

ГИДРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

УДК: 551.467.3:551.5:532.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СОЛЕННОСТИ В ТАГАНРОГСКОМ ЗАЛИВЕ ПРИ ШТОРМОВЫХ НАГОНАХ¹

© 2019 г. А. Л. Чикин^{1,*}, А. В. Клещенков¹, Л. Г. Чикина²

¹Южный научный центр РАН
Ростов на-Дону, 344006 Россия

²Южный федеральный университет
Ростов-на-Дону, 344006 Россия

*e-mail: chikin@sfedu.ru

Поступила в редакцию 19.03.2018 г.

После доработки 18.10.2018 г.

Принята к публикации 18.10.2018 г.

Приведены результаты анализа наблюдений за изменением солености в Таганрогском заливе при штормовых нагонах, дано подробное описание математической модели процесса переноса соленых водных масс, а также приведены результаты численных расчетов.

Ключевые слова: штормовой нагон, соленость, математическая модель, вычислительный эксперимент.

DOI: 10.31857/S0321-0596466592-597

ВВЕДЕНИЕ

Для Азовского моря характерна значительная пространственная неоднородность солености. На участке от дельты Дона до Керченского пролива соленость возрастает от 0.5–0.7 до 13–14‰. Самый резкий градиент солености до 10‰ закономерно формируется в эстуарном Таганрогском заливе. Здесь происходит сложное взаимодействие донских речных и трансформированных морских вод. Именно в заливе наиболее резко проявляются внутривековые, сезонные и сгонно-нагонные (погодные) вариации термохалинного режима. Сокращение стока Дона до исторических минимумов наряду с интенсивной циклонической деятельностью и аномальной адвекцией черноморских вод привело к тому, что в течение 2014–2016 гг. в Таганрогском заливе наблюдалась аномально высокая соленость (до 12‰) [4]. На фоне этого в последнее время фронтальная зона смешения морских и речных вод из Таганрогского залива часто перемещается в рукава дельты Дона. В результате возрастает

соленость воды на водозаборах в Азове, Таганроге и Ростове-на-Дону, происходит повышение концентрации в воде одорантов, фенолов и хлорфенолов, а вода и рыба приобретают резкий запах “дуста” [5]. В таких условиях представляется важным исследование взаимодействия морских и речных вод. Случай приливных устьев рек подробно рассмотрен в работе [1].

В данной работе предложен прогноз динамики поля солености в восточной части Таганрогского залива и в устьевой области Дона во время нагонов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

С начала XXI в. ЮНЦ РАН и Институт аридных зон ЮНЦ РАН ведут систематические наблюдения за термохалинной структурой вод устьевого взморья и дельты р. Дон в ходе морских экспедиций. Начиная с лета 2014 г. исследования солености и температуры воды проводились комплексным измерителем течений Aanderaa RSM-9LW [12] на стационарной буйковой станции на взморье в 5 км от края дельты (первый створный знак Азово-Донского морского канала, АДМК) и в устье Дона (х. Донской, с. Кагальник). Параллельно с этим велись наблюдения за

¹ Работа выполнена в части анализа термохалинной структуры вод в рамках ГЗ ЮНЦ РАН (проект АААА-А18-118122790121-5), в части численного моделирования — при финансовой поддержке РФФИ (научный проект 18-05-80025).

метеопараметрами и уровнем воды на гидропосту на х. Донском и уровнемерном посту в г. Таганроге. Весной 2015 г. была создана система из двух постоянно действующих гидропостов, оборудованных датчиками температуры и электропроводности, метеостанцией и уровнемером (рис. 1). Передача данных осуществлялась в режиме реального времени на сервер ЮНЦ РАН.

Для исследования пространственного распределения температуры и солености морской воды в ходе рейсов НИС “Денеб” в Азовское море и Таганрогский залив проводилась непрерывная запись данных о состоянии среды термосоленографом SBE 21 SEACAT [13], траекторию движения которого на рис. 1 представляют жирные линии.

С помощью указанных измерительных приборов получают данные лишь в одной точке, где эти приборы установлены, а в случае использования термосоленографа — только вдоль линии следования термосоленографа. Для получения более полной картины распределения солености в Таганрогском заливе были проведены расчеты с помощью математической модели, имеющей две части — гидродинамическую и транспортную.

