

В.А.Иванов, К.Е.Краевский, А.В.Прусов

Морской гидрофизический институт РАН, г.Севастополь

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЦЕНАРИЕВ
РАЗВИТИЯ КАТАСТРОФИЧЕСКИХ ПАВОДКОВ
НА ГОРНЫХ РЕКАХ АЗОВО-ЧЕРНОМОРСКОГО БАССЕЙНА**

Приводятся результаты моделирования паводка, вызванного экстремальными ливнями в районе бассейна реки Адагум. Сделан вывод о пригодности используемых моделей как основы для развития прогностической системы катастрофических паводков в горных районах со сложным рельефом.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *река, ливень, паводок, моделирование*

В ночь с 6-го на 7-е июля 2012 г. в городе Крымске Краснодарского края произошла страшная трагедия – катастрофический паводок затопил город, погибло 168 человек. Моделированию этого события [1 – 3] и подробному его описанию посвящено несколько работ, например, [4 – 7]. В [4] подробно анализируются данные наблюдений гидрометеорологической обстановки 6 – 7 июля 2012 г. в бассейне р.Адагум. В [5] говорится о том, что основные разрушения городу нанес вал воды высотой около 3 м, пробежавший ночью по руслу реки. Источником залпового расхода воды, породившего вал, мог быть сброс воды из Неберджаевского водохранилища в реку Неберджай, которая впадает в Адагум. В [6] выявлены две зоны – два «пятна смерти» в г.Крымск. По этим зонам пришелся наибольший удар паводка. Это районы города, где сконцