

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ
И РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

УДК 556.5

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ УРОВНЕЙ ЗАТОПЛЕНИЯ ПОЙМЫ НИЖНЕГО
ДОНА ПОД ВЛИЯНИЕМ ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ.
РЕТРОСПЕКТИВНОЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ¹

© 2022 г. В. В. Беликов^{a, *}, А. И. Алексюк^{a, b}, Н. М. Борисова^{a, **},
А. В. Глотко^{a, c}, А. Б. Румянцев^a

^aИнститут Водных Проблем РАН, Москва, 119333 Россия

^bМеханико-математический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова,
Москва, 119991 Россия

^cНИУ МГСУ, Москва, 129337 Россия

*e-mail: belvv@bk.ru

**e-mail: borisovanm@mail.ru

Поступила в редакцию 15.09.2020 г.

После доработки 22.06.2021 г.

Принята к публикации 22.06.2021 г.

Для долины Нижнего Дона методом ретроспективного численного моделирования на основе цифровых 3D-моделей рельефа и двумерных уравнений мелкой воды показано, что для высоких половодий уровенный режим реки существенно изменился за последние 100 лет. Это вызвано интенсивным хозяйственным освоением поймы Нижнего Дона, строительством дорог, перегораживающих пойму высокими насыпями, паводкозащитных сооружений, рыбхозов и т. п. Сделан вывод, что кривые связи расходов и уровней воды на водомерных постах, применяемые в настоящее время Росгидрометом, должны быть откорректированы в диапазоне расходов воды, выходящих на пойму.

Ключевые слова: затопление поймы, антропогенное воздействие, 2D-моделирование, кривая связи расходов и уровней воды.

DOI: 10.31857/S0321059622060025

ВВЕДЕНИЕ

Численным моделированием процесса затопления поймы Нижнего Дона (в том числе и при нагонных явлениях) занимались многие исследователи (например, [2–4]). Однако в [2–4] и других аналогичных работах использовались недостаточно точные цифровые модели рельефа (ЦМР) и/или недостаточно подробные схематизации течения (одномерные либо двумерные на “грубой” расчетной сетке). В работе по гидролого-гидравлическому обоснованию проекта строительства Багаевского гидроузла [7] построены достаточно детальная ЦМР долины Нижнего Дона и густая адаптивная расчетная гибридная треугольно-четырёхугольная сетка, которые позволили вы-

полнить высокоточную калибровку гидродинамической модели в диапазоне расходов воды, наблюдавшихся за последние 40 лет. При этом установлено, что полученные с применением численного гидродинамического моделирования кривые связи $Q(H)$ в створах гидропостов на Нижнем Дону для расходов малой обеспеченности (10, 1, 0.1%) существенно отличаются от применяемых в настоящее время кривых Росгидромета и Правил Использования Водных Ресурсов Кочетовского гидроузла, основанных на данных натуральных измерений за длительный период времени (>100 лет). Высказано предположение, что причиной этого может быть интенсивное хозяйственное освоение поймы р. Дон (дороги, защитные дамбы, рыбные хозяйства и т. п.), начатое в 1960-е гг. после строительства Цимлянского гидроузла. Это время совпадает с началом маловодного периода, когда высокие расходы не наблюдались (последний достаточно большой половодный расход (6300 м³/с) наблюдался в 1963 г., т. е. без малого 60 лет назад) и, следовательно, по дан-

¹ Работа выполнена в рамках Государственного задания ИВП РАН (тема FMWZ-2022-0003 “Разработка численных моделей гидрологических, гидродинамических и гидрохимических процессов в водных объектах и их водосборных бассейнах, создание на основе разработанных моделей технологий поддержки решений в сфере водной безопасности для информационной модернизации водохозяйственной отрасли России”).

ным инструментальных измерений невозможно было отследить изменение уровенных режимов при затоплении поймы, вызванное хозяйственной деятельностью. Для подтверждения этой гипотезы было решено выполнить ретроспективное гидродинамическое моделирование с учетом приведения рельефа поймы в его естественное состояние на начало XX в.

ПОСТРОЕНИЕ ЧИСЛЕННОЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НИЖНЕГО ДОНА И ЕЕ КАЛИБРОВКА

Для выполнения исследований разработана компьютерная модель долины Нижнего Дона протяженностью ~180 км с учетом широкой поймы и расположенных на ней многочисленных дорог, рыбхозов и дамб обвалования, защищающих от затопления населенные пункты. ЦМР местности строилась на основе карт масштаба от 1 : 5000 до 1 : 25000, топографического плана масштаба 1 : 2000 участка строительства Багаевского гидроузла площадью съемки 712 га, результатов лидарной съемки прирусловых участков в полосе от Кочетовского гидроузла до о. Арпачинского, а также продольных профилей некоторых перегораживающих пойму дорог, полученных на основе топографических съемок. При этом рельеф русловой части модели сформирован на основе актуализированных батиметрических промеров р. Дон. На рис. 1 представлена область моделирования со схемой расположения стесняющих пойму сооружений, которые в ретроспективных расчетах исключаются из рассмотрения.

Расчетная адаптивная треугольно-четырёхугольная сетка модели содержала более 560 тыс. ячеек размерами от 5 до 300 м. На рис. 2 представлен фрагмент расчетной гибридной сетки в районе г. Ростов-на-Дону.