Гидродинамическая часть описывается двухслойной математической моделью, суть которой состоит в следующем. Проведем горизонтальную секущую плоскость P , отстоящую от невозмущенной поверхности водоема P_0 на глубине, равной максимальной глубине мелководья $h(x, y)$ (эта глубина соизмерима с величиной перепада уровня воды $\zeta(x, y)$ при сгонно-нагонных явлениях) (рис. 2), и разобьем всю

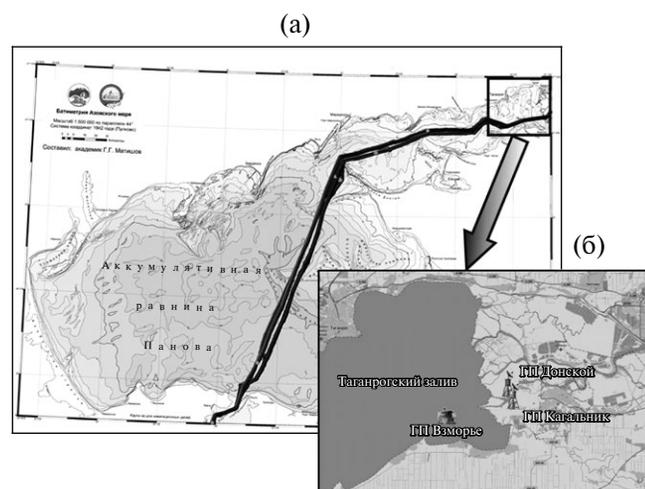


Рис. 1. Расположение станций измерений термосоленографа в Азовском море (а), картосхема гидропостов ЮНЦ РАН (б).

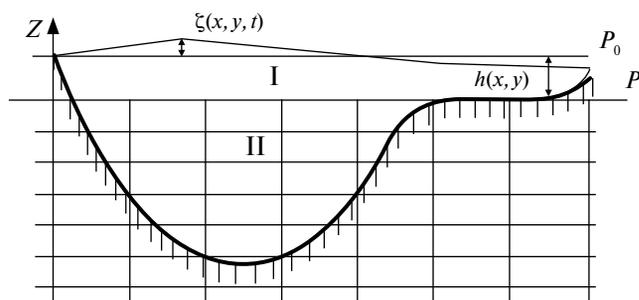


Рис. 2. Вертикальный разрез исследуемого водоема. P_0 — невозмущенная поверхность водоема; P — горизонтальная секущая плоскость; $h(x, y)$ — максимальная глубина мелководья; $\zeta(x, y)$ — величина перепада уровня воды.

область моделирования на два слоя: верхний — I и нижний — II. Таким образом, слой I — все мелководье и верхняя часть глубоководного слоя, слой II содержит глубоководную область. Предполагается, что эффект осушения водоема из-за сгона воды может наблюдаться только в мелководных районах и не может в глубоководной части.

На движение воды в слое I влияет ветер, а движение в слое II вызывается как движением слоя I, так и градиентами давления.

Движение воды в слое I задается уравнениями мелкой воды:

$$\frac{\partial u_s}{\partial t} + u_s \frac{\partial u_s}{\partial x} + v_s \frac{\partial u_s}{\partial y} - \Omega v_s = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v_{xy} \left(\frac{\partial^2 u_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_s}{\partial y^2} \right) + \frac{\tau_{sx}}{H} - \frac{\tau_{bx}}{H} + F_x(x, y), \quad (1)$$

$$\frac{\partial v_s}{\partial t} + u_s \frac{\partial v_s}{\partial x} + v_s \frac{\partial v_s}{\partial y} + \Omega u_s = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + v_{xy} \left(\frac{\partial^2 v_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_s}{\partial y^2} \right) + \frac{\tau_{sy}}{H} - \frac{\tau_{by}}{H} + F_y(x, y), \quad (2)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial (H u_s)}{\partial x} + \frac{\partial (H v_s)}{\partial y} = 0. \quad (3)$$

В уравнениях (1)–(3) $H = h + \zeta$; $h = h(x, y)$ — глубина мелководного слоя; ζ — перепад уровня воды; $u_s = u_s(x, y, t)$, $v_s = v_s(x, y, t)$ — скорости в слое I; функции $F_x(x, y)$ и $F_y(x, y)$ получаются при осреднении по глубине H верхнего слоя I вертикальных составляющих конвективных членов в трехмерном уравнении движения; 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 жидкости о дно (или

о глубоководный слой воды). Эти величины зависят от скорости ветра $W_B = \{W_x; W_y\}$ и течения $W_T = \{u_s; v_s\}$ и определяются так [8]:

$$\tau_s = \gamma |W_B| W_B, \quad \tau_b = \beta |W_T| W_T,$$

где $|W_B| = \sqrt{W_x^2 + W_y^2}$, $|W_T| = \sqrt{u_s^2 + v_s^2}$.

