для нагона 25–26 декабря 2018 г., следует, что наибольшее влияние на результаты расчета имеют R и связанные с ним соотношениями B и ω . Сила связи D_{min} , S_m/S_p и i значительно меньше.

Так как берега дельты низменны и выход воды на пойму за прирусловые валы при ветровом нагоне происходит при отметках уровня 0.8–1.0 мБС, то недоучет распластывания на-

гонной волны и затопления дельты приводит к завышению значений гидравлического радиуса ($H_{ср}$) и, соответственно, результатов расчетов.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования показали, что “дисперсионный” и “динамический” методы расчета дальности проникновения осолоненных вод в рукава дельты р. Дон дают достаточно хорошее представление о характере этого процесса и близкие к реальным значения дальности проникновения. “Гидравлический” метод, по-видимому, приводит к занижению результатов расчета. Следует считать уточненной для рассматриваемого периода дальность проникновения осолоненных вод в дельту р. Дон в пределах 30–35 км. При расчетах следует учитывать распластывание стока нагонной волны и связанное с этим изменение гидравлического радиуса в расчетном створе.

Следует отметить, что современные условия развития устьевой области Дона – такие как продолжающийся период маловодья, рост солёности моря и Таганрогского залива, рост относительного уровня Азовского моря, колебания среднегодовой минерализации воды на устьевом участке Дона, планы по сокращению навигационных попусков через Цимлянский гидроузел до 180 м³/с в течение двух третей года после ввода в эксплуатацию строящегося Багаевского гидроузла – позволяют ожидать увеличения частоты проникновения соленых вод в дельту. Важно отметить, что негативные эффекты поступления соленых вод касаются не только качества воды, поступающей в водозаборы (прежде всего общая минерализация, жесткость и концентрация хлоридов и сульфатов), но и гораздо более широкого комплекса последствий.

Авторы выражают благодарность Д.В. Магрицкому за помощь в работе с фондовыми данными.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бердников С.В., Клещенок А.В., Григоренко К.С., Олейников Е.П., Московец А.Ю., Дашкевич Л.В., Кулыгин В.В., Сорокина В.В., Соьер В.Г. Результаты морских научных исследований Южного научного