Для расчета гидродинамических параметров течения воды применялся программный комплекс STREAM 2D CUDA [1], в котором реализован оригинальный алгоритм, описанный в [5, 6] и распараллеленный на графическом процессоре с использованием технологии CUDA. В основу программы заложена двумерная нестационарная система уравнений мелкой воды (уравнения Сен-Венана), описывающая меженные, паводковые и сгонно-нагонные течения в реках и речных долинах, волны прорыва, вызванные разрушением напорного фронта плотин, и т. п.

В качестве граничных условий на главной входной границе в нижнем бьефе Кочетовского гидроузла задавались постоянные расходы воды раз-

личной обеспеченности. Кроме того, учитывались боковой приток воды от рек Сал и Маныч, а также водозабор на Новочеркасскую ГРЭС.

На нижней (морской) границе (рис. 1) задавался постоянный (среднегодовой или сезонный) или переменный (в виде функции зависимости уровня воды от времени) уровень воды Таганрогского залива. Более подробно эта процедура и результаты расчетов описаны в работе [7]. В настоящей статье этот вопрос подробно не рассматривается, поскольку расчеты и наблюдения показывают, что в р. Дон при расходах воды >4000 м³/с (на водпосту Раздорская) сгоны и нагоны проявляются слабо и только уже в дельте Дона ниже г. Ростов-на-Дону. Поэтому на выводы настоящей работы они не влияют.

При выполнении гидрологического обоснования проекта Багаевского низконапорного гидроузла [7] были выполнены сбор, анализ и обобщение большого объема материалов ежесуточных гидрометеорологических наблюдений на станциях и постах Северо-Кавказского УГМС и других ведомств за почти столетний период. Это большие табличные массивы данных. В настоящей статье эти данные приведены частично в осредненном виде на графиках связи расходов и уровня воды на водомерных постах.

Значения коэффициентов шероховатости, которые остаются единственными “свободными” параметрами математической модели при калибровке, подбирались при последовательном увеличении расходов воды в результате вариантных расчетов из условия наилучшего совпадения с имеющимися натурными данными по уровням и расходам воды на водомерных постах Северо-Кавказского УГМС Раздорская (расходный пост), Багаевская, Старочеркасская, Аксай, Ростов-на-Дону и в нижнем бьефе Кочетовского гидроузла (по данным Администрации Азово-Донского БВВП) за последние 40 лет. По результатам калибровочных расчетов, подробно описанных в [7], были подобраны коэффициенты шероховатости по Маннингу: $n_1 = 0.02$ по руслу, $n_2 = 0.035$ в переходной от русла к пойме зоне и $n_3 = 0.05$ на пойме.

На перечисленных выше водопостах были проанализированы и суточные данные по расходам и уровням воды за более продолжительный — столетний период. При высоких паводковых расходах (≥ 4000 м³/с), не наблюдаемых уже длительное время, но остающихся расчетными расходами малой обеспеченности, уровни воды в современных условиях при тех же расходах, как показали результаты численного моделирования, будут су-

