

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПАВОДОЧНОЙ ВОЛНЫ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ РАЗЛИЧНОЙ ДЕТАЛЬНОСТИ*

© 2014 г. А.С. Калугин¹, И.Н. Крыленко^{2,1}

¹ *Институт водных проблем Российской академии наук, Москва*

² *Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва*

Ключевые слова: гидродинамическое моделирование, MIKE 11, р. Дон, р. Тверца.



А.С. Калугин



И.Н. Крыленко

С использованием программного комплекса MIKE 11 и детальной морфометрической и гидрометрической информации для участка р. Тверцы в нижнем бьефе Новотверецкой ГЭС адаптирована одномерная модель неустановившегося движения воды. На основе общедоступных топографических данных и информации гидрологических постов откалибрована и проверена на независимом материале одномерная модель движения паводковой волны для 600-километрового участка р. Дон. Проведена оценка чувствительности моделей к составу и детальности исходных данных о морфометрических характеристиках русла и поймы.

С использованием программного комплекса MIKE 11 и детальной морфометрической и гидрометрической информации для участка р. Тверцы в нижнем бьефе Новотверецкой ГЭС адаптирована одномерная модель неустановившегося движения воды. На основе общедоступных топографических данных и информации гидрологических постов откалибрована и

Использование математических моделей движения водных потоков в речной сети позволяет расширить представление об особенностях водного режима, количественно оценить скорости перемещения паводковых волн, глубины и границы затопления территорий и другие характеристики. При этом появляются возможности не только для исследования водного режима в наблюдавшихся условиях, но и для решения прогностических задач, например, оценки его возможных изменений вследствие антропогенных изменений морфометрии речных русел, изучения особенностей прохождения паводков, превышающих зарегистрированные за период инструментальных измерений и т. д. Реализация этих возможностей зависит в

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №№ 13-05-00791, 13-07-12120).

значительной мере от полноты и надежности данных, используемых для построения гидродинамических моделей. При этом объем исходной информации, достаточный для расчета характеристик водного режима с заданной точностью, может заметно отличаться для разных речных систем в зависимости от особенностей морфометрии русла и поймы, изменчивости их характеристик по длине реки, наличия гидротехнических сооружений и т. д. Важное значение в этой связи приобретает накопление опыта использования гидродинамических моделей для описания движения воды в речных системах, по-разному обеспеченных исходными данными, а также разработка методов оценки чувствительности расчетов к полноте и составу этих данных.

Цель данного исследования – определение возможностей математического моделирования неустановившегося движения воды в речной системе при использовании разных по составу и детальности исходных данных о морфометрических характеристиках русла и поймы. В качестве инструмента исследования использовали одномерную гидродинамическую модель, основанную на решении уравнений Сен-Венана и реализованную в рамках программного комплекса MIKE 11 [1].

Система уравнений Сен-Венана при одномерной схематизации потока включает одномерное уравнение неустановившегося движения воды (1) и уравнение неразрывности (2):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{(u - u_q) q}{F} = g(i_0 - i_f); \quad (1)$$

$$\frac{\partial (uF)}{\partial x} + \frac{\partial (hB)}{\partial t} = q, \quad (2)$$

где x – расстояние от начального створа;

t – время;

g – ускорение силы тяжести;

$u, h, B, F = Bh$ – средняя скорость, средняя глубина и ширина потока, площадь живого сечения, соответственно;

q – боковой приток в единицу времени на единицу длины;

u_q – относительная скорость бокового притока;

i_0 – уклон водотока, который считается положительным в сторону уменьшения отметок дна;

i_f – уклон трения, задаваемый обычно по формуле $\frac{U^2}{C^2 h}$;

C – коэффициент Шези.

В рамках программного комплекса МКЕ 11 реализовано численное решение системы уравнений Сен-Венана на основе неявной конечно-разностной схемы. Исходными данными для моделирования является информация о морфометрии речных долин, представленная в виде поперечных профилей. В качестве граничных условий задаются расходы воды на верхней и уровни воды на нижней границе расчетного участка как функции времени, начальные условия задаются в виде уровней водной поверхности в пределах расчетного участка на начало расчета. Для одномерных уравнений Сен-Венана основным калибровочным параметром является коэффициент шероховатости. Результатом моделирования – временной ход расходов и уровней воды в пределах расчетного участка.

Для моделирования были выбраны два объекта: р. Тверца и р. Дон.

Моделирование неустановившегося движения воды на участке р. Тверцы

Первым объектом исследования явился участок р. Тверцы, в пределах которого Государственным гидрологическим институтом (ГГИ) в августе 1959 г. было организовано уникальное детальное исследование распространения волн попусков, материалы которого послужили основой для ряда работ по исследованию неустановившегося движения воды, в том числе на основе методов математического моделирования [2–5]. Участок начинался от Новотверецкой ГЭС, включая полторакилометровый отводящий канал, и заканчивался у с. Бабьего, в 48 км ниже ГЭС (рис. 1). Река Тверца выше места выхода в нее отводящего канала ГЭС на период эксперимента была отделена временной земляной перемычкой.

В пределах рассматриваемого участка р. Тверца принимает пять небольших притоков, общий расход которых в августе 1959 г. по специально проведенным замерам был оценен приблизительно в $0,49 \text{ м}^3/\text{с}$. Если эти расходы сопоставить с расходами попусков, величина которых колебалась приблизительно в пределах от 20 до $120 \text{ м}^3/\text{с}$, очевидно, что боковая приточность не могла повлиять на ход неустановившегося процесса движения воды, и с этой точки зрения экспериментальный участок следует рассматривать как бесприточный [2].

Исследованный участок р. Тверцы характеризовался значительным разнообразием морфологических условий – от правильного почти прямолинейного русла типа канала до извилистого русла с широкой поймой, что позволило изучить влияние форм русла на распространение волн попусков. В пределах участка было расположено 8 гидрометрических створов на расстоянии 0,43; 1,38; 4,88; 11,8; 20,6; 27,8; 39,7; 48 км от ГЭС.

Ширина реки в межень составляла 25–30 м, расход в пределах бровок русла около $40 \text{ м}^3/\text{с}$, а максимальные расходы немного больше $100 \text{ м}^3/\text{с}$.

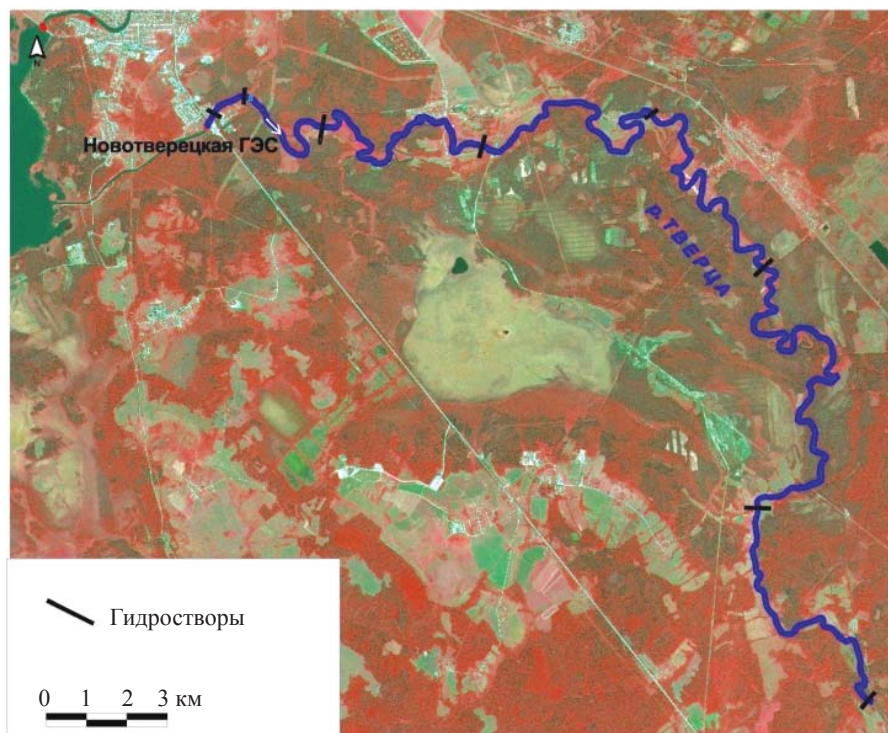


Рис. 1. Схема размещения гидрологических створов исследуемого участка р. Тверцы.

