

УДК 556.5

ЧИСЛЕННОЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ 2D-МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАТОПЛЕНИЯ г. ТУЛУНА НА р. ИЯ В ПАВОДОК 2019 г.¹

© 2021 г. В. В. Беликов^{а, *}, Н. М. Борисова^{а, **}, А. В. Глотко^{а, б}

^аИнститут Водных Проблем РАН, Москва, 119333 Россия

^бНациональный исследовательский московский государственный строительный университет, Москва, 129337 Россия

*e-mail: belvv@bk.ru

**e-mail: borisovanm@mail.ru

Поступила в редакцию 13.10.2020 г.

После доработки 15.12.2020 г.

Принята к публикации 21.01.2021 г.

На основе детальной 3D-цифровой модели рельефа местности и высокоточной эффективной программы 2D-моделирования STREAM 2D CUDA с использованием фактической информации о метках высоких вод и динамики изменения уровней воды в паводок 2019 г. на р. Ия в районе г. Тулуна проведена оценка величины максимального расхода воды и построен гидрограф экстремального паводка в районе г. Тулуна. Рассчитанная сложная динамика затопления города, расположенного в обвалованной излучине реки, хорошо совпала с данными наблюдений.

Ключевые слова: уравнения мелкой воды, численное моделирование, гидрограф паводка, динамика затопления.

DOI: 10.31857/S0321059621040027

ВВЕДЕНИЕ

Река Ия протекает по территории Иркутской области. Длина реки 484 км, площадь бассейна 18.1 тыс. км² (до г. Тулун 14.5 тыс. км²). Берет начало на северных склонах Восточного Саяна, впадает в Окинский залив Братского водохранилища. Питание главным образом дождевое и грунтовое. Средний годовой расход воды у г. Тулуна (119 км от устья) 149 м³/с (4.7 км³/год), максимальный расход (без учета 2019 г.) – 4040 (1984 г.), минимальный – 4.5 м³/с. Паводок, накрывший в июне–июле 2019 г. несколько районов Иркутской области, стал крупнейшим в регионе за все время наблюдений. Город Тулун, стоящий на р. Ия, подвергся значительному затоплению и вызванным им масштабным разрушениям. В июне 2019 г. начал расти уровень воды в р. Ия и 29 июня достиг отметки 1382 см над нулем графика водомерного поста, при критической отметке 700 см. Дамбы, отсыпанные за несколько лет до этого, подверглись переливу и оказались неспособны уберечь жилые дома от затопления и разрушения.

После наводнения силами нескольких научно-исследовательских институтов и проектных организаций были выполнены обширные комплексные исследования причин, динамики и последствий этого экстраординарного паводка, а также предложены мероприятия по защите г. Тулуна и других населенных пунктов долины р. Ия от подобных стихийных бедствий в будущем. Поскольку величина максимального расхода воды на пике паводка 2019 г. не была измерена на водопосту р. Ия – г. Тулун либо в каком-то другом поблизости расположенном створе, его достоверная оценка стала одним из ключевых моментов для всех проведенных исследований.

Для определения величины максимального расхода, объема стока и формы гидрографа паводка в створе г. Тулун различными авторами применялись гидрологические, морфометрические и гидродинамические методы, а также физическое моделирование. Одними из первых численное гидродинамическое моделирование формирования динамики паводковой волны в долине р. Ия выполнено А.В. Шаликовским и соавторами и опубликовано в работе [5]. Полученный максимальный расход составил ~2900 м³/с.

В Институте водных проблем (ИВП) РАН выполнено численное гидрологическое моделирование паводкового стока на основе программного

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания ИВП РАН (Раздел 3.2) (тема 0147-2019-0003, государственная регистрация АААА-А18-118022090105-5).

комплекса ЭКОМАГ [3, 8]. Полученный максимальный расход составил $5640 \text{ м}^3/\text{с}$. Специалистами ООО “Байкалпроект” на основе гидродинамического 1D-моделирования получен максимальный расход $5630 \text{ м}^3/\text{с}$.

Государственный гидрологический институт (ГГИ) провел гидрологическое моделирование на основе двух вариантов формирования осадков на водосборе р. Ия (по данным метеостанций и по глобальной модели погоды ICON) с применением программного комплекса “Гидрограф” [4]. Максимальные среднесуточные расходы получились равными 6570 и $4780 \text{ м}^3/\text{с}$ соответственно, максимальный трехчасовой по модели ICON равен $5260 \text{ м}^3/\text{с}$. Параллельно в ГГИ морфометрическим методом был рассчитан максимальный стационарный расход, который составил $6800 \text{ м}^3/\text{с}$.

Наконец, Иркутским УГМС путем экстраполяции натурных данных была принята величина максимального расхода паводка 2019 г., равная $7500 \text{ м}^3/\text{с}$, и на этот расход дано задание на проектирование новых паводкозащитных дамб.

Таким образом, перед началом разработки двумерной численной гидродинамической модели участка р. Ия – г. Тулун в январе 2020 г. имелось не менее 7 различных вариантов величины максимальных расходов катастрофического паводка 2019 г. с разбросом значений в 2.5 раза.

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основная цель работы – анализ опасности наводнений и гидродинамическое моделирование для исследования и комплексного анализа факторов опасного развития гидрологической обстановки, а также разработка научно обоснованных рекомендаций для предотвращения катастрофических паводков и обеспечения безопасности территорий Тулунского района Иркутской области.

Задачи исследования были следующие:

численное гидродинамическое моделирование руслового потока р. Ия в пределах городской застройки с учетом влияния всех видов застройки, а также блокировки мостовых переходов;

расчет продвижения волны паводка с расходом воды 1%-й и 0.1%-й обеспеченности по руслу и долине р. Ия в пределах селитебной территории и установление отметок максимального уровня и границ зоны затопления при прохождении других редких и катастрофических паводков;

оценка эффективности существующей и предлагаемой схем инженерной защиты селитебных территорий, в том числе оценка достаточности пропускной способности мостовых переходов;

разработка научных рекомендаций по снижению риска затопления.

В настоящей статье акцент делается на решении одной из ключевых исследовательских задач – определении максимального расхода и формы гидрографа экстраординарного паводка 2019 г. в районе г. Тулуна методами численного гидродинамического моделирования.

ПОСТРОЕНИЕ ЧИСЛЕННОЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И ЕЕ КАЛИБРОВКА

Для выполнения исследований разработана двумерная в плане компьютерная модель долины р. Ия в районе г. Тулуна протяженностью по продольнику русла ~ 21 км. Расчетная сетка, адаптированная к рельефу земной поверхности, дорожным и защитным сооружениям, содержала 104 тыс. ячеек с размером сторон ячеек от 2 до 50 м. Опоры автодорожного и железнодорожного мостов выделялись на сетке, а именно вырезались из расчетной области с учетом их формы (рис. 1). В данной численной модели учитывались две входные границы по рекам Ия и Азей, на которых задавались расходы воды (гидрографы для нестационарных расчетов), и одна граница на выходе из модели, на которой задавался уровень воды либо (для нестационарных случаев) кривая связи расходов и уровней воды (рис. 1).