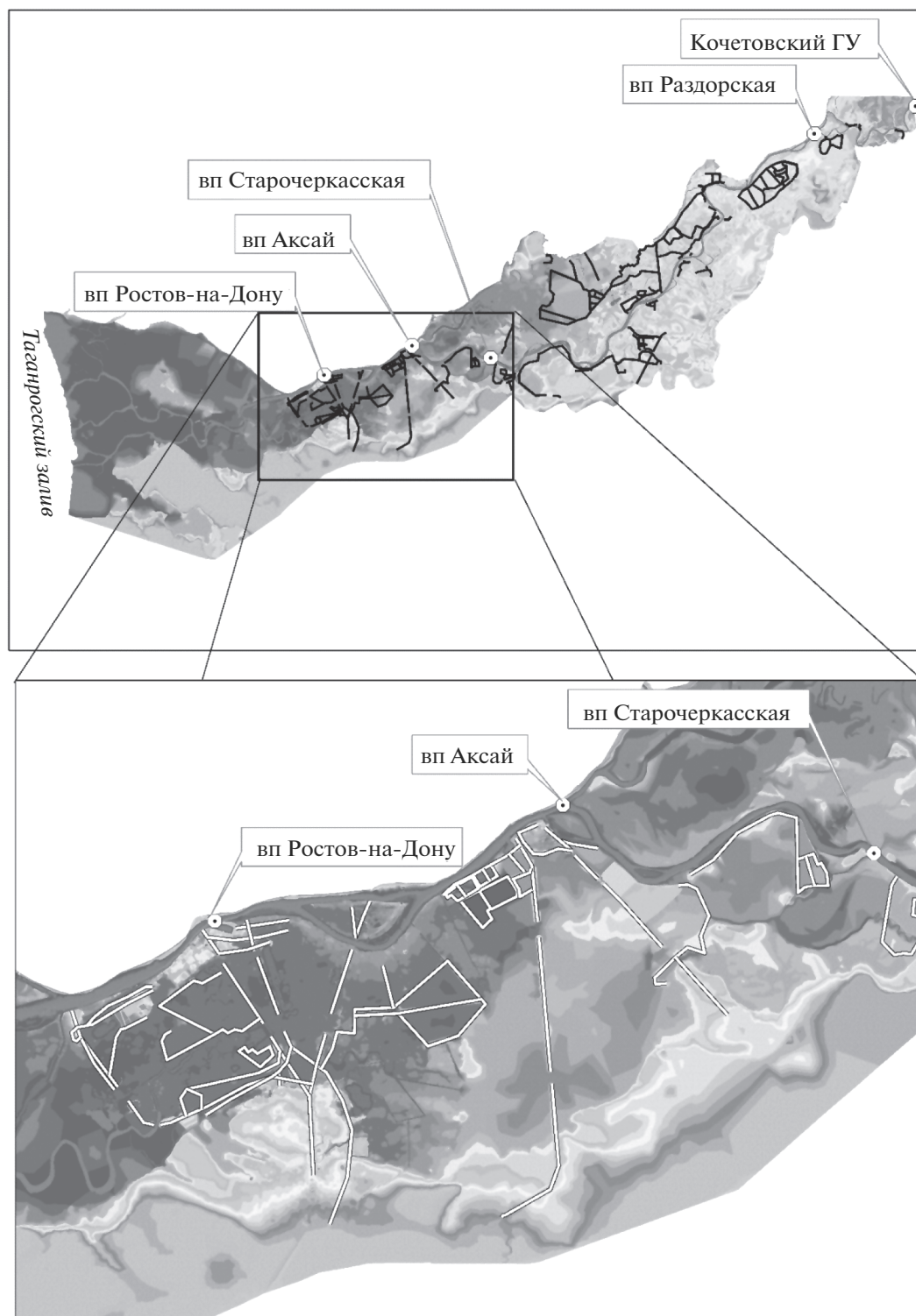


Рис. 1. Область моделирования с выделенными дамбами и дорогами.

шественно выше, чем наблюдаемые в начале и середине XX в. (рис. 3). Так, у ст. Старочеркасской рассчитанный уровень на 1 м выше, чем был в

1917 г. (исторический максимум 5.70 м БС) при том же расходе – 14600 м³/с (обеспеченностью 0.5%), и на 1 м выше, чем был в 1963 г. при расходе

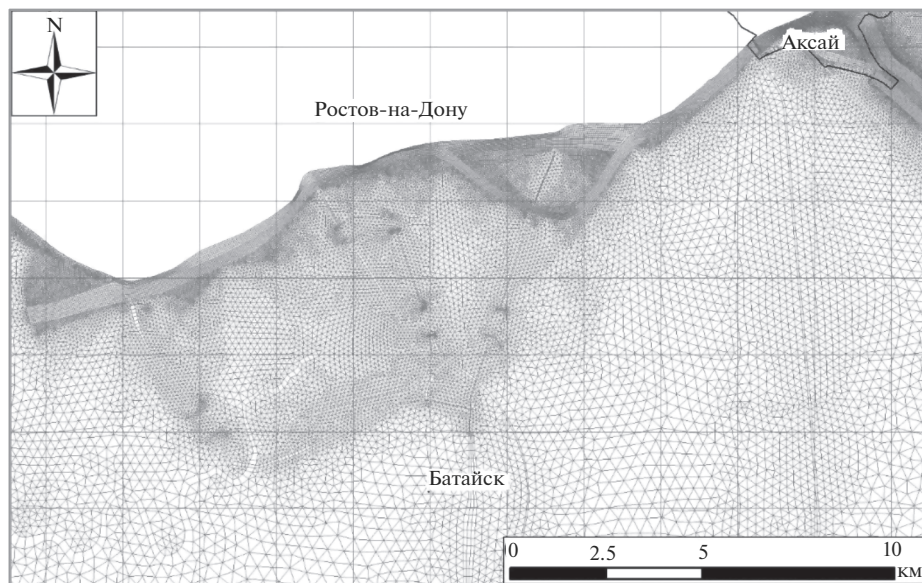


Рис. 2. Фрагмент гибридной расчетной сетки в районе г. Ростов-на-Дону.

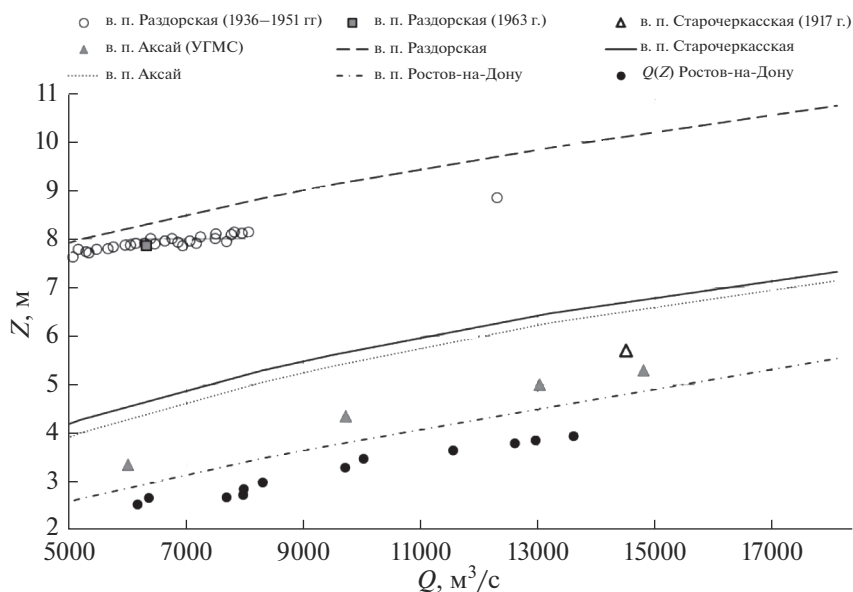


Рис. 3. Кривые $Q = f(H)$ для в. п. Ростов-на-Дону, Аксай, Старочеркасская и Раздорская (линии), полученные по результатам модельных расчетов, и их сопоставление с данными наблюдений за исторический период (в. п. — водпост).

