

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ УРОВНЯ ВОДЫ В ДЕЛЬТЕ ДОНА ПО ПРОГНОЗАМ ВЕТРОВОЙ СИТУАЦИИ

А.Л. Чикин¹, В.В. Кулыгин¹, Л.Г. Чикина²

¹Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

²Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Представлена математическая модель, состоящая из модели гидродинамики всего Азовского моря, включая Таганрогский залив, и модели движения воды в русле Дона. Данная модель позволяет рассчитывать колебания уровня воды в устьевой области Дона в зависимости от ветровой ситуации над акваторией Азовского моря и Таганрогского залива. Такой подход дает возможность заблаговременно предсказать изменение уровня поверхности в основных рукавах реки Дон, а также в его основном русле. Гидродинамика Азовского моря описывается уравнениями мелкой воды, а движение воды в основных рукавах дельты Дона – уравнением Сен-Венана. Задача решается конечно-разностными методами. Программа написана на языке FORTRAN и реализуется на высокопроизводительных вычислительных системах в среде MPI с применением пакета Aztec.

Для прогнозов ветровой ситуации использовались данные Норвежского метеорологического института. Прогнозируемая ветровая нагрузка над акваторией Азовского моря задавалась по точкам, соответствующим расположению береговых гидрометеорологических станций с последующей интерполяцией на всю акваторию. Рассмотрены две задачи прогнозирования колебаний уровня воды. Первая задача заключалась в расчете колебаний уровня в зависимости от прогноза ветровой ситуации с заблаговременностью три дня. Во второй задаче изучалась динамика изменения качества прогноза в фиксированном промежутке времени по мере приближения к его началу. Качество прогнозов определялось сравнением прогнозируемых и наблюдаемых значений уровня, полученных на гидропостах. Результат сравнения показал, что представленная модель достаточно адекватно описывает гидродинамику в дельтовой области Дона в зависимости от ветровой ситуации над акваторией Азовского моря.

Ключевые слова: неустановившееся течение; вычислительный эксперимент; сгонно-нагонное явление; русловой поток; заблаговременный прогноз; дельта Дона.

Введение

Считается, что устьевая область Дона расположена в границах от станицы Раздорской в основном русле Дона до Должанской косы в Таганрогском заливе [1, 2].

Уровень воды на нижнем участке р. Дон от Кочетовского гидроузла до устья подвержен различным по величине и периоду колебаниям, связанными как с основными фазами водного режима (как межень и половодье), так и обусловленным ветром, вызывающим сгоны и нагоны [3]. Сочетание стоковых колебаний уровня со сгонно-нагонными колебаниями, возбуждаемыми на взморье, создает в устьевой области Дона весьма сложный и быстро меняющийся рельеф водной поверхности [4].

Чаще всего сгонно-нагонные явления наблюдаются весной и осенью. Для осеннего периода характерно влияние ветров восточного направления, которые вызывают сгон воды, что неблагоприятно влияет на судоходство. Так, в октябре 2015 и 2016 гг. наблюдался экстремально низкий уровень воды в Дону, вызванный продолжительными действиями восточных ветров, а также низким попуском воды на Цимлянском гидроузле. Это привело к тому, что суда были вынуждены простаивать в восточной части Таганрогского залива несколько дней, как это было 24.10.2016 [5]. Ветры западного направления вызывают нагон воды из Таганрогского залива. Экстремальные нагоны в дельте Дона в 2013 и 2014 гг. подробно описаны в работах [6, 7].

В этой связи актуальными задачами становятся не только качественный мониторинг, но и развитие методов прогнозирования и раннего предупреждения. Величина уровня воды в руслах рек зависит как от количества атмосферных осадков, высоты снежного покрова так и от ветровой ситуации в принимающем водоеме. При краткосрочном прогнозировании изменения уровня поверхности русла реки используются различные методы: от основанных на графических зависимостях до математических моделей.

Для краткосрочного прогнозирования уровней воды в р. Амур разработана система методик, в основе которых лежит метод соответственных уровней, позволяющий упрощенно описывать движение и трансформацию волн паводков и половодий в русловой сети на основе данных гидрометрических наблюдений [8]. В работе [9] выполнено краткосрочное прогнозирование уровней воды у г. Барнаула по методу соответственных уровней. В основу метода положена графическая связь между уровнями воды в верхнем и нижнем створах.