Значительная часть экспериментального участка имеет пойму, ширина которой составляет 100–600 м (средняя около 250 м). Выход воды на пойму и спрямление потока при высоких уровнях наиболее выражены на участках 7–8 км и 16–32 км от ГЭС [3]. В пределах отводящего канала (до второго створа) поймы нет, также она практически отсутствует в нижней части участка (37–48 км от ГЭС), где поток течет по глубоко врезанной долине. Пойма имеет сглаженный микрорельеф и в основном не выходит за пределы полосы меандрирования, поперечный уклон на пойме направлен в сторону меженного русла.

Исходные данные для моделирования

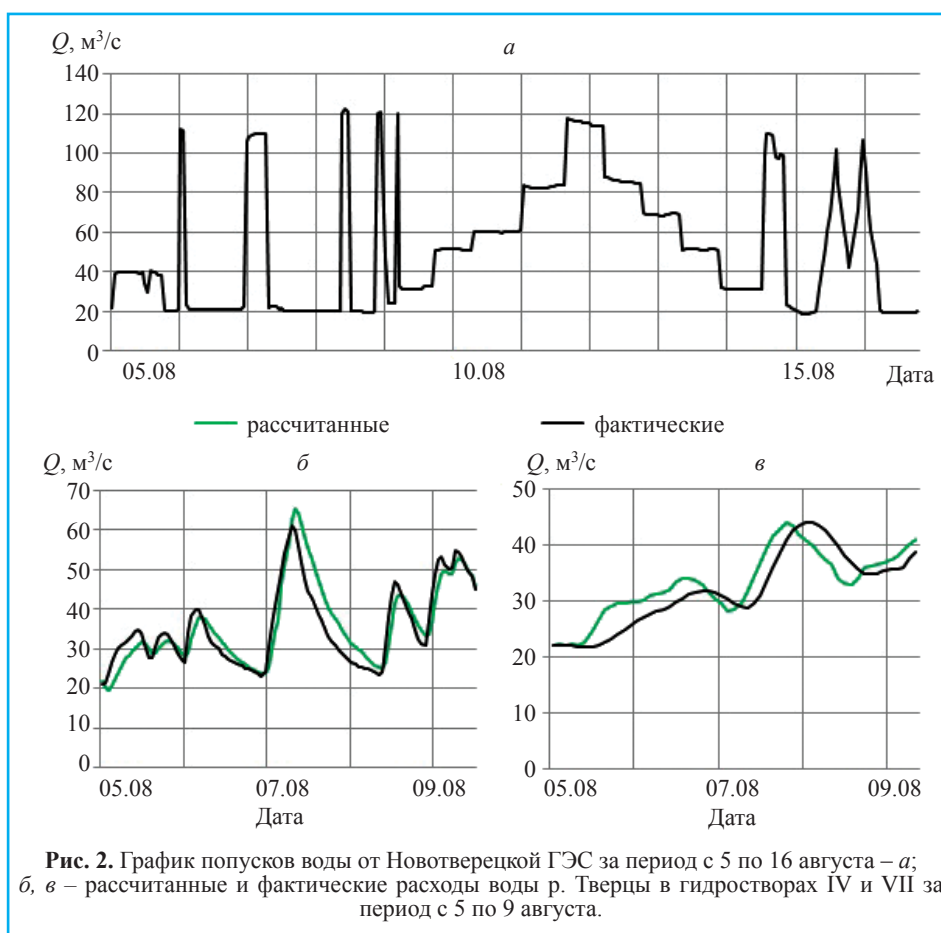
На основе космического снимка был выделен исследуемый участок русла р. Тверцы протяженностью 48 км и по данным экспедиции ГГИ подготовлена информация о рельефе в виде 200 поперечных профилей через долину реки. В качестве граничных условий на верхней границе расчетного участка задавались значения расходов воды, измеренные с переменной частотой от 5 мин до 2 ч – на нижней границе задавались уровни воды по VIII гидроствору у с. Бабьего.

Эксперименты, состоявшие из ряда осуществляемых по графику попусков, проводили в течение 13 сут и позволили выявить влияние как самого типа попуска, так и геоморфологических особенностей долины реки.

Попуски должны были начинаться при расходе 40 м³/с, когда работали обе турбины ГЭС, и закончиться при расходе 20 м³/с.

Исходя из указанных требований была разработана следующая схема попусков [2] (рис. 2а):

- малые попуски 5 августа с расходами около 40 м³/с для изучения неустановившегося движения, происходящего без выхода воды на пойму;
- серия кратковременных попусков 6–9 августа продолжительностью от 2 до 8 ч с максимально возможными расходами (до 100–120 м³/с) с целью изучения неустановившегося движения в условиях затопляемой поймы;
- длительный попуск 10–14 августа при постепенном ступенчатом нарастании расходов от 30 до 120 м³/с и последующем ступенчатом убывании



до 40 м³/с. Этот попуск, помимо имитирования естественного паводка, предназначался также для создания в реке режимов, близких к установившемуся (в конце ступеней), что должно было облегчить построение кривых расходов на гидростворах;

– кратковременный попуск 15 августа, аналогичный попускам 6–9 августа, но осуществленный в условиях поймы, насыщенной водой;

– кратковременный ступенчатый попуск 16 августа с двумя максимумами с кратковременными ступеньками продолжительностью по 1 ч.

Калибровка и валидация модели

После построения модели участка речной долины следующим этапом стала ее калибровка для достижения минимальных отклонений расчетов от данных измерений посредством подбора коэффициентов шероховатости русла и поймы.

Для калибровки модели р. Тверцы был выбран период кратковременных попусков с 5 по 9 августа. Наиболее полное соответствие рассчитанных и фактических расходов и уровней воды было достигнуто при коэффициенте шероховатости Маннинга 0,045 с/м^{1/3} для всего моделируемого участка (рис. 2б, в).

Проверку модели на независимом материале проводили путем сопоставления расчетных и фактических данных о расходах и уровнях воды за период наблюдений с 10 по 17 августа, включающий продолжительный многоступенчатый попуск (рис. 3).

Для оценки эффективности расчетов использован распространенный в гидрологических исследованиях критерий Нэша–Сатклифа R_{NS}^2

$$R_{NS}^2 = \frac{F_0^2 - F^2}{F_0^2}, \quad (3)$$

где $F_0^2 = \sum_i (Q_i - Q_{\text{ср}})^2$, $F^2 = \sum_i (Q_{i,p} - Q_i)^2$;

$Q_{i,p}$ – рассчитанный по модели расход воды в i -е сутки;

Q_i – фактический расход;

$Q_{\text{ср}}$ – средняя величина фактического расхода воды за период расчета.

Чем ближе R_{NS}^2 к единице, тем выше точность моделирования, т. е. меньше средняя и среднеквадратическая погрешности расчета. Значения $R_{NS}^2 \leq 0$ означают, что модель неэффективна (табл. 1).

