

Численное исследование влияния расхода воды на уровенный режим в устьевой области Дона

А. Л. Чикин^{1,*}, А. В. Клещенко¹, Л. Г. Чикина²

¹Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук,
Ростов-на-Дону, Россия

²Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия
*E-mail: chikin1956@gmail.com

Поступила в редакцию 11.01.2019 г., после доработки – 18.02.2019 г.

Цель. Цель данной работы – установление закономерностей формирования уровенного режима в русловом и дельтовом участках долины Дона при различных объемах речного стока и уровнях воды в Таганрогском заливе.

Методы и результаты. Приводится описание математической модели течения в дельтовой части реки Дон. Рассматривается русло из нескольких рукавов при впадении в принимающий водоем – Таганрогский залив. Модель описывается системой уравнений Сен-Венана, которая решается конечно-разностными методами. Аппроксимация уравнений проводится на четырехточечном шаблоне, что приводит к системе линейных уравнений с пятидиагональной матрицей. Для разных по величине расходов воды подобраны коэффициенты шероховатости. Приведено сравнение расчетных значений расхода воды и скорости течения с наблюдаемыми значениями при разных сгонах воды в Таганрогском заливе. Получены результаты численного исследования влияния величины расхода в вершине устьевой области на величину уровня поверхности воды в русле при разных уровнях в принимающем водоеме. Численно установлено, что величина расхода оказывает существенное влияние на уровенную поверхность в основном русле Дона. Однако расход почти не влияет на уровень в дельтовой части реки. В то же время уровень воды в Таганрогском заливе существенно влияет на уровенную поверхность в рукавах дельты и не оказывает влияния на вершинную часть русла.

Выводы. Вычислительные эксперименты с использованием математической модели показали, что на участке устьевой области выше первого узла дельты Дона существенное влияние на уровенную поверхность оказывает расход воды, на нижележащем участке – уровень воды в Таганрогском заливе.

Ключевые слова: русловый поток, дельта реки, уравнения Сен-Венана, математическая модель, сгонно-нагонные колебания, вычислительный эксперимент.

Благодарности: работа подготовлена в рамках реализации государственного задания ЮНЦ РАН, № госрегистрации проекта АААА-А18-118122790121-5. Расчеты выполнены на кластере ЦКП «Высокопроизводительные вычисления».

Для цитирования: Чикин А. Л., Клещенко 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. doi:10.22449/0233-7584-2019-4-355-366

Numerical Study of the Water Flow Effect on the Water Level in the Don Mouth

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

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

²*Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia
e-mail:chikin1956@gmail.com*

Purpose. The purpose of the paper is to determine the patterns of the level regime formation in the Don riverbed and the delta area of its valley at different volumes of the river flow discharge and water levels in the Taganrog Bay.

Methods and Results. The mathematical model of the river Don flow in its delta area is described. The mainstream consisting of several reaches is considered at its running into the receiving reservoir – the Taganrog Bay. The model is described by the Saint-Venant system of equations which is solved by the finite-difference methods. The equations are approximated at the four-point template that leads to the system of linear equations with a five-diagonal matrix. Roughness coefficients were selected for different water flow discharges. The simulated values of the water flow discharge and the flow velocity are compared with the values observed at different water levels in the Taganrog Bay. The results of the numerical study of the water flow effect at the estuary top upon the water surface level in the riverbed were obtained at different water levels in the receiving reservoir. It is numerically defined that the flow discharge value exerts a significant effect on the surface level of the Don mainstream. However, the flow almost does not influence the water level in the river delta area. At the same time, the water level in the Taganrog Bay significantly affects the surface level in the delta reaches; and no its influence is observed in the top part of the riverbed.

Conclusions. The computational experiments involving the mathematical model showed that in the mouth area above the first node of the Don delta, the level surface was significantly influenced by the flow discharge, whereas in its lower section – by the water level in the Taganrog Bay.

Keywords: streamflow, river delta, Saint-Venant equations, mathematical model, swing-surge oscillations, computational experiment.

