

УДК 551.466.78
DOI: 10.7868/S25000640190306

ОПЫТ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НАГОНОВ В ДЕЛЬТЕ ДОНА

© 2019 г. И.В. Шевердяев¹, А.В. Клещенков¹, И.А. Третьякова¹

Аннотация. В дельте Дона для изучения сгонно-нагонных процессов сотрудники Южного научного центра РАН развивают систему автоматического наблюдения за уровнем воды. С 2014 г. накапливается архив наблюдений за уровнем воды с временным шагом 10 минут в х. Донской Азовского района Ростовской области. В последующие годы были установлены уровнемеры «Взморье» на придельтовом участке Таганрогского залива и в Ростове-на-Дону. Накопленные данные в сочетании с наблюдениями более раннего периода в дельте Дона и в с. Кагальник Азовского района Ростовской области позволяют адаптировать гидрологические модели для имитации процессов затопления при нагонах с учетом динамики стока Дона и густоты растительности. На основе анализа архива детальных наблюдений уровнемера в х. Донской выявлено, что умеренные нагоны с максимальным подъемом уровня воды между 0,5 и 1,3 м в 2014–2018 гг. заняли 11,9 % от общего времени, в то время как сильные нагоны (1,3–2,3 м) – менее 1 %. Экстремальные нагоны (более 2,3 м) зарегистрированы в 2014 г. и продлились в сумме менее 13 часов. Составлена карта распределения коэффициента шероховатости в пределах дельты Дона на основе выделенных типов земной поверхности. Исследование динамики нормализованного относительного индекса растительности NDVI в сочетании с полевыми наблюдениями и литературными данными позволило построить сезонную динамику коэффициента шероховатости тростниковых зарослей дельты Дона. Максимальный коэффициент шероховатости относится к июлю (0,12), минимальный – к марту (0,04). Гидрологическое моделирование нагонов с учетом влияния стока Дона, коэффициента шероховатости и силы нагонов показало качественное влияние выделенных факторов на площади затопления дельты. Представлено снижение максимального подъема воды при нагоне от края дельты вверх по течению. На основании расположения линий снижения максимального подъема уровня воды на 10 % при сочетании рассматриваемых факторов выделено 4 зоны дельты Дона.

Ключевые слова: нагоны, дельта Дона, коэффициент шероховатости, гидрологическое моделирование, речной сток, уровень воды.

THE HYDROLOGICAL MODELING OF SURGES AT THE DELTA OF THE RIVER DON

I.V. Sheverdyayev¹, A.V. Kleshchenkov¹, I.A. Tretyakova¹

Abstract. At the delta of the river Don, a system for automatic observation of the water level is being developed to study surge processes. Since 2014, an archive of the water level observations with a time step of 10 minutes by gauge at the wharf of the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences in Donskoy village (Rostov Region) has been accumulated. Next years, level gauges were introduced on the near delta area of Taganrog Bay (“Vzmorye”) and in Rostov-on-Don. The accumulated archive of detailed data in combination with observations in the delta and Kagalnik settlement of an earlier period allow to adapt hydrological models for simulating the processes of flooding during surges, taking into account the dynamics of the Don river flow and vegetation density. Based on the analysis of the archive detailed observations of the gauge in Donskoy, it was revealed that moderate surges with a maximum water level between 0.5 and 1.3 m in 2014–2018 were observed during 11.9 % of the time, while strong surges (1.3–2.3 m) took less than 1 %. Extreme surge (more than 2.3 m) was observed in 2014 and lasted less than 13 hours in total. A map of the

¹ Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук (Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: ig71089@yandex.ru

roughness distribution within the Don Delta based on the selected types of the landscapes was created. The study of the NDVI index dynamics together with field observations and literature data allowed us to construct the seasonal dynamics of the reed thickets roughness of the Don Delta. The maximum roughness coefficient refers to July (0.12), the minimum one to March (0.04). Hydrological modeling of surges, taking into account the influence of the Don river flow, roughness and surge strength, showed the qualitative influence of selected factors on the delta flooding area. The decrease of the maximum water level during the surge from the edge of the delta upstream is shown. Based on the location of the lines of 10 % decrease of the maximum water level with a combination of selected factors, 4 zones of the Don Delta were identified.

Keywords: surge, the Don delta, roughness coefficient, hydrological modeling, river flow, water level.

ВВЕДЕНИЕ

Для дельты Дона характерен неустойчивый гидрологический режим, определяемый взаимодействием речного стока и сгонно-нагонных процессов в Таганрогском заливе Азовского моря. Большое значение дельты для судоходства, рекреации, рыболовства, а также для развития ростовской агломерации в целом обуславливает необходимость изучения процессов, связанных с затоплением/подтоплением этой территории. Эффективным инструментом для этого является гидрологическое моделирование, с помощью которого можно анализировать различные сценарии взаимодействия речных и морских вод в дельте. Адаптация гидрологических моделей для решения конкретного круга задач имеет ключевое значение для получения качественных результатов. Применительно к задаче моделирования сгонно-нагонных процессов в дельте Дона это подразумевает проведение анализа имеющегося массива наблюдений, а также калибровку параметров, определяющих гидрологическую динамику на мелководных объектах. На основе вышеизложенного в настоящей работе рассматривается опыт гидрологического моделирования сгонно-нагонных явлений в дельте Дона: анализ их современной повторяемости по наблюдениям автоматических уровнемеров, адаптация используемой гидрологической модели и результаты расчетов затопления.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Для анализа современных сгонно-нагонных явлений использованы показания уровнемеров с гидрологических постов, расположенных в Азовском районе Ростовской области: на научно-экспедиционной базе Южного научного центра Российской академии наук (ЮНЦ РАН) в с. Кагальник (гирло Свиное) и на причале ЮНЦ РАН в х. Донской (рукав Старый Дон). Данные об уровне воды на