6300 м³/с обеспеченностью ~15%. В районе г. Аксай превышение >1 м, в створе водомерного поста Раздорская превышение уровня составляет 0.8 м для половодья 1942 г. с максимальным наблюдаемым на этом посту расходом 12300 м³/с

обеспеченностью 2% (в половодье 1917 г. измерения на Раздорской не проводились). Эти результаты можно, по-видимому, объяснить сильным антропогенным воздействием на пойму Нижнего Дона. Для проверки этой гипотезы

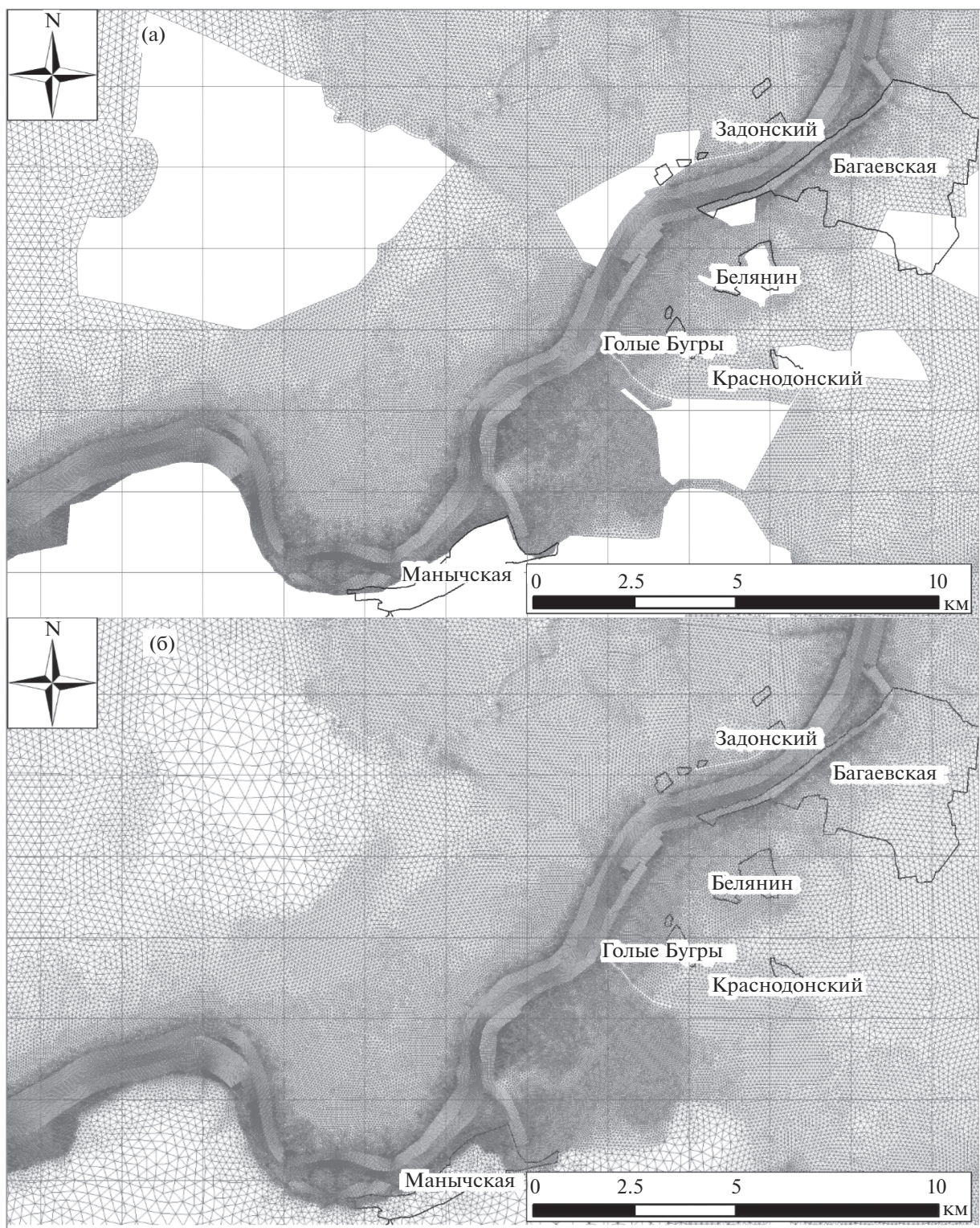


Рис. 4. Фрагменты гибридной расчетной сетки в районе ст. Манычской для моделей в современных условиях (а) и на период начала XX в. (б).