Acknowledgments: The study is carried out within the framework of the state task of SSC, RAS, state registration of the project is № AAAA-A18-118122790121-5. The calculations are performed at the cluster of the Multiple-Access Center (MAC) “High-duty computations”.

For citation: Chikin, A.L., Kleshchenkov, A.V. and Chikina, L.G., 2019. Numerical study of the water flow effect on the water level in the Don mouth. *Physical Oceanography*, [e-journal] 26(4), pp. 316-325. doi:10.22449/1573-160X-2019-4-316-325

Введение

Устьевые области рек, несмотря на свои относительно небольшие размеры, занимают особое и очень важное место в составе как природных экосистем, так и территориально-хозяйственных комплексов. Они также играют важнейшую роль в поддержании экологического равновесия в глобальном масштабе [1]. Благодаря выгодному географическому положению (находясь на пересечении водных путей из материков в моря и океаны и наоборот) устья рек стали местом строительства портов, образования крупных промышленных центров. Исключительная биопродуктивность и широкое использование земельных, растительных, рыбных и других ресурсов устьев рек различными отраслями хозяйства привели к тому, что районы речных дельт стали густонаселенными. Вместе с тем использование устьев рек затруднено в связи с большой изменчивостью их морфологических, гидрологических,

гидрохимических, экологических характеристик кратковременного (приливы, штормы, нагоны) и сезонного масштабов.

Устьевая область Дона – ключевой район бассейна Азовского моря, где происходят сложные процессы взаимодействия речных и морских вод [2]. Она простирается на 291 км от условной линии, соединяющей Должанскую и Белосарайскую косы в Таганрогском заливе, на западе до ст-цы Раздорской на востоке [3, 4]. Устьевая область Дона состоит из устьевого участка реки (от ст-цы Раздорской 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. [5].

Для Таганрогского залива Азовского моря и устьевой области Дона в настоящее время характерно сложное сочетание пресных, слабосоленоватых и солоноватых вод: здесь формируются 6 основных типов водных масс. Установлено, что в устьевой области даже во время сгонов фиксируется значительное повышение солёности (до 5‰), что свидетельствует о резко возросшей роли Азово-Черноморского компенсационного течения [6, 7]. Район исследований хорошо освоен с точки зрения морехозяйственной деятельности, здесь развито судоходство. Через порты Приазовья (Ростов-на-Дону, Азов, Таганрог) ежегодно проходит более 40% российского экспорта зерновых. В силу значительного влияния сгонно-нагонных явлений в устьевой области Дона часто складываются ситуации, когда суда вынуждены простаивать по несколько дней в восточной части Таганрогского залива (район приемного буя Азово-Донского морского канала) и на рейде портов Азов и Ростов. Так, 24 октября 2016 г. практически на неделю было остановлено движение 45 судов из-за резкого снижения уровня воды [8].

Целью настоящей работы является установление закономерностей формирования уровневого режима в русловом и дельтовом участках долины Дона при различных объемах речного стока в условиях изменчивости уровня принимающего водоема – Таганрогского залива. Решение этой задачи представляется важным, так как гидродинамическое взаимодействие руслового и морского участков устьевой области контролирует транспортировку как твердых, так и растворенных веществ [9], в том числе токсичных [10], и имеет ключевое значение для управления природопользованием в дельте Дона.

Материалы и методы

К настоящему времени разработано много подходов для расчета гидрологических характеристик русловых потоков. В работе [11] расчет уровней свободной поверхности для русла Дона предлагается вести по формуле

$$\frac{\Delta H_x}{\Delta H_{Az}} = e^{-kx},$$

где ΔH_x – нагон в сечении x ; ΔH_{Az} – нагон в Азове; $k = 1,21 \cdot 10^{-5} Q_{Razd} + 0,011$, Q_{Razd} – расход воды на посту в ст-це Раздорской; x – расстояние от Азова. Однако расчет по данной методике дает удовлетворительные результаты

только в годы, когда расход близок к норме (слегка завышенный результат с погрешностью, не превышающей 7%). Кроме того, данная методика не работает в случае, когда ΔH_{Az} и ΔH_x имеют разные знаки.