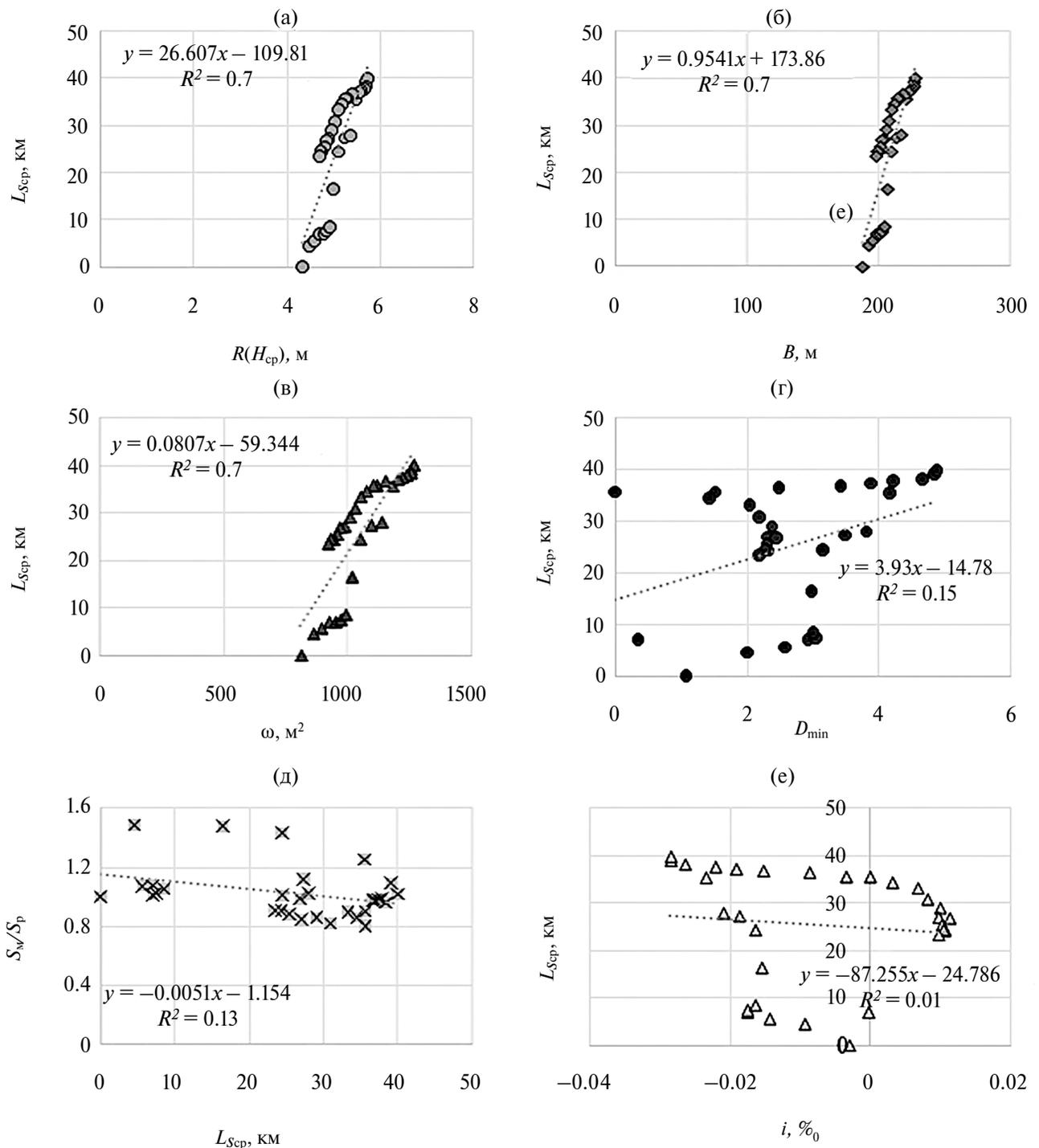


Рис. 6. ГП Донской, ветровой нагон воды 25.12.2018–26.12.2018, зависимость средней дальности проникновения осолоненных вод от гидравлического радиуса расчетного створа $R(H_{ср})$ (а), ширины расчетного створа B (б), площади поперечного сечения ω (в), коэффициента продольной дисперсии D (г), соотношения солености морской и речной воды S_M/S_p (д), уклона воды в дельте i (е).