Движение воды в слое II задается уравнениями движения несжимаемой вязкой жидкости:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - \Omega v = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \\ + v_{xy} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_z \frac{\partial u}{\partial z} \right), \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + \Omega u = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \\ + v_{xy} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_z \frac{\partial v}{\partial z} \right), \end{aligned} \quad (5)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (6)$$

К системе уравнений (4)–(6) добавляется уравнение гидростатического давления

$$p = g\rho(\zeta - z) + p_a. \quad (7)$$

В (4)–(7) u, v, w — компоненты скорости; x, y, z, t — пространственные переменные и время соответственно; v_{xy}, v_z — коэффициенты горизонтальной и вертикальной вязкости соответственно; ρ — плотность воды; $g = 9.8 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения; p_a — атмосферное давление. Приведенные системы замыкаются соответствующими граничными условиями. На границе с атмосферой задается сила трения ветра о поверхность водоема, которая выносится в правую часть уравнений (1), (2). Вдоль твердой границы, в том числе на дне, ставятся условия скольжения или задаются скорости втекания или вытекания воды (например, для устьев рек). Вертикальная составляющая скорости вычисляется из уравнения неразрывности с единственным нулевым граничным условием на дне.

Предполагается, что на границе между слоями $\partial\Omega_i$ горизонтальные скорости равны, что является верхним граничным условием для глубоководного слоя II:

$$u|_{\partial\Omega_i} = u_s, \quad v|_{\partial\Omega_i} = v_s.$$

Функции $F_x(x, y)$ и $F_y(x, y)$ имеют следующий вид:

$$F_x(x, y) = \frac{u_s w}{H} \Big|_{\partial\Omega_i}, \quad F_y(x, y) = \frac{v_s w}{H} \Big|_{\partial\Omega_i}.$$

Подробное описание численного решения гидродинамической составляющей модели представлено в [9]. Данный подход успешно применен при моделировании экстремальных наводнений [6, 7].

Транспортную часть представляет уравнение конвекции–диффузии в предположении консервативности распространяемого вещества:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + (\bar{v} \cdot \nabla) S = \Delta(\bar{M} \nabla S),$$

где $S_{(x)}$ — концентрация; $\bar{M} = \{\mu_s^{xy}, \mu_s^{xy}, \mu_s^z\}$, μ_s^{xy}, μ_s^z — коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентной диффузии соответственно; $\bar{v} = (u, v, w)$ — вектор скорости. Предполагается, что поток через свободную поверхность и боковую границу отсутствует. Такая постановка задачи рассматривалась при моделировании процесса распространения загрязняющего вещества в Цимлянском водохранилище [10].

Задача, подобная представленной в настоящей работе, решена для всего Азовского моря в целом, когда возникла необходимость восстановления пропущенных данных по солености [3].

Основная цель данной работы — исследование пространственного распределения соленых вод в Таганрогском заливе и расчет динамики изменения концентрации соли в районе дельты Дона. Поэтому, чтобы не ставить граничные условия на открытой границе Таганрогского залива в районе Должанской косы, расчет проводился по всему Азовскому морю, где граничные условия ставятся достаточно легко. В качестве начального распределения концентрации использовался профиль солености, полученный с помощью термосоленографа SBE 21 SEACAT, а в случае отсутствия таких данных — соответствующее поле солености на данное время года [11]. Калибровка модели проводилась по данным наблюдений за несколькими нагонами в различные сезоны года, при этом корректировка гидродинамической составляющей была возможна только по уровню воды.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В рамках предложенной ранее новой классификации гидрологических обстановок на устьевом взморье [4] можно выделить два класса ситуаций. Первый характеризуется практически

линейной связью между уровнем и соленостью в пределах устьевых взморья и дельты Дона. Замечено, что только при сильных нагонах изменение солености связано прямой зависимостью с изменением уровня воды, что объясняется конвективной составляющей в процессе переноса. Второй класс ситуаций формируется при умеренных ветрах западных румбов, когда даже значительное увеличение уровня не влияет на изменение солености. Это явление продемонстрировано на рис. 3, где видно увеличение уровня солености, обусловленное резким увеличением скорости западного ветра до 10–11 м/с. В остальное время, когда скорость ветра не превышала 7–8 м/с, соленость практически не изменяется, хотя наблюдаются достаточно большие колебания уровня.