Результаты расчетов показывают, что в целом разработанная гидродинамическая модель адекватно отражает динамику хода расходов и уровней воды на экспериментальном участке р. Тверцы. Для расходов воды критерий Нэша – Сатклифа варьируется за период калибровки от 0,75 до 0,99, что соответствует хорошим значениям ($R_{NS}^2 \geq 0,75$). За период валидации R_{NS}^2 для расходов воды лучше, чем за калибровочный период – от 0,82 до 0,99.

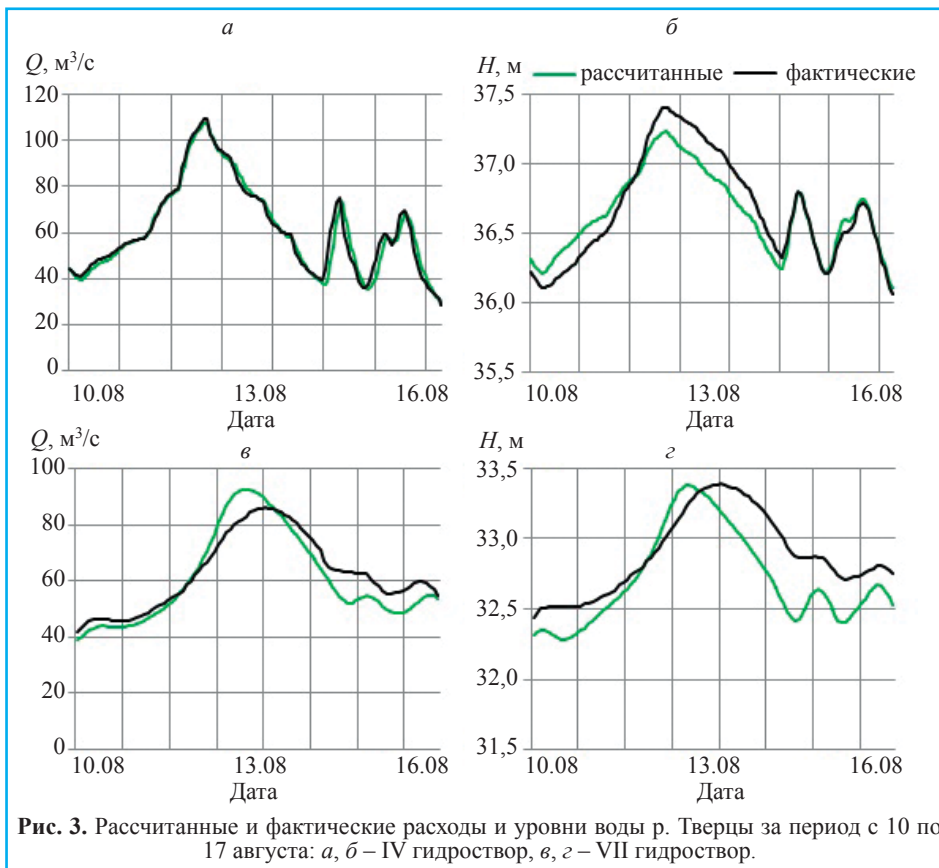


Таблица 1. Значения критерия Нэша – Сатклифа за период калибровки (с 5 по 9 августа) и валидации (с 10 по 17 августа)

№ гидроствора	Калибровка	Валидация	
	расходы воды	расходы воды	уровни воды
I	0,99	0,99	0,96
II	0,97	0,99	0,92
III	0,92	0,96	0,91
IV	0,89	0,97	0,88
V	0,87	0,92	0,70
VI	0,81	0,86	0,61
VII	0,77	0,82	0,38
VIII	0,75	0,88	–

Вероятно, это связано с тем фактом, что серия отдельных кратковременных попусков представляет собой неустановившееся движение, а длительный попуск при постепенном ступенчатом нарастании и убывании расходов создает в реке режим, близкий к установившемуся, т. е. поток лучше адаптируется к параметрам русла. По сравнению с модельными расчетами отставание пика при прохождении продолжительного попуска связано со значительным аккумулярующим действием поймы: довольно большое количество воды тратится на затопление и возвращается в основное русло с задержкой на спаде попуска.

Результаты расчета уровней воды показали хорошее соответствие наблюдаемых и рассчитанных значений до IV гидроствора (11,8 км от ГЭС). Ниже IV гидроствора достигается лишь удовлетворительный результат моделирования ($0,36 \leq R_{NS}^2 < 0,75$) из-за того, что геометрические характеристики речного русла и поймы обладают большой пространственной изменчивостью и данные по гидростворам становятся недостаточно репрезентативными (объемы речного русла, вычисленные по данным измерений в гидрометрических створах, являются заниженными) [4]. В результате рассчитанные гидрографы имеют более резкие подъемы и спады, чем наблюдаемые, а рассчитанные скорости добега гребней волн попусков получаются завышенными. Схожий эффект при моделировании неустановившегося движения воды на этом участке отмечали и другие исследователи [2, 5].

Оценка чувствительности модельных расчетов к изменению морфометрических характеристик русла

Наличие достаточно подробных данных о морфометрии русла, расходах и уровнях воды позволило оценить качество моделирования прохождения попусков при сокращении числа поперечных профилей.

Чтобы установить влияние морфометрии были проведены расчеты за период с 10 по 17 августа при задании в качестве исходной информации разного количества поперечных профилей – 200, 20, 10, 5 и 2. Результаты расчетов по V и VII гидростворам, как наиболее показательные, представлены на рис. 4. Для I, II и III гидростворов при разном количестве поперечных профилей наблюдалось совпадение результатов расчета, т. е. разница между натурными данными и рассчитанными по модели на участке протяженностью почти 5 км не выражена.

При сокращении числа поперечников возрастает амплитуда колебаний расходов и уровней воды, уменьшается время добега волны попуска.

При исходных данных 5, 10, 20 и 200 поперечных профилей русла осредненное для определенного числа поперечных профилей значение R_{NS}^2 для расходов воды варьируется от 0,85 при 5 поперечниках до 0,93 при 200 профилях (табл. 2), что соответствует хорошим значениям критерия. Это свидетельствует