В работе [10] представлен расчетно-модельный комплекс, предназначенный для выполнения диагностических и прогностических расчетов положения уровня поверхности, скоростей течения и расходов воды в русле Дона. В основе комплекса лежит модель DELFT-3D, разработанная независимым нидерландским институтом прикладных исследований в сфере поверхностного и подземного стока.

В настоящей работе для расчета колебаний уровня воды в дельте Дона по прогнозам ветровой ситуации предлагается математическая модель, которая объединяет модель гидродинамики Азовского моря и модель движения воды в русле Дона. Обе эти модели были ранее разработаны в Южном научном центре РАН.

Целью настоящей работы является моделирование значений уровней воды в устьевой области Дона в зависимости от ветровой ситуации над Азовским морем, а также изучение влияния качества прогнозов ветров на результаты этого моделирования.

1. Материал и методы исследования

В качестве прогнозной ветровой ситуации использовался прогноз Норвежского метеорологического института [<https://www.yr.no/>]. Ветровая нагрузка над акваторией Азовского моря задавалась по 7 точкам, соответствующим расположению береговых гидрометеорологических станций Бердянск, Геническ, Ейск, Мариуполь, Приморско-Ахтарск, Таганрог и Темрюк, с последующей интерполяцией на всю акваторию. Шаг прогноза составляет 1 час с заблаговременностью почти трое суток.

После расчетов по прогнозной ветровой ситуации проводились расчеты уровня воды по уже наблюдаемым значениям ветра на метеорологических станциях. Периодичность измерения на метеостанциях – 8 раз в сутки с шагом 3 часа. В связи с трудностями получения регулярных наблюдений на станциях Бердянск, Геническ и Мариуполь в момент исследования их пришлось заменить данными с других метеостанций. Как показали расчеты, замена значений в Бердянске и Мариуполе значениями, измеренными на станции Должанская, а Геническ — значениями станции Джанкой, дают значительно лучшие результаты, чем при замене всех трех станций значениями станции Таганрог. Следует также отметить, что в наблюдаемых данных направление ветра указано по румбам (т.е. точность около 10°), в отличие от прогнозов ветра, где направление ветра указано с точностью до $0, 1^\circ$.

Расчетные и наблюдаемые значения уровня воды на гидропосту Донской, расположенному в дельте Дона на рукаве Старый Дон, снимались через каждый час. Наблюдаемые значения уровня воды брались с сайта Эмерсит [<http://emercit.com/map/>].

Погрешность расчета определялась по формуле

$$\delta = \frac{\|\mathbf{a} - \mathbf{a}_0\|}{\|\mathbf{a}_0\|},$$

где \mathbf{a} – вектор, координатами которого являются расчетные значения, \mathbf{a}_0 – вектор, координатами которого являются соответствующие наблюдаемые значения, $\|\mathbf{a}\| = \sqrt{a_1^2 + a_2^2 + \dots + a_n^2}$.

Представленная модель работает по следующему принципу. На каждом временном шаге сначала рассчитываются скорости течения и величина уровня воды в Азовском море по заданной ветровой ситуации. После этого по полученным значениям уровня воды, которые соответствуют точкам устьев основных рукавов Дона, производится расчет гидродинамических параметров течения в рукавах Дона. Данный подход позволяет наблюдать за параметрами течения как в основных рукавах Дона, так и в Таганрогском заливе.

Движение воды в Азовском море (морская часть модели) описывается уравнениями мелкой воды:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - \Omega v = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{H} - \frac{\tau_{bx}}{H},$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \Omega u = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{H} - \frac{\tau_{by}}{H},$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial(Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(Hv)}{\partial y} = 0.$$

Здесь $u = u(x, y, t)$, $v = v(x, y, t)$ – компоненты скорости; Ω – коэффициент Кориолиса; $\zeta = \zeta(x, y, t)$ – возмущение уровня воды; $H = h + \zeta$; $h = h(x, y)$ – глубина Азовского моря; τ_{sx}, τ_{sy} – проекции на оси ОХ и ОУ силы трения ветра о поверхность водоема; τ_{bx}, τ_{by} – проекции на оси ОХ и ОУ силы трения жидкости о дно; $g = 9,81$ – значение ускорения свободного падения. Проекции сил трения зависят от скорости ветра $\mathbf{W}_B = \{W_x; W_y\}$ и течения $\mathbf{W}_T = \{u; v\}$ и определяются так [11]:

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

$$|\mathbf{W}_B| = \sqrt{W_x^2 + W_y^2}, |\mathbf{W}_T| = \sqrt{u^2 + v^2},$$

где γ – коэффициент трения ветра о свободную поверхность; β – коэффициент трения жидкости о дно. Приведенная система замыкается соответствующими граничными условиями. Вдоль твердой границы ставятся условия скольжения $\mathbf{V}_n = 0$, $\partial \mathbf{V}_\tau / \partial n = 0$, где \mathbf{V}_n и \mathbf{V}_τ – нормальная и касательная составляющие вектора скорости соответственно. В точках, соответствующих устьям рек, задаются скорости втекания воды. В качестве начальных данных можно задавать какое-либо известное распределение скоростей (ранее полученное) или считать эти скорости нулевыми.

Для расчета русловой составляющей модели необходимо знать уровень воды в устьях рукавов Дона в Таганрогском заливе и задачу можно было ставить только для залива. Однако морская составляющая модели включает в себя Азовское море в целом. Это объясняется двумя причинами. Во-первых, гидродинамика Таганрогского залива полностью определяется гидродинамикой самого Азовского моря, а во-вторых, такой подход существенно облегчает решение задачи, так как отпадает необходимость ставить граничные условия на открытой границе Таганрогского залива.

Движение воды в основных рукавах дельты Дона описывается уравнениями Сен-Венана в предположении отсутствия распределенного бокового притока. Считается, что поперечное сечение русла имеет параболический профиль [12]:

$$\begin{cases} \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + gW \frac{\partial z}{\partial x} + \alpha_s v \frac{\partial Q}{\partial x} = -\alpha_s Q \frac{\partial v}{\partial x} - gW \frac{Q|Q|}{K^2}, \end{cases}$$

где z – уровень воды; t – время; B – ширина русла; Q – расход воды; x – координата; W – площадь живого сечения; K – модуль расхода. Коэффициент α_s учитывает неравномерное распределение скоростей по живому сечению потока, и для идеализированных русел рукавов с параболической формой поперечного сечения он обычно близок к единице. Модуль расхода K вычисляется по формуле $K = W \cdot C \sqrt{R}$, здесь C – коэффициент Шези; R – гидравлический радиус. Коэффициент Шези вычисляется по формуле Маннинга $C = R^{\frac{1}{6}}/n$, где n – шероховатость дна. Шероховатость дна оценивалась по фактическим наблюдениям, выполненным в ходе экспедиционных работ на НИС «Профессор Панов» в дельте Дона и на Нижнем Дону в 2020 – 2022 гг.

Предыдущую систему можно записать в характеристическом виде:

$$\begin{cases} \frac{gW}{\lambda_1} \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial t} + gW \frac{\partial z}{\partial x} + \lambda_1 \frac{\partial Q}{\partial x} = \varphi, \\ \frac{gW}{\lambda_2} \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial t} + gW \frac{\partial z}{\partial x} + \lambda_2 \frac{\partial Q}{\partial x} = \varphi, \end{cases}$$

где

$$\lambda_{1,2} = \frac{\alpha_s v \pm \sqrt{(\alpha_s v)^2 + 4c^2}}{2}, \varphi = -\alpha_s Q \frac{\partial v}{\partial x} - gW \frac{Q|Q|}{K^2}, c = \sqrt{\frac{gW}{B}}.$$

Граничные условия задаются следующим образом. В точке, соответствующей самой верхней точке основного русла, задается расход поступающей воды $Q_0(0, t)$, в точках, соответствующих устьям рукавов, задаются уровни воды в Таганрогском заливе $z_k(X_k, t)$. В узлах ветвления на рукава Дона задаются условия равенства расходов притоков и оттоков $\sum_i Q_*^i = 0$ (i – число рукавов, приходящих в узел ветвления).

Уровни водной поверхности в узлах ветвления равны между собой $z_i = z_*$.

И морская, и русловая части модели решаются конечно-разностными методами. Программа написана на языке FORTRAN и реализуется на высокопроизводительных вычислительных системах в среде MPI. При конечно-разностной аппроксимации морской части модели получаются системы линейных алгебраических уравнений с блочными пятидиагональными матрицами, для решения которых используется пакет прикладных программ Aztec. При конечно-разностной аппроксимации русловой части модели полученная система линейных алгебраических уравнений также имеет преимущественно пятидиагональный вид, но она представляется как ленточная матрица общего вида. Решение этой системы линейных алгебраических уравнений проводится с помощью пакета LAPACK. Численная реализация представленных подмоделей подробно описана в работах [13, 14].

2. Результаты и обсуждения

Были рассмотрены две задачи прогнозирования колебаний уровня воды. Первая задача заключалась в непосредственном прогнозе колебаний уровня в зависимости от

ветровой ситуации. Для этого по прогнозу ветровой ситуации от 26.09.2022 был проведен расчет изменения уровня воды на станции Донской в период с 12:00 26.09.2022 по 3:00 29.09.2022. Затем было проведено сравнение с уже наблюдаемыми значениями уровня воды в этот же период.

На рис. 1 приведены графики расчетных и наблюдаемых колебаний уровня воды, полученные через каждый час на станции в Донском. Расчеты проводились как по прогнозному значению ветра, так и по наблюдаемой ветровой ситуации.

Погрешность расчетных значений уровня воды, полученных по прогнозным значениям ветра, в сравнении с наблюдениями значениями составляет 56,6 %. Если проводить расчет по наблюдаемым значениям ветра (апостериори), то погрешность расчетных значений в сравнении с наблюдаемыми значениями уровня воды составляет 19,2 %.

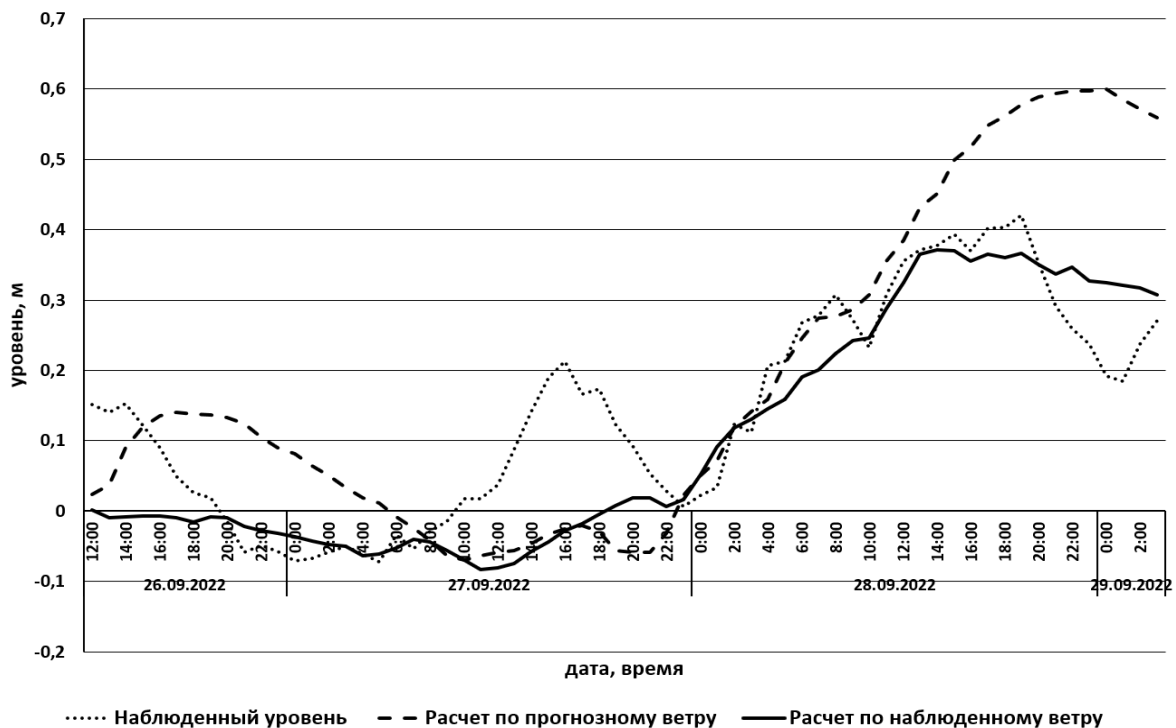


Рис. 1. Колебания уровня воды в Донском в период с 12:00 26.09.2022 по 3:00 29.09.2022

Вторая задача заключалась в изучении динамики изменения качества прогноза уровня воды в фиксированном промежутке времени по мере приближения к его началу. Для этого были рассмотрены три прогнозируемых периода времени: с 10:00 18.10.2022 по 3:00 21.10.2022; с 10:00 19.10.2022 по 3:00 22.10.2022 и с 12:00 20.10.2022 по 3:00 23.10.2022, для каждого из которых был сделан прогноз ветровой ситуации с заблаговременностью трое суток. Общим для этих трех периодов является промежуток с 12:00 20.10.2022 г. по 3:00 21.10.2022 г., который совпадает с началом третьего периода, концом первого и целиком находится во втором периоде. Для этого промежутка и решалась задача определения качества прогнозов уровней воды, исходя из ветровой ситуации по прогнозам от 18.10.2022, 19.10.2022 и 20.10.2022.

Динамика изменения качества прогнозов по мере приближения к выделенному промежутку времени представлена в таблице. Качество прогноза выражено в погрешности между расчетными и уже наблюдаемыми значениями уровня воды. Там

же приведена погрешность значений уровня воды, рассчитанных по наблюдаемой ветровой ситуации (апостериори). Все расчетные и наблюдаемые значения уровня воды снимались через 1 час после начала действия соответствующего ветра.

Таблица

Погрешности расчетных значений в промежуток с 13:00 20.10.2022 по 4:00 21.10.2022 для прогнозируемых ветровых ситуаций

№	Дата прогноза	Погрешность
1	18.10.2022 10:00-21.10.2022 3:00	29,2 %
2	19.10.2022 10:00-22.10.2022 3:00	10,1 %
3	20.10.2022 12:00-23.10.2022 3:00	22,8 % (13,8 %)
4	Апостериори	12,0 %