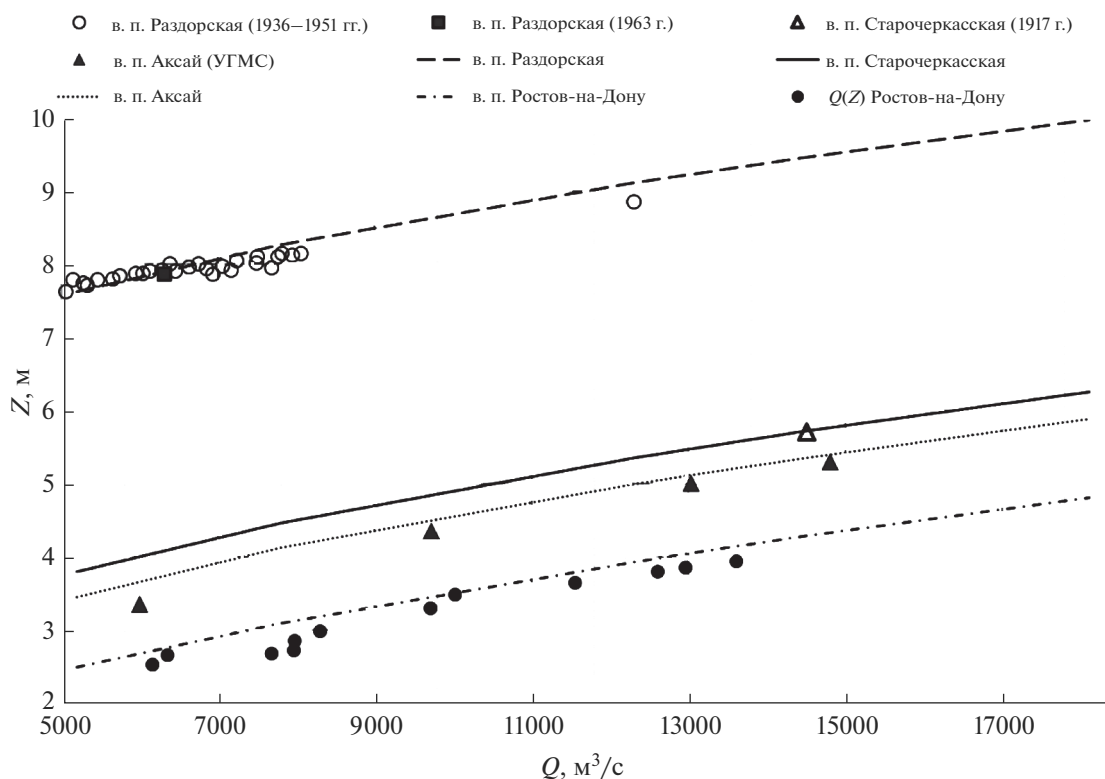


Рис. 5. Полученные на основе модельных расчетов кривые $Q = f(H)$ в области высоких расходов для в. п. Ростов-на-Дону, Аксай, Старочеркасская и Раздорская на период в начале XX в. (линии) и их сопоставление с данными наблюдений за исторический период. Для в. п. Раздорская серым квадратом на графике нанесена точка, соответствующая 1963 г. (отметка уровня 7.86 м БС, расход $6320 \text{ м}^3/\text{с}$), белыми кружками – данные за период 1936–1951 гг. (отобраны только расходы $>5000 \text{ м}^3/\text{с}$); в. п. – водпост.

проведена реконструкция ЦМР долины Нижнего Дона для начала XX в. и проведены аналогичные расчеты.

РЕКОНСТРУКЦИЯ ЦМР ДОЛИНЫ НИЖНЕГО ДОНА ДЛЯ ПЕРИОДА В НАЧАЛЕ XX в.

На описанной выше модели были проведены некоторые изменения рельефа дна для того, чтобы максимально приблизить ЦМР долины Нижнего Дона к периоду в начале XX в., а именно – “убраны” дорожные и защитные сооружения, построенные позже и изображенные на рис. 1. Кроме изменения рельефа, увеличена расчетная сетка модели на участки поймы, ограниченные защитными сооружениями (например, рыбхозы), через которые в первоначальной модели предполагалась невозможность протекания воды. Количество ячеек расчетной сетки модели возросло до 568 тыс. В расчетную сетку для численной модели начала XX в. (рис. 4б) добавлены участки, кото-

рые в модели для современных условий (рис. 4а) не учитывались в силу того что были окружены дорогами или дамбами.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ЗАТОПЛЕНИЯ ПОЙМЫ НИЖНЕГО ДОНА ДО НАЧАЛА ЕЕ ИНТЕНСИВНОГО ХОЗЯЙСТВЕННОГО ОСВОЕНИЯ

Для численной модели начала XX в. проведены расчеты в диапазоне расходов от 5200 (обеспеченность 20%) до $18100 \text{ м}^3/\text{с}$ (0.1%). Значения коэффициентов шероховатости были взяты такими же, как и в численной модели для современных условий ($n_1 = 0.02$, $n_2 = 0.035$, $n_3 = 0.05$). На рис. 5 изображены рассчитанные на математической модели на начало XX в. кривые связи расходов и уровней для характерных створов. Для водпоста Раздорская данные ложатся на одну кривую, которая тянется до точки, соответствующей половине 1942 г. (максимальная отметка уровня 8.85 м БС, измеренный расход $12300 \text{ м}^3/\text{с}$ обеспе-