В работе [5] 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.

Настоящая работа является продолжением исследований, представленных в [13]. Дельтовая область расширена до границы с Таганрогским заливом и включает в себя три основных рукава Дона: Старый Дон, Большая Каланча, переходящая в Мокрую Каланчу, и Большая Кутерьма. Движение воды в открытом русле описано во многих классических учебниках [14, 15] следующей системой дифференциальных уравнений:

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

где Q – расход воды, $\text{м}^3/\text{с}$; t – время, с ; W – площадь живого сечения, м^2 ; z – уровень воды, м ; s – координата, м ; K – модуль расхода, $\text{м}^3/\text{с}$; q – распределенный боковой приток, $\text{м}^2/\text{с}$; $g = 9,81$ – принятое значение ускорения свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$. Модуль расхода K вычисляется по формуле $K = W \cdot C \sqrt{R}$, здесь R – гидравлический радиус; C – коэффициент Шези, найденный по формуле Маннинга $C = R^{1/6} / n$, n – шероховатость дна.

На верхней границе потока, в вершине устьевой области у ст-цы Раздорской, задавался расход воды. На нижней границе задавался уровень воды в принимающем водоеме – Таганрогском заливе. Данный параметр устанавливался равным величине сгона или нагона в восточной части залива. В точках ветвления рукавов ставилось условие равенства нулю суммарного по рукавам расхода воды. В качестве начального условия задавались морфометрические значения глубины и ширины русла в соответствии с Атласом внутренних водных путей РФ [16] и данными промерных работ, проведенных в Южном научном центре (ЮНЦ) РАН. Считалось, что расход воды в расчетной области равен расходу на верхней границе, а изменение водной поверхности равно нулю или какому-либо известному распределению: $Q(s, 0) = Q_0(s)$, $z(s, 0) = z_0(s)$.

Предположим, что поперечное сечение русла имеет параболический профиль $z = \alpha x^2 - H_0$, $-b_0/2 \leq x \leq b_0/2$, где z – профиль дна; $\alpha = 4H_0/b_0^2$ – коэффициент параболы; H_0 и b_0 – начальные значения максимальной глубины и ширины русла соответственно. Тогда свободная поверхность воды в произвольный момент времени находится на уровне $z + H_0$. Ширина русла b

зависит от высоты урениной поверхности и вычисляется по формуле $b = 2\sqrt{\frac{z + H_0}{\alpha}}$, а площадь живого сечения вычисляется соответственно как $W = \frac{2}{3}b(z + H_0) = \frac{4}{3\sqrt{\alpha}}(z + H_0)^{\frac{3}{2}}$. Тогда имеем $\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial W}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial t}$, и с учетом того, что $\frac{\partial W}{\partial z} = \frac{2}{\sqrt{\alpha}}\sqrt{z + H_0} = b$, получим $\frac{\partial W}{\partial t} = b \frac{\partial z}{\partial t}$. Систему (1) можно переписать в виде

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

Данная задача решается конечно-разностными методами с использованием неявных схем. К системе (2) применим следующую конечно-разностную аппроксимацию на четырехточечном шаблоне:

$$\begin{cases} \frac{(\mathcal{Q}_{j+1}^{n+1} - \mathcal{Q}_{j+1}^n) + (\mathcal{Q}_j^{n+1} - \mathcal{Q}_j^n)}{2\Delta t} + gW_j^n \left(\frac{z_{j+1}^{n+1} - z_j^{n+1}}{\Delta s} + \frac{\mathcal{Q}_j^{n+1}|\mathcal{Q}_j^n|}{K_j^{n2}} \right) = 0, \\ b_j^n \frac{(z_{j+1}^{n+1} - z_{j+1}^n) + (z_j^{n+1} - z_j^n)}{2\Delta t} + \frac{\mathcal{Q}_{j+1}^{n+1} - \mathcal{Q}_j^{n+1}}{\Delta s} = q_j^n. \end{cases}$$

Приведенная схема применялась в работах [17, 18] при расчете течений в естественных каналах, там же доказывается ее устойчивость.