Построение трехмерной цифровой модели рельефа выполнялось с использованием наложения поверхности TIN (Triangulated Irregular Network) на исследуемый участок, при этом рельеф дна русловой части формировался на основе актуализированных батиметрических промеров русла от 20 сентября 2019 г. Рельеф дна, проинтерполированный на расчетную сетку, приведен на рис. 2, на котором хорошо видна детализация рельефа поймы, выделение русла, дорог и дамб.

Для расчета гидродинамических параметров течения воды применялся программный комплекс STREAM 2D CUDA [1], в котором реализован оригинальный алгоритм, описанный в [6, 7] 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.

Для определения коэффициентов шероховатости русла в меженных условиях был использован продольный профиль водной поверхности р. Ия, полученный в результате водно-технических изысканий, выполненных в сентябре 2019 г. ООО “Байкалпроект” при фактически измеренном в створе гидропоста р. Ия – г. Тулун расходе

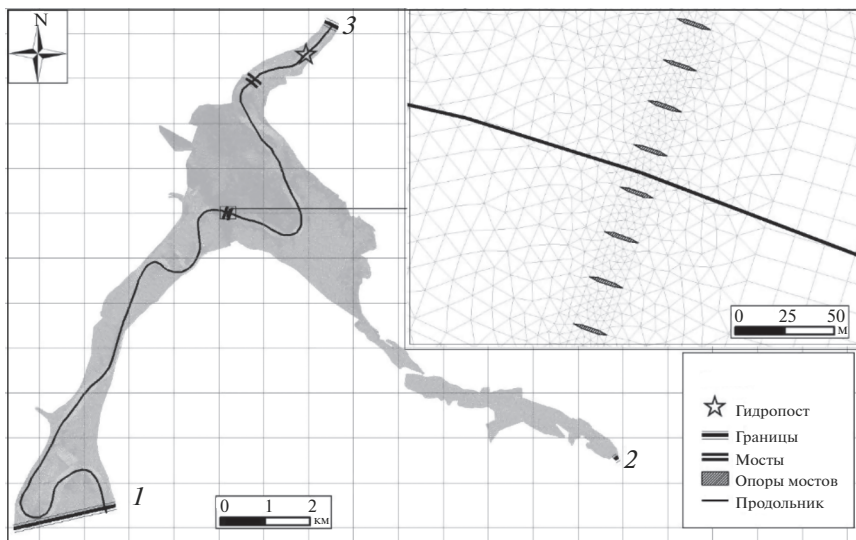


Рис. 1. Расчетная сетка области моделирования и ее фрагмент у автодорожного моста. 1, 2 – входные границы по рекам Ия и Азей, 3 – выходная граница.

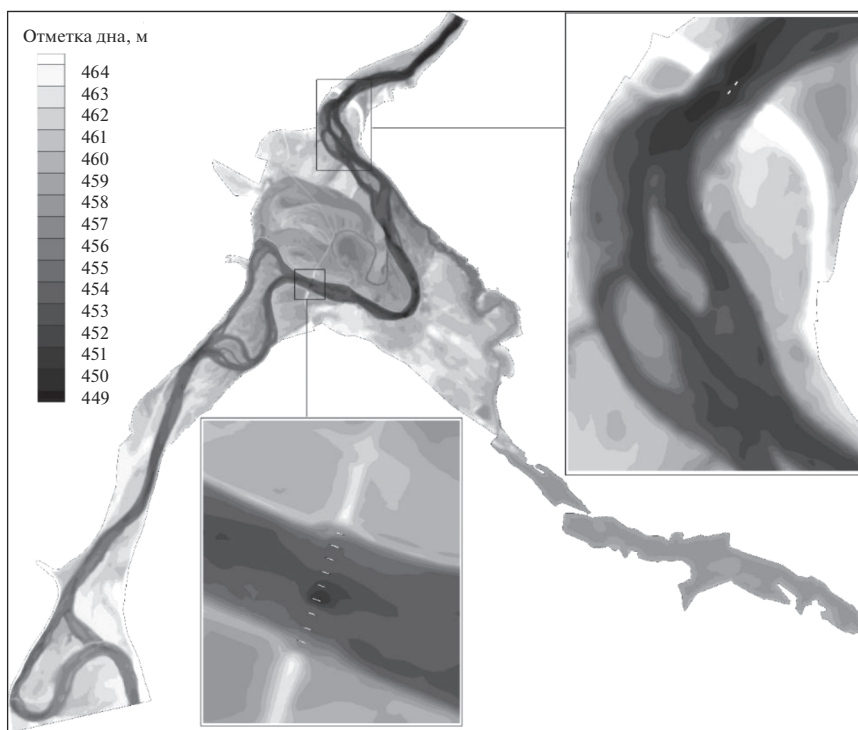


Рис. 2. Рельеф земной поверхности области моделирования.

201 м³/с. При этом в расчетах принимался расход по р. Ия 200, по р. Азей – 1 м³/с.

Наилучшее совпадение рассчитанных и измеренных уровней воды по продольному профилю получилось при значении коэффициента шероховатости русла р. Ия по Маннингу на верхнем участке модели $n = 0.035 \text{ с/м}^{1/3}$, на среднем и ниж-

нем $n = 0.03 \text{ с/м}^{1/3}$. Зонирование по шероховатости представлено на рис. 3. На рис. 4 представлено сопоставление продольных профилей водной поверхности при этих значениях n . В целом совпадение весьма удовлетворительное. При общем перепаде уровней воды 6 м на участке длиной 20 км (средний уклон 0.3 м/км) среднее отклонение рассчитанных отметок уровней воды от измерен-

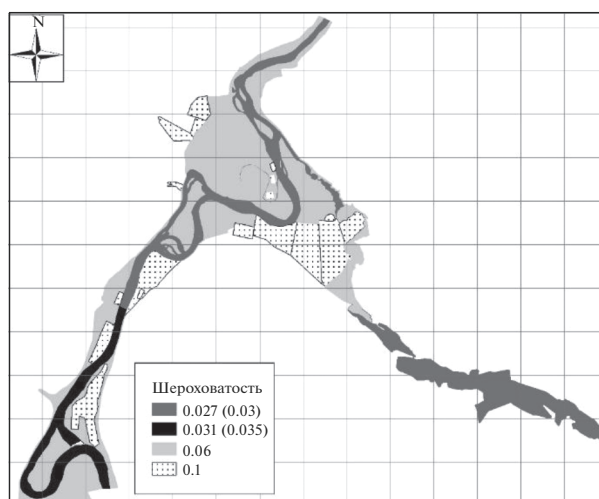


Рис. 3. Зонирование коэффициентов шероховатости для паводковых (меженных) условий.

ных на всей длине продольного профиля составило 0.06 м (1%), среднее квадратическое отклонение – 0.08 м (1.2%).

Поскольку максимальный расход на пике паводка 2019 г. не был измерен и был априори неизвестной величиной, в данном случае нельзя выполнить классическую калибровку модели на большие расходы, только подбирая коэффициенты шероховатости поймы (напомним, что для русла они уже определены). Поэтому в настоящей работе верификация разработанной 2D-гидродинамической модели в паводок 2019 г. проводится путем подбора максимальных мгновенных расходов воды и формы гидрографа из условий наилучшего совпадения рассчитанных уровней воды с измеренными отметками высоких вод по продольному профилю и на гидропосту р. Ия – г. Тулун при принятых коэффициентах шероховатости русла и поймы.

