ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СОЛЕННОСТИ В ТАГАНРОГСКОМ ЗАЛИВЕ ПРИ СГОННО-НАГОННЫХ ЯВЛЕНИЯХ

Чикин* А.Л., Клещенко* А.В., Чикина Л.Г.**

*Институт аридных зон Южного научного центра РАН, г. Ростов-на-Дону

**Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону

chikin@sfedu.ru, geo@ssc-ras.ru, lchikina@sfedu.ru

Южный научный центр РАН и Институт аридных зон ЮНЦ РАН ведут систематические наблюдения за термохалинной структурой вод устьевого взморья Дона и дельты р.Дон. Начиная с лета 2014 года измерение солёности и температуры воды производилось комплексным измерителем течений Aanderaa RSM-9LW [1] на стационарной буйковой станции на взморье в пяти километрах от края дельты (первый створный знак Азово-донского магистрального канала (АДМК)) и в устье Дона (х.Донской, с. Кагальник). Параллельно с этим велись наблюдения за метеопараметрами и уровнем воды на гидропосту в х.Донской и уровнемерном посту в г.Таганрог. Начиная с весны 2015 года 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 солёности морской воды ходе рейсов НИС «Денеб» в Азовское море и Таганрогский залив (рис. 1) проводилась непрерывная запись данных о состоянии среды термосолёнографом SBE 21 SEACAT [2].

Данные, получаемые с помощью указанных измерительных приборов, дают значения лишь в одной точке, где эти приборы установлены, а в случае использования термосолёнографа только вдоль линии его следования. Целью данной работы было исследование пространственного распределения солёных вод в Таганрогском заливе и расчёт динамики изменения концентрации соли в районе дельты Дона.

Для получения более полной картины распределения солёности в Таганрогском заливе были проведены расчёты с помощью математической модели. Гидродинамическая составляющая модели описывается уравнениями мелкой воды:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - \Omega v &= -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v_{xy} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{\tau_{sx}}{H} - \frac{\tau_{bx}}{H} \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \Omega u &= -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + v_{xy} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{\tau_{sy}}{H} - \frac{\tau_{by}}{H} \\ \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial Hu}{\partial x} + \frac{\partial Hv}{\partial y} &= 0, \end{aligned}$$

где H – глубина; u , v – осредненные по вертикали скорости; x , y – пространственные переменные; t – время; ζ – возмущение уровня воды; Ω – коэффициент

Кориолиса; ν_{xy} – коэффициент горизонтальной вязкости; $g = 9.8 \text{ м/с}^2$ – ускорение силы тяжести; 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. Эти величины зависят от скорости ветра $\bar{W}_B = \{W_x, W_y\}$ и течения $\bar{W}_T = \{u, v\}$ и определяются как $\bar{\tau}_s = \gamma |\bar{W}_B| \bar{W}_B$, $\bar{\tau}_b = \gamma |\bar{W}_T| \bar{W}_T$, $|\bar{W}_B| = \sqrt{W_x^2 + W_y^2}$, $|\bar{W}_T| = \sqrt{u^2 + v^2}$, β – коэффициент трения о дно; γ – коэффициент трения ветра о поверхность водоема.

Рис. 1 – Расположение станций измерения термосоленографа в Азовском море, на врезке – карта-схема расположения гидропостов ЮНЦ РАН

Модель распределения концентрации S соли при условии отсутствия источников внутри области расчета описывается уравнением конвекции-диффузии

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} = \mu_{xy} \left(\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} \right)$$

где μ_{xy} – коэффициент горизонтальной турбулентной диффузии.

Принимается, что нет потока через свободную поверхность и твердую границу Γ_0

$$\left. \frac{\partial S}{\partial \bar{n}} \right|_{\Gamma_0} = 0,$$

где $\bar{n}$ – вектор нормали к границе.

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 использовалось поле солёности, полученное с помощью термосолёнографа SBE 21 SEACAT, а в случае отсутствия таких данных – соответствующее картам солёности на данное время года [3]. Калибровка модели проводилась по наблюдаемым данным нескольких нагонов в различные времена года, при этом корректировка гидродинамической составляющей была возможна только по значениям уровня воды.

В рамках предложенной ранее новой классификации гидрологических обстановок на устьевом взморье [4] можно выделить два укрупненных класса ситуаций. Первый характеризуется практически линейной связью уровня и солёности в пределах устьевого взморья и дельты Дона. Замечено, что только при сильных нагонах изменение солёности 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 солёности. Это явление хорошо иллюстрируется на рис. 2, где виден обоюдный всплеск величин уровня и солёности который обусловлен резким увеличением скорости западного ветра до 10–11 м/с. В остальное время солёность практически не изменяется, хотя наблюдаются достаточно большие колебания уровня.

Рис. 2 – Ход уровня воды (1) и солёности (2) во время нагона 23-27 сентября 2016 года

Анализ данных хода уровня и солёности на устьевом взморье и в гирле Свиное на расстоянии 5 км от устья позволил выявить некоторую инертность в процессе переноса солёности, которая иллюстрируется «раздвоением» данных уровня и солёности на диаграмме рассеивания, где одним и тем же значениям уровня воды соответствуют меньшие и большие значения солёности. Меньшие значения соответствуют, как правило, подъёму уровня воды во время нагона, а большие – падению. Это объясняется тем, что при начале нагона более солёные воды ещё не успели достигнуть точки наблюдения, а при ослаблении ветра и начавшемся падении уровня эти воды ещё могли продолжать поступать, и лишь через некоторое время стали откатываться под действием более пресных речных вод. Данный процесс очень четко прослеживался во время нагона 26–28 декабря 2015 года (рис. 3). Аналогичная картина наблюдалась также во время нагона 26–28 июня 2014 года.