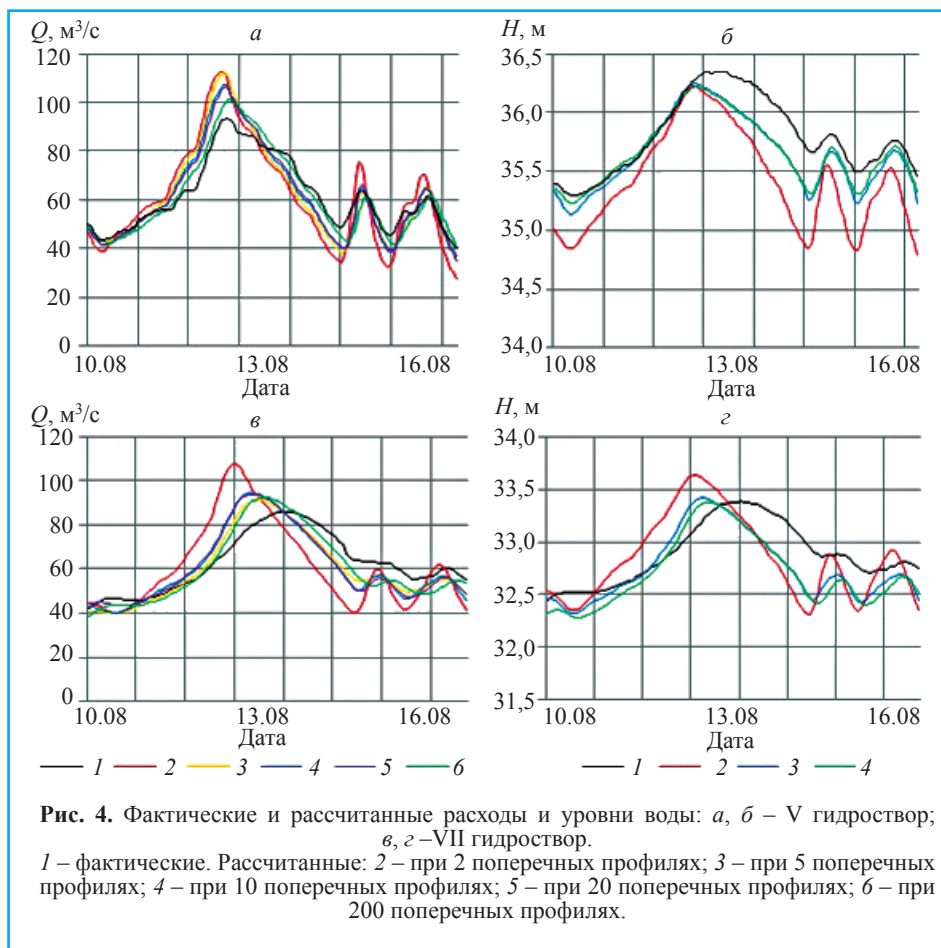


Таблица 2. Значения критерия Нэша – Сатклифа для расходов воды при разном количестве поперечных профилей

Количество профилей	№ гидроствора								Среднее
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	
200	0,99	0,99	0,98	0,97	0,92	0,86	0,88	0,82	0,93
20	0,99	0,99	0,98	0,99	0,86	0,82	0,69	0,64	0,87
10	0,99	0,96	0,97	0,98	0,85	0,78	0,72	0,64	0,86
5	0,98	0,98	0,97	0,93	0,81	0,8	0,73	0,58	0,85
2	0,98	0,98	0,97	0,87	0,45	0,01	-0,3	-0,33	0,45

Таблица 3. Значения критерия Нэша – Сатклифа для уровней воды при разном количестве поперечных профилей

Количество профилей	№ гидроствора							Среднее
	I	II	III	IV	V	VI	VII	
200	0,96	0,95	0,91	0,88	0,70	0,61	0,33	0,76
10	0,95	0,93	0,92	0,70	0,65	0,58	0,41	0,73
5	0,89	0,83	0,72	0,66	-0,72	-1,1	-0,2	0,15

о сопоставимости результатов расчета неустановившегося движения воды в этих случаях. Обратная картина наблюдается при задании двух створов. Результаты расчетов значительно ухудшаются из-за недостаточности данных об исходных параметрах русла. В итоге задание пяти поперечных профилей является граничным положением, при котором возможно для данного участка воспроизвести расходы воды на основе моделирования.

Расчеты неустановившегося движения при разном количестве поперечников были проанализированы и для уровней воды (табл. 3). При 10 и 200 поперечных профилях русла осредненное значение R_{NS}^2 составило 0,76 и 0,73 соответственно, что отражает сопоставимость результатов расчета. При пяти створах результаты расчетов значительно хуже из-за недостаточности морфометрических данных, при этом на участке ниже IV гидроствора появляются значения $R_{NS}^2 < 0$, т. е. модель неэффективна.

Таким образом, приемлемые результаты моделирования достигаются на исследуемом участке р. Тверцы при задании в качестве исходной морфометрии не менее 5 поперечных профилей русла (около 1 профиля на 10 км) для оценки трансформации расходов воды и не менее 10 поперечных профилей русла (около 1 профиля на 5 км) при расчете уровней воды (рис. 5).

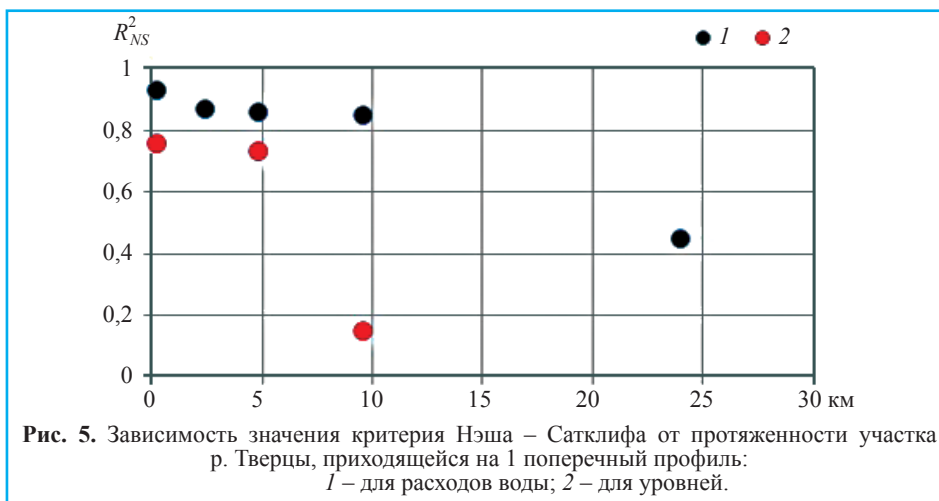


Рис. 5. Зависимость значения критерия Нэша – Сатклифа от протяженности участка р. Тверцы, приходящейся на 1 поперечный профиль:
1 – для расходов воды; 2 – для уровней.

Моделирование движения воды на участке р. Дон

В дальнейшем результаты применения модели MIKE 11 для описания движения воды в русле р. Тверцы с использованием данных детальных измерений были использованы при разработке одномерной гидродинамической модели р. Дон при наличии лишь ограниченного набора исходных данных, типичного для большинства участков рек, а именно – топографических карт и данных гидрологических постов.

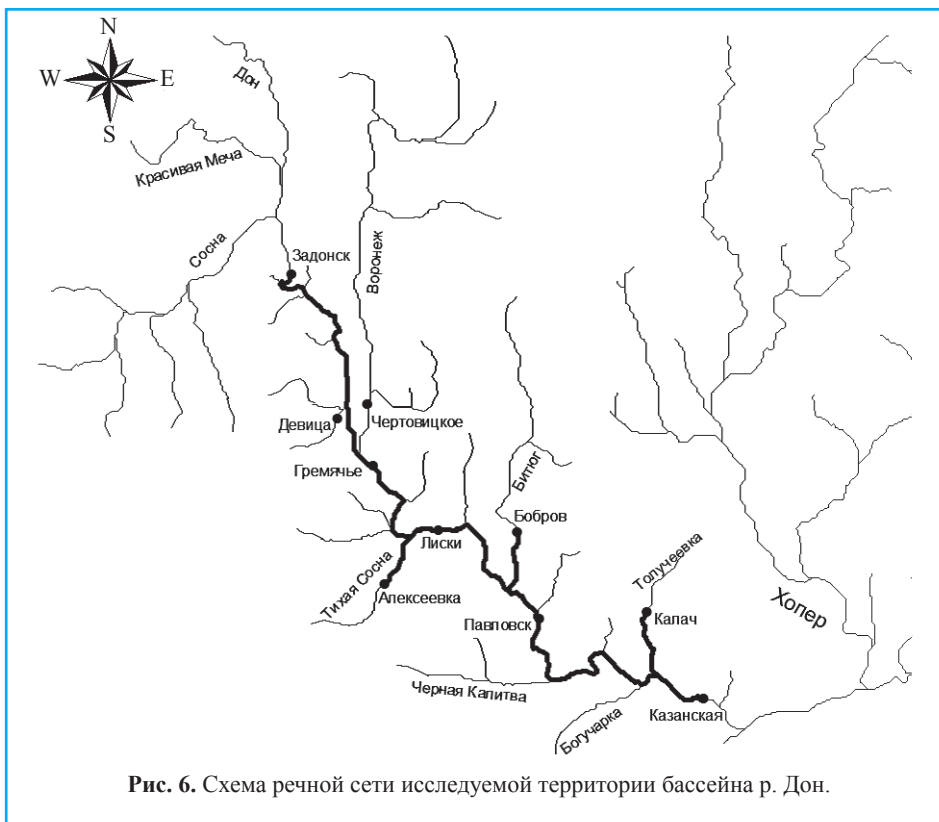
Объектом исследования стал участок р. Дон и ее притоки в пределах верхней части бассейна – от г. Задонска до ст-цы Казанской. Площадь этой части бассейна составляет 102 000 км². Авторам известны результаты успешного применения двумерной гидродинамической модели для участка р. Дон в районе г. Павловска [6]. В настоящей работе рассмотрены возможности адаптации одномерной модели для протяженного участка р. Дон.