В соответствии с таким подходом для больших расходов воды и глубин течения, которые в паводок 2019 г. достигали 10–13 м, коэффициенты шероховатости в руслах по опыту аналогичных исследований (например, [2]) были уменьшены на 10% по сравнению с меженными (определенными в результате калибровки) и приняты по руслам рек Ия и Азей $n = 0.027 \text{ с/м}^{1/3}$, при этом в верхней части модели (участок длиной 7 км у входной границы по р. Ия $n = 0.031 \text{ с/м}^{1/3}$) (рис. 3). В данной ситуации некоторое уменьшение коэффициентов шероховатости относительно меженных значений идет в запас гидравлических расчетов при проектировании защитных мероприятий в том смысле, что при одних и тех же глубинах воды, уклонах водной поверхности и меньших шероховатостях будет проходить больший расход и будут выше скорости течения, которые необходимо учитывать при выборе типов крепления защитных дамб. На пойме на основе опыта аналогичных расчетов по другим объектам и табличных данных принят $n = 0.06 \text{ с/м}^{1/3}$, на заселенных застроенных участках поймы $n = 0.1 \text{ с/м}^{1/3}$. Для верификации модели во всех последующих расчетах использованы метки высоких вод на местности, полученные в результате изысканий ООО “Байкалпроект”.

РАСЧЕТЫ НА ПОСТОЯННЫЕ РАСХОДЫ ДЛЯ ПАВОДКА 2019 г.

Сначала был выполнен расчет на постоянный расход $5640 \text{ м}^3/\text{с}$, который был максимальным суточным расходом гидрографа паводка 2019 г. на 29.06.2019, рассчитанного по модели “ЕСОМАГ”, разработанной в ИВП РАН Ю.Г. Мотовиловым [3, 8]. При этом уровень воды на выходной границе расчетной области, выбранной на расстоянии 865 м ниже гидропоста, принимался равным наблюдаемой максимальной отметке высоких вод 462.50 мБС в этом створе. Этот же уровень воды

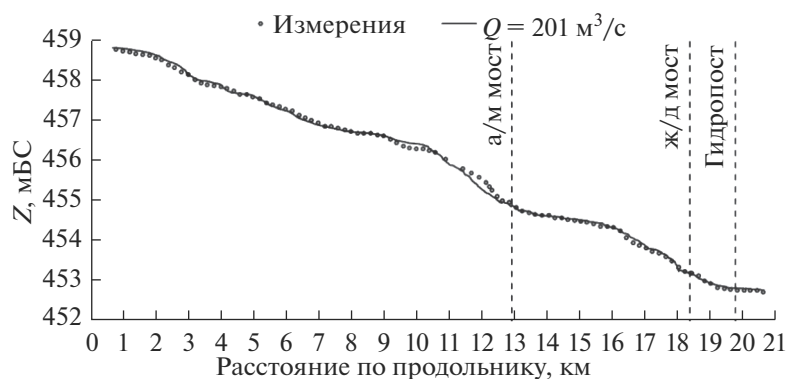


Рис. 4. Сопоставление рассчитанных (сплошная линия) и измеренных 20.09.2019 уровней воды при расходе $201 \text{ м}^3/\text{с}$ в створе гидропоста р. Ия – г. Тулун.

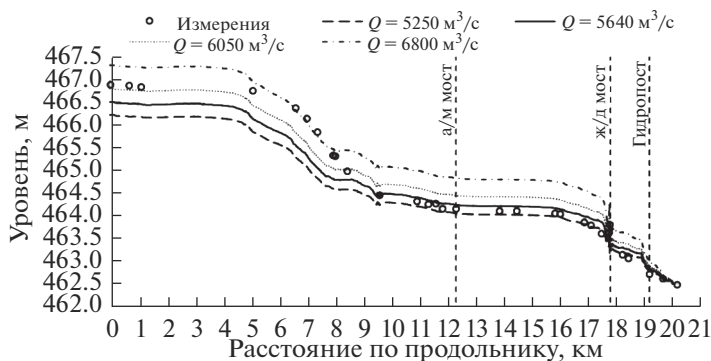


Рис. 5. Уровни воды по продольнику при расчете на постоянные расходы для паводка 2019 г. (при одной и той же отметке уровня воды на выходной границе 462.5 мБС).

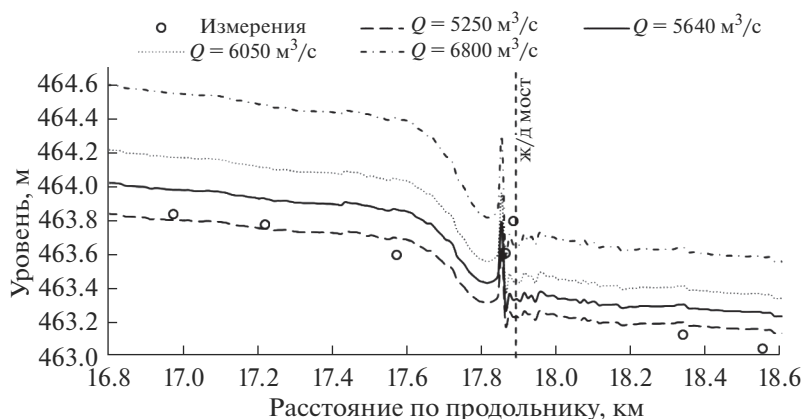


Рис. 6. Уровни воды по продольнику при расчете на постоянные расходы для паводка 2019 г. Фрагмент у железнодорожного моста.

на выходной границе принимался и для остальных расчетов для постоянных паводковых расходов. Следует отметить, что практически такой же расход (5630 м³/с) получен в исследованиях ООО “Байкалпроект” по данным натурных наблюдений за отметками высоких вод с применением одномерной программы решения уравнений неравномерного движения в открытых руслах.

Результат расчетов для постоянного расхода 5640 м³/с представлен на рис. 5. При этом уровни воды в верхней части гидродинамической модели (выше основной городской территории) ниже уровней воды, построенных по отметкам высоких вод, на 0.3 м; а на участке между мостами они оказались выше этих отметок на 0.2 м. Под обоими мостами совпадение по уровням воды получилось хорошим. Для железнодорожного моста это демонстрируется на рис. 6, где видно, что рассчитанная отметка уровня воды при набегании на опору совпадает с измеренным уровнем высоких вод. Существенное расхождение (до 0.6–0.8 м)

с отметками высоких вод наблюдается только на участке 6–8 км.

Далее при тех же значениях *n* русла и поймы и уровне воды на выходной границе был выполнен расчет для постоянного расхода 6800 м³/с, полученного ГГИ гидравлическим способом по формуле Шези и путем экстраполяции кривой скоростей на водомерном посту р. Ия – г. Тулун. Соответствующий продольный профиль водной поверхности представлен на рис. 5. Видно, что на верхнем участке модели рассчитанный уровень превышает отметки высоких вод на 0.5 м, а на участке между мостами (на основной городской территории) на 0.7–0.8 м. При этом отметка уровня воды на опоре железнодорожного моста на 0.5 м выше наблюдаемой (рис. 6) и ниже моста также превышает наблюдаемые уровни на 0.5–0.6 м. Таким образом, очевидно, что расход 6800 м³/с – завышенный.

