

УДК 556.048

## РЕКОНСТРУКЦИЯ ДОЖДЕВОГО ПАВОДКА НА РЕКЕ АДАГУМ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА

© 2013 г. М.В. Болгов<sup>1</sup>, Е.А. Коробкина<sup>2</sup><sup>1</sup> *Институт водных проблем Российской академии наук, Москва*<sup>2</sup> *Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск***Ключевые слова:** наводнение, дождевой паводок, моделирование, Крымск.

Рассмотрено формирование экстремального дождевого паводка, прошедшего 6–7 июля 2012 г. в бассейне р. Адагум и приведшего к катастрофическому наводнению в г. Крымске, а также подходы к оценке границ зоны затопления обеспеченностью 1 %. Анализ паводочного стока и гидрологические расчеты выполнены на основе системы моделей, описывающей

формирование стока на водосборе и прохождение паводочной волны в пределах застроенной территории. Представлены предложения по снижению риска наводнений в г. Крымске.

### Введение

Гидрологическая ситуация, имевшая место в бассейне р. Адагум 6–7 июля 2012 г., характеризуется термином «быстро развивающийся паводок». Возникновение таких паводков связано с формированием синоптической обстановки, благоприятствующей локальному выпадению осадков очень большой интенсивности. Прогнозировать такие случаи с заблаговременностью, достаточной для принятия эффективных превентивных мер, как показывает практика, весьма сложно и затратно. Однако работы в данном направлении, безусловно, проводить необходимо.

Основной проблемой при исследовании формирования паводочного стока является отсутствие достаточно надежной информации как по осадкам (их пространственно-временное распределение в силу значительной нерав-

Водное хозяйство России № 3, 2013

# Водное хозяйство России

номерности выпадения ливней изучено недостаточно), так и по условиям впитывания дождевых осадков в почву и образования на склоне водного потока, т. е. по механизмам потерь, определяющим генезис паводочного стока.

Современная теория паводочного стока с малых водосборов разработана рядом отечественных и зарубежных ученых. Можно упомянуть основополагающие работы Р. Хортон [1], А.Н. Бефани [2, 3], Г.А. Алексеева [4] и многих других. Согласно результатам этих теоретических разработок выделяются два этапа формирования паводка на водосборе: склоновый и русловой. На склонах осуществляется трансформация осадков в приток к первичной гидрографической сети и далее за счет добегания по руслам, гидрограф склонового стока трансформируется в гидрограф паводка в замыкающем створе. Эта давно уже ставшая классической схема нашла отражение во многих методах расчета паводочного стока, таких, например, как формула предельной интенсивности [4–6], формула А.Н. Бефани [2, 3] и других.

Однако большинство формул, позволяющих рассчитывать максимальный сток по осадкам, являются «однофазовыми», т. е. позволяют рассчитывать только максимальную ординату гидрографа паводочного стока. Во многих случаях этого достаточно, особенно при условии знания общего слоя стока за паводок, но при этом решение таких задач, как трансформация паводка при выходе воды на пойму, учет влияния создаваемых объектов инженерной защиты, прочих гидротехнических сооружений и мостов на гидравлику потока становится затруднительным, поскольку требует знания всей формы гидрографа дождевого паводка. Необходимо применять более детальные подходы, основанные на математических моделях, реализующих те же идеи склонового и руслового добегания, но позволяющие на более подробной основе учитывать особенности размещения гидротехнических сооружений, пространственное распределение стокоформирующих комплексов, неравномерную структуру гидрографической сети и пр.

Основой выполненных гидрологических расчетов в данном случае явилась гидрологическая модель бассейна р. Адагум, учитывающая сток с застроенных городских территорий. Совершенствование методов гидрологических расчетов за счет использования математических моделей формирования стока означает тем не менее и возникновение ряда дополнительных проблем. К их числу относится определение так называемого расчетного ливня – такого ливня, который формирует максимальный расход заданной обеспеченности. В методе предельной интенсивности стока переход от «обеспеченных» осадков к стоку той же обеспеченности достигается путем умножения средней за время добегания интенсивности осадков заданной обеспеченности на коэффициент стока, значения которого нормируются в зависимости от природной зоны, типа почвогрунта и пр. и определяются, по сути, обратным расчетом.

Таким образом, задача определения расчетного максимального расхода требует решения задачи композиции нескольких случайных величин: интенсивности осадков, их продолжительности и предшествующего увлажнения как фактора потерь стока. В общем случае эта задача может быть решена методом вероятностно-детерминистического моделирования, предусматривающим знание совместного закона распределения всех используемых в расчете величин, а также стохастических моделей их временной изменчивости. Реализовать этот подход на практике сложно из-за отсутствия необходимых данных и большой громоздкости имитационных процедур, поэтому далее ограничимся анализом только экстремального события.

Сложнее определить расчетные значения максимального стока с использованием плювиограмм конкретных ливней. На практике из ряда наблюдаемых гиетогографов (графиков хода дождя во времени) выбирается самый компактный, но при этом характеризующийся большим значением осадков. В дальнейшем этот ливень и соответствующий ему паводок используют для тестирования модели формирования стока. После определения параметров модели стока наблюдаемый гиетогограф трансформируют таким образом, чтобы получить на выходе максимальный расход заданной обеспеченности (по имеющимся данным гидрологических наблюдений). В нашем случае на р. Адагум у г. Крымска продолжительность гидрологических наблюдений составляет 75 лет, статистическая обработка позволяет оценить максимальный паводочный расход 1 % обеспеченности. Трансформированный наблюдаемый ливень, позволяющий получить на модели заданный расход 1 % обеспеченности, и будет в нашем случае расчетным графиком дождя. Соответствующий этому дождю и расходу гидрограф паводка, полученный путем модельных расчетов, будет гидрографом стока 1 % обеспеченности, необходимым для последующих расчетов затопления городской территории.