этих гидрологических постах являются репрезентативными для всей дельты Дона, так как колебания уровня в различных рукавах практически синхронны. Дифференциация уровня воды в рукавах дельты связана с морфометрическими параметрами русла и состоянием берегов. Для верификации модельных расчетов и задания граничных условий в дальнейшей работе были использованы наблюдения гидропоста в х. Донской за 2014–2018 гг., которые являются наиболее детальными.

Для удобства анализа ветровые нагоны были разделены на группы, отличающиеся по своей интенсивности: слабые, умеренные, сильные, экстремальные – в соответствии с рядом работ [1–3]. Для с. Кагальник и х. Донской величины подъема уровня воды для указанных групп нагонов будем принимать следующими (относительно среднего уровня):

- обычные: подъем уровня меньше 50 см;
- умеренные: от 50 до 130 см;
- сильные: от 130 до 230 см;
- экстремальные: больше 230 см.

Подъем уровня воды при сильных нагонах приводит к неблагоприятному явлению, а при экстремальных – к опасному явлению [4].

Четкое представление о характеристиках сопротивления потоку русловых и пойменных участков, коэффициенте шероховатости n (или коэффициенте Маннинга), играет ключевую роль в разработке более совершенных схем управления водными ресурсами и природными рисками. Коэффициент шероховатости является одним из наиболее важных эмпирических параметров в области гидрологии и гидравлики, который количественно определяет сопротивление потоку воды и используется для расчета потока в естественных руслах и в поймах. Коэффициент шероховатости зависит от нескольких параметров речных русел и пойм, таких как высота выступов шероховатости, донных гряд, извилистости речных русел, растительности, водоворотных зон и др. Эти за-

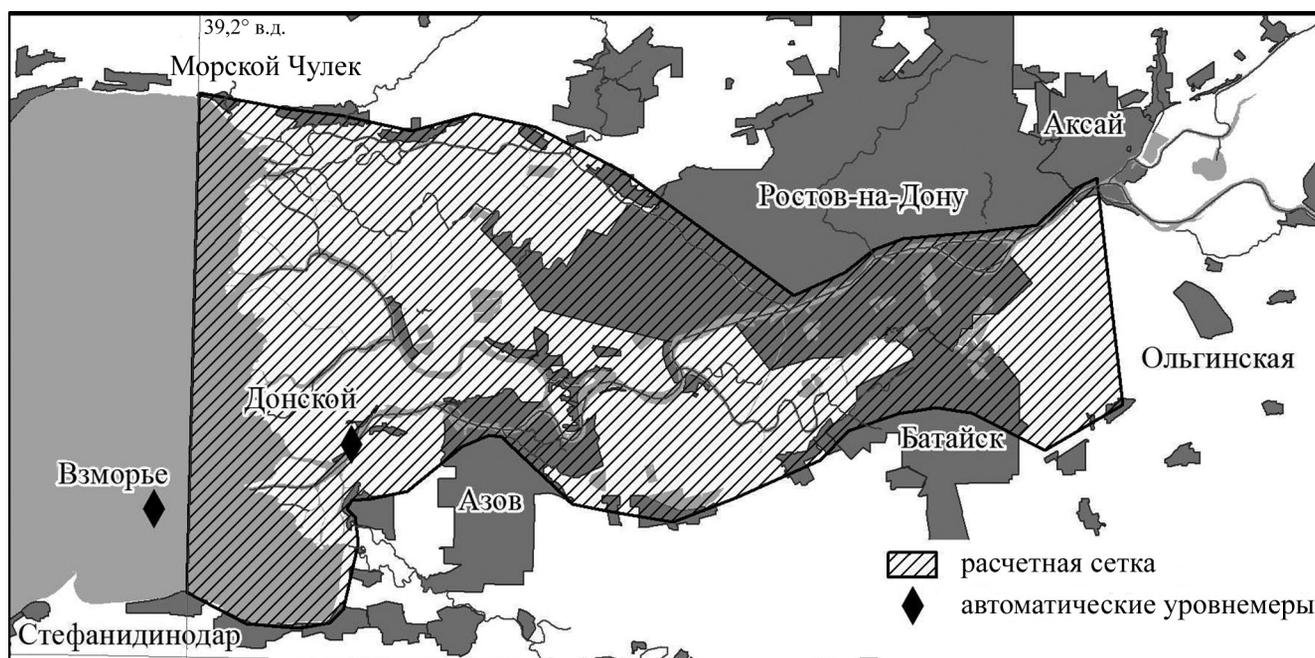


Рис. 1. Расчетная область гидрологической модели.