Расчетами подобрано два постоянных расхода воды – 6050 и 5250 м³/с, которые дали хорошее совпадение с отметками высоких вод на верхнем

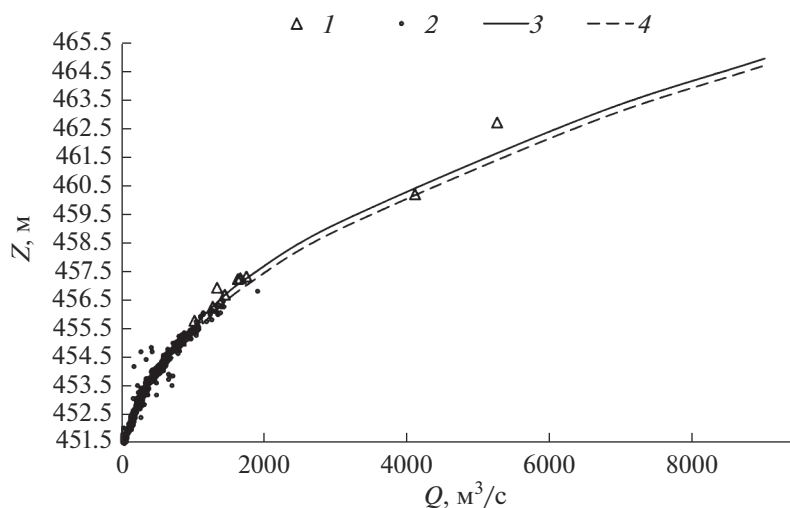


Рис. 7. Графики принятого на гидропосту и пересчитанного на выходную границу $Q(Z)$. 1 – максимальные наблюдаемые уровни воды на гидропосту (1980–1986 гг.), 2 – наблюдаемые уровни воды на гидропосту (1943–1974 гг.), 3 – принятый $Q(Z)$ на гидропосту, 4 – пересчитанный $Q(Z)$ на выходную границу.

(выше автодорожного моста) и нижнем участках модели соответственно (рис. 5). Эти расчеты показали, что необходимо проводить верификацию модели в динамическом режиме с учетом гидрографа паводка, форму и пиковый расход которого нужно подбирать из условий соответствия данным фактических наблюдений за уровнями воды. Таким образом, пришлось подбором решать обратную задачу, восстанавливая входной гидрограф по максимальным меткам высоких вод и ходу уровней во времени на гидропосту р. Ия – г. Тулун.

ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ В НЕСТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ

Для нестационарных расчетов, кроме максимальных уровней воды по продольнику, определенных по отметкам высоких вод, для верификации результатов использовались также достоверные данные о ходе уровней воды по времени на гидропосту р. Ия – г. Тулун в паводок 2019 г. Поскольку гидрограф расходов в паводок не был измерен, имеется возможность в определенных пределах трансформировать какой-либо гидрограф для достижения по возможности наилучшего совпадения с перечисленными выше известными данными по уровням воды. Следует отметить, что восстановить гидрограф в створе гидропоста по кривой хода уровней воды во времени и кривой связи расходов и уровней $Q(Z)$ для численного моделирования недостаточно, поскольку гидрограф, как будет показано ниже, перестраивается в расчетной области и на входной границе модели (где он задается) может существенно отличаться от гидрографа на гидропосту. Более того, сама

кривая $Q(Z)$ в створе гидропоста в данном случае определяется неоднозначно в области больших расходов, поскольку максимальные расходы на пике паводка не измерены (не говоря уже о том, что на кривой имеется петля гистерезиса).

Для выполнения нестационарных расчетов необходимо построение на выходной границе кривой связи расходов и уровней воды $Q(Z)$. Для этого по фактическим данным наблюдений с 1943 по 1974 г., а также данным по максимальным расходам воды за 1980, 1981, 1984, 2019 гг. (за последний год максимальный расход был принят с учетом стационарных расчетов) построена кривая $Q(Z)$ на гидропосту Тулун (рис. 7), которая соответствует связи расходов и уровней на подъеме паводка.

Далее эта кривая пересчитана с уклоном 0.3 м/км (определен по отметкам высоких вод на конечном участке модели) на расстояние 865 м вниз по реке от гидропоста – место расположения выходной границы (рис. 7).

Принятые в расчетах входные гидрографы (по модели ЕСОМАГ, ГГИ и скорректированные) представлены на рис. 8. Для р. Азей принят гидрограф трапецеидальной формы с максимальным расходом 30 м³/с, который не оказывает заметного влияния на результаты моделирования ввиду малости расхода. По модели ЕСОМАГ выдается расход с суточным шагом по времени, что недостаточно для детализированного динамического расчета. Кроме того, максимальный мгновенный расход может быть выше, чем среднесуточный. Это дает основание выполнить корректировку исходного гидрографа и получить несколько новых гидрографов для улучшения совпадения рассчитанных уровней с измеренными.

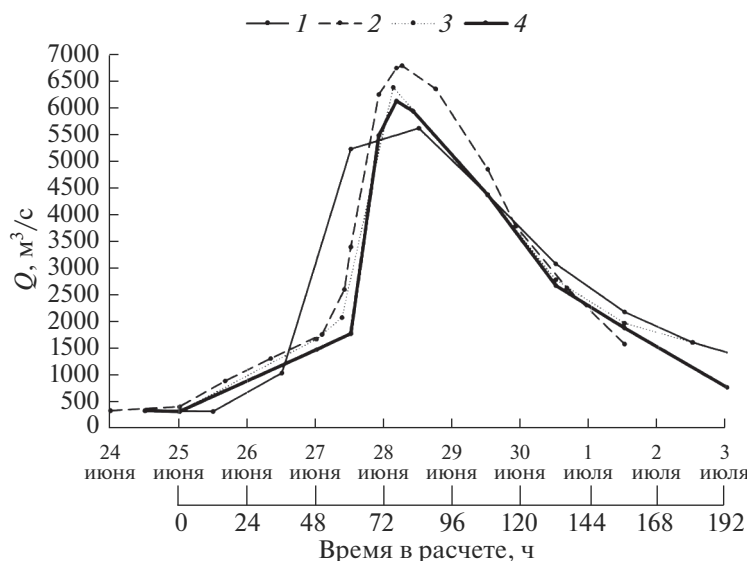


Рис. 8. Расчетные гидрографы, задаваемые на входной границе по р. Ия: 1 – ЕСОМАГ с $Q_{\max} = 5640 \text{ м}^3/\text{с}$, 2 – ГГИ с $Q_{\max} = 6800 \text{ м}^3/\text{с}$, 3 – $Q_{\max} = 6400 \text{ м}^3/\text{с}$, 4 – гидрограф с $Q_{\max} = 6150 \text{ м}^3/\text{с}$.

Сначала были выполнены расчеты для гидрографа 1, полученного по модели ЕСОМАГ и задаваемого на входной границе гидродинамической модели (рис. 8). На выходной границе задавалась связь уровней и расходов по кривой на рис. 7. На рис. 9б представлен график хода уровней на гидропосту для гидрографа 1. Совпадение по уровням воды на гидропосту хорошее на пике паводка и достаточно удовлетворительное на спаде. Подъем уровней до высоких отметок начинается по расчету значительно раньше, чем по факту, что свидетельствует о завышении расходов на подъеме паводка.