Для моделирования зоны затопления г. Крымска во время наводнения 6–7 июля 2012 г. использовали одномерную гидродинамическую модель на основе уравнений Сен-Венана с дополнительными емкостями и перетоками, воспроизводящими процесс затопления городских территорий. Верификацию модели формирования стока осуществлял на основе сопоставления величин максимальных расходов, рассчитанных по модели, и оцененных по меткам (горизонтам) высоких вод, найденным на водосборе р. Адагум гидрологической партией Росгидромета. После верификации модели стока был подобран расчетный ливень, приводящий к возникновению максимального расхода с обеспеченностью 1 %. Модель формирования стока позволила получить расчетные гидрографы притока к г. Крымску и оценить зону затопления в самом Крымске с обеспеченностью 1 %. Дальнейшие модельные расчеты показали, что реконструкция русла р. Адагум в пределах городской застройки может существенно снизить риск затопления застроенных территорий.

### Характеристика бассейна р. Адагум

Река Адагум относится к бассейну р. Кубань, ее водосбор находится на территории Крымского района Краснодарского края. Адагум образуется при слиянии рек Баканка (левый исток) и Неберджай (правый исток) в 32 км от г. Крымска на высоте 44 м, протекает через Крымск и впадает в Варнавинское водохранилище, сток из которого по Варнавинскому сбросному каналу осуществляется в р. Кубань [7]. В верхнем течении р. Неберджай сооружено Неберджаевское водохранилище, которое служит источником водоснабжения г. Новороссийска. На водохранилище имеется сбросное сооружение в виде шахтного водосброса.

Протяженность р. Адагум около 100 км, площадь водосбора 336 км<sup>2</sup>. Большая часть реки (около 77 %) имеет уклон 0–5 ‰, а в верховьях уклон достигает 21–50 ‰. Долина р. Адагум до г. Крымска имеет ящикообразную форму. Дно долины ровное, склоны умеренно крутые со средней высотой порядка 40 м. Ниже города и до устья ширина поймы 15–20 м. Водный режим реки характеризуется интенсивными паводками в осенне-зимний период и довольно устойчивой летней меженью. Среднегодовые расходы воды небольшие, внутригодовое распределение стока характеризуется максимумом в январе–апреле. Вследствие незначительной роли грунтового питания (менее 10 % от общего стока) сток рек района в летне-осеннюю межень может приближаться к нулю. Дождевые паводки на реках имеют бурный характер, продолжаются 2–3 дня, прохождение пика может длиться несколько часов. Осадки за год в среднем составляют 660 мм (данные метеостанции Крымск). Характерным является большая повторяемость ливней и гроз. Число дней с ливнями составляет 60–70, с грозами – 30–40 за год [8].

### Методы расчета поверхностного паводочного стока и трансформации паводочной волны в пределах застроенной части бассейна р. Адагум

Для расчета гидрологических характеристик бассейна р. Адагум использован программный комплекс SWMM (модель управления ливневым стоком), разработанный Агентством по охране окружающей среды США [9]. Данный комплекс состоит из нескольких модулей, воспроизводящих в т. ч. и процессы смыва загрязняющих веществ, главным образом, с урбанизированных территорий, но на данном этапе применены только два из них.

Модуль RUNOFF рассчитывает сток с элементарных водосборов, при этом на уровне модели с сосредоточенными параметрами учитываются основные элементы процесса стока – инфильтрация, поверхностное задержание, испарение, снеготаяние, поверхностный (склоновый) сток. Модель формирования поверхностного стока на изучаемой территории включает расчет стока с элементарных водосборов с учетом различной степени застройки и его трансформацию по системам естественных ру-

сел и каналов городской дренажной сети. Поверхностный склоновый сток рассчитывается с помощью емкостной модели с использованием уравнения Маннинга.

Модуль под названием EXTRAN реализует программу, моделирующую движение воды в системе открытых и закрытых (напорных и безнапорных) водоводов и водотоков. EXTRAN-блок получает входные гидрографы в специальных узлах через интерфейсный файл из гидрологического блока RUNOFF и/или путем непосредственного ввода пользователем. Гидравлическая система, воспроизводимая модулем EXTRAN, представляется в виде набора элементов гидрографической сети в основном двух типов: соединительные узлы и линейные элементы (водоводы).

Модель выполняет динамический расчет потока ливневых вод по всей гидрографической системе с верхних точек до точек выхода (принимающей водной системы). Программа моделирует разветвленные системы каналов, открытых русел, безнапорные и напорные потоки, обратные течения, перераспределение потоков с помощью водосливов и вододелителей, водоводов и насосных станций, управляемых и не управляемых емкостей. Возможен учет различных форм поперечных сечений открытых русел, каналов и труб городской дренажной сети, в т. ч. трапецеидальных, параболических или естественных русел произвольной формы. Модель воспроизводит уровни и расходы воды в заданных точках системы.

В основе модели лежит система уравнений Сен-Венана, описывающая одномерные неустановившиеся течения воды в открытых руслах, в виде:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2 / \omega)}{\partial x} + g\omega \frac{\partial y}{\partial x} + g\omega S_f = 0, \quad (2)$$

где  $x$  – координата по длине водотока (водовода);

$t$  – время;

$\omega$  – площадь поперечного сечения;

$Q$  – расход воды на рассматриваемом участке русла;

$g$  – ускорение свободного падения;

$y = z + h$  – уровень свободной поверхности воды;

$z$  – отметка дна;

$h$  – глубина воды;

$S_f$  – уклон трения.

Уклон трения характеризует сопротивление, и наиболее часто для учета сил сопротивления применяется коэффициент Шези или коэффициент шероховатости  $n$ , определяемый из формулы Маннинга

$$Q = \omega \frac{m}{n} (R)^{\frac{2}{3}} \sqrt{S_f}, \quad (3)$$

где  $R$  – гидравлический радиус;

$m$  – коэффициент, отражающий использование различных метрических систем для измерения длины;  $m = 1,49$  для английской системы мер (фут),  $m = 1$  для системы СИ (метр).

Коэффициент Шези связан с коэффициентом шероховатости зависимостью

$$C = \frac{1}{n} (R)^{\frac{1}{6}}.$$

Также для работы модуля EXTRAN необходимо задать ряд параметров модели, таких как временной шаг, время начала/окончания расчета, параметры ввода данных и вывода результатов расчета, число итераций, допустимая ошибка итерационных вычислений и др. Отдельная группа входных данных описывает каналы и водоводы (в т. ч. естественные русла), включая форму поперечного сечения и его размеры, длину, гидравлическую шероховатость, соединяемые узлы, начальные расходы воды и высотное положение дна водотока по отношению к отметке дна узловой точки и пр. При проведении расчетов коэффициенты шероховатости назначались с учетом рекомендаций [9, 10], в т. ч. для основного русла 0,035; для прилегающих пойменных участков 0,05.

#### **Реконструкция гидрологической обстановки, сложившейся в паводок 6–7 июля 2012 г.**

Для расчета трансформации паводочного стока была выполнена схематизация водосбора и участка русла р. Адагум в пределах территории г. Крымска. На рис. 1 приведена схема водосбора р. Адагум от истоков до места расположения железнодорожного моста на входе в г. Крымск. Для расчета поверхностного стока водосбор разбит на 19 элементарных водосборов.

На рис. 2 представлен фрагмент расчетной схемы гидродинамической модели для застроенной части бассейна р. Адагум в пределах г. Крымска. Точки 570 и 730 соответствуют основному руслу р. Адагум в начале и окончании зоны городской застройки. Остальные элементы воспроизводят городскую дренажную сеть. Канал, соединяющий точки 670 и 6012, моделирует затопление внутригородского участка вследствие перелива через понижение рельефа вблизи автодорожного моста в центре города.

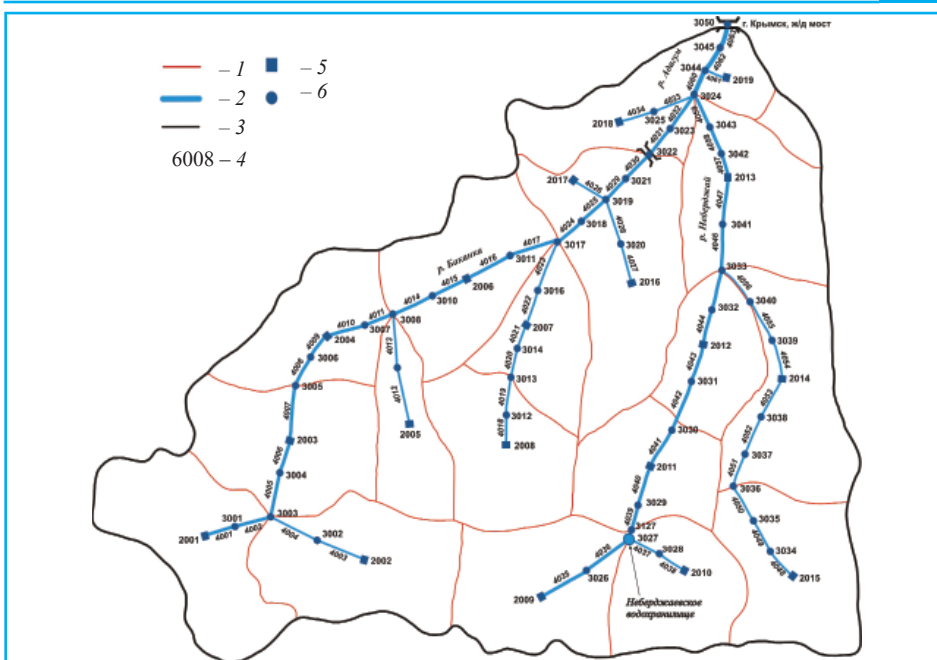


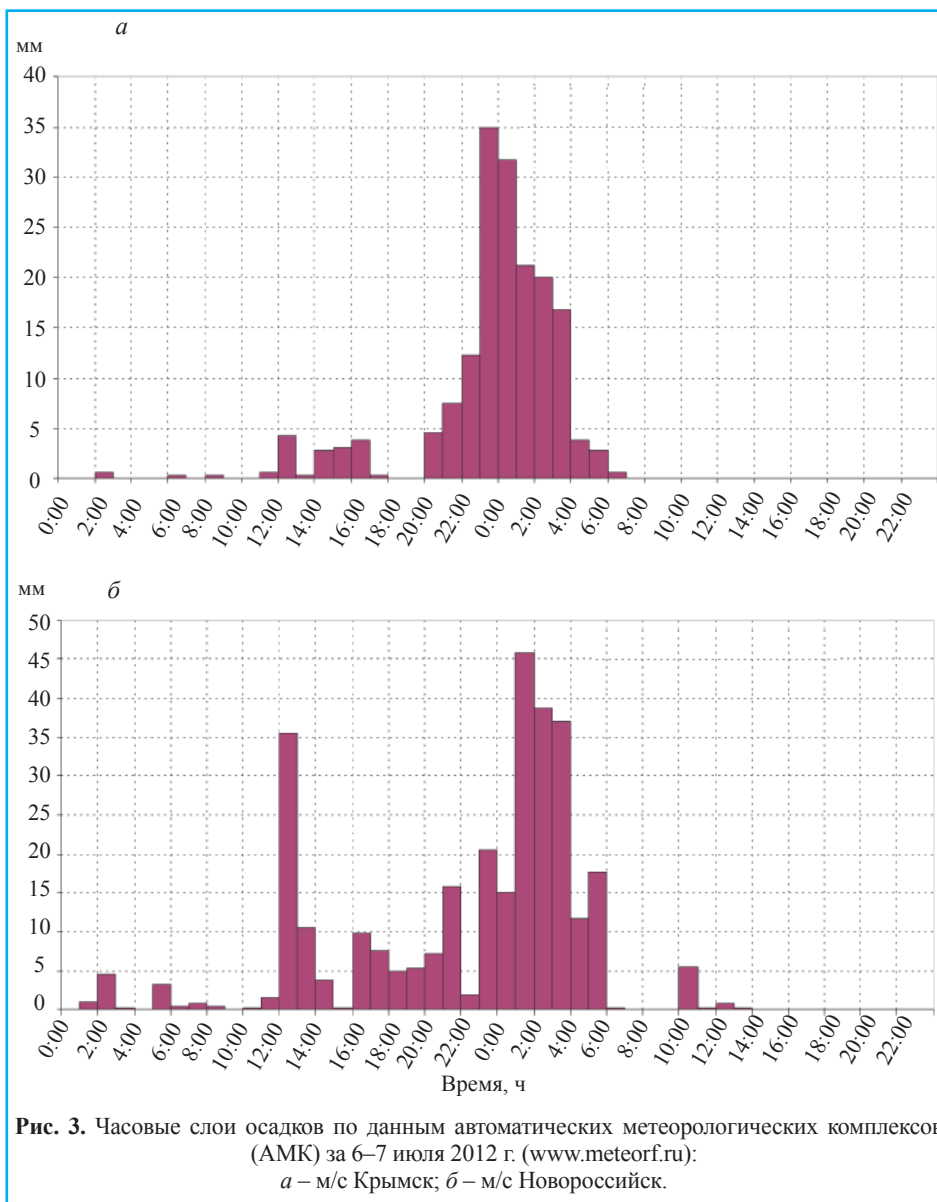
Рис. 1. Схематизация водосбора р. Адагум до створа железнодорожного моста на входе в г. Крымск:

1 – граница элементарных водосборов; 2 – участки схематизированного русла; 3 – граница водосбора; 4 – номера участков и узлов расчетной схемы; 5 – узлы, в которых задается гидрограф поверхностного притока с элементарного водосбора; 6 – узлы расчетной схемы.



Рис. 2. Схематизация городской гидрографической сети р. Адагум:

1 – участки схематизированного русла; 2 – участки городской дренажной сети; 3 – номера участков и узлов расчетной схемы; 4 – узлы, в которых задается гидрограф поверхностного притока; 5 – узлы расчетной схемы.



Реконструкция гидрологической обстановки в паводок 6–7 июля 2012 г. выполнена с помощью использования системы моделей, разработанной на основе крупномасштабного картографического материала, гидрометеорологической информации, собранной Краснодарским ЦГМС, Государственным гидрологическим институтом Росгидромета, и результатов полевых топографических работ и обследований, выполненных специалистами института Кубаньводпроект и Географического факультета МГУ.



Основным фактором наводнения в г. Крымске 6–7 июля 2012 г. стали экстремальные дождевые осадки, не отмечавшиеся до этого за всю историю инструментальных наблюдений. По данным Росгидромета, суммы суточных осадков по метеостанции (м/с) Крымск ранее не превышали 80 мм, а в ночь с 6 на 7 июля сумма осадков достигла 156 мм. Ранее наблюдавшаяся максимальная суточная сумма осадков по м/с Новороссийск составила 180 мм в 1988 г., а за сутки с 7 часов 6 июля по 7 часов 7 июля был зафиксирован максимум осадков 275 мм. Были превышены ранее наблюдаемые максимумы суточных осадков (105 мм) по м/с Геленджик, где за 24 часа выпало 311 мм. Вся территория бассейна Адагум была охвачена зоной интенсивного выпадения осадков.

Полученные на м/с Новороссийск и Крымск (рис. 3) гиетографы указывают на то, что основной объем осадков, сформировавших катастрофический паводок, выпал с 22 часов 6 июля по 3 часа ночи 7 июля. В этот период интенсивность осадков достигала 35–45 мм в час.

В табл. 1 приведены величины максимальных расходов воды, определенные по меткам высоких вод Росгидрометом и полученные в результате модельных расчетов. Методика определения максимальных расходов по меткам высоких вод характеризуется большой погрешностью, т. к. полученные значения расхода не всегда соответствуют естественному гидродинамическому режиму открытого безнапорного потока (довольно часто не принимаются во внимание подпорные явления, вызванные заломами из карчи и другого плавающего мусора в зонах сужения потока, мостовых переходов и др. препятствий, набегание потока на берега, деревья, мосты и др.). Сравнение данных величин с рассчитанными по модели позволяет сделать вывод об удовлетворительном качестве моделирования стока, в особенности его максимальных значений.