- центра Российской академии наук (ЮНЦ РАН) в Азовском море в 2003–2018 гг. Ч. 1. Гидрология и гидрохимия // Вод. биоресурсы и среда обитания. 2019. Т. 2. № 3. С. 7–19.
2. Бердников С.В., Кулыгин В.В., Дашкевич Л.В. Причины стремительного роста солености воды Азовского моря в XXI веке // Морской гидрофиз. журн. 2023. Т. 39. № 6. С. 760–778.
 3. Дашкевич Л.В., Бердников С.В., Кулыгин В.В. Многолетнее изменение средней солености Азовского моря // Вод. ресурсы. 2017. Т. 44. № 5. С. 563–572.
 4. Клещенок 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.
 5. Клещенок А.В., Сорокина В.В. Перераспределение стока по рукавам дельты Дона в условиях маловодья // Окружающая среда и человек. Современные проблемы генетики, селекции и биотехнологии. Мат-лы междунар. науч. конф. и молодеж. науч. конф. памяти Д.Г. Матишова. Ростов-на-Дону, 2016. С. 102–105.
 6. Магрицкий Д.В. Опасные гидрологические процессы в устье Дона и многолетние тенденции в изменении их параметров // Актуальные вопросы гидрологии и геоэкологии. Мат-лы Всерос. науч.-практ. конф., посвященной 100-летию Пермского гос. нац. исследовател. ун-та / Под ред. А.Б. Китаева. Пермь: ПГНИУ, 2016. С. 35–41.
 7. Магрицкий Д.В., Михайлова М.В. Опасные гидрологические процессы в устьях рек и на морских побережьях // Фундаментальные и прикладные исследования в гидрометеорологии. Мат-лы междунар. науч.-практ. конф., посвященной 50-летию кафедры общего землеведения и гидрометеорологии БГУ. Минск, 2023. С. 260–267.
 8. Матишов Г.Г. Случаи экстремальной адвекции соленых вод в дельту Дона и льда в Керченский пролив // ДАН. 2015. Т. 465. № 1. С. 99–103.
 9. Матишов Г.Г., Григоренко К.С. Причины осолонения Таганрогского залива // ДАН. 2017. Т. 477. № 1. С. 92–96.
 10. Матишов Г.Г., Григоренко К.С., Чеха М.М., Алешина Е.Г. Мониторинг гидрохимических преобразований на взморье Дона в реальном времени // Наука Юга России. 2023. Т. 19. № 2. С. 20–32.
 11. Михайлов В.Н. Гидрология устьев рек. Учебник. М.: МГУ, 1998. 176 с.
 12. Михайлов В.Н. Динамика потока и русла в неприливых устьях рек. М.: Гидрометеиздат, 1989. 260 с.
 13. Михайлов В.Н., Михайлова М.В. Влияние многолетних изменений морских факторов на устья рек // Вод. ресурсы. 2015. Т. 42. № 4. С. 367–379.
 14. Михайлова М.В. Процессы проникновения морских вод в устья рек // Вод. ресурсы. 2013. Т. 40. № 5. С. 439–455.
 15. Остроумова Л.П., Соловьева Л.Н., Мишин Д.В. Справочно-аналитический обзор гидрологического режима устьевых областей рек Дона и Кубани. М.: Финпол, 2019. 140 с.
 16. Пляка П.С., Лихацкий В.В., Юдин А.В. Разработка средств контроля параметров водной среды // Экология 2023 – море и человек. // Тр. XII Всерос. науч. конф. молодеж. шк.-семинара. Ростов-на-Дону, Таганрог, 2023. С. 51–64.
 17. Рекомендации “Р 52.24.627-2007 Усовершенствованные методы прогностических расчетов распространения по речной сети зон высокозагрязненных вод с учетом форм миграции наиболее опасных загрязняющих веществ”. Ростов-на-Дону: Минприроды, Росгидромет, 2008. 172 с.
 18. Руководящий документ “РД 52.10.324-92 Методические указания. Гидрологические наблюдения и работы на гидрометеорологической сети в устьевых областях рек”. М., 1993. 188 с.
 19. Система мониторинга “Эмерсит”. <http://www.emercit.com/map/> (дата обращения: 01.04.2023)
 20. Цимлянское водохранилище: состояние водных и прибрежных экосистем. проблемы и пути их решения / Отв. ред. Г.Г. Матишов. Ростов-на-Дону: ЮНЦ РАН, 2011. 216 с.
 21. Швердяев И.В. Исследование шероховатости русел дельты Дона на основе наблюдений колебаний уровня в мае 2018 года // Экология. Экономика. Информатика. Сер. Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. 2018. Т. 1. № 3. С. 276–279.
 22. Guidelines on the study of seawater intrusion into rivers. Studies and reports in hydrology. Paris: UNESCO, 1991. № 50. 138 p.

THE INTRUSION OF SEA WATER INTO THE DON DELTA DURING THE LOW-WATER PERIOD

A. V. Kleshchenkov*, V. A. Kostyuk, A. Yu. Moskovets, E. G. Aleshina
Southern Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, 344006 Russia
**e-mail: kle-aleksej@yandex.ru*

A decrease of freshwater flow of the Don River during the period of severe low water flow observed in recent years, the growth of salinity of the Sea of Azov and Taganrog Bay, and sea level rise are accompanied by an increase in the number and intensity of dangerous salt water intrusions into the Don Delta. Retrospective analysis of the inflow of salt water into the delta shows an increase in salinity at the same levels of water rise during surges. This is especially clearly manifested in the lowest water years, when the frontal zone of the salinity gradient in Taganrog Bay approaches the delta coastline. The results of the analysis of the penetration range of salt water into the branches of the Don Delta allow us to state that changes in natural conditions have led to an increase in the distance to which salt water penetrates by 2–3 times compared to the 20th century.

Keywords: Don delta, the Sea of Azov, seawater intrusion, setup, saltwater penetration distance.