Fig. 1. Modeling mesh.

кономерности описываются формулой Кована [5]:

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m, \quad (1)$$

где n_0 – коэффициент, зависящий от материала, из которого сложено русло; n_1 – степень неоднородности поверхности; n_2 – коэффициент, зависящий от изменения поперечного сечения канала; n_3 – коэффициент, зависящий от воздействия препятствия; n_4 – коэффициент, учитывающий растительность; m – параметр, учитывающий извилистость русла.

В настоящее время процесс выбора коэффициентов шероховатости происходит, как правило, на основе оценочных данных по эмпирическим таблицам И.Ф. Карасёва [6], М.Ф. Срибного [7], В.Т. Чоу [8] и носит в известной степени субъективный характер, на что обращается внимание в работе [9]. Этот подход тем более трудно применять, когда речь идет об обширных участках гидрологического моделирования.

Решение проблем взаимодействия речного стока и сгонно-нагонных процессов в дельте Дона связано с определением значения сопротивления потоку. Однако значение сопротивления сильно зависит от типа подстилающей поверхности. На необходимость дифференцированного подхода, учитывающего неравномерность распределения коэффициента шероховатости пойм, указывали В.Г. Иванов и Е.С. Субботина в работе [10]. Они рекомендовали принимать значение параметра n переменным и выполнять расчет планов течений для пойменных

участков рек на основе карты распределения параметра n . Подобные подходы встречаются и в зарубежной литературе [8]. Также очевидно, что тип растительности и ее повышенная плотность могут значительно замедлить поток, особенно в неглубоких каналах и в сильно обводненной местности, такой как дельта Дона. Недочет всего многообразия типов подстилающих поверхностей и участков с различными видами землепользования в пределах расчетной области может приводить к высокой степени неопределенности в результатах гидрологического моделирования.

Гидрологическое моделирование затопления дельты в результате взаимодействия сгонно-нагонных процессов с речным стоком в условиях переменной водности Дона проводили с помощью программного комплекса HEC-RAS [11], позволяющего начиная с версии 5.0 рассчитывать двумерные потоки. В пределах дельты и поймы Дона между г. Аксай и авандельтой Дона (западной границей условно взят меридиан 39,2° в.д. в соответствии с рисунком 1) была построена расчетная сетка. Она представляет собой набор ячеек 100 × 100 м, осложненный береговыми линиями, со сгущением до 50 × 50 м. Размер ячейки сетки определял расчетный шаг по времени таким образом, чтобы за 1 шаг преодолевалось расстояние не более одной ячейки. Вследствие этого расчетный шаг по времени был выбран в 30 секунд (максимальная скорость тече-

ния не превышала 3,3 м/с). Результаты расчетов при этом имели временной шаг 10 минут для сопоставления с данными автоматических уровнемеров при адаптации гидрологической модели и дальнейших расчетах. Были установлены 2 границы: русло Дона у г. Аксай (верхняя граница) и линия Стефанинодар – Морской Чулек (нижняя граница). На верхней границе задавался расход в Дону, на нижней – изменения уровня воды на приустьевом участке Таганрогского залива согласно данным уровнемера в х. Донской. Для расчетов использовали детальную цифровую модель местности, построенную на основе топографических карт масштаба 1 : 100000 и водных зеркал во время затопления поймы в годовые 1994 и 2018 гг., и растр распределения коэффициента шероховатости в пределах расчетной сетки.

В рамках адаптации модели к природным условиям местности необходимо было провести исследование распределения коэффициента шероховатости поверхности на участке. Для этого была построена карта распределения типов покрытий земной поверхности (в англоязычной литературе именуемых «land use land cover») и присвоено значение шероховатости каждому из них. На первом этапе был выполнен анализ космического снимка Landsat-8 от 7 августа 2017 г. без облаков в условиях максимального развития растительности. Для выделения типов покрытия земной поверхности был сформирован композитный снимок, отображающий данные о спектральной отражательной способности ландшафта в красной и ближней инфракрасной зонах спектра (каналы с 4 по 7), в соответствии с

рекомендациями, изложенными в работах [12]. В результате применения методик анализа данных ISODATA [13] в среде программы ArcGIS 10.1 были получены классы, отражающие различные типы поверхностей. На следующем этапе в среде программы ArcGIS 10.1 был рассчитан нормализованный относительный индекс растительности (NDVI) для исследуемого снимка по работе [14]. Далее классификация раstra типов поверхности была произведена с учетом распределения NDVI в пределах участков, различающихся между собой по плотности растительности. Дороги и селитебные территории были добавлены на карту с использованием базы геоданных OpenStreetMaps [15] и объединены с данными о типах покрытия, полученными на предыдущих этапах.

В результате выполненных преобразований была получена карта распределения типов поверхности в пределах дельты Дона, включающая в себя следующие классы: тростниковые заросли, травянистый покров (пойменные луга), водные объекты (главные рукава дельты, пруды, ерики и ручьи), открытый грунт (пляжи, песчаные дюны, отсыпки и т.д.), леса, дороги, селитебные территории. Каждому из выделенных классов были присвоены значения коэффициентов шероховатости Маннинга, приведенные в специальной литературе [16–20]. Для классов водных объектов (русел и других постоянно затопленных территорий) использовали коэффициент шероховатости 0,0125, полученный в работе [21]. Данные о выделенных классах земной поверхности приведены в таблице 1.