Для решения полученной системы линейных алгебраических уравнений в настоящей работе использовался прямой метод с применением LU -разложения [19].

Результаты и обсуждение

Модель отлаживалась на данных по расходам воды и уровням водной поверхности на гидропостах (ГП) Раздорская, Багаевская, Аксай, Ростов-на-Дону, Донской в период 10 марта – 7 мая 2018 г. Предполагалось, что боковые притоки q отсутствовали ($q = 0$). Изменение расхода воды и уровня свободной поверхности на ГП показано в табл. 1. Для оценки полученных результатов использовали 5%-ные доли от размаха (вариаций) уровня для каждого ГП.

Задавая уровень на ГП Донской и соответствующий расход воды, вычисляли уровни на оставшихся четырех ГП. Счет проводился до получения установившегося решения. Варьирование величин уровня на ГП задавалось подбором коэффициентов шероховатости на каждом из участков русла с учетом ранее выполненных в ЮНЦ РАН работ [20]. Результат считался удовлетворительным, если расчетный уровень отличался от наблюдаемого значения не более чем на 5% соответствующего размаха.

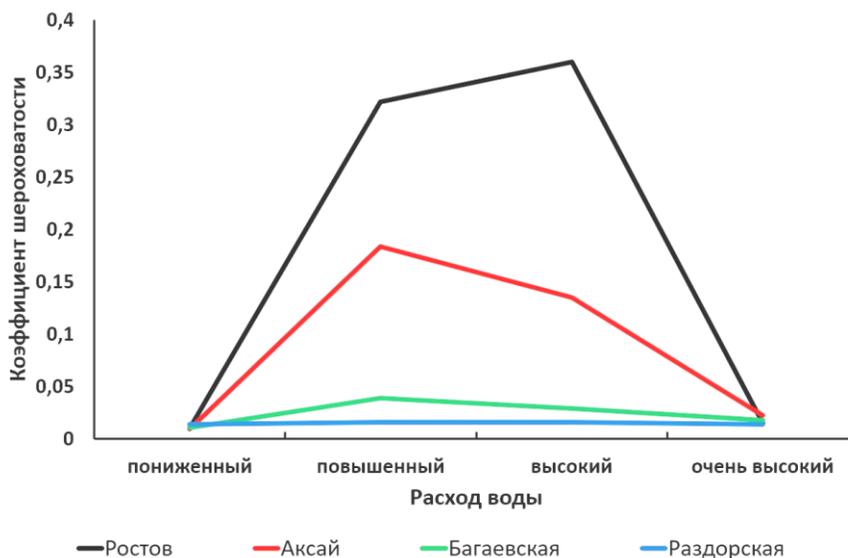
Т а б л и ц а 1
T a b l e 1

**Значения вариаций уровня свободной поверхности и их 5%-ных долей
на гидропостах**
**Values of variations of the free surface level and their 5%-portions
at the hydrological stations**

Гидропост / Hydrological station	Уровень, м / Level, m		Размах уров- ня воды, м / Amplitude of water level, m	5% размаха уровня, м / 5% of level amplitude, m
	Минимум / Minimum	Максимум / Maximum		
Раздорская / Razdorskaya	1,01	5,42	4,41	0,22
Багаевская / Bagaevskaya	-0,01	3,43	3,44	0,17
Акса́й / Aksai	-0,69	1,58	2,27	0,11
Ростов-на-Дону / Rostov-on-Don	-0,85	1,30	2,15	0,11
Донской / Donskoy	-1,22	1,18	2,40	0,12
Расход воды Q , м ³ /с / Flow discharge Q , м ³ /s	371	2020	1649	82