Река Дон в верхнем течении имеет извилистое, устойчивое, преимущественно неразветвленное русло, неширокую асимметричную долину (0,5–0,8 км), которая по мере продвижения вниз увеличивается и у г. Воронежа составляет 2–3 км. Правый склон долины на всем протяжении реки высокий, левый – пологий. Пойма на Верхнем Доне у истока составляет около 200 м, постепенно расширяясь до 0,6–3,0 км, местами до 7 км [7]. На участке Верхнего Дона основными притоками являются реки Красивая Меча, Сосна, Воронеж, Тихая Сосна и Битюг. По характеру водного режима р. Дон и ее притоки относятся к рекам равнинного типа с резко выраженным половодьем и низкой маловодной меженью. Основным источником питания – талые воды. На долю весеннего стока (март–май) приходится 70–90 % годового, сток летне-осеннего (июль–ноябрь) и зимнего (декабрь–февраль) периодов составляет 10–30 % [8].

Исходные данные для моделирования

На основе топографических карт 1:100 000 масштаба на исследуемую территорию был создан ГИС-проект, выделены элементы речной сети, включая русло основной р. Дон от гидропоста (г/п) Задонск до г/п Казанская, а также притоки: р. Тихая Сосна от г/п Алексеевка, р. Битюг от г/п Бобров и р. Толучеевка от г/п Калач. В результате модель описывает русловую сеть протяженностью около 840 км, включающую 600-километровый участок русла Дона и три притока. На рис. 6 выделена моделируемая часть речной сети.

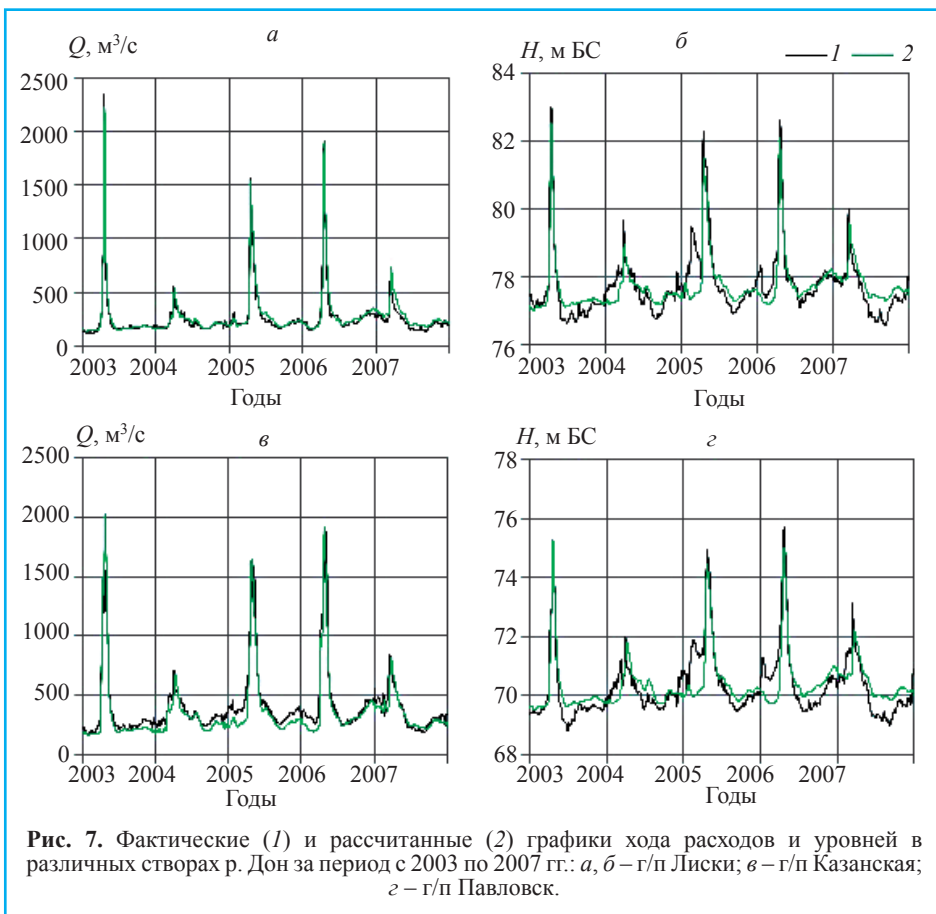
Информация о рельефе для модели была подготовлена в виде поперечных профилей долин рек с плановой привязкой и привязкой к абсолютной системе высот. Русло задавали в форме прямоугольника по данным ширины и средней глубины, которые указаны на топографических картах для межени периода. Дополнительной информацией о морфометрии русла



авторы не располагали. На исследуемом участке р. Дон было построено 50 поперечных профилей и 15 на притоках. При формировании блока граничных условий на верхней границе расчетного участка р. Дон – г/п Задонск и верхних границах на притоках Тихая Сосна – г/п Алексеевка, Битюг – г/п Бобров, Толучеевка – г/п Капач задавали среднесуточные значения расходов воды по данным гидрологических постов. На нижней границе – уровни воды по г/п Казанская. Неучтенный боковой приток рассчитывали по модулю стока ближайшего притока. В качестве начальных условий задавались абсолютные отметки урезов воды в меженный период.