**Таблица 1.** Максимальные расходы дождевого паводка 6–7 июля 2012 г., определенные Росгидрометом по меткам высоких вод ( $Q_{\text{вв}}$ ) и модели формирования стока ( $Q_{\text{м}}$ ), м<sup>3</sup>/с

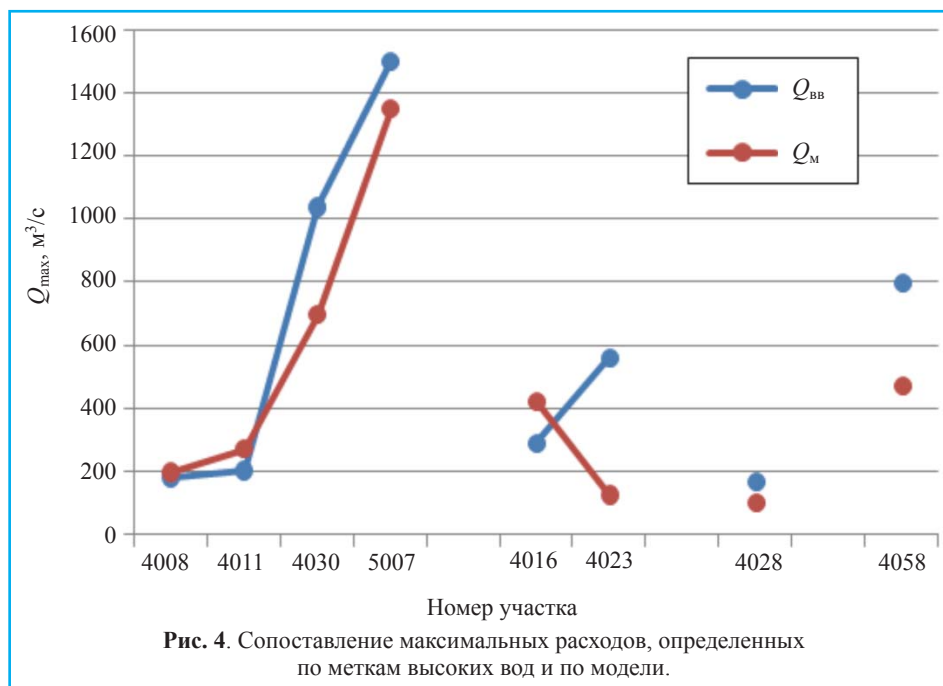
№ п/п	№ участка по схеме на рис. 1, 2	$Q_{\text{вв}}$	$Q_{\text{м}}$
1	4008	182	200
2	4011	205	275
3	4016	290	425
4	4023	560	129
5	4030	1040	700
6	4028	170	105
7	4058	800	475
8	5007	1500	1350

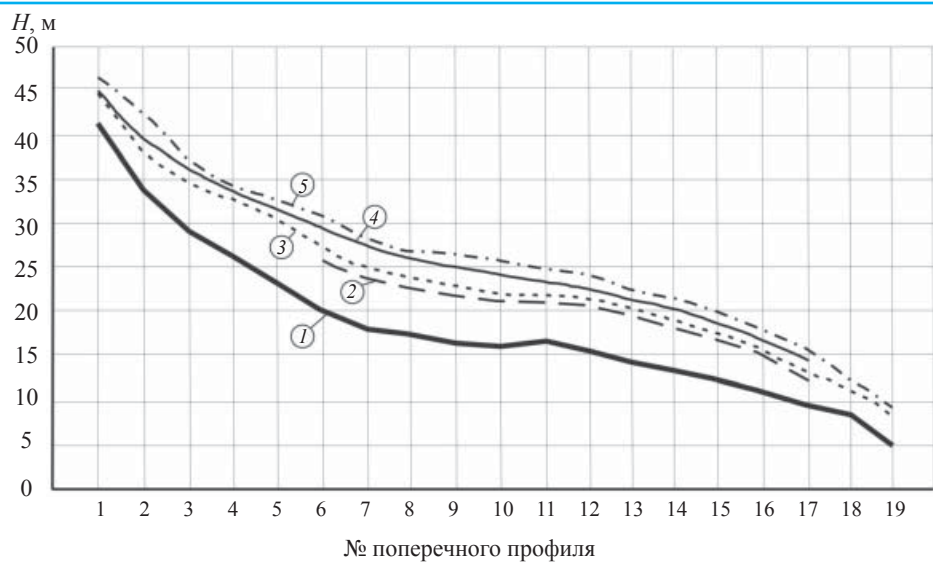
Расхождение в ряде случаев в значениях расходов  $Q_{\text{вв}}$  и  $Q_{\text{м}}$  можно объяснить тем, что определение максимальных расходов в модели основано на данных плювиограмм наблюдавшихся ливней на м/с Новороссийск и Крымск, при этом интенсивность ливня на всей территории водосбора предполагалась одинаковой, что может сильно отклоняться от реальной картины. Сопоставление максимальных расходов, определенных по меткам высоких вод и по модели, представлено на рис. 4. На графике можно выделить два участка, расхождение значений расхода на которых достигает 70 %, что, по-видимому, является следствием как недостаточной информации о распределении осадков, так и ошибок измерений.

В целом же моделирование позволило получить расход в замыкающем створе (для всего водосбора реки Адагум на входе в город) с приемлемой точностью.

Следующий этап реконструкции заключался в верификации гидродинамической модели с использованием поперечных профилей, полученных в результате обследования территории города и сбора меток высоких вод (уровней затопления), зафиксированных на этих же профилях (рис. 5). После верификации модели был выполнен расчет уровня свободной поверхности для входного гидрографа обеспеченности  $P = 1 \%$ .