Таблица 1. Классы земной поверхности дельты Дона
Table 1. Land cover classes of the delta of the river Don

Тип поверхности Surface type	NDVI	Коэффициент Маннинга, n Manning's coefficient, n	% от площади дельты % of the Delta area
Водные объекты Water body	<0	0,0125	16,1
Травянистый покров Grass	0,17–0,31	0,045	26,6
Леса Forest	0,39–0,49	0,15	0,6
Открытый грунт Clear surface	0,11–0,15	0,025	1,9
Селитебные территории и дороги Urban area or roads	0,10–0,25	0,015	8,4
Тростниковые заросли Reed	0,39–0,52	0,04–0,12	46,4

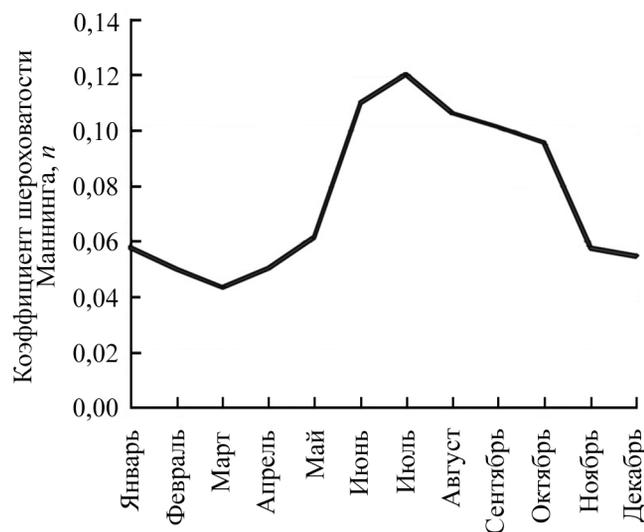


Рис. 2. Динамика коэффициента шероховатости тростниковой растительности.

Fig. 2. Monthly roughness changes of the reeds.

В работах [22; 23] было показано, что при прочих равных условиях коэффициент Маннинга не является величиной постоянной, а подвержен изменчивости в зависимости от стадии жизненного цикла растительности. В осенне-зимний и ранневесенний периоды отмершая растительность слабее сопротивляется потоку, чем растительность в фазе активной вегетации. Проведенный нами анализ натурных данных синхронного изменения уровней воды на островах и в рукавах дельты в период спа-

да нагонов и вегетационных индексов NDVI в различные сезоны года [24] позволил предположить изменения коэффициента шероховатости участков, покрытых тростниковыми зарослями, показанные на рисунке 2. Данный тип покрытия был выбран как имеющий наибольшее распространение в дельте Дона (табл. 1).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Оценка повторяемости нагонов в дельте Дона по данным уровнемеров в с. Кагальник и в х. Донской представлена в работе [23].

Автоматический уровнемер в х. Донской в 2014–2018 гг. фиксировал уровень воды в среднем более 95 % времени, при этом уровни более 0 м (то есть те, которые можно отнести к нагонам) наблюдались в среднем 61,4 % времени. Абсолютное большинство нагонов относилось к слабым (около 50 % времени, или 80,6 % от всех нагонов). Умеренные нагоны наблюдались менее 12 % времени, что соответствует почти 20 % от всех нагонов. Время сильных нагонов составило менее 1 %, они нечасты и кратковременны. Экстремальные нагоны наблюдались только в 2014 г. При этом прослеживается некоторая динамика по годам с повышенным временем нагонов в 2014 и 2016 гг. (до 69,5 % времени) и пониженным в 2015 и 2018 гг. (до 55 и 55,1 % соответственно). Возможно, наблюдения за колеба-