Весь размах расхода воды за указанный период был условно разбит на 4 интервала: пониженная норма 371–597 м³/с со средним значением 496 м³/с; повышенный расход 758–926 м³/с со средним значением 837 м³/с; высокий расход 1062–1532 м³/с со средним значением 1404 м³/с; очень высокий расход 1605–2008 м³/с со средним значением 1879 м³/с. Установлено, что для данной модели требуются разные коэффициенты шероховатости в зависимости от величины расхода. Так, для пониженной нормы и очень высокого расхода на всех участках русла коэффициент примерно равен 0,010–0,015. Но для повышенного и высокого расходов коэффициент шероховатости на участках вверх по течению от устья до ГП Раздорская различный: на участке до ГП Ростов-на-Дону он равен 0,322 (повышенный) и 0,360 (высокий); на участке Ростов-на-Дону – Аксай 0,135 (высокий) и 0,184(повышенный); на участке Аксай – Багаевская 0,029 (высокий) и 0,039 (повышенный); на участке Багаевская – Раздорская примерно 0,016 при всех расходах. Схематично изменение коэффициентов шероховатости показано на рис. 1.

Корреляционный анализ показал, что зависимость между расходом воды и уровнем водной поверхности ослабевает при продвижении вниз по течению (табл. 2). Более того, после ответвления от основного русла Дона его рукавов уровень поверхности воды практически не зависит от расхода ($r = 0,29$).



Р и с. 1. Графики изменения коэффициентов шероховатости
Fig. 1. Graphs of variation of the roughness coefficients

Т а б л и ц а 2
 Table 2

Коэффициенты корреляции (r) и уровни значимости (p) для зависимости уровней свободной поверхности от расхода воды (Q)
Correlation coefficients (r) and significance levels (p) for dependence of the free surface levels on water discharge (Q)

Гидропост / Hydrological station	r	p
Раздорская / Razdorskaya	0,99	0,00
Багаевская / Bagaevskaya	0,98	0,00
Аксай / Aksai	0,93	0,00
Ростов-на-Дону / Rostov-on-Don	0,86	0,00
Донской / Donskoy	0,29	0,01

Было проведено сравнение расчетных значений расхода воды (Q) и скорости течения (V) со значениями ($Q_{\text{наб}}, V_{\text{наб}}$), полученными 22–23 сентября 2014 г. Замеры проводились на станциях, показанных на рис. 2. Для этих же точек проводились расчеты по рассматриваемой модели. Погрешность определялась следующим образом: $\delta = \frac{|x - x_n|}{\max(x, x_n)}$ (где x – расчетное значение, x_n – наблюдаемое значение) и не могла превышать 100%.

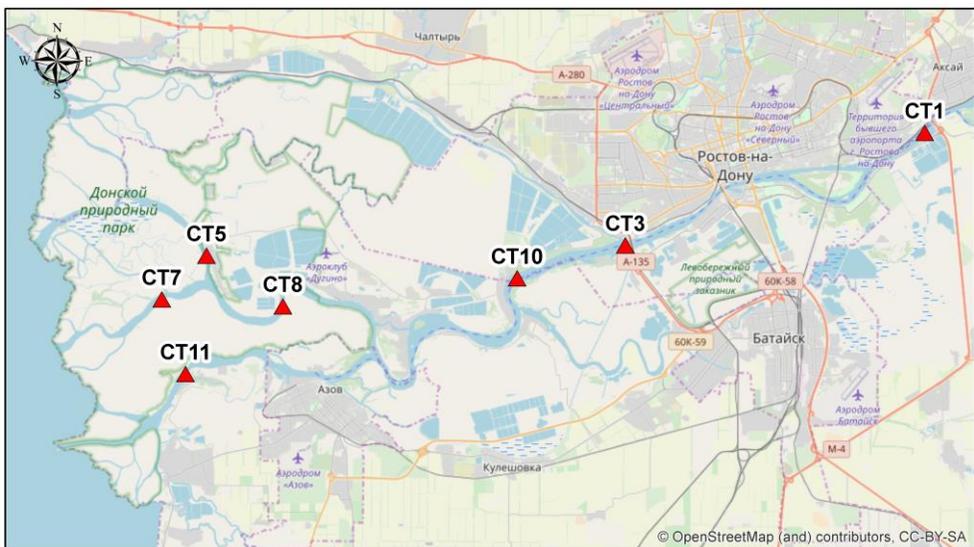


Рис. 2. Положение станций в рукавах дельты Дона в 2014 г.
Fig. 2. Location of the stations in the Don delta reaches in 2014