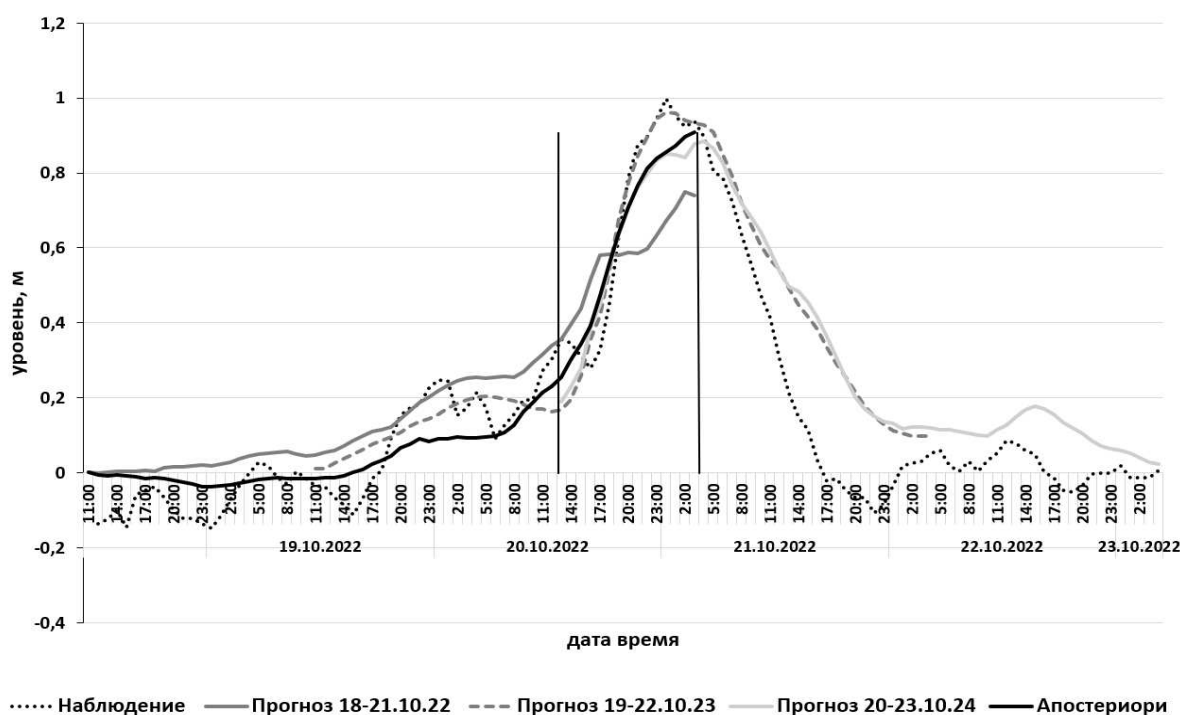


Рис. 2. Изменение уровня воды в Донском по прогнозным и наблюдаемым значениям ветровой нагрузки

Лучший результат наблюдается для второго прогноза, хотя он ожидался для третьего. Возможно, это объясняется заданием нулевых начальных данных на начало каждого периода. Однако начало третьего периода совпадает с началом исследуемого временного промежутка (рис. 2), что может давать большую погрешность. Если в качестве начальных данных брать значения уровня из второго прогноза в соответствующий началу третьего периода момент времени, то погрешность существенно уменьшается до 13,8 %, однако остается больше погрешности для второго прогноза. Возможно, это объясняется тем, что наблюдения на станциях Бердянск, Геническ, Мариуполь не проводились, а заменялись измерениями на станциях Должанская и Джанкой. Кроме того, на результаты могло повлиять более грубое (с точностью до румба) задание величины наблюдаемого направления ветра при метеонаблюдениях.

Выводы

При расчете прогнозов уровня воды в дельте Дона принципиальное значение имеет качество заданной ветровой ситуации над акваторией Азовского моря, что вполне естественно. Ошибки в прогнозе ветровой ситуации приводят к существенным погрешностям расчета величины уровня воды.

При отсутствии данных на одной или нескольких станциях важно правильно подобрать им замену (разница может быть существенной). Сравнение прогнозов ветра с наблюдениями показало, что лучшие прогнозные значения, по крайней мере для данных исследуемых периодов, определены для станции Ейск, и значительно худшие – для станции Таганрог. Видимо, этим объясняется тот факт, что при апостериорной оценке качества модели замена значений в Мариуполе и Бердянске значениями Должанской дает лучший результат, чем замена значениями в Таганроге.

Сравнение расчетных и наблюдаемых значений уровня воды показало, что представленная модель адекватно описывает прогнозируемую гидродинамику в дельтовой области Дона при прогнозах ветровой ситуации над Азовским морем с заблаговременностью в трое суток.

Публикация подготовлена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН, номер проекта 122011900153-9.

Литература

1. Остроумова, Л.П. Исследование нагонных и сгонных явлений в морских устьях рек на примере устьевой области р. Дон / Л.П. Остроумова // Метеорология и гидрология. – 2017. – Т. 12. – С. 69–82.
2. Симов, В.Г. Гидрология устьев рек Азовского моря / В.Г. Симов. – М.: Гидрометеиздат, 1989.
3. Пономаренко, Е.П. Сгонно-нагонные явления в дельте реки Дон в 2007–2010 гг. и их прогнозирование / Е.П. Пономаренко, В.В. Сорокина, П.А. Бирюков // Вестник Южного научного центра РАН. – 2012. – Т. 8, № 1. – С. 28–37.
4. Родионов, Н.А. Гидрология устьевой области Дона / Н.А. Родионов. – М: Гидрометеиздат, 1958.
5. Матишов, Г.Г. Мир каравайки и взморья глазами донских казаков / Г.Г. Матишов, А.И. Ермолаев. – Ростов-на-Дону: ЮНЦ РАН, 2016.
6. Матишов, Г.Г. Экстремальное затопление дельты Дона весной 2013 г./ Г.Г. Матишов, С.В. Бердников // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2015. – № 1. – С. 111–118.
7. Матишов, Г.Г. Экстремальное затопление дельты Дона весной 2013 г.: хронология, условия формирования и последствия / Г.Г. Матишов, А.Л. Чикин, С.В. Бердников, И.В. Швердяев, А.В. Клещенков, Е.Э. Кириллова // Вестник Южного научного центра РАН. – 2014. – Т. 10, № 1. – С. 17–24.
8. Борщ, С.В. Краткосрочное прогнозирование уровней воды на реке Амур / С.В. Борщ, Ю.А. Симонов, А.В. Христофоров, Н.М. Юмина // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – М., 2017. – Т. 44. – С. 136–151.
9. Кошелева, Е.Д. Краткосрочное прогнозирование уровней воды реки Обь у города Барнаула во время половодья 2018 года / Е.Д. Кошелева, А.В. Кудишин // Известия Алтайского отделения Русского географического общества. – 2018. – Т. 3, № 50. – С. 27–37.