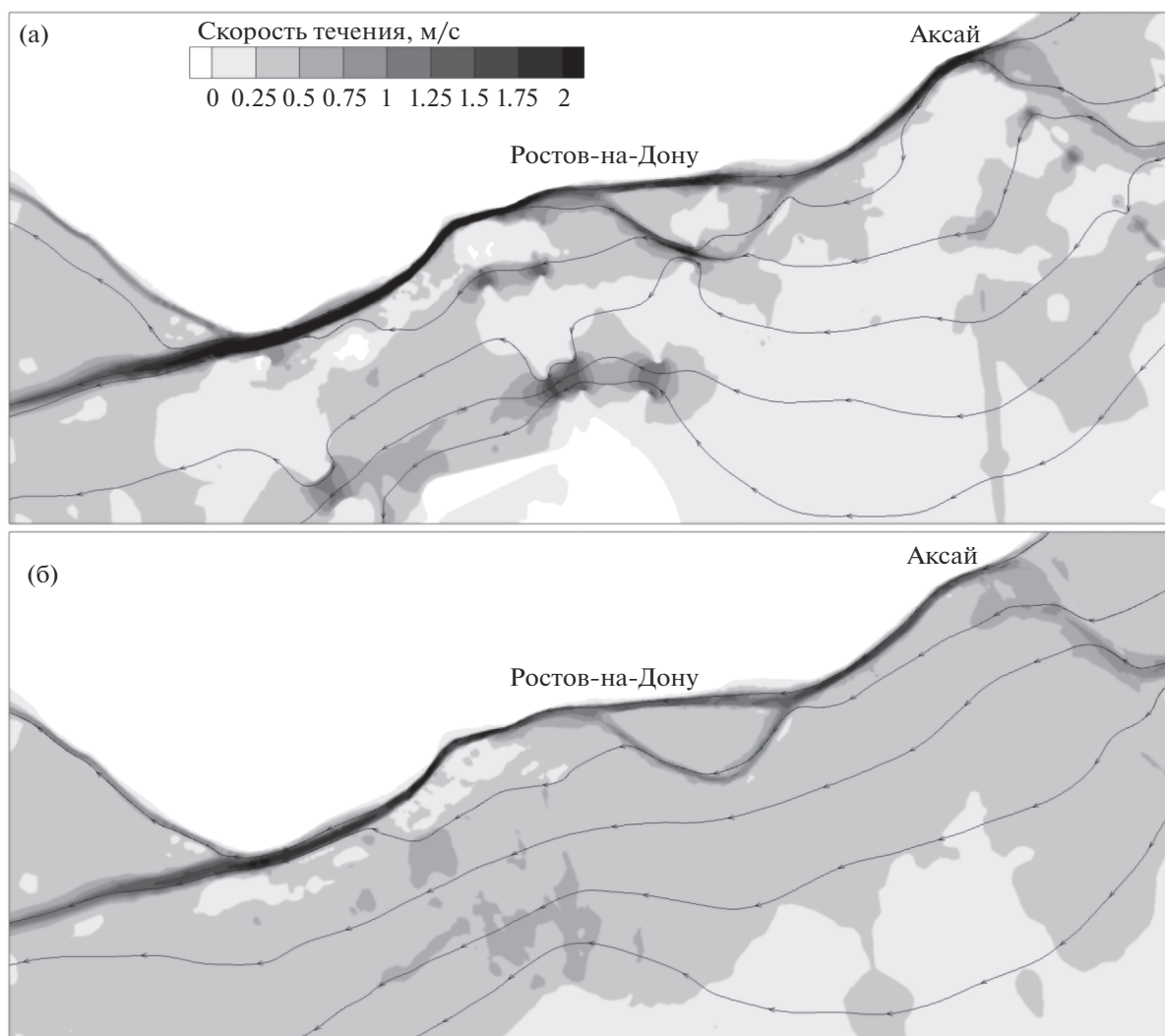


Рис. 6. Скорости течения и линии тока при расходе $13200 \text{ м}^3/\text{с}$, рассчитанные на моделях в современных условиях (а) и на период начала XX в. (б).

ченностью 2%). Рассчитанная по модели кривая на водпосту Раздорская близка к наблюдаемым данным, разница уровней воды при расходе $12300 \text{ м}^3/\text{с}$ составляет 0.25 м. У ст. Старочеркасской рассчитанный уровень совпадает с наблюдаемым экстремальным уровнем 1917 г. — 5.70 м БС. В районе городов Акса́й и Ростов-на-Дону наблюдается небольшое превышение рассчитанных уровней воды над измеренными, при этом с увеличением расхода воды разница уровней уменьшается. Возможно, это связано с тем, что в районе Акса́й и Ростова-на-Дону заметное влияние на уровни воды оказывают сгоны и нагоны, которые сильнее проявляются при меньших расходах.

На рис. 6 и 7 приведены скорости течения и уровни воды для района г. Ростов-на-Дону, рассчитанные на двух моделях (для современных и исторических условий). Как видно на рис. 6, скорости течения на пойме, полученные на численной модели для периода в начале XX в., $\leq 0.6 \text{ м/с}$, для современных условий скорости воды на пойме возрастают в местах водопропусков (пойменных мостов) до 1.7 м/с . На рис. 7 хорошо видно, что дороги, пересекающие пойму, подпирают воду и приводят к повышению уровней воды в современных условиях.

На рис. 8 построены профили водной поверхности вдоль русла р. Дон от нижнего бьефа Кочетовского гидроузла до водпоста Азов для расходов