22 сентября наблюдался сгон воды до $-0,61$ м на ГП Донской, расход на ст. 1 (ГП Аксай) составлял $453 \text{ м}^3/\text{с}$, но 23 сентября уровень повысился до $-0,36$ м, а расход упал до $303 \text{ м}^3/\text{с}$, что внесло значительные погрешности в проведенные замеры. Полученные результаты сравнивались с наблюдаемыми данными на ст. 3, 8, 10, 11 (табл. 3).

Станция 8 находилась в рукаве Каланча, где, скорее всего, в рассматриваемый период наблюдений из-за метеоусловий нарушилась прямая связь между расходом воды и уровнем. Погрешность для этой станции значительно выше остальных. Большая погрешность в скорости течения объясняется, вероятно, погрешностью в задании поперечного профиля русла, что непосредственно влияет на живое сечение и, следовательно, на скорость течения.

Было проведено численное исследование влияния величины поступления воды в вершине устьевой области на величину уровня поверхности воды в русле при разных уровнях в принимающем водоеме – Таганрогском заливе. Расход воды изменялся от $300 \text{ м}^3/\text{с}$ (в маловодный период) до $2000 \text{ м}^3/\text{с}$ (в многоводный период). Вычислительный эксперимент показал, что уровень поверхности воды существенно зависит от величины расхода только на ГП основного русла (Багаевская, Аксай). Причем это происходит как при сгонах воды, так и при нейтральном уровне, а также при нагонах. В дельтовой области влияние величины сброса воды на уренистую поверхность русла начинает существенно ослабевать. Так, при сгоне воды ($-0,7$ м) разность уровней при наибольшем и наименьшем расходе в первом узле дельты на ст. 3 (Западный мост) не превышала $0,85$ м. На станциях в самой дельте Дона (Дугино (ст. 8), Мокрая Каланча (ст. 7), Рогожкино (ст. 5), Узяк (ст. 11)) эта разность не превышала $0,6$ м (рис. 3).

Т а б л и ц а 3
T a b l e 3

**Сравнение расчетных значений скорости течения (V) и расхода воды (Q) с наблюдаемыми значениями ($V_{\text{наб}}$ и $Q_{\text{наб}}$) при сгонах $-0,61$ и $-0,36$ м
Comparison the calculated values of flow velocity (V) and water discharge (Q) with the observed values (Q_{obs}) and (V_{obs}) at water levels -0.61 and -0.36 m**