Калибровка модели

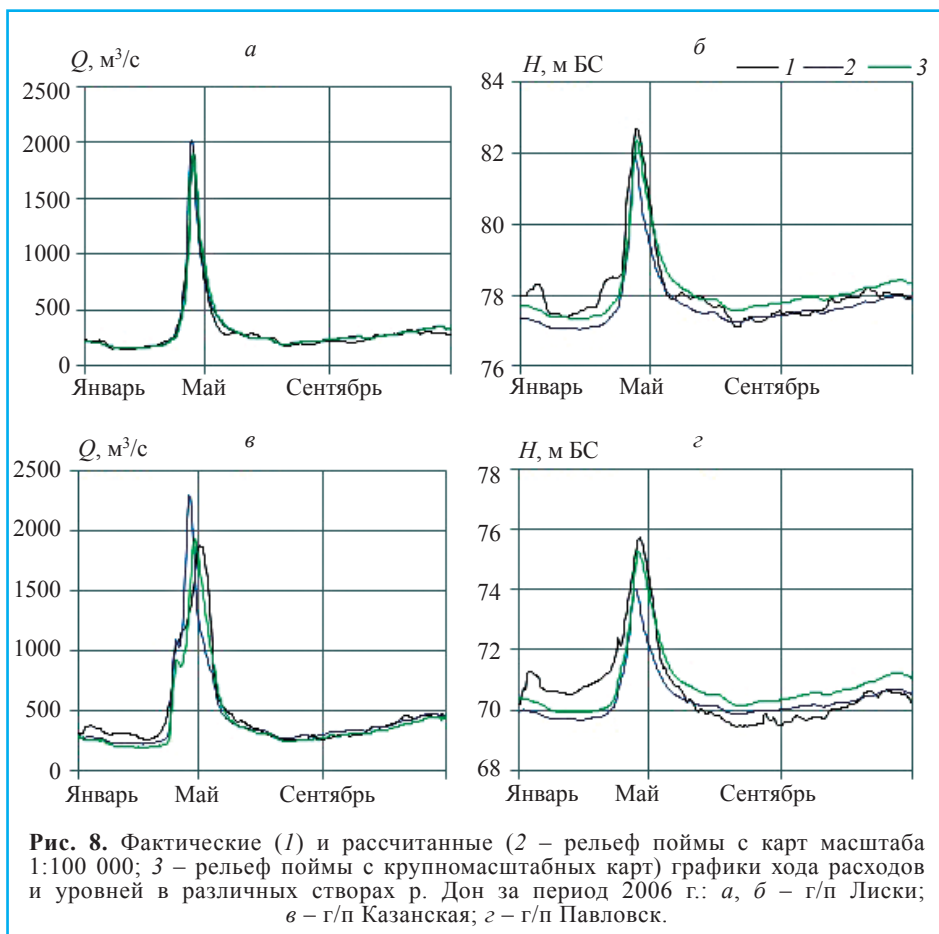
Для калибровки модели был выбран период наблюдений с 2003 по 2007 гг. При этом использовали фактические данные по следующим гидрологическим постам на р. Дон: Гремячье (173 км по руслу реки от Задонска), Лиски (285 км), Павловск (406 км), Казанская (605 км). Ставили цель получения надежных результатов работы модели с использованием минимума параметров, поэтому применяли постоянный коэффициент шероховатости для всего моделируемого участка. Наиболее полное (по критерию R_{NS}^2)



совпадение рассчитанных и фактических расходов и уровней воды наблюдалось при коэффициенте шероховатости Маннинга $0,035 \text{ с/м}^{1/3}$, что хорошо согласуется с общими представлениями о шероховатости русел равнинных рек (рис. 7).

При калибровке модели было обнаружено, что на результаты расчетов заметное влияние оказывают следующие факторы: возможности уточнения рельефа поймы на основе крупномасштабных карт, увеличение коэффициента шероховатости для пойменных участков и задание боковой приточности в основном в форме сосредоточенного, а не распределенного притока.

Изначально рельеф поймы задавался по данным оцифровки топографических карт масштаба 1:100 000. После чего было проведено уточнение рельефа поймы на основе карт масштаба 1:50 000 и 1:25 000. Результаты уточнения представлены на рис. 8 на примере 2006 г.



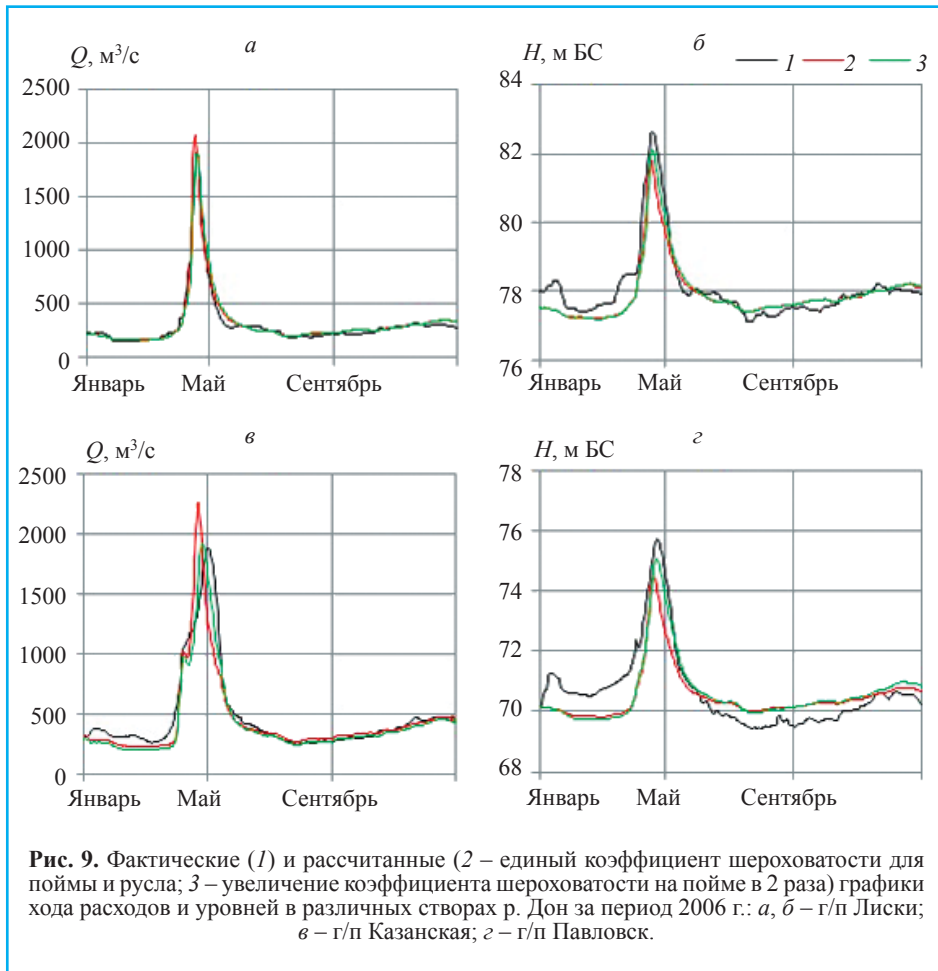
Следующим этапом, позволившим улучшить результаты моделирования, стало определение дифференцированного коэффициента шероховатости для русловой и пойменной части профиля (рис. 9). При калибровке было принято, что оптимальное значение коэффициента n для русла $0,035 \text{ с/м}^{1/3}$, а для поймы в 2 раза больше – $0,07 \text{ с/м}^{1/3}$.

Еще одним способом улучшения модельных расчетов явилось задание боковой приточности в основном в форме сосредоточенного, а не распределенного по длине р. Дон притока (рис. 10).

Валидация модели

Проверку модели на независимом материале проводили путем сопоставления расчетных и фактических данных о расходах и уровнях воды, не использовавшихся при калибровке, за период с 1998 по 2002 гг. (рис. 11).

Результаты калибровки и валидации показали, что разработанная гидродинамическая модель адекватно отражает динамику хода расходов и уров-



ней воды на исследуемом участке р. Дон. Критерий Нэша – Сатклифа варьируется для расходов воды по постам от 0,8 до 0,85, для уровней – от 0,53 до 0,87 (табл. 4), что соответствует хорошим и удовлетворительным значениям. Результаты расчета уровней воды оказались несколько хуже, чем расходов: вероятно, это связано с не учитываемым моделью увеличением шероховатости в зимне-весенний период вследствие влияния ледового покрова, что приводит к росту уровней воды.