Анализ хода уровня и солености на устьевом взморье и в гирле Свином на расстоянии 5 км от устья позволил выявить некоторую инертность в процессе переноса соленых водных масс, которая иллюстрируется “раздвоением” данных по уровню и солености на диаграмме рассеивания, где одним и тем же уровням воды соответствуют меньшие и большие величины значения солености. Меньшая соленость соответствует, как правило, подъему уровня воды во время нагона, а большая — падению. Это объясняется тем, что в начале нагона более соленые воды еще не успели достигнуть точки наблюдения, а при ослаблении ветра и начавшемся падении уровня эти воды еще могли продолжать поступательное движение и лишь через некоторое время стали отступать под действием более пресных речных вод. Данный процесс наблюдается не при всех нагонах. Очень четко он прослеживался во время нагона 26–28 декабря 2015 г. (рис. 4), а также во время нагонов 26–28 июня 2014 г. и 3–4 июля 2015 г. Во время нагонов 2–4 октября 2015 г. и 27–30 марта 2017 г.

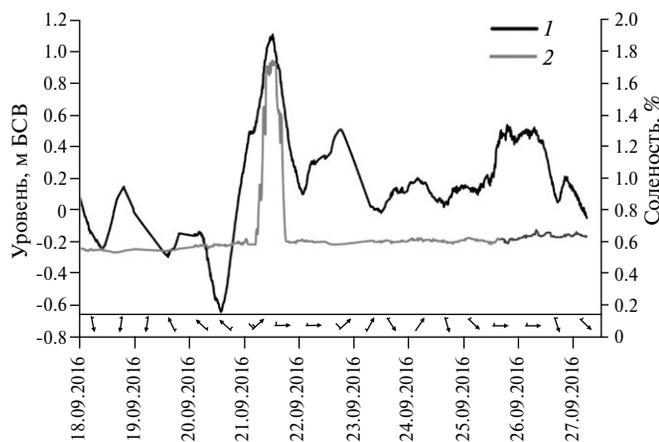


Рис. 3. Ход уровня воды (1) и солености (2) во время нагона 23–27 сентября 2016 г.

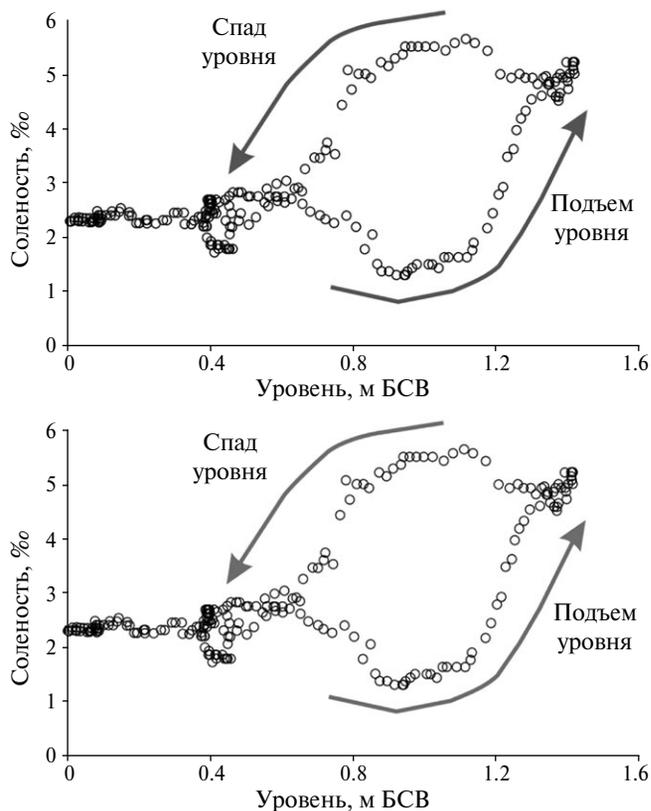


Рис. 4. Диаграмма рассеивания показателей уровня и солености воды во время нагона 26–28 декабря 2015 г.

картина немного сглажена, но гистерезисный характер связи солености и уровня сохраняется.

Используемая модель позволяет учитывать подобные эффекты и корректно прогнозировать распределение солености по акватории Таганрогского залива и устьевых взморья в период нагонов.