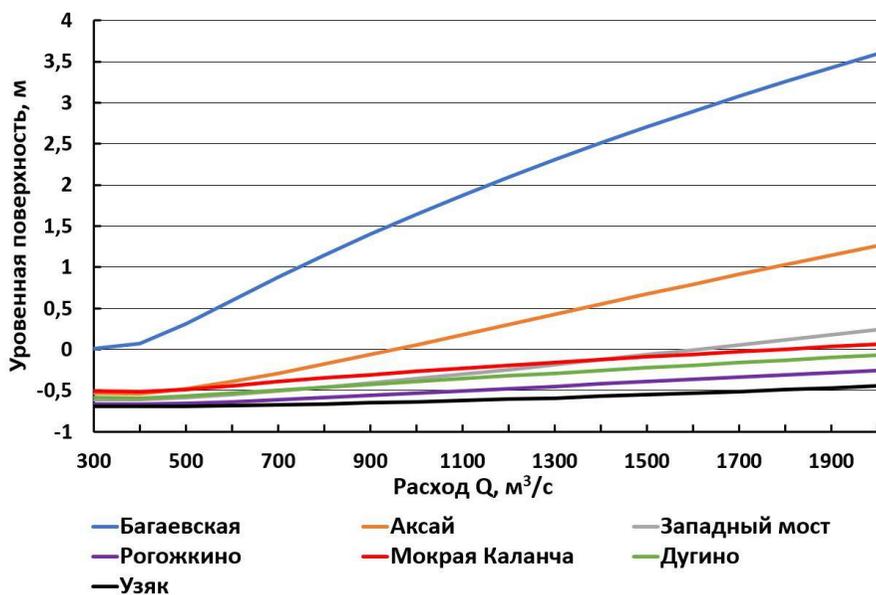
Станция / Station	$V_{\text{наб}}$, м/с / V_{obs} , m/s	V , м/с / V , m/s	Погрешность, % / Error, %	$Q_{\text{наб}}$, м ³ /с / Q_{obs} , m ³ /s	Q , м ³ /с / Q , m ³ /s	Погрешность, % / Error, %
сгон $-0,61$ м / water level -0.61 m						
3	0,281	0,260	7,47	457	456,1	0,20
8	0,063	0,130	51,54	104	300,2	65,36
10	0,196	0,250	21,60	382	501,2	23,78
11	0,139	0,150	7,33	152,5	201,2	24,20
сгон $-0,36$ м / water level -0.36 m						
3	0,281	0,250	11,03	457	455,9	0,24
8	0,063	0,120	47,50	104	273,1	61,92
10	0,196	0,220	10,91	382	455,9	16,21
11	0,139	0,130	6,47	152,5	183,0	16,67

При сгоне повышенный сброс воды в устьевую область позволяет поддерживать нормальную проходную глубину судового хода, но, как показали расчеты, это малоэффективно в дельтовой части Дона.

Проведенный с использованием математической модели вычислительный эксперимент показал следующие результаты. При отсутствии сгонов или нагонов колебание уровня поверхности при наименьшем и наибольшем расходе воды не превышает $0,55$ м в первом узле дельты и $0,3$ м – на станциях в самой дельте Дона.

В то же время на величину уровня в самой дельте Дона существенное влияние оказывают нагонные явления, а не величина расхода воды. Так, при нагоне $1,5$ м в устьях рукавов Дона уровень воды на станциях в дельте также поднялся примерно на $1,5$ м и практически не зависел от величины поступления воды в устьевую область. Зависимость уровня поверхности русла от расхода воды при продвижении вверх по течению также уменьшается. Наблюдения за уровнем воды на ГП Донской подтверждают результаты, полученные расчетным путем.

Сравнение скоростей течения на станциях в отсутствие сгонов и нагонов при различных расходах сбрасываемой воды (табл. 4) показало, что вариации скорости в дельтовой области русла (Мокрая Каланча, Дугино, Узьяк) значительно меньше, чем в основном русле (Аксай, Западный мост). Это объясняется существенно меньшим влиянием расхода поступающей воды на гидродинамику дельтовых рукавов Дона.



Р и с. 3. Изменение уровня воды (по Балтийской системе) на станциях относительно нормы в зависимости от расхода Q при сгоне $-0,7$ м

F i g. 3. Change of the water level at the stations relative to the standard depending on the flow discharge Q at water level -0.7 m (Baltic system)

Т а б л и ц а 4
T a b l e 4

Вариации скорости течения (V) на станциях Variations of the flow velocity values V at the stations

Станция / Stations	Размах V , м/с / Amplitude of V , m/s
Аксай / Aksai	0,93
Западный мост / Zapadny most	0,76
Мокрая Каланча / Mokraya Kalancha	0,46
Дугино / Dugino	0,41
Узьяк / Uzyak	0,47