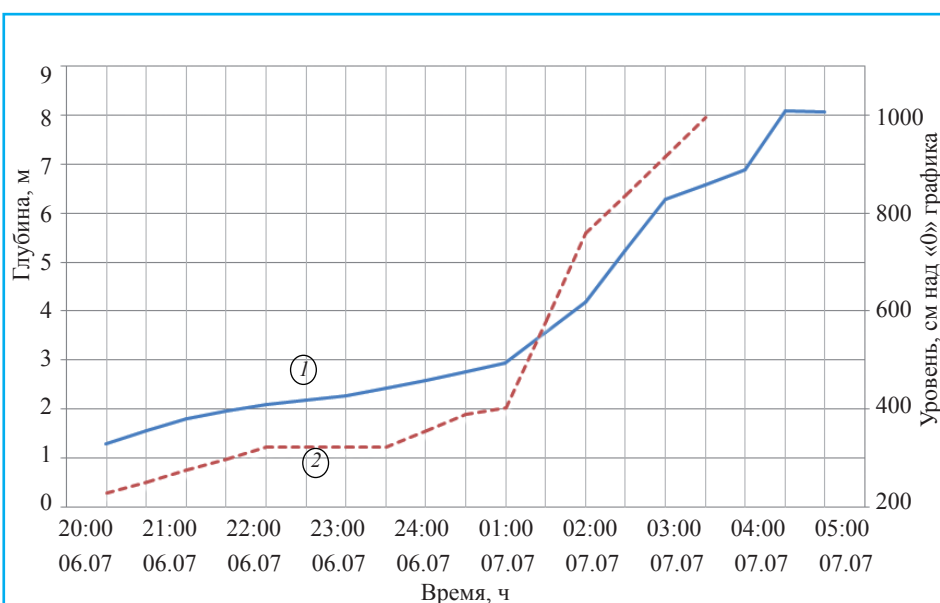
Единственный пункт гидрологических наблюдений на р. Адагум, находящийся в г. Крымске, был разрушен в момент прохождения пика паводка, поэтому для реконструкции события имелась только ветвь гидрографа





**Рис. 5.** Продольные профили водной поверхности р. Адагум в пределах г. Крыма для различных вариантов расчета:

1 – отметка дна русла; 2 – уровень водной поверхности при русле трапецеидальной формы с шириной 60 м по дну; 3 – бровки берега; 4 – уровень водной поверхности при расходе обеспеченностью 1 раз в 100 лет; 5 – уровень водной поверхности, наблюдаемый в паводок 6–7 июля 2012 г.