Моделирование процесса распределения солености во время нагона в период с 27 по 30 марта 2017 г. дало хорошие результаты на период активной фазы нагона (27–29 марта) (рис. 5). При этом погрешность расчетов по солености составляла 28, а по уровню воды — 15%. Расчеты гидрофизических параметров во время нагонов 26–28 июня 2014 г. и 26–28 декабря 2015 г. также показали хорошее совпадение расчетных и наблюдаемых значений уровня воды и солености.

Развитие гидрологической ситуации во время экстремальных нагонов (24–25 сентября 2014 г.) происходит по схожему сценарию. Так, в период 16–23 сентября 2014 г., когда наблюдался сгон воды, отмечался обычный уровень минерализации речной воды на акватории порта г. Азов (гирло Песчаное и Старый Дон, 12 км от устья). Во время штормового нагона 24 сентября в пик подъема уровня воды соленость достигла 5.6–

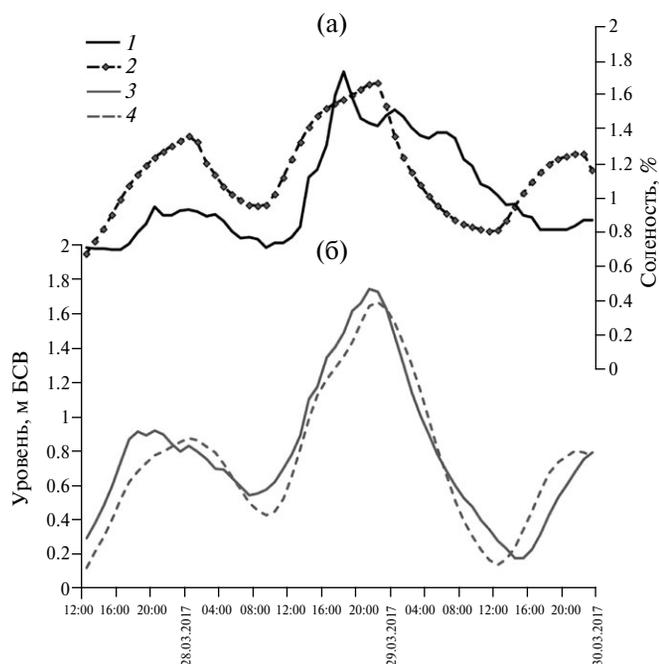


Рис. 5. Результаты моделирования солёности (а) и уровня (б) воды во время нагона с 27 по 30 марта 2017 г. Данные измерений солёности воды (1); солёность, рассчитанная по модели (2); данные измерений уровня (3); уровень, рассчитанный по модели (4).

6.0‰. После пика наводнения снижение солёности происходило не сразу — процесс распреснения до 0.5‰ растянулся во времени на 6 сут [2].

С помощью математической модели была восстановлена динамика концентрации соли во время экстремального нагона воды 24–25 сентября 2014 г. в восточной части Таганрогского залива, где датчики учета солёности не были установлены. Изменение концентрации соли в точке, соответствующей устью гирла Песчаного, представлено на рис. 6.

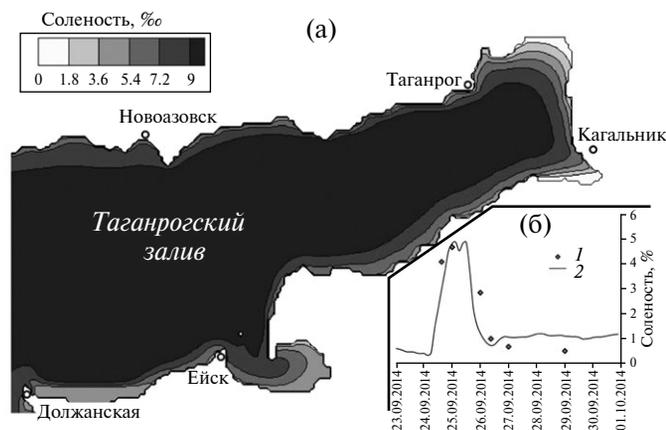


Рис. 6. Распределение солёности в Таганрогском заливе в момент максимальных зафиксированных значений 24.09.2014 (а); ход солёности в гирле Песчаном с 23 по 29 сентября 2014 г. (б); данные измерений солёности воды (1); солёность, рассчитанная по модели (2).