З а к л ю ч е н и е

Проведенные с использованием математической модели расчеты, а также наблюдения за расходом воды и изменением уровня водной поверхности показали, что на гидрологическую ситуацию в дельте Дона существенное влияние оказывает уровень в принимающем водоеме – Таганрогском заливе. Величина расхода воды, поступающей в устьевую область, оказывает влияние на уровеньный режим русла Дона, расположенного выше ветвления на рукава. Причем с продвижением вверх по течению это влияние возрастает. В дельтовой же части Дона величина расхода на ГП Раздорская практически не оказывает влияния на уровеньный режим.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михайлов В. Н. Устья рек России и сопредельных стран: прошлое, настоящее и будущее. М. : ГЕОС, 1997. 413 с.
2. Филиппов Ю. Г. О влиянии стока р. Дон на уровень воды в Таганрогском заливе // Метеорология и гидрология. 2015. № 2. С. 76–80.
3. 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.
4. Симов В. Г. Гидрология устьев рек Азовского моря. М. : Гидрометеиздат, 1989. 328 с.
5. Мишин Д. В., Полонский В. Ф. Исследование нестационарных водных потоков в непривливаемом устье реки Дон // Труды государственного океанографического института. 2013. № 214. С. 166–179.
6. Матишов Г. Г., Григоренко К. С. Причины осолонения Таганрогского залива // Доклады Академии наук. 2017. Т. 477, № 1. С. 92–96.
7. 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.
8. Матишов Г. Г., Ермолаев А. И. Мир каравайки и взморья глазами донских казаков. Ростов-на-Дону : Изд-во ЮНЦ РАН, 2017. 224 с.
9. Drivers and impacts of water level fluctuations in the Mississippi River delta: Implications for delta restoration / M. Hiatt [et al.] // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2019. Vol. 224. P. 117–137. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.04.020>
10. Metal fate and effects in estuaries: A review and conceptual model for better understanding of toxicity / A. A. de Souza Machado [et al.] // Science of the Total Environment. 2016. Vol. 541. P. 268–281. doi:10.1016/j.scitotenv.2015.09.045
11. Михайлов В. Н., Рогов М. М., Чистяков А. А. Речные дельты. Гидролого-морфологические процессы. Л. : Гидрометеиздат, 1986. 280 с.
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. 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.
14. Грушевский М. С. Волны попусков и паводков в реках. Л. : Гидрометеиздат, 1969. 337 с.
15. Корень В. И. Математические модели в прогнозах речного стока. Л. : Гидрометеиздат, 1991. 197 с.
16. 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.
17. Amein M., Fang C. S. Implicit Flood Routing in Natural Channels // Journal of the Hydraulics Division. 1970. Vol. 96, iss. 12. P. 2481–2500.
18. Fread D. L. Numerical Properties of Implicit Four-Point Finite Difference Equations of Unsteady Flow. NOAA Technical Memorandum NWS Hydro-18. Silver Spring, MD : U.S. Department of Commerce, NOAA, 1974. 123 p. URL: https://www.nws.noaa.gov/oh/hdsc/Technical_memoranda/TM18.pdf (дата обращения: 04.01.2019).
19. Форсайт Дж., Молер К. Численное решение систем линейных алгебраических уравнений / Пер. с англ. В. П. Ильина и Ю. И. Кузнецова. М. : Мир, 1969. 167 с.

20. *Шевердяев И. В.* Исследование шероховатости русел дельты Дона на основе наблюдений колебаний уровня в мае 2018 года // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. Ростов-на-Дону : Изд-во ЮНЦ РАН, 2018. Т. 1, вып. 3. С. 276–279. doi:10.23885/2500-123x-2018-2-3-49-57

Об авторах:

Чикин Алексей Львович, главный научный сотрудник, лаборатория гидрологии и гидрохимии, ФИЦ ЮНЦ РАН (344006, Россия, 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

Клешенков Алексей Владимирович, ведущий научный сотрудник, лаборатория гидрологии и гидрохимии, ФИЦ ЮНЦ РАН (344006, Россия, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, д. 41), кандидат географических наук, **ResearcherID: E-6619-2014**, **ORCID ID: 0000-0002-7976-6951**, **Scopus Author ID: 57016697100**, geo@ssc-ras.ru

Чикина Любовь Григорьевна, профессор, кафедра информатики и вычислительного эксперимента, ЮФУ (344006, Россия, 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**, lchikina@sfedu.ru