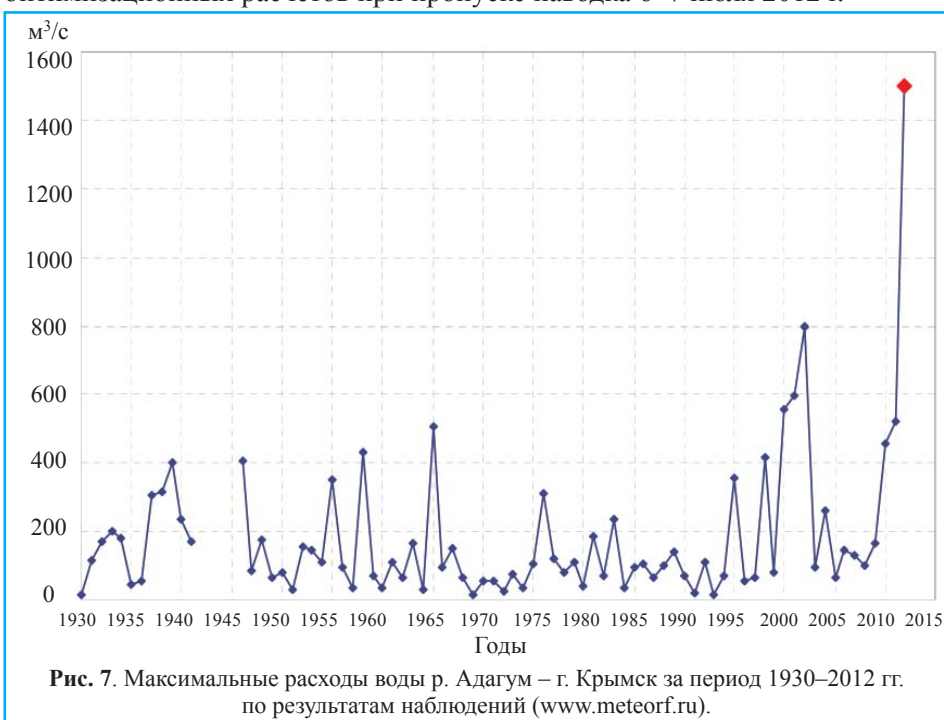


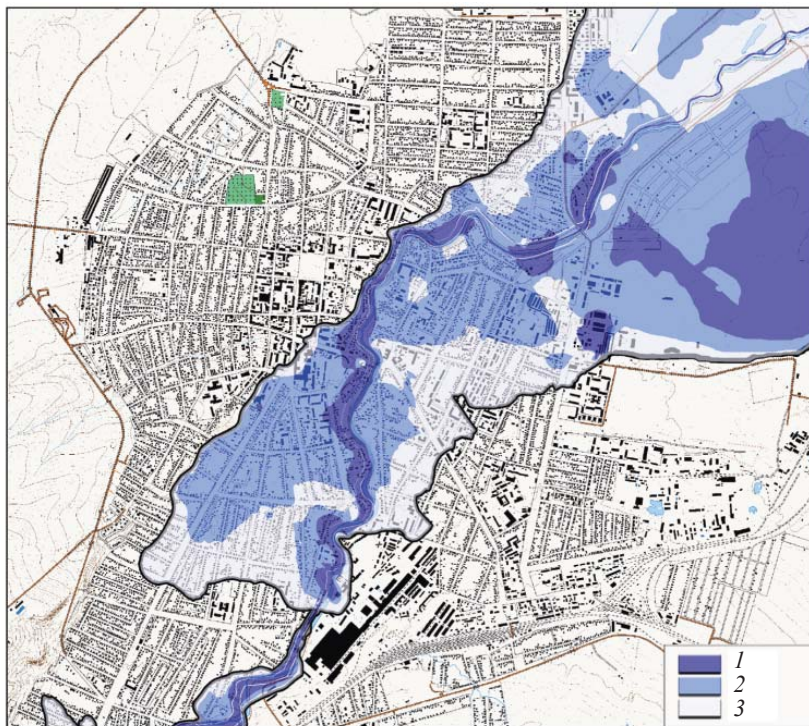
**Рис. 6.** Ход уровней при подъеме паводка 6–7 июля 2012 г., р. Адагум, г. Крымск: 1 – расчетный; 2 – наблюдаемый.

при подъеме паводка. На рис. 6 представлен ход уровней воды во время подъема стока, зафиксированных на водомерном посту до его разрушения, а также рассчитанных на модели. Приняв во внимание, что модельные расчеты выполнены по данным pluviографов в Новороссийске и Крымске без какой-либо калибровки параметров, характеризующих время добегающего по водосбору, качество моделирования следует оценить как приемлемое. Данный результат позволяет утверждать, что основной механизм формирования паводочного стока 6–7 июля 2012 г. и соответствующего наводнения в г. Крымске – это выдающиеся дождевые осадки, сформировавшие экстремальный по величине сток.

### Оценка зоны затопления г. Крымска в паводок 1 % обеспеченности

Для оценки зон затопления г. Крымска в паводок 1 % обеспеченности использованы результаты расчетов прохождения паводочной волны на гидродинамической модели и крупномасштабная карта застроенной территории. Для построения продольного профиля водной поверхности, соответствующего паводку 1 % обеспеченности, использовали входной гидрограф, рассчитанный с помощью модели формирования стока в бассейне р. Адагум, и морфометрические характеристики русла, полученные в процессе оптимизационных расчетов при пропуске паводка 6–7 июля 2012 г.





**Рис. 8.** Границы зон затопления г. Крымска в паводок обеспеченностью 1 %:  
1 – зона затопления с глубиной более 2 м; 2 – зона затопления с глубиной от 1 до 2 м;  
3 – зона затопления с глубиной менее 1 м.

Для получения расчетных гидрологических характеристик стока обрабатывали данные о максимальных расходах воды по гидрологической станции р. Адагум – г. Крымск за 80-летний период 1929–2012 гг. (рис. 7). Оценка расчетных гидрологических характеристик для паводка 1 % обеспеченности проведена тремя различными методами, используемыми в гидрологии: методом моментов, методом наибольшего правдоподобия [5, 6] и методом  $L$ -моментов [11]. Результаты расчетов квантилей 1 %, выполненных независимыми методами, незначительно отличаются друг от друга. По выполненным гидрологическим расчетам максимальный расчетный расход 1 % обеспеченности р. Адагум в г. Крымске составил  $1040 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Долина реки Адагум в черте города представляет собой плоскую широкую террасу. В силу этой особенности рельефа граница зоны затопления территории г. Крымска при расчетном случае паводка обеспеченностью 1 % (максимальный расход  $1040 \text{ м}^3/\text{с}$ ) достаточно близка наблюдаемой в паводок 6–7 июля 2012 г. (рассчитанный по модели максимальный расход  $1350 \text{ м}^3/\text{с}$ , оцененный по меткам высоких вод  $1500 \text{ м}^3/\text{с}$ ). Полученная с помощью крупномасштабной карты граница зоны затопления в паводок

1 % обеспеченности представлена на рис. 8 с выделением подзон, соответствующих различным глубинам затопления. Зоны затопления выделены с использованием цифровой модели рельефа, разработанной А.Л. Бубером.

### **Предложения по снижению риска затопления территории г. Крымска**

Снижение риска затопления застроенной территории г. Крымска может быть достигнуто за счет различных мероприятий, в т. ч. предусматривающих проектирование и строительство защитных инженерных сооружений, вынос объектов из зоны затопления расчетной обеспеченности и др.

Город Крымск расположен на террасе в месте выхода реки из горной части бассейна, где пропускная способность потока резко сокращается за счет снижения уклонов русла, что и приводит к значительному затоплению территории города в случае выдающихся паводков. Русло реки в пределах городской территории было захлавлено или искусственно сужено, соответственно основная рекомендация состоит в расчистке, углублении, расширении русла в сочетании с его спрямлением на отдельных участках. Гидравлические расчеты показывают, что в «максимальном» варианте при канализовании русла (создании канала трапециoidalной формы шириной по дну 60 м и заложением откосов 2:1) удастся обеспечить безопасный пропуск паводка обеспеченностью 1 %. Оптимальные размеры канала должны быть определены на стадии проектирования путем выполнения многовариантных расчетов, предусматривающих, например, сокращение размеров канала и затопление узкой прибрежной полосы с учетом стоимости выносимых и реконструируемых объектов.

Зона затопления г. Крымска, соответствующая обеспеченности 1 %, занимает большую часть застроенной территории. Для принятия решений о выносе, реконструкции или защите объектов эту зону необходимо разделить на части, соответствующие различной глубине затопления (см. рис. 8).