С учетом этого для всех остальных принятых в расчетах гидрографов на входной границе (рис. 8) моменты начала интенсивного увеличения расхода сдвинуты вперед по сравнению с гидрографом 1, а ветви спада сохранены практически такими же, как и у гидрографа 1. При этом суммарный объем стока для гидрографов 3, 4 уменьшился на $\sim 0.14 \text{ км}^3$ по сравнению с гидрографом, полученным на модели ЕСОМАГ. Поскольку объем стока за паводок (при расходах $>500 \text{ м}^3/\text{с}$) для гидрографа 1 оценивается по графику на рис. 8 в 1.8 км^3 , то принятое в расчетах уменьшение паводкового стока для откорректированных гидрографов составило 7.8%, что находится в пределах погрешности гидрологической модели.

На рис. 9а представлены гидрографы рассчитанных расходов воды в четырех контрольных створах. Разница максимальных расходов на входной и выходной границах на пике паводка почти не наблюдается, что объясняется формой рассчитанного по модели ЕСОМАГ гидрографа, в котором на пике паводка за сутки происходит

увеличение расхода всего на $390 \text{ м}^3/\text{с}$, и аккумуляция расхода на пойме в этот промежуток времени слабая. Между тем на моменты времени 48 и 60 ч (в середине и конце участка резкого нарастания расхода по гидрографу 1) разница расходов на входной и выходной границах составляет $\sim 1000 \text{ м}^3/\text{с}$ (рис. 9а). Общий объем аккумулированной воды на ветви подъема для гидрографа 1 равен 0.1 км^3 .

Провал (понижение) в гидрографе на автодорожном мосту (рис. 9а, учитывается только расход в подмостовом отверстии) на период времени с 52 до 136 ч от начала расчета связан с переливом воды через защитные дамбы (начинается при расходе $\sim 3600 \text{ м}^3/\text{с}$) и с дальнейшим пропуском основной части расхода напрямую к створу железнодорожного моста по пойме через городскую излучину. При этом в русле в створе автодорожного моста расход падает до $1200 \text{ м}^3/\text{с}$, а $>4000 \text{ м}^3/\text{с}$ — идет по пойме.

На рис. 9в представлен продольный профиль водной поверхности для гидрографа 1. Видно, что на верхнем участке вблизи входной границы максимальные отметки уровня воды на 0.4 м ниже отметок высоких вод, а на участках между мостами и ниже железнодорожного моста — близки к наблюдаемым. Это свидетельствует о том, что на входной границе максимальный расход должен быть $>5640 \text{ м}^3/\text{с}$, но расход должен быть резко нестационарным на пике паводка.

Следующим был выполнен расчет по гидрографу 2 с максимальным расходом $6800 \text{ м}^3/\text{с}$. Ход уровней воды на гидропосту для этого случая представлен на рис. 10б. Видно, что максимальный уровень почти на 0.5 м превышает измеренный.

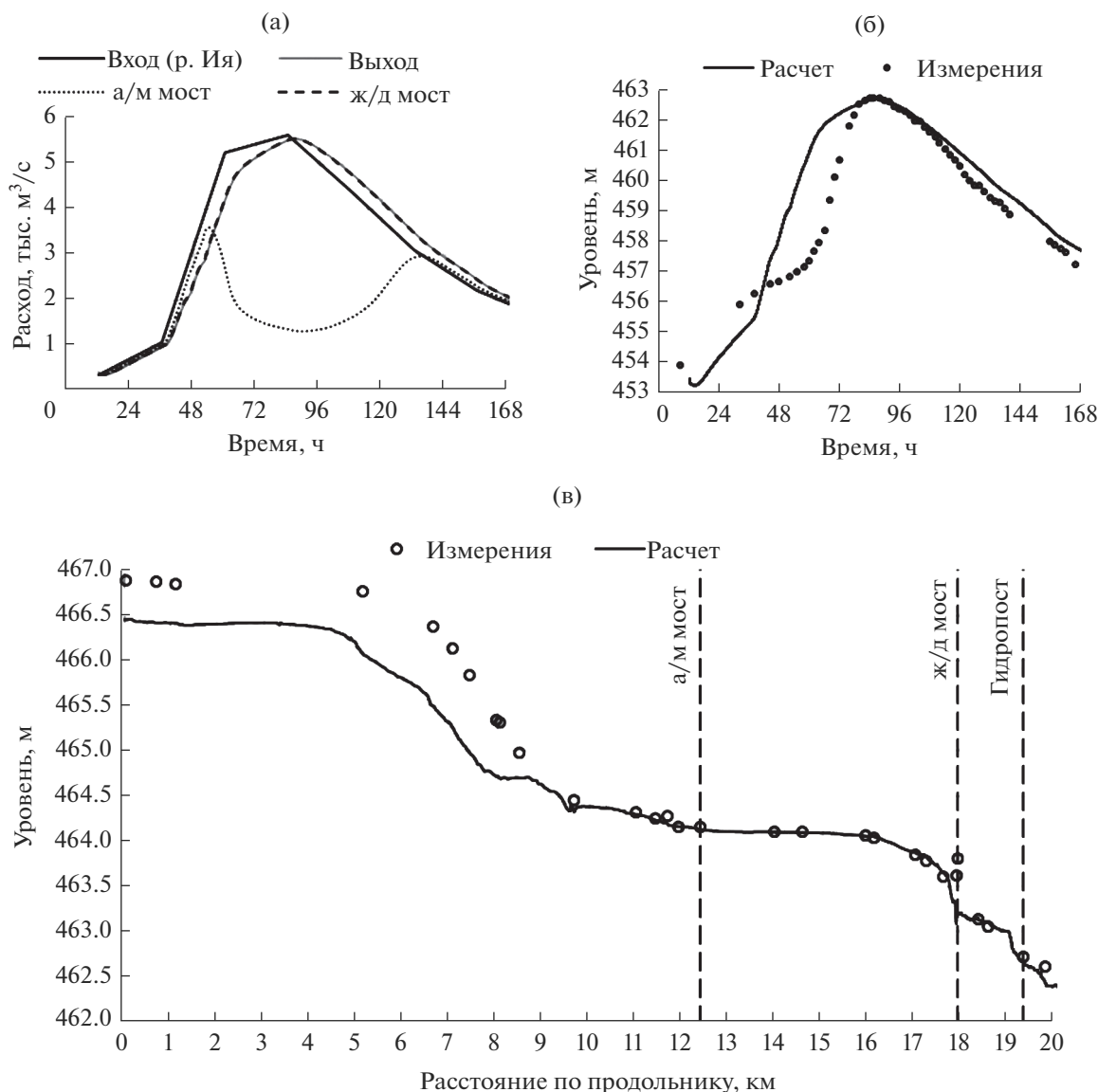


Рис. 9. Расходы воды в контрольных створах (а), ход уровней воды на гидропосту (б), максимальные уровни воды по продольнику (в) при расчете по гидрографу № 1.

На рис. 10а представлены расходы воды в контрольных створах при расчетном гидрографе 2. Видно, что в створе гидропоста проходит максимальный расход $\geq 6450 \text{ м}^3/\text{с}$, т.е. уменьшается по сравнению с максимальным входным расходом на $\sim 350 \text{ м}^3/\text{с}$. Максимальный продольный профиль водной поверхности для этого варианта изображен на рис. 10в. Вблизи входной границы рассчитанные уровни превышают отметки высоких вод на 0.3 м, а между мостами (на затопленной городской излучине) – на 0.7 м – это большая погрешность.