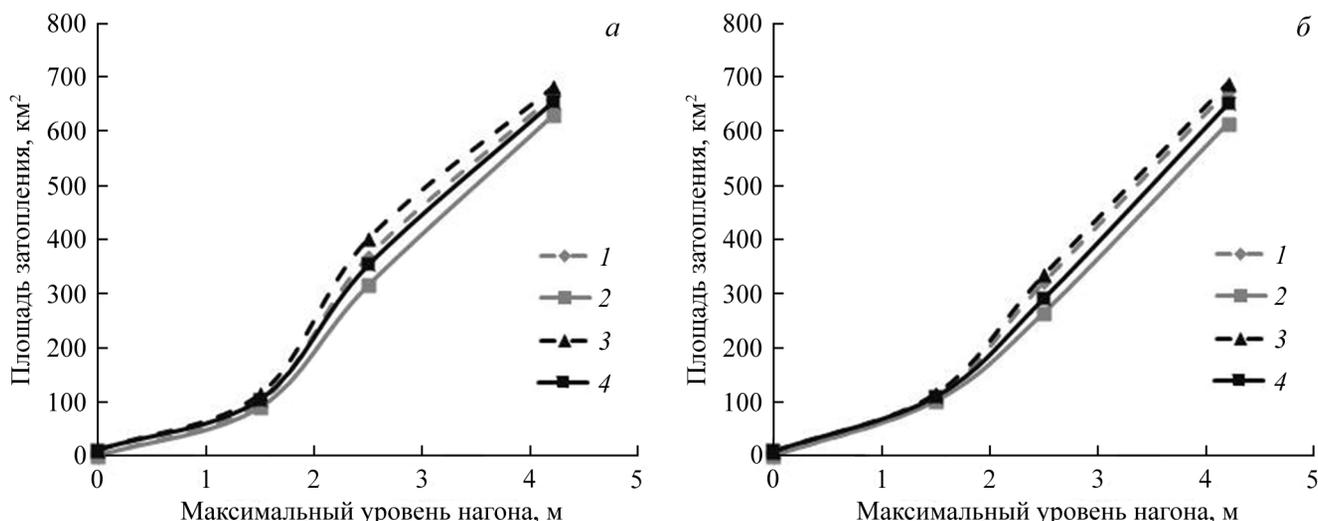


Рис. 3. Максимальные площади затопления дельты уровнями более 0,8 м (а) и более 1,1 м (б) при нагонах в условиях сценариев: 1 – расход воды в Дону 500 м³/с, коэффициент шероховатости тростниковых зарослей 0,04; 2 – расход воды в Дону 500 м³/с, коэффициент шероховатости 0,12; 3 – расход воды в Дону 2000 м³/с, коэффициент шероховатости 0,04; 4 – расход воды в Дону 2000 м³/с, коэффициент шероховатости 0,12.

Fig. 3. Maximum flood areas of the delta of the river Don with depth more than 0.8 m (a) and more than 1.1 m (b) during wind surges in the following cases: 1 – river flow 500 m³/sec, reed roughness coefficient 0.04; 2 – river flow 500 m³/sec, reed roughness coefficient 0.12; 3 – river flow 2000 m³/sec, reed roughness coefficient 0.04; 4 – river flow 2000 m³/sec, reed roughness coefficient 0.12.

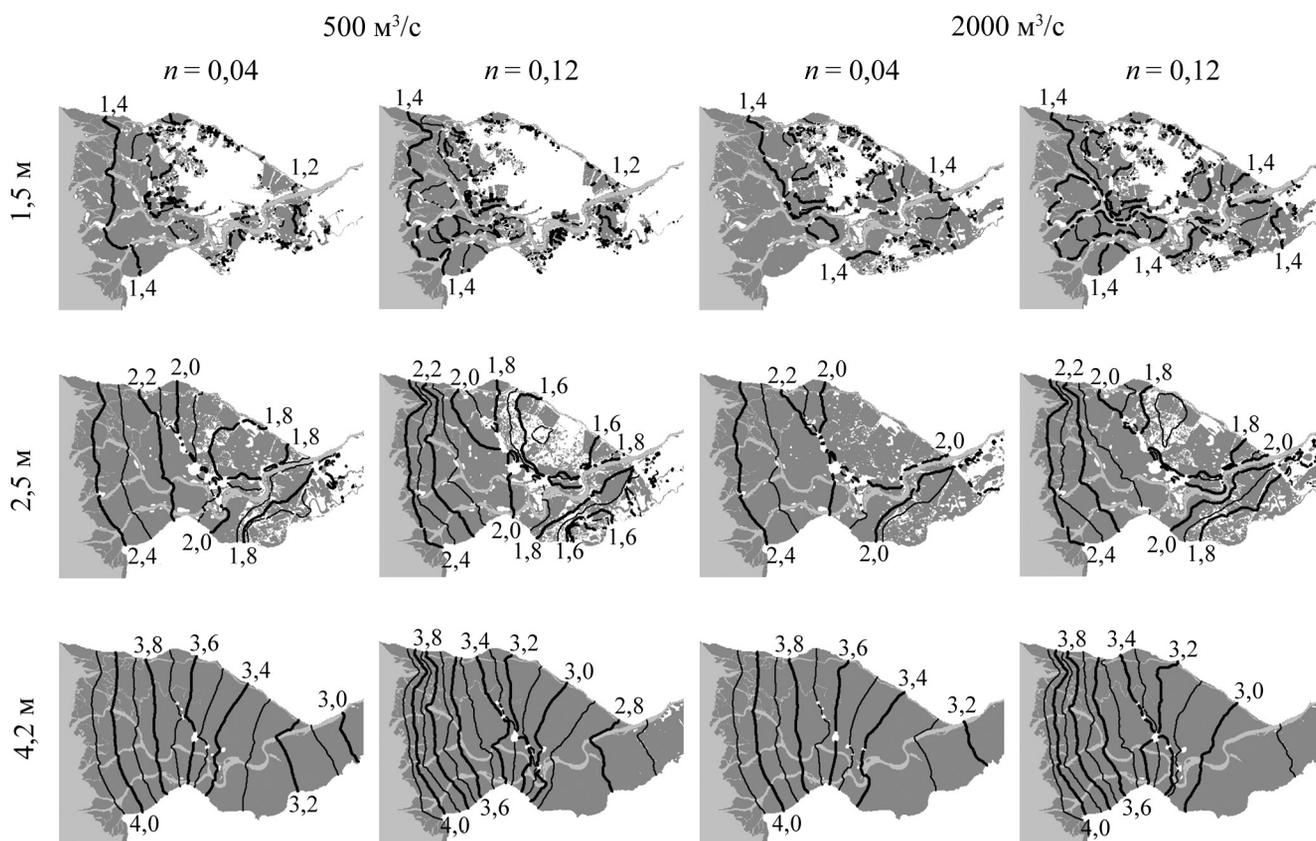


Рис. 4. Схемы затопления дельты Дона при различных уровнях нагона, коэффициенте шероховатости и расходе воды в Дону (изолинии максимального уровня проведены через 0,1 м).