Оценка чувствительности модельных расчетов к изменению морфометрических данных

Чтобы установить влияние детальности описания морфометрии долин на результаты моделирования были проведены расчеты за период 2003–2007 гг. при задании в качестве исходной информации разного

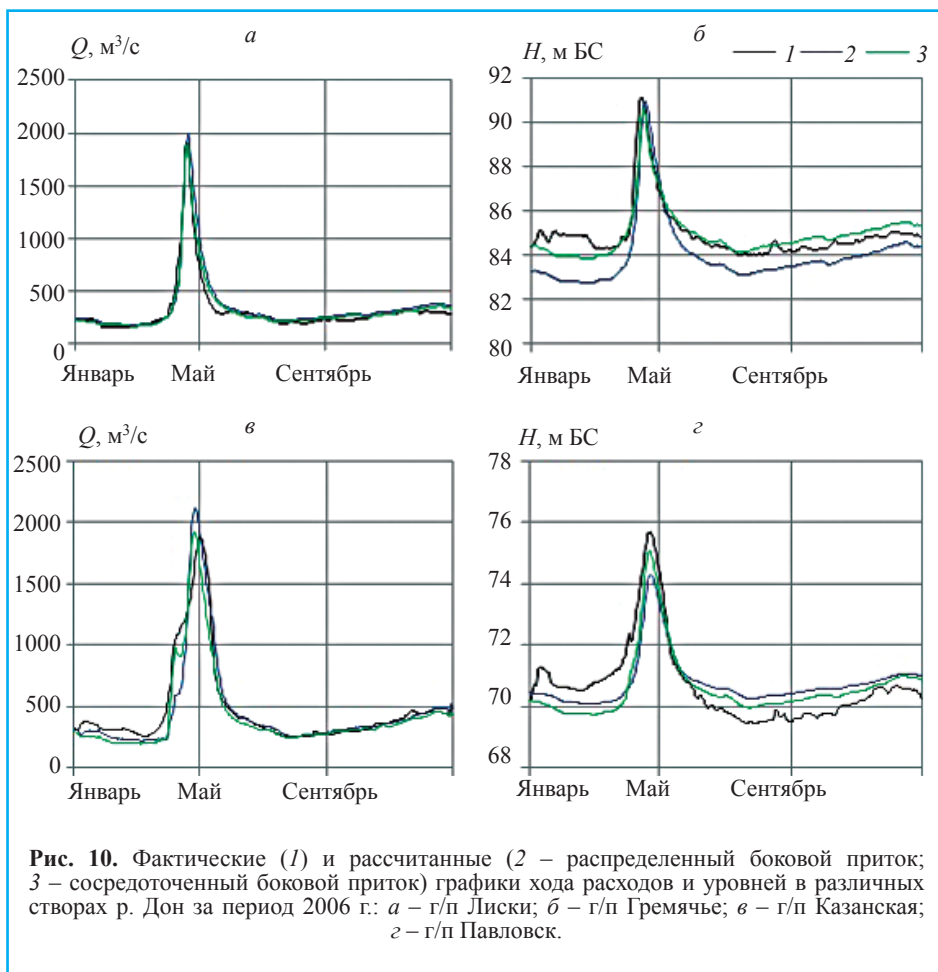


Рис. 10. Фактические (1) и рассчитанные (2 – распределенный боковой приток; 3 – сосредоточенный боковой приток) графики хода расходов и уровней в различных створах р. Дон за период 2006 г.: а – г/п Лиски; б – г/п Гремячье; в – г/п Казанская; г – г/п Павловск.

количества поперечных профилей долины р. Дон, а именно 50, 25 и 10 (рис. 12, табл. 5).

При более детальном описании морфометрии русла 50-ю поперечными профилями (один профиль на 12 км) и уменьшении их числа до 25 (один профиль на 24 км) наблюдаются несущественные отклонения модельных расчетов расходов и уровней воды от данных фактических измерений. При 10 створах значительно лучше результаты расчетов расходов воды, для уровней – результаты неудовлетворительные, т. е. для приемлемого расчета уровней воды на р. Дон морфометрия русла должна быть задана с частотой не менее одного профиля на 24 км (рис. 13). Схожие результаты моделирования получены для Среднего Амура [9].

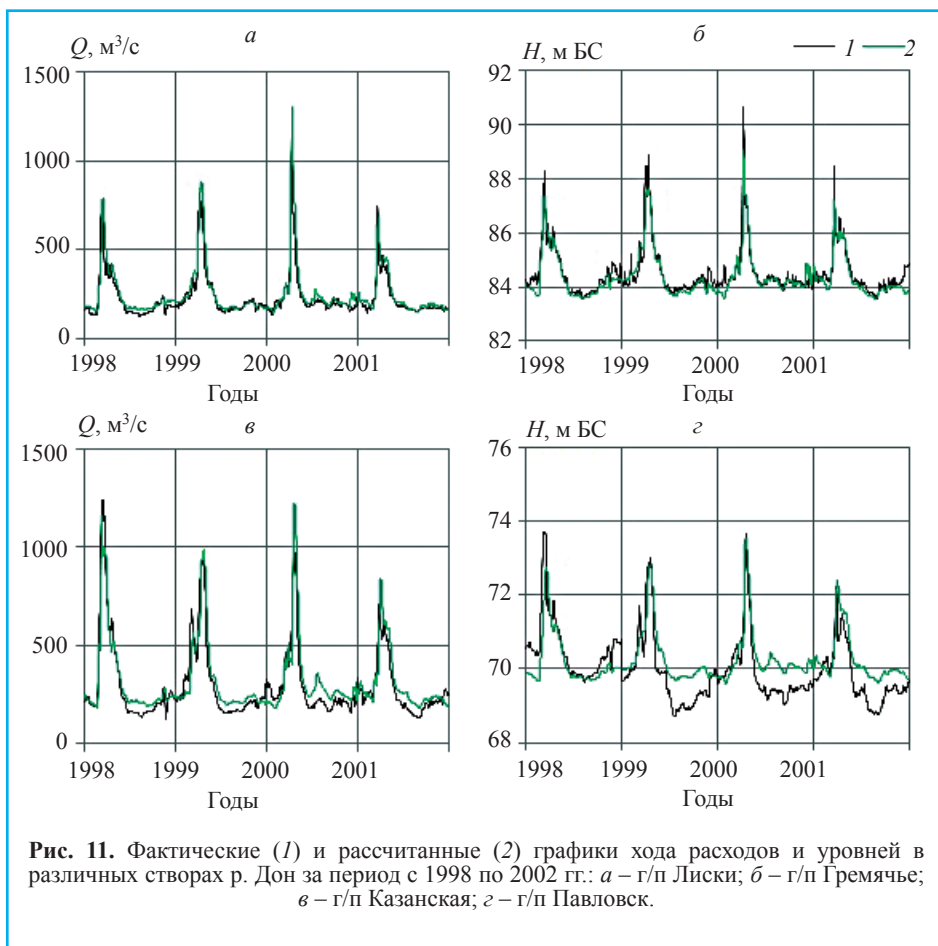


Таблица 4. Осредненные значения критерия Нэша – Сатклифа за период калибровки (2003–2007 гг.) и валидации (1998–2002 гг.)