Далее был выполнен расчет по гидрографу 3 с максимальным расходом $6400 \text{ м}^3/\text{с}$ на входной границе (рис. 8). Ход уровней воды на гидропосту

для этого случая гораздо лучше совпал с измеренными значениями, чем для гидрографов 1, 2.

Затем подобран гидрограф 4 более “естественной” формы (рис. 8), который дает хорошее совпадение по уровням водной поверхности на гидропосту в динамическом режиме (рис. 11б) и хорошее совпадение максимальных уровней по продольному профилю (рис. 11в). На входной границе максимальный расход этого гидрографа равен 6150 , в створе гидропоста – $5700 \text{ м}^3/\text{с}$ (близкий к рассчитанному по программе ЭКОМАГ). Таким образом, аккумуляция расхода на пике паводка в этом случае составляет $450 \text{ м}^3/\text{с}$ (рис. 11а). На подходе к городу, согласно этому гидрографу,

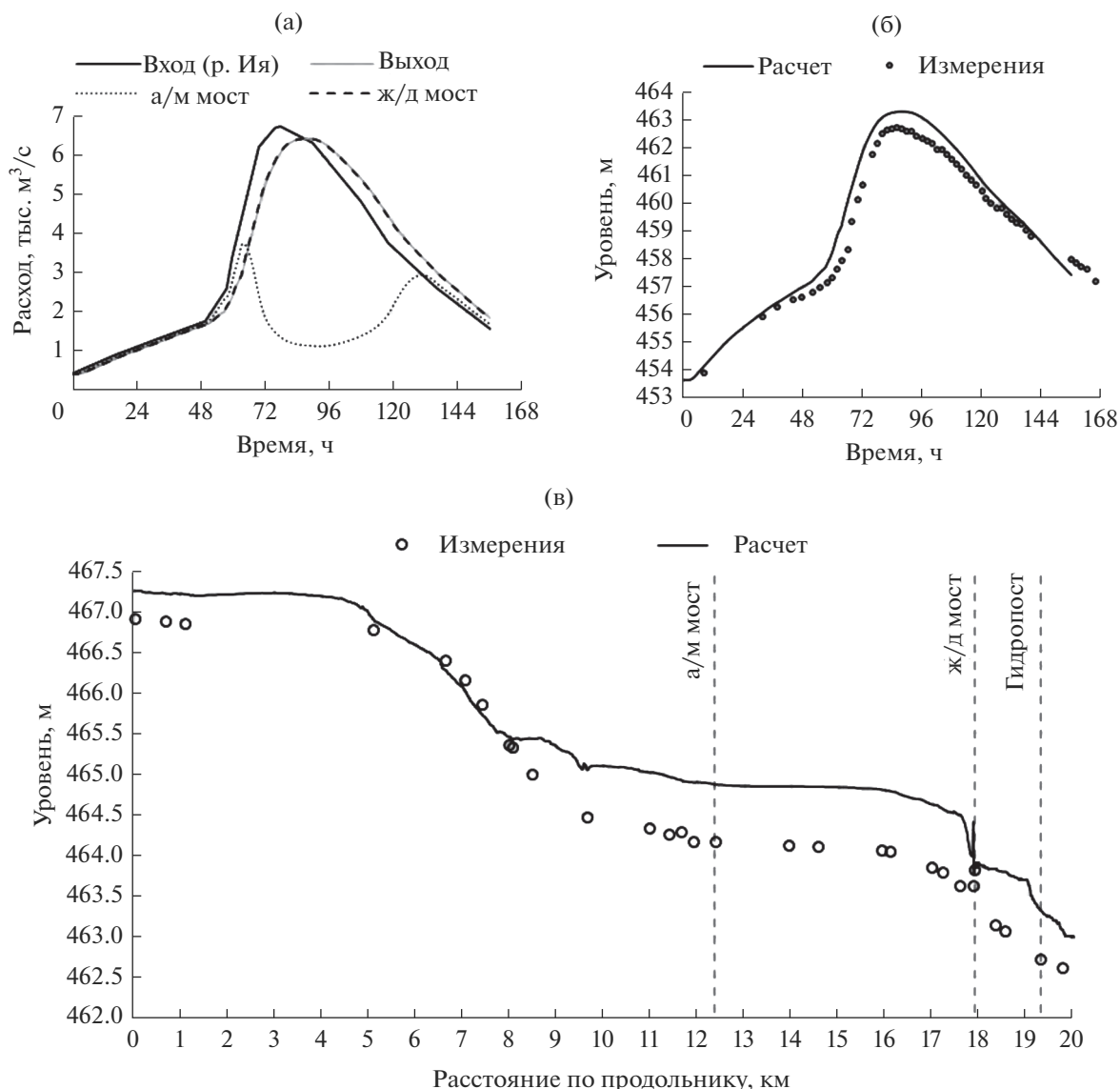


Рис. 10. Расходы воды в контрольных створах (а), ход уровней воды на гидропосту (б), максимальные уровни воды по продольнику (в) при расчете по гидрографу № 2.

максимальный расход паводка 2019 г. следует принимать равным 6050 м³/с.

Средняя и среднеквадратическая погрешности, рассчитанные для хода уровней воды на гидропосту за основное время паводка – 8 сут, равны 0.14 и 0.18 м, что по отношению к перепаду уровней 9 м за паводок составляет 1.5 и 2.0%. Соответствующие погрешности, рассчитанные по отклонениям от меток высоких вод на продольном профиле, составили 0.21 и 0.29 м соответственно. Основной вклад в последние погрешности дает значительное расхождение измеренных и рассчитанных уровней воды на участке 6–8 км по продольному профилю (рис. 11в). Первой причиной этого могло быть повышенное сопротивление движению потока, вызванное плывающими дома-

ми, мусором и т.п. (особенно на ветви подъема паводка). Второй причиной может быть повышенное волнообразование на этом участке, вызванное большими скоростями течения, достигающими 3–3.5 м/с. При этом отметки высоких вод будут соответствовать гребням волн, а не осредненной отметке свободной поверхности. Третьей причиной может быть переформирование дна реки в период паводка, особенно на участках с большими скоростями (размыв) и ниже их по течению (отложения грунта). Выполнен контрольный расчет с приподнятыми на 1–2 м минимальными отметками дна на этом участке, который показал гораздо лучшее совпадение уровней с отметками высоких вод.