Видно, что в начале при восточном ветре во время сгона воды из залива концентрация соли убывала до значения, соответствующего пресной воде, а затем при ветре западного направления стала быстро увеличиваться и достигла 5.6‰. После этого с ослаблением ветра солёность снова стала уменьшаться. Проведенные расчеты позволили получить поле распределения солёности в момент наибольшей ее концентрации.

ВЫВОДЫ

Проведенные расчеты поля солёности показали, что данная математическая модель достаточно адекватно описывает процесс перемещения солёных масс воды под действием ветра в Таганрогском заливе, что дает возможность “доопределять” значения солёности в любой точке залива, где датчики учета солёности не были установлены. Кроме того, данный подход позволяет прогнозировать распределение концентрации соли при определенных направлениях ветра. Однако в устьях рукавов Дона, где также наблюдалось увеличение концентрации соли, удовлетворительные результаты расчетов, близкие к наблюдаемым данным, получить не удалось, так как модель пока не учитывает процесс затопления дельты Дона штормовыми нагонами.

Таким образом, изучение такого опасного явления, как нетипичные затоки солёных черноморских вод в дельту Дона, имеет не только теоретический интерес, но и необходимо для прогнозирования экстремальных наводнений и обеспечения безопасности населения азовского побережья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зырянов В.Н., Чебанова М.К., Филатов Н.Н. Интрузия морских вод в устья рек // Вод. ресурсы. 2015. Т. 42. № 5. С. 492–504.
2. Матишов Г.Г. Керченский пролив и дельта Дона: безопасность коммуникаций и населения // Вестн. ЮНЦ. 2015. Т. 11. № 1. С. 6–15.
3. Матишов Г.Г., Архипова О.Е., Чикин А.Л. Модельный подход к восстановлению пропущенных данных по солёности на примере Азовского моря // ДАН. 2008. Т. 420. № 5. С. 687–690.
4. 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.

5. Матишов Г.Г., Ковалева Г.В., Ясакова О.Н. Аномальное осолонение в Таганрогском эстуарии и дельте Дона // Наука юга России. 2016. Т. 12. № 1. С. 43–50.
6. Матишов Г.Г., Чикин А.Л., Бердников С.В., Шевурдяев И.В., Клещенков А.В., Кириллова Е.Э. Экстремальное затопление дельты Дона весной 2013 г.: хронология, условия формирования и последствия // Наука Юга России. 2014. Т. 10. № 1. С. 17–24. <http://elibrary.ru/item.asp?id=21422344/>
7. Третьякова И.А., Чикин А.Л., Бердников С.В. Прогнозирование нагонных явлений с применением модели SASMO // Экология. Экономика. Информатика. Сб. ст. Т. 1. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2015. С. 288–291.
8. Филиппов Ю.Г. Об одном способе расчета морских течений // Тр. ГОИН. 1970. Вып. 103. С. 87.
9. Чикин А.Л. Об одном из методов расчета параметров течений в водоемах с большой неоднородностью глубин // Вод. ресурсы. 2005. Т. 32. № 1. С. 55–60.
10. Чикин А.Л., Шабас И.Н., Сидиропуло С.Г. Моделирование процесса переноса загрязняющего вещества в Цимлянском водохранилище // Вод. ресурсы. 2008. Т. 35. № 1. С. 53–59.
11. Climatic Atlas of the Sea of Azov 2006. World Data Center for Oceanography // Silver Spring, Int. Ocean Atlas and Information Ser. 2006. V. 10. 106 p.
12. http://ns.ssc-ras.ru/eg/Equipment/AADI_AANDERA_5059/extracted/TD259%20Operating%20Manual%20RCM%209%20IW,9%20LW%20&%20RCM%2011.pdf.
13. http://ns.ssc-ras.ru/eg/Equipment/SBE%2021/SBE21_user_manual.pdf.

SALINITY VARIATION MODELING IN THE GULF OF TAGANROG DURING STORM SURGE

© 2019 A. L. Chikin^{1,*}, A. V. Kleschenkov¹, L. G. Chikina²

¹ Federal Research Center The Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences
Rostov-on-Don, 344006, Russia

² Southern Federal University,
Rostov-on-Don, 344006, Russia
*e-mail: chikin@sfedu.ru

Received: 19.03.2018

Revised version received: 18.10.2018

Accepted: 18.10.2018

Results of an analysis of observations of Gulf of Taganrog salinity during storm surge are presented and a detailed description of a mathematical model of the salt water transfer process is provided as well as the results of numerical computations.

Keywords: storm surge, salinity, mathematical model, simulation experiment

DOI: 10.31857/S0321-0596466592-597