Fig. 4. Flood area of the delta of the river Don during different surges, land cover roughness and river flows (contours of the maximum water surface elevation shown at 0.1 m).

нием уровня воды в последующие годы позволят проследить межгодовую динамику более детально.

В целях рассмотрения взаимодействия нагонов и расходов воды в Дону различной величины, а также с учетом возможной сезонной динамики коэффициента шероховатости было осуществлено моделирование сгонно-нагонных процессов в дельте Дона по ряду сценариев. Они разрабатывались на основе сочетания трех факторов: динамики нагона (уровня максимального подъема воды), величины расхода Дона и коэффициента шероховатости поверхности. Для динамики нагонов рассматривались случаи с максимальными уровнями, соответствующими 1,5 м (относятся к сильным нагонам, то есть к неблагоприятным явлениям), 2,5 м (относятся к экстремальным нагонам, то есть к опасным явлениям) и 4,2 м (максимальный зарегистрированный уровень). Динамика неблагоприятных и опасных явлений была получена на основе наблюдения максимального уровня 4,2 м в сентябре 2014 г. Рассматривались варианты постоянного расхода в Дону на уровне 500 м³/с, что соответствует условиям ме-

жени, и 2000 м³/с как расход в половодье (в половодье 2018 г. сброс из Цимлянского водохранилища достигал 1800 м³/с). Использована карта распределения коэффициента шероховатости с вариантами минимального и максимального коэффициентов для тростниковой растительности в марте (0,04) и июле (0,12) соответственно.

Влияние коэффициента шероховатости поверхности и расхода воды в Дону на формирование затоплений, соответствующих уровням неблагоприятных (0,8 м) и опасных (1,1 м) явлений для поста Азов при рассматриваемых нагонах, можно проследить на рисунке 3.

Полученные результаты показывают, что:

- при увеличении расхода воды в Дону во время нагонов при прочих равных условиях затопляются большие территории;
- при повышенном коэффициенте шероховатости затопляется меньшая площадь;
- величина нагона в большей степени, чем расход воды в Дону или коэффициент шероховатости, определяет размер максимально затопленной площади.



Рис. 5. Выделенные зоны затопления дельты Дона с наложенными положениями фронтов снижения максимального уровня на 10 %. I – край дельты, II – середина дельты, III – тихая заводь, IV – прирусловая часть.

Fig. 5. Parts of the delta of the river Don estimated by flood dynamics. I – edge of delta, II – middle of delta, III – backwater, IV – riverine part.

Рассмотрим влияние выделенных факторов на пространственную динамику затопления. Нами было замечено, что абсолютные значения максимальных уровней воды в дельте снижаются при движении от края дельты вверх по Дону, однако это происходит неравномерно (рис. 4).

Представленные схемы затопления и изолинии максимальных уровней позволяют отметить следующие закономерности:

- максимальный уровень воды при нагоне снижается от морского края дельты вверх по течению Дона;
- площадь затопления дельты обусловлена интенсивностью нагона (чем сильнее нагон, тем больше площадь затопления);
- повышенная шероховатость тростниковых зарослей препятствует проникновению нагонной волны вверх по течению Дона;
- расход Дона сильно влияет на механизм затопления при нагоне в верхней по течению части дельты.

Если для каждого нагона выделить изолинию снижения значения максимального уровня на 10 %, то есть не абсолютный, а относительный показатель, то при их совмещении (рис. 5) на схеме дельты Дона можно выделить 4 характерные зоны: край дельты (зона I), середину дельты (зона II), тихую заводь (зона III) и прирусловую часть (зона IV).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матишов Г.Г., Чикин А.Л., Бердников С.В., Шевердяев И.В., Клещенков А.В., Кириллова Е.Э. 2014. Экстремальное затопление дельты Дона весной 2013 г.: хронология, условия формирования и последствия. *Вестник Южного научного центра*. 10(1): 17–24.

Зона I (край дельты) характеризуется сохранением и снижением максимального уровня нагона менее чем на 10 %. Она в наибольшей степени подвержена затоплениям в результате нагонов вне зависимости от стока Дона. Здесь уровни воды и глубины затопления формируются в соответствии с динамикой уровня воды в Таганрогском заливе. Зона II (середина дельты) выделена как переходная между краем дельты и прирусловой частью, здесь максимальные уровни и время затопления сильно зависят от коэффициента шероховатости тростниковых зарослей. Тихая заводь (зона III) выделена как участок, затапливаемый во время нагонов в последнюю очередь, максимальный уровень воды всегда снижен, а значит, затопление слабее, чем в других районах, вне зависимости от коэффициента шероховатости тростниковых зарослей и расхода воды в Дону. В прирусловой части (зона IV) расход воды в Дону играет наибольшую роль в затоплении территории.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для дельты Дона в 2014–2018 гг. повышение уровня воды более чем на 1,3 м наблюдалось в 11,9 % от всего времени, а более чем 2,3 м – менее 1 %.