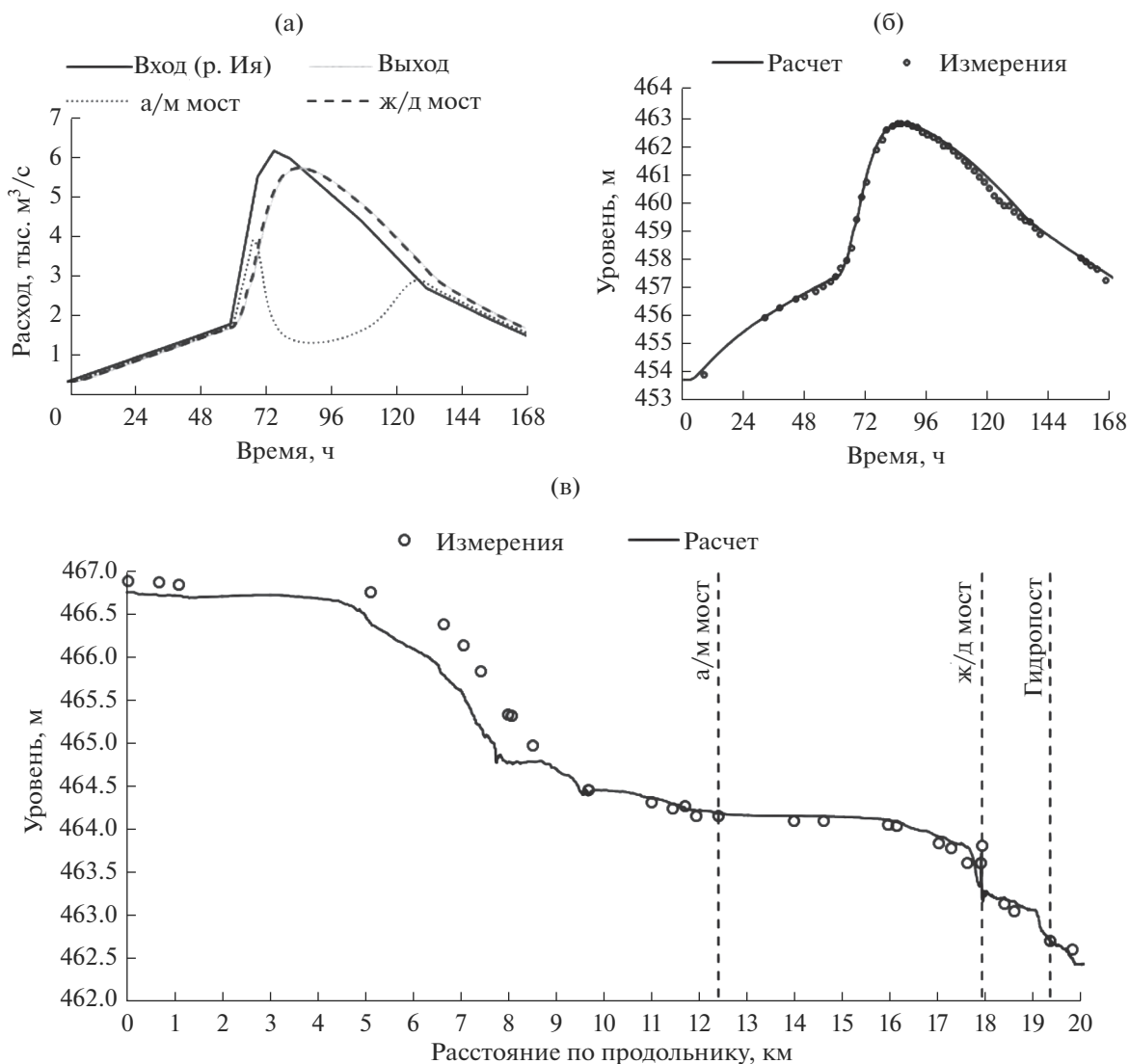


Рис. 11. Расходы воды в контрольных створах (а), ход уровней воды на гидропосту (б), максимальные уровни воды по продольнику (в) при расчете по гидрографу № 4.

По результатам моделирования прохождения волны паводка в районе г. Тулуна подготовлен анимационный ролик. Некоторые элементы динамики затопления представлены на рис. 12, 13. Расчетами установлено (подтверждается и натурными наблюдениями), в частности, что прорыв защитных дамб начался в середине излучины, и некоторое время водный поток двигался поперек общего направления долины реки. Это исключает применение одномерных численных моделей для таких сложных случаев. Сопоставление фактической динамики затопления с результатами 2D-моделирования показало хорошее совпадение по времени и характеру затопления отдельных участков поймы.

ВЫВОДЫ

Моделирование паводкового события в нестационарном режиме (с использованием реалистичного гидрографа стока на подходе к городской территории) на численной двумерной гидродинамической модели позволило детально воспроизвести сложную динамику затопления широкой поймы в четко видимом расширении долины, где расположен г. Тулун. Из-за аккумуляции >10% стока паводка на пойме пиковый расход паводка снизился в створе у гидрометрического поста на 300–400 м³/с по сравнению с величиной на подходе к городу. Таким образом, при максимальном мгновенном расходе 5700 м³/с на посту максимальный мгновенный расход на