Период	Гидропост				
	Лиски	Казанская	Гремячье	Лиски	Павловск
	Расходы воды			Уровни воды	
Калибровка	0,85	0,80	0,86	0,72	0,68
Валидация	0,85	0,82	0,87	0,54	0,53

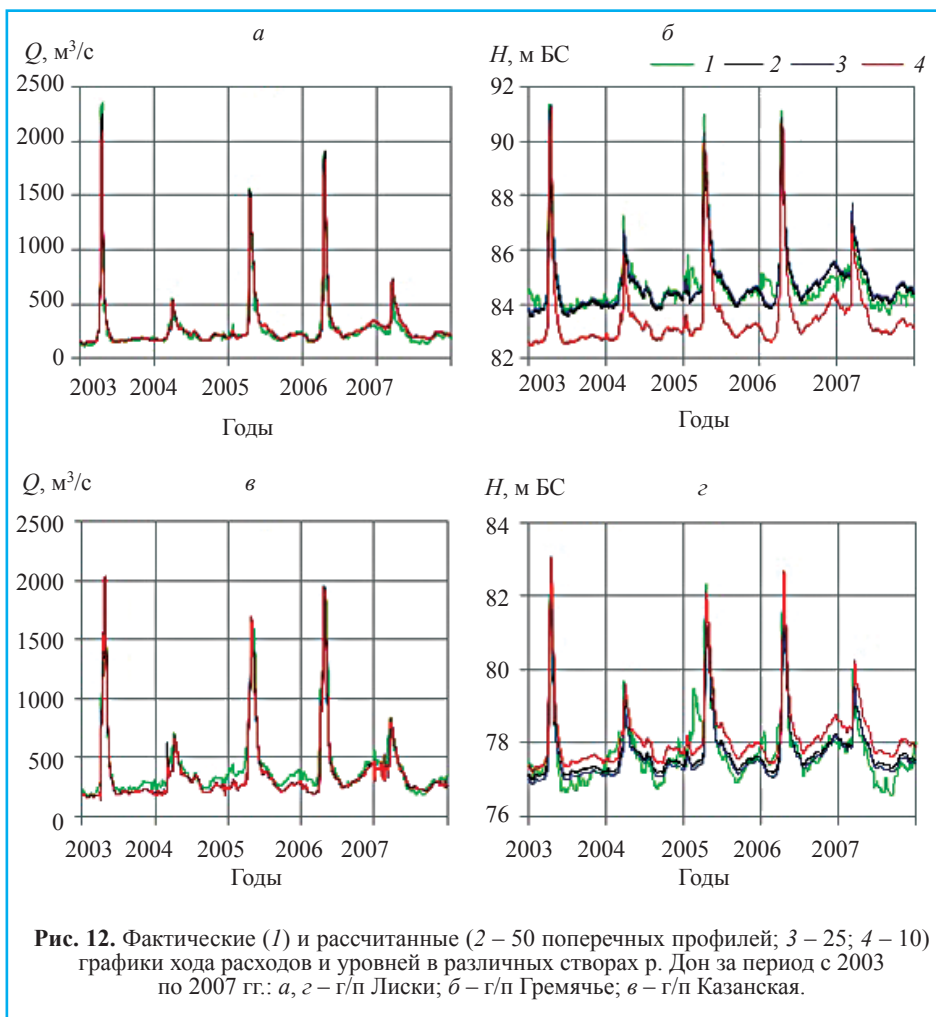
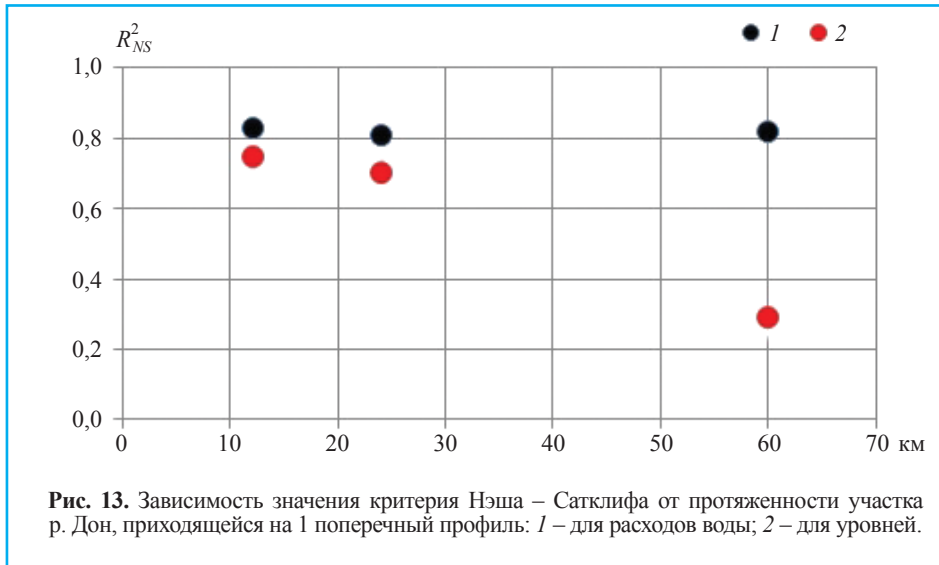


Таблица 5. Осредненные значения критерия Нэша – Сатклифа при разном количестве поперечных профилей долины р. Дон

Количество профилей	Гидропост						
	Лиски	Казанская	Среднее	Гремячье	Лиски	Павловск	Среднее
	Расходы воды			Уровни воды			
50	0,85	0,8	0,83	0,86	0,72	0,68	0,75
25	0,82	0,8	0,81	0,83	0,66	0,6	0,70
10	0,85	0,78	0,82	-0,18	0,53	0,51	0,29



Выводы

На основе детальных данных измерений адаптирована одномерная модель неустановившегося движения воды для 48-километрового участка р. Тверцы и с использованием общедоступных топографических карт и гидрологических данных для участка р. Дон и ее притоков общей протяженностью более 800 км; проведены калибровка, валидация и оценка чувствительности моделей к составу и детальности исходных данных. Показано, что для удовлетворительного моделирования расходов воды р. Тверцы необходимы морфометрические данные с частотой около 1 профиля на 10 км, а для протяженного участка р. Дон оказалось достаточно данных о рельефе долин, заданного на основе топографических карт масштаба 1:100 000 с частотой около 1 профиля на 20 км. Приемлемые результаты моделирования уровней воды р. Тверцы достигаются при задании исходной морфометрии с частотой около 1 профиля на 5 км. Для адекватного моделирования уровней воды р. Дон необходимо уточнять профили на основе крупномасштабных карт. Для улучшения результатов моделирования на крупной реке предложено дифференцировать коэффициенты шероховатости для русловой и пойменной частей поперечного профиля долины реки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Refsgaard J.C., Havno K., Ammentorp H.C. Applications of hydrological models for flood forecasting and flood control in India and Bangladesh // *Advances in Water Resources*. 1988. Vol. 11. P. 101–105.
2. Кондратьев Н.Е., Урываев В.А. Исследование неустановившегося движения воды на реках Тверце и Ордеже. Л.: Гидрометеиздат, 1961. 287 с.
3. Грушевский М.С. Волны попусков и паводков в реках. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 337 с.
4. Кучмент Л.С., Демидов В.Н., Мотовилов Ю.Г. Формирование речного стока. М.: Наука, 1983. 216 с.
5. Грушевский М.С. О влиянии пойм на распластывание волн попусков (по материалам наблюдений ГГИ на р. Тверце) // *Труды ГГИ*. 1964. Вып. 117.
6. Богомолов А.В., Лепихин А.П., Тиунов А.А. Использование численных гидродинамических моделей для оценки эффективности проектных решений по защите берегов (на примере реки Дон в районе города Павловска) // *Водное хозяйство России*. 2014. № 1. С. 50–57.
7. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 7. Донской бассейн. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 459 с.
8. Вода России. Речные бассейны. Екатеринбург: Аква-Пресс, 2000. 536 с.
9. Данилов-Данильян В.И., Гельфан А.Н., Мотовилов Ю.Г., Калугин А.С. Катастрофическое наводнение 2013 года в бассейне реки Амур: условия формирования, оценка повторяемости, результаты моделирования // *Водные ресурсы*. 2014. Т. 41. № 2. С. 111–122.

Сведения об авторах:

Калугин Андрей Сергеевич, аспирант, группа гидрологии речных бассейнов, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт водных проблем Российской академии наук», 119333, Москва, ул. Губкина, 3; e-mail: kalugin-andrei@mail.ru

Крыленко Инна Николаевна, канд. географ. наук, старший научный сотрудник, кафедра гидрологии суши, географический факультет, Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1; e-mail: krylenko_i@mail.ru