Получена карта распределения коэффициента шероховатости поверхности в дельте Дона на основе полевых и дистанционных наблюдений и предложена сезонная динамика коэффициента шероховатости класса тростниковой растительности.

Изучено влияние расхода воды в Дону, динамики коэффициента шероховатости и величины нагонов на процессы затопления. Произведено зонирование дельты Дона по положению фронта снижения максимального уровня нагона на 10 % на зоны края дельты, середины дельты, прирусловой части и тихой заводи под влиянием нагона, стока Дона и коэффициента шероховатости.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-35-00441 мол_а.

2. Матишов Г.Г., Чикин А.Л., Бердников С.В., Шевердяев И.В. 2014. Экстремальное наводнение в дельте Дона (23–24 марта 2013 г.) и факторы, его определяющие. *Доклады Академии наук*. 455(3): 342–345. doi: 10.7868/80869565214090229

3. Матишов Г.Г., Бердников С.В. 2015. Экстремальное затопление дельты Дона весной 2013 г. *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 1: 111–118.

4. РД 52.04.563. Инструкция. Критерии опасных гидрометеорологических явлений и порядок передачи штормового сообщения. 2002. 27 с.
5. Cowan W.L. 1956. Estimating hydraulic roughness coefficients. *Agricultural Engineering*. 37(7): 473–475.
6. Карасёв И.Ф. 1980. Речная гидрометрия и учет водных ресурсов. Л., Гидрометеиздат: 310 с.
7. Срибный М.Ф. 1965. Нормы сопротивления движению естественных водотоков и расчет отверстий больших мостов. Л., Госстройиздат: 148 с.
8. Чоу В.Т. 1969. Гидравлика открытых каналов. М., Стройиздат: 464 с.
9. Барышников Н.Б., Субботина Е.С., Скоморохова Е.М., Поташко Е.А. 2012. Коэффициенты шероховатости пойм. Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 23: 13–20.
10. Иванов Г.В., Субботина Е.С. 1975. Применение методов расчетов решения плановых задач к расчету максимальных расходов воды. В кн.: Тезисы докладов 1-ой Приморской конференции по гидрологическим расчетам. Владивосток: 75–79.
11. HEC-RAS: River Analysis System. URL: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/> (дата обращения: 15.12.2018).
12. *Classifying Landsat Data for the National Land Cover Dataset*. URL: <https://www.e-education.psu.edu/natureofgeoinfo/book/export/html/1759> (дата обращения: 15.12.2018).
13. Методологический аппарат ERDAS IMAGINE для классификации изображений (выдержки). *GIS-Lab*. URL: <http://www.gis-lab.info/qa/genclass-erdas.html> (дата обращения: 15.12.2018).
14. Kriegler F.J., Malila W.A., Nalepka R.F., Richardson W. 1969. Preprocessing, transformations and their effects on multispectral recognition. In: *Proceedings of the Sixth International Symposium on Remote Sensing of Environment, Volume II (Ann Arbor, Michigan, USA, 13–16 October 1969)*. Ann Arbor, MI, University of Michigan: 97–131.
15. *OpenStreetMap is the free wiki world map*. URL: <https://www.openstreetmap.org> (дата обращения: 15.12.2018).
16. Henderson F.M. 1966. *Open-channel flow*. New York, MacMillan Publishing Co., Inc.: 522 p.
17. Barnes H.H. 1967. *Roughness characteristics of natural channels*. Washington, United States Government Printing Office: 213 p.
18. Graf W.H. 1984. *Hydraulics of Sediment Transport*. Littleton, Colorado, Water Resources Publications, LLC: 513 p.
19. Arcement G.J., Jr., Schneider V.R. 1989. Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains. *USGS*. URL: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/wsp2339> (дата обращения: 15.12.2018). doi: 10.3133/wsp2339
20. Shih S.F., Rahi G.S. 1982. Seasonal Variations of Manning's Roughness Coefficient in a Subtropical Marsh. *Transactions of the ASAE*. 25(1): 116–119. doi: 10.13031/2013.33488.
21. Шевердяев И.В. 2018. Исследование шероховатости русел дельты Дона на основе наблюдений колебаний уровня в мае 2018 года. В кн.: *Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем*. Вып. 3. Ростов н/Д, изд-во ЮНЦ РАН: 276–279. doi: 10.23885/2500-395x-2018-1-3-276-279
22. Song S., Schmalz B., Xu Y.P., Fohrer N. 2017. Seasonality of roughness – the indicator of annual river flow resistance condition in lowland catchment. *Water Resources Management*. 31(11): 3299–3312. doi: 10.1007/s11269-017-1656-z
23. Третьякова И.А. 2018. Оценка повторяемости нагонов различной величины в дельте Дона по данным наблюдений. В кн.: *Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем*. Вып. 3. Ростов н/Д, изд-во ЮНЦ РАН: 258–261. doi: 10.23885/2500-395x-2018-1-3-258-261
24. Клещенков А.В., Шевердяев И.В., Мельник И.А. 2018. Оценка сезонной динамики шероховатости поверхности в дельте Дона по данным дистанционного зондирования. В кн.: *Дельты рек России: закономерности формирования, биоресурсный потенциал, рациональное хозяйствование и прогнозы развития: материалы Международной молодежной научной конференции памяти члена-корреспондента РАН Д.Г. Матшиова (г. Ростов-на-Дону, 4–6 сентября 2018 г.)*. Ростов н/Д, изд-во ЮНЦ РАН: 37–41.