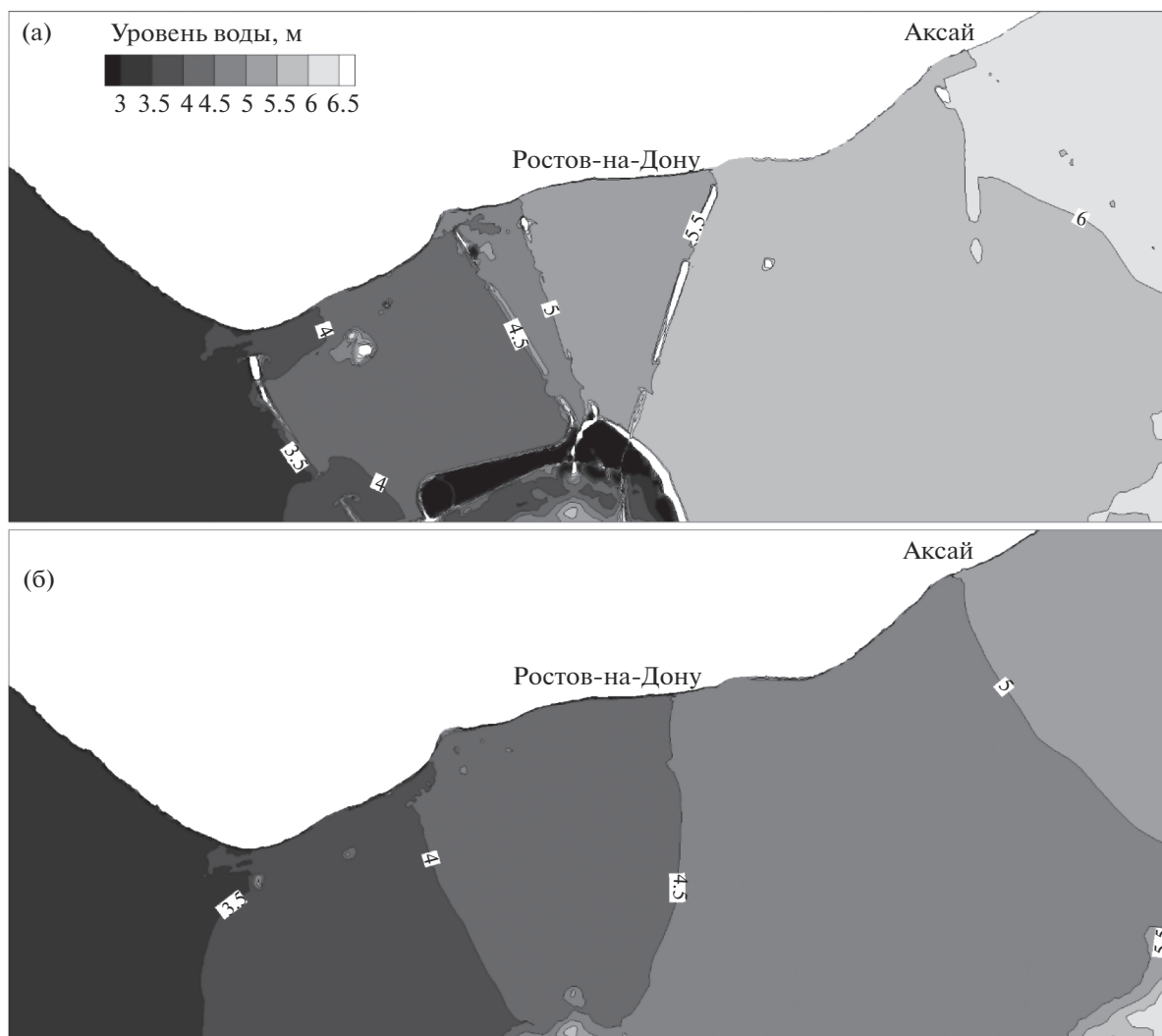


Рис. 7. Уровни воды при расходе $13200 \text{ м}^3/\text{с}$, рассчитанные на моделях в современных условиях (а) и на период начала XX в. (б).

5200, 13200 (обеспеченность 1%) и $18100 \text{ м}^3/\text{с}$ (обеспеченность 0.1%). На рис. 8 хорошо видно, что дополнительный подъем уровня, связанный с застройкой поймы, может достигать 0.5–1 м и более в зависимости от максимального расхода и расположения створа. Максимальные дополнительные подъемы уровня ($>1 \text{ м}$ при экстремальных расходах 13200 и $18100 \text{ м}^3/\text{с}$) возникают в створе г. Аксай, что вызвано перекрытием всей поймы Нижнего Дона в этом месте и ниже по течению высокими дорожными насыпями. По той же причине на этом участке почти весь расход концентрируется в русле реки, что приводит к существенному увеличению скоростей течения при пропуске высоких половодий (рис. 6а). Это в свою очередь может интенсифицировать общий

размыв дна русла, активизировать подмыв мостовых опор и вызвать разрушение мостов через р. Дон на участке Аксай, Ростов-на-Дону, Батайск.

ВЫВОДЫ

На основе высокоточной цифровой модели рельефа долины и русла Нижнего Дона и детализированной адаптивной гибридной сетки построена и откалибрована численная гидродинамическая 2D-модель Нижнего Дона от Кочетовского гидроузла до Таганрогского залива Азовского моря протяженностью $\sim 180 \text{ км}$.

По результатам численного моделирования сделан вывод, что при расходах воды малой обеспеченности (1 и 0.1%) рассчитанные кривые