В числе возможных мероприятий, способствующих снижению риска наводнения и катастрофических ущербов, можно отметить:

- вынос жилых строений и промышленных объектов из зоны затопления паводком 1 % обеспеченности (или, по крайней мере, из наиболее опасной ее части с глубинами более двух метров);
- увеличение и поддержание пропускной способности русла р. Адагум в пределах городской территории;
- строительство обводного канала, отводящего паводочный сток непосредственно в Варнавинское водохранилище, минуя г. Крымск;
- строительство дамб обвалования в черте города, защищающих застроенные территории от затопления.

Оптимальный вариант системы инженерной защиты г. Крымска от затопления должен основываться на комбинации некоторых из перечислен-

ных выше методов. Основную нагрузку по снижению риска затопления застроенной территории берет на себя канализование русла р. Адагум. При этом допускается затопление узкой прибрежной полосы с отчуждением территории, выносом из нее объектов или созданием локальных систем инженерной защиты. На некоторых, особо опасных участках, допускается создание защитных дамб. Размер полосы отчуждения, проектные решения по канализованию русла и параметры других систем защиты должны быть определены на стадии ТЭО путем сравнения стоимости каждого варианта.

### **Выводы**

Основной причиной катастрофического наводнения в г. Крымске 6–7 июля 2012 г. явилось исключительно редкое по вероятности гидрологическое событие – выдающийся дождевой паводок, сформировавший расходы воды, значительно превышающие по величине пропускную способность русла р. Адагум в городской черте.

Дождевые паводки данного типа относятся к категории так называемых «быстроразвивающихся» паводков. Прогноз такого паводка в оперативном режиме является весьма сложной задачей, требующей существенной реорганизации существующей сети гидрометеорологического мониторинга и средств и методов гидропрогнозов. Существующая система прогнозирования и предупреждения может выдавать в экстремальных случаях лишь так называемые штормовые предупреждения и не может сопровождать их надежными количественными оценками прогнозируемых гидрологических характеристик.

Причиной возникновения значительных площадей затопления является также расположение города на участке речной долины при выходе потока из горной части бассейна, где уклон реки резко уменьшается и пропускная способность русла падает. В результате происходит повышение уровня воды в реке и значительная часть расположенного на относительно плоской террасе города затапливается. Опасность затопления возрастает в связи с наличием в русле объектов инфраструктуры (мосты, искусственные сужения русла, застройка прибрежной части), оказывающих дополнительные гидравлические сопротивления.

Для г. Крымска выполнено зонирование затапливаемых территорий паводком обеспеченностью 1 %. Площадь зоны затопления составляет примерно 3,1 км<sup>2</sup>, она должна быть дифференцирована по глубине затопления с разработкой соответствующих первоочередных инженерных защитных мероприятий для каждой подзоны.

В качестве наиболее приемлемого варианта защиты г. Крымска от затопления рекомендуется увеличение пропускной способности русла р. Адагум за счет его канализования в сочетании с отчуждением узкой прибрежной

части и выносом из этой зоны жилых и промышленных объектов. Предварительные модельные расчеты показали, что реконструкция русла р. Адагум в пределах городской застройки может существенно снизить риск затопления селитебных территорий. Для обоснования конкретных проектных решений необходимо на стадии проектирования выполнить многовариантные расчеты по определению размеров канализованного русла исходя из стоимостных критериев, включающих как стоимость самого строительства, так и стоимость выноса объектов (жилых домов, промышленных сооружений и пр. инфраструктуры) из зоны отчуждения.

**Благодарности.** Авторы благодарят за помощь и содействие при выполнении работ главного специалиста ФГУ «Кубаньмониторинг вод» Е.В. Белана, а также старшего научного сотрудника ВНИИГИМ А.Л. Бубера за помощь при внедрении компьютерных технологий визуализации результатов расчетов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Horton R.E. Analysis of runoff-plat experiments with varying infiltration capacity. Trans. American Geophys. Union. 1939. V. 20. Part IV. P. 693–711.
2. Бефани А.Н. Основы теории ливневого стока // Труды ОГМИ. 1949. Ч. 1. Вып. IV. С. 39–175.
3. Бефани А.Н. Основы теории ливневого стока // Труды ОГМИ. 1958. Ч. 2. Вып. 14. 310 с.
4. Алексеев Г.А. Расчет паводочного стока рек СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1955. 197 с.
5. СНиП 2.01.14–83 «Определение расчетных гидрологических характеристик».
6. СП 33-101–2003 «Определение основных расчетных гидрологических характеристик».
7. Лурье П.М., Панов В.Д., Ткаченко Ю.Ю. Река Кубань. Гидрография и режим стока. СПб.: Гидрометеиздат, 2005. 499 с.
8. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 8. Северный Кавказ. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 446 с.
9. James W., Huber W.C., Dickinson R.E., Pitt R.E., James W.R. C., Roesner L.A., Aldrich J.A. User's guide to SWMM. 2003. 700 p.
10. Rivard G. Gestion des eaux pluviales en Milieu urbain. Concepts et applications. Alias communication design inc. 1998. 314 p.
11. Болгов М.В., Осипова Н.В. Новые стохастические модели и методы инженерной гидрологии (обзор) // Современные проблемы стохастической гидрологии. Тр. конф. М. 2001. С. 30–36.

#### Сведения об авторах:

Болгов Михаил Васильевич, д. т. н., заведующий лабораторией, Институт водных проблем Российской академии наук, 119333, Москва, ул. Губкина, 3; e-mail: bolgovmv@mail.ru

Коробкина Елена Александровна, к. т. н., научный сотрудник, Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирский филиал, 630090, г. Новосибирск, Морской проспект, 2; e-mail: elenakorobkina@mail.ru