REFERENCES

10. Ivanov G.V., Subbotina E.S. 1975. [Application of methods for calculating the solution of planned tasks to the calculation of maximum water consumption]. In: *Tezisy dokladov 1-y Primorskoy konferentsii po gidrologicheskim raschetam*. [Reports of the 1st Primorye conference of the hydrological calculations]. Vladivostok: 75–79. (In Russian).
11. HEC-RAS: River Analysis System. Available at: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/> (accessed 15 December 2018).
12. *Classifying Landsat Data for the National Land Cover Dataset*. URL: <https://www.e-education.psu.edu/natureofgeoinfo/book/export/html/1759> (accessed 15 December 2018).
13. [ERDAS IMAGINE methodological apparatus for classifying images (extracts)]. *GIS-Lab*. Available at: <http://www.gis-lab.info/qa/genclass-erdas.html> (accessed 15 December 2018). (In Russian).
14. Kriegler F.J., Malila W.A., Nalepka R.F., Richardson W. 1969. Preprocessing, transformations and their effects on multispectral recognition. In: *Proceedings of the Sixth International Symposium on Remote Sensing of Environment, Volume II (Ann Arbor, Michigan, USA, 13–16 October 1969)*. Ann Arbor, MI, University of Michigan: 97–131.
15. *OpenStreetMap is the free wiki world map*. Available at: <https://www.openstreetmap.org> (accesses 15 December 2018).
16. Henderson F.M. 1966. *Open-channel flow*. New York, MacMillan Publishing Co., Inc.: 522 p.
17. Barnes H.H. 1967. *Roughness characteristics of natural channels*. Washington, United States Government Printing Office: 213 p.
18. Graf W.H. 1984. *Hydraulics of Sediment Transport*. Littleton, Colorado, Water Resources Publications, LLC: 513 p.
19. Arcement G.J., Jr., Schneider V.R. 1989. Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains. USGS. Available at: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/wsp2339> (accessed 15 December 2018). doi: 10.3133/wsp2339
20. Shih S.F., Rahi G.S. 1982. Seasonal Variations of Manning's Roughness Coefficient in a Subtropical Marsh. *Transactions of the ASAE*. 25(1): 116–119. doi: 10.13031/2013.33488.
21. Sheverdyayev I.V. 2018. [Investigation of the streambed roughness at the delta of the river Don, by water level observations in May 2018]. In: *Ekologiya. Ekonomika. Informatika. Seriya: Sistemnyy analiz i modelirovaniye ekonomicheskikh i ekologicheskikh sistem*. [Ecology. Economy. Informatics. System analysis and mathematical modeling of ecological and economic systems]. Rostov-on-Don, Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences Publishers: 276–279. (In Russian). doi: 10.23885/2500-395x-2018-1-3-276-279
22. Song S., Schmalz B., Xu Y.P., Fohrer N. 2017. Seasonality of roughness – the indicator of annual river flow resistance condition in lowland catchment. *Water Resources Management*. 31(11): 3299–3312. doi: 10.1007/s11269-017-1656-z
23. Tretyakova I.A. 2018. [Repeatability evaluation of surges of various magnitude in the Don river delta by observation data]. In: *Ekologiya. Ekonomika. Informatika. Seriya: Sistemnyy analiz i modelirovaniye ekonomicheskikh i ekologicheskikh sistem*. [Ecology. Economy. Informatics. System analysis and mathematical modeling of ecological and economic systems]. Rostov-on-Don, Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences Publishers: 258–261. (In Russian). doi: 10.23885/2500-395x-2018-1-3-258-261
24. Kleschenkov A.V., Sheverdyayev I.V., Melnik I.A. 2018. [Evaluation of the seasonal dynamics of the surface roughness in the Don Delta according to remote sensing data]. In: *Del'ny rek Rossii: zakonmernosti formirovaniya, bioresursnyy potentsial, ratsional'noye khozyaystvovaniye i prognozy razvitiya: materialy Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii pamyati chlena-korrespondenta RAN D.G. Matishova*. [Rivers Deltas of Russia: Regularities of Formation, Bioresourcing Potential, Rational Opportunity and Development Forecasts: Proceedings of the International Youth Scientific Conference in memory of Corresponding-Member RAS D.G. Matishov (Rostov-on-Don, Russia, 4–6 September 2018)]. Rostov-on-Don, Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences Publishers: 37–41. (In Russian).

Поступила 27.07.2018