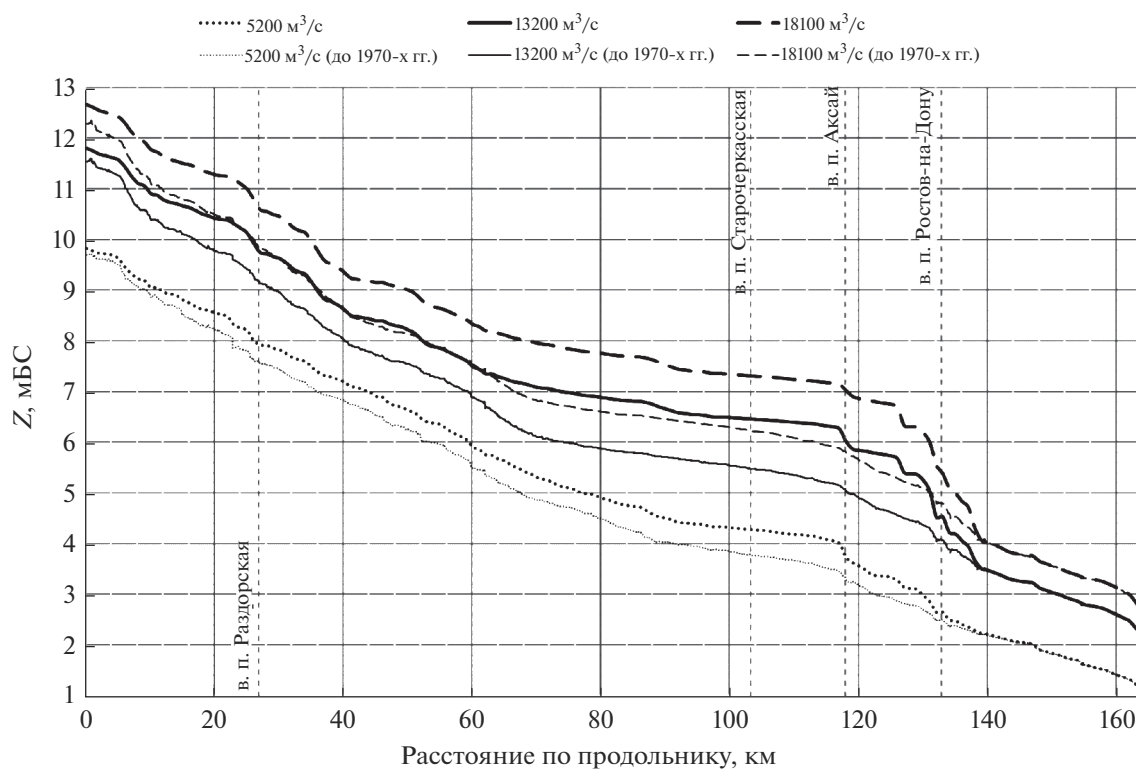


Рис. 8. Продольные профили водной поверхности р. Дон при расходах редкой обеспеченности, рассчитанные на моделях для современных условий и для начала XX в.

связи расходов и уровней в створах гидрологических постов существенно отличаются от кривых Росгидромета по уровням в большую сторону при тех же расходах. Сделано предположение, что это связано с интенсивным хозяйственным освоением поймы Нижнего Дона, особенно в 1960–1970-х гг., но не проявлялось в силу длительного маловодного периода.

Подтверждение этой гипотезы получено путем ретроспективного гидродинамического моделирования с измененным рельефом поймы, по возможности приведенным к состоянию на начало XX в. Рассчитанные для этого рельефа кривые связи расходов и уровней на водпостах хорошо совпадают с кривыми Росгидромета.

Сопоставление рассчитанных уровней воды для одних и тех же расходов в современных и столетней давности условиях убедительно показывает существенное антропогенное воздействие на уровеньный режим Нижнего Дона, которое должно быть учтено в актуализированных кривых Росгидромета. Кривые связи $Q(H)$ для створов гидропостов требуют корректировки в области больших расходов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексюк А.И., Беликов В.В. Программный комплекс STREAM 2D CUDA для расчета течений, деформаций дна и переноса загрязнений в открытых потоках с использованием технологий Compute Unified Device Architecture (на графических процессорах NVIDIA) // Свид. гос. регистрации программ для ЭВМ № 2017660266 от 20.09.2017.
2. Беликов В.В., Борисова Н.М., Васильева Е.С., Кочетков В.В. Обеспечение гидрологической безопасности при застройке пойменных территорий на примере долины Нижнего Дона // "Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов" Материалы Третьей всерос. конф. с международ. участием. Барнаул, 2010. С. 496–499.
3. Беликов В.В., Кочетков В.В., Борисова Н.М., Ковалёв С.В., Никитина Н.В. Применение ГИС-технологий и специализированных баз данных при численном моделировании экстремальных затоплений поймы Нижнего Дона // Тр. науч.-практ. конф. "Управление водно-ресурсными системами в экстремальных ситуациях" М., 2008. С. 121–125.
4. Бубер А.Л., Головинов Е.Э., Бубер А.А., Талызов А.А. Построение интегрированной цифровой модели рельефа для разработки гидродинамической модели Нижнего Дона и визуализации результатов расчетов с учетом влияния низконапорных гидроузлов и сгонно-нагонных явлений // Материалы

- Международ. науч. конф. Ростов-на-Дону: ЮНЦ РАН, 2019. С. 106–110. ISBN 978-5-4358-0182-8
5. *Aleksyuk A.I., Belikov V.V.* Simulation of shallow water flows with shoaling areas and bottom discontinuities // *Comput. Math. Math. Phys.* 2017. V. 57. № 2. P. 318–339.
<https://doi.org/10.1134/S0965542517020026>
 6. *Aleksyuk A.I., Belikov V.V.* The uniqueness of the exact solution of the Riemann problem for the shallow water equations with discontinuous bottom // *J. Computational Physics*. 2019. V. 390. P. 232–248.
<https://doi.org/10.1016/j.jcp.2019.04.001>
 7. *Belikov V.V., Borisova N.M., Aleksyuk A.I., Rumyantsev A.B., Glotko A.V., Shurukhin L.A.* Hydraulic Substantiation of the Bagaevskaya Hydro Complex Project Based on Numerical Hydrodynamic Modeling // *Power Technol. Engineering*. 2018. November. V. 52. № 4. P. 372–388.
<https://doi.org/10.1007/s10749-018-0962-9>