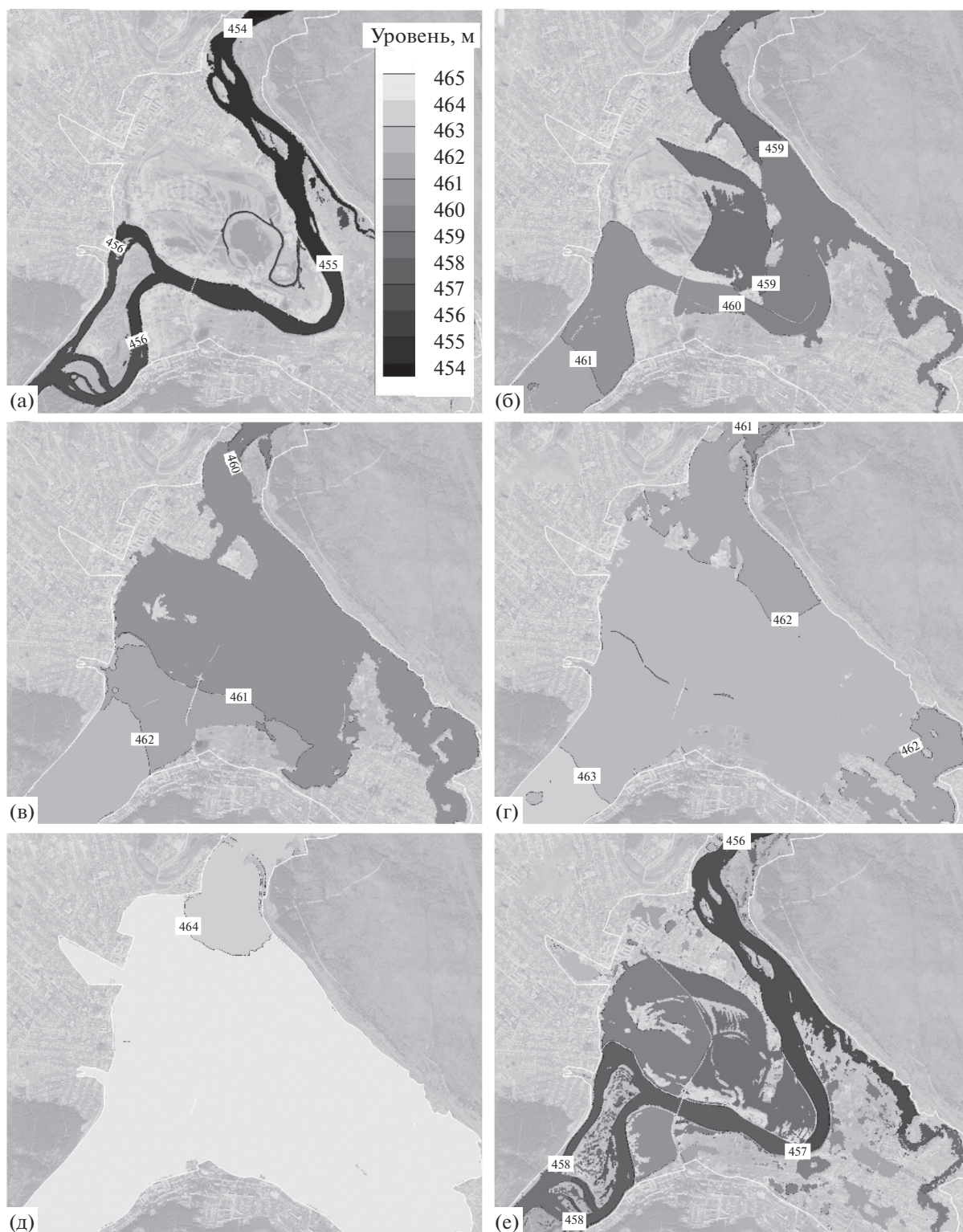


Рис. 12. Динамика затопления г. Тулуна (изменение уровней воды) во время паводка 2019 г., полученное в результате расчета: а – 26 июня, 0:00, б – 28 июня, 16:00, в – 28 июня, 20:00, г – 28 июня, 23:00, д – 29 июня, 14:00, е – 3 июля, 24:00.

входе в городскую излучину составлял 6000–6100 м³/с. Именно эти величины сформировали катастрофические затопления территории. Экс-

перименты ГГИ на физической модели подтвердили величину максимального расхода на входе в город в диапазоне 6000–6100 м³/с.

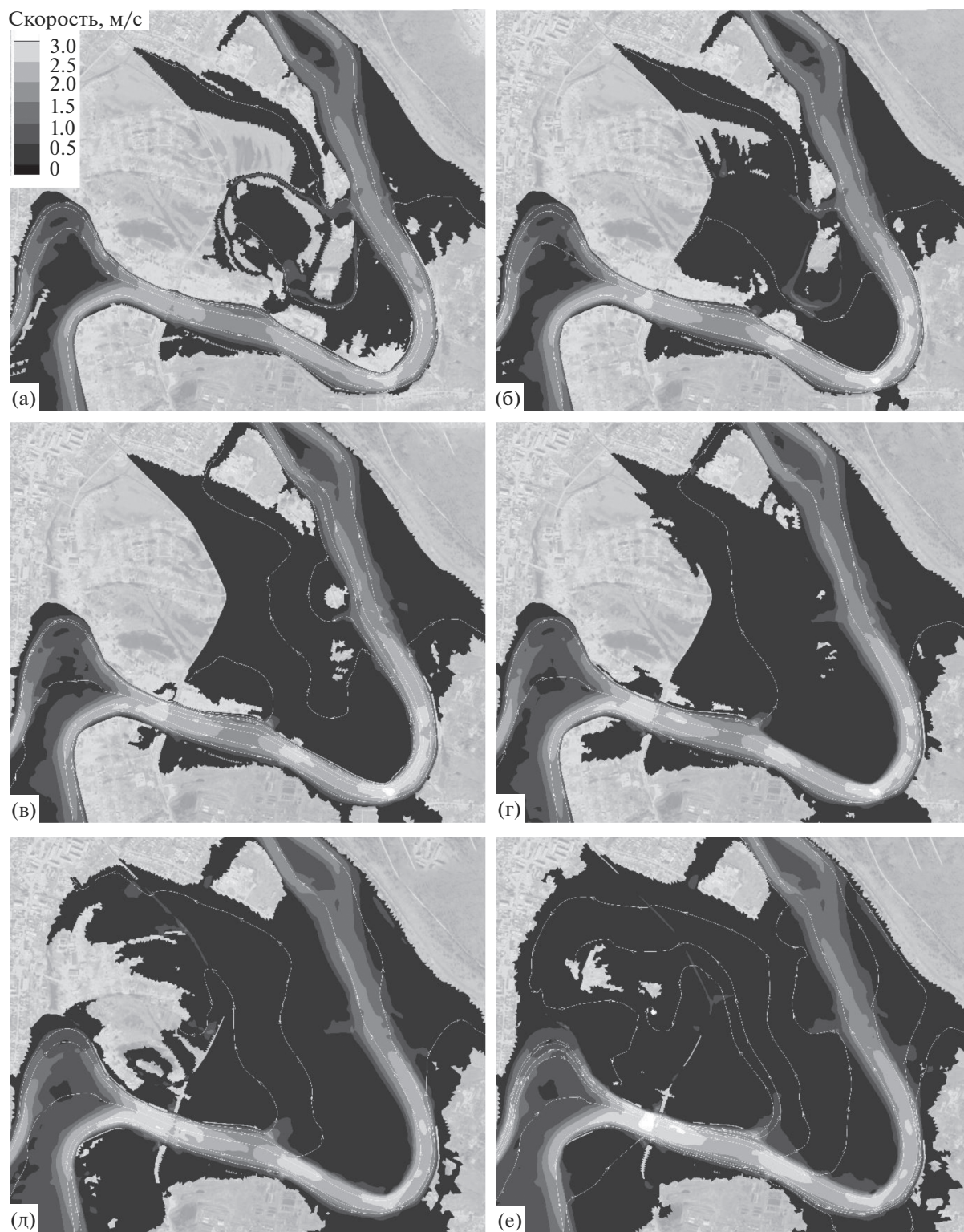


Рис. 13. Динамика затопления г. Тулуна (модули скорости и линии тока) 28 июня 2019 г., полученная в результате расчета: а – 15:00, б – 16:00, в – 17:00, г – 18:00, д – 19:00, е – 20:00.

На взгляд авторов статьи, гидродинамическое моделирование на пространственных численных и физических (гидравлических) моделях в настоящее время позволяет более точно и с меньшим разбросом, чем на гидрологических моделях, восстановить максимальные паводковые расходы в определенных створах.

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. о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2017660266 от 20.09.2017.
2. *Беликов В.В., Борисова Н.М., Алексюк А.И., Румянцев А.Б., Глотко А.В., Шурухин Л.А.* Гидравлическое обоснование проекта Багаевского гидроузла с применением численного гидродинамического моделирования // Гидротех. стр.-во. 2018. № 5. С. 19–35.
3. *Калугин А.С.* Исследование природных факторов формирования наводнений на реке Ия методами физико-математического моделирования // Сб. докл. Международ. науч. конф. пам. Ю.Б. Виноградова “Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология: от познания к мировоззрению”. СПб.: Изд-во ВВМ, 2020. С. 280–285.
4. *Макарьева О.М.* Результаты моделирования паводка на реке Ия – Тулун. [Электронный ресурс]. https://vk.com/@other_hydrology-rezultaty-modelirovaniya-pavodka-na-reke-iya-tulun 37
5. *Шаликовский А.В., Лепихин А.П., Тиунов А.А., Курганович К.А., Морозов М.Г.* Наводнения в Иркутской области 2019 года // Вод. хоз-во России. 2019. № 6. С. 48–65. <https://doi.org/10.35567/1999-4508-2019-6-4>
6. *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>
7. *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. Comput. Phys. 2019. V. 390. P. 232–248. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2019.04.001>
8. *Motovilov Yu. G., Gottschalk L., Engelandand K., Belokurov A.* ECOMAG – regional model of hydrological cycle. Application to the NOPEX region // Inst. Rep. Series. Department Geophys. Univ. Oslo, 1999. № 105. 88 p.