Рис. 3 – Диаграмма рассеивания величин уровня и солёности во время нагона 26–28 декабря 2015 года

Используемая нами модель позволяет учитывать подобные эффекты и корректно прогнозировать распределение солёности по акватории Таганрогского залива и устьевого взморья в период нагонов.

Моделирование процесса распределения солёности во время нагона в период с 27 по 30 марта 2017 года дало хорошие результаты на период активной фазы нагона (27–29 марта) (рис. 4). При этом погрешность расчетов по солёности составляла 28 %, а по уровню воды – 15 %. Расчеты гидрофизических параметров во время нагонов 26–28 июня 2014 года и 26–28 декабря 2015 года также показали хорошее совпадение расчетных и наблюдаемых значений уровня воды и солёности.

Рис. 4 – Расчетные и наблюдаемые данные с 27 марта по 1 апреля 2017 года.

1 – наблюдаемая соленость, 2 – расчетная соленость, 3 – наблюдаемый уровень, 4 – расчетный уровень.

Развитие гидрологической ситуации во время экстремальных нагонов (24–25 сентября 2014 г.) происходит по схожему сценарию. Так в период с 16–23 сентября 2014 года, 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 значений 5.6–6.0‰. После пика наводнения снижение солености происходило не сразу – процесс распреснения (до 0.5‰) растянулся во времени на 6 суток [5].

С помощью математической модели было восстановлено поведение концентрации соли в восточной части Таганрогского залива во время экстремального нагона воды 24–25 сентября 2014 года, где датчики учета солености не были установлены. Изменение концентрации соли в точке, соответствующей устью гирла Песчаный, представлено на рис. 5.

Видно, что в начале, при действии восточного ветра во время сгона воды из залива концентрация соли убывала до значения пресной воды, а затем, при развороте ветра на западное направление, стала быстро увеличиваться

и достигла значения 5.55‰. После этого, с ослаблением ветра, соленость снова стала уменьшаться. Проведенные расчеты позволили получить предполагаемое поле распределения солености в момент наибольшей ее концентрации. Данная картина представлена на рис. 5.

Рис. 5 – Распределение солености в Таганрогском заливе в момент наибольшей наблюдаемой концентрации 24.09.14. На врезке – ход солености в гирле Песчаное с 23 по 29 сентября 2014 года: 1 – наблюдаемые значения солености, 2-расчетные значения солености

Проведенные расчеты показали, что данная модель позволяет достаточно адекватно описывать процесс перемещения соленых масс воды под действием ветра в Таганрогском заливе, что дает возможность «доопределять» значения солености в интересующих нас точках, где датчики учета солености не были установлены. Кроме того, данный подход позволяет прогнозировать картину возможного распределения концентрации соли при определенных ветровых ситуациях. Однако, в устьях рукавов Дона, где также наблюдалось увеличение концентрации соли, удовлетворительные расчетные результаты получить не удалось, так как модель пока не учитывает процесс затопления дельты Дона.

Таким образом, изучение такого опасного явления, как нетипичные затопления соленых 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. <http://www.aanderaa.com/media/pdfs/SeaGuard-RCM.pdf>
2. <http://www.seabird.com/sbe21-seacat-thermosalinograph>
3. Climatic Atlas of the Sea of Azov 2006. World Data Center for Oceanography, Silver Spring, International Ocean Atlas and Information Series, Volume 10, 106 p.
4. Матишов Г.Г., Григоренко К.С., Московец А.Ю. // Наука юга России (Вестник Южного научного центра). 2017. Т. 13. №1. С.35-43.
5. Матишов Г.Г. // Вестник Южного научного центра. 2015. Т. 11. №1.. С.6-15.

STUDY CHANGES IN SALINITY IN THE GULF OF TAGANROG IN SURGE PHENOMENA

L. Chikin¹, A.V. Kleschenkov¹, L.G. Chikina²

¹ Institute of Arid Zones Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
(chikin@sfedu.ru)

¹ Institute of Arid Zones Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
(geo@ssc-ras.ru)

² Southern Federal University
(lchikina@sfedu.ru)

Abstract. The analysis of observations of salinity in the Gulf of Taganrog at surges is carried out. The mathematical model of salt concentration distribution contains hydrodynamic and transport components. The shallow water equations describe hydrodynamics, and convection-diffusion equations describe the transport process. Results of numerical calculations by means of mathematical model of transport process are received. Comparison of the calculation results with the observed data showed the adequacy of the presented model.

Key words: storm surge, salinity, mathematical model, computational experiment.

References

1. <http://www.aanderaa.com/media/pdfs/SeaGuard-RCM.pdf>
2. <http://www.seabird.com/sbe21-seacat-thermosalinograph>
3. Climatic Atlas of the Sea of Azov 2006. World Data Center for Oceanography, Silver Spring, International Ocean Atlas and Information Series, Volume 10, 106 p.
4. Matishov G.G., Grigorenko K.S., Moskovets A.Yu. // Nauka yuga Rossii (Vestnik Yuzhnogo nauchnogo tsentra). 2017. T. 13. №1. S.35-43.
5. Matishov G.G. // Vestnik Yuzhnogo nauchnogo tsentra. 2015. T. 11. №1. S.6-15.