10. Землянов, И.В. Краткосрочный прогноз уровней воды в устьевой области р. Дон на основе гидродинамического моделирования / И.В. Землянов, А.Е. Павловский, И.Ю. Милотина, О.В. Горелиц, А.А. Сапожникова // Водные ресурсы. – 2022. – Т. 49, № 5. – С. 596–607.
11. Филиппов, Ю.Г. Об одном способе расчета морских течений / Ю.Г. Филиппов // Труды государственного океанографического института. – М., 1970. – Т. 103. – С. 87–94.
12. Корень, В.И. Математические модели в прогнозах речного стока / В.И. Корень. – Л: Гидрометеиздат, 1991.
13. Чикин, А.Л. Об одном из методов расчета параметров течений в водоемах с большой неоднородностью глубин / А.Л. Чикин // Водные ресурсы. – 2005. – Т. 32, № 1. – С. 55–60.
14. Чикин, А.Л. Сгонно-нагонные колебания уровня воды устьевой области Дона: численное моделирование и сценарии изменения / А.Л. Чикин, А.В. Клещенок, Л.Г. Чикина, А.М. Коршун // Наука юга России. – 2017. – Т. 13, № 3. – С. 39–49.

Алексей Львович Чикин, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Южный научный центр РАН (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация), chikin1956@gmail.com.

Валерий Валерьевич Кулыгин, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Южный научный центр РАН (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация), kulygin@ssc-ras.ru.

Любовь Григорьевна Чикина, доктор физико-математических наук, профессор, кафедра «Информатика и вычислительный эксперимент», Южный федеральный университет (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация), lchikina@sfedu.ru.

Поступила в редакцию 17 мая 2023 г.

MSC 76-10

DOI: 10.14529/mmp230307

MODELLING OF WATER LEVEL OSCILLATIONS IN THE DON DELTA ACCORDING TO WIND SITUATION FORECASTS

A.L. Chikin¹, V.V. Kulygin¹, L.G. Chikina²

¹Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation

²Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation

E-mail: chikin1956@gmail.com, kulygin@ssc-ras.ru, lchikina@sfedu.ru

We present a mathematical model consisting of a model of the hydrodynamics of the Azov Sea and a model of water movement in the Don channel. This model makes it possible to calculate fluctuations in the water level in the mouth area of the Don, depending on the wind situation over the Azov Sea. This approach makes it possible to predict in advance

the change in the level surface in the main branches of the Don River. The movement of water in the Azov Sea (the marine part of the model) is described by shallow water equations. Hydrodynamics in the main branches of the Don Delta is considered as the movement of water in an open channel (channel part of the model). Both parts of the model (marine and channel ones) are solved by finite difference methods.

The predicted wind load over the water area of the Sea of Azov was set at points corresponding to the location of coastal hydrometeorological stations with subsequent interpolation for the entire water area. Two problems of forecasting water level fluctuations are considered. In the first problem, water level fluctuations are calculated depending on the morning forecast of the wind situation with a lead time of three days. In the second problem, we study the dynamics of changes in the quality of the forecast of the water level over a fixed period of time as it approaches its beginning. The quality of the forecasts is determined by comparing the predicted and observed level values. The result of the comparison shows that the presented model adequately describes the hydrodynamics in the Don Delta region depending on the wind situation over the Azov Sea.

Keywords: unsteady flow; computational experiment; surge phenomenon; channel flow; Don delta.

References

1. Ostroumova L.P. [Investigation Surges and Ebbs Phenomena in Marine Estuaries in the Example of the Don River Mouth Area]. *Meteorologiya i gidrologiya*, 2017, no. 12, pp. 69–82. (in Russian)
2. Simov V.G. *Gidrologiya ust'ev rek Azovskogo morya* [Hydrology of the Mouths of the Rivers of the Sea of Azov]. Moscow, Gidrometeoizdat, 1989. (in Russian)
3. Ponomarenko E.P., Sorokina V.V., Birjukov P.A. [Surge Phenomena in the Don River Delta in 2007–2010 and their Prediction]. *Vestnik Yuzhnogo nauchnogo centra RAN* [Bulletin of the Southern Scientific Center], 2012, vol. 8, no. 1, pp. 28–37. (in Russian)
4. Rodionov N.A. *Gidrologiya ust'evoj oblasti Dona* [Hydrology of the Mouth Area of the Don]. Moscow, Gidrometeoizdat, 1958. (in Russian)
5. Matishov G.G., Ermolaev A.I. *Mir karavajki i vzmor'ja glazami donskih kazakov* [The World of Loaves and Seashore Through the Eyes of the Don Cossacks]. Rostov-on-Don, Southern Federal University Publishers, 2016. (in Russian)
6. Matishov G.G., Berdnikov S.V. [Extreme Flooding of the Don River Delta in Spring 2013]. *Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya*, 2015, no. 1, pp. 111–118. (in Russian)
7. Matishov G.G., Chikin A.L., Berdnikov S.V., Sheverdjaev I.V., Kleshhenkov A.V., Kirillova E.Je. [Extreme Flooding of the Don Delta in the Spring of 2013: Chronology, Formation Conditions and Consequences]. *Vestnik Yuzhnogo nauchnogo centra RAN* [Bulletin of the Southern Scientific Center], 2014, vol. 10, no. 1, pp. 17–24. (in Russian)
8. Borshch S.V., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V., Yumina N.M. [Short-Term Forecasting of Water Levels on the Amur River]. *Rezul'taty ispytaniya novyh i usovershenstvovannyh tehnologij, modelej i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov* [Results of Testing New and Improved Technologies, Models and Methods of Hydrometeorological Forecasts], 2017, vol. 44, pp. 136–151. (in Russian)
9. Kosheleva E.D., Kudishin A.V. [Short-Term Forecasting of the Water Levels of the Ob River Near the City of Barnaul During the Flood of 2018.] *Bulletin of the Altay Branch of the Russian Geographical Society*, 2018, vol. 3, no. 50, pp. 27–37. (in Russian)
10. Zemljanov I.V., Pavlovskij A.E., Miljutina I.Ju., Gorelic O.V., Sapozhnikova A.A. [Short-Term Forecast of Water Levels in the Mouth Area of the Don River Based on Hydrodynamic Simulation]. *Vodnye resursy*, 2022, vol. 49, no. 5, pp. 596–607. (in Russian) DOI: 10.31857/S0321059622050170
11. Filippov Yu.G. [On One Method of Calculating Sea Currents]. *Proceedings of the GOIN*, 1970, vol. 103, pp. 87–94. (in Russian)

12. Koren' V.I. *Matematicheskie modeli v prognozhakh rechnogo stoka* [Mathematical Models in River Runoff Forecasts]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1991. (in Russian)
13. Chikin A.L. A Technique for Evaluating Flow Parameters in Water Bodies with a Highly Heterogeneous Depth. *Water Resources*, 2005, vol. 32, no. 1, pp. 50–55.
14. Chikin A.L., Kleshchenkov A.V., Chikina L.G., Korshun A.M. [Wind-Driven Water Level Variation of the Mouth Area of the Don: Numerical Modelling and Change Scenarios]. *Nauka Yuga Rossii* [Science of the South of Russia], 2017, vol. 13, no. 3, pp. 39–49. (in Russian)
DOI: 10.23885/2500-0640-2017-13-3-39-49

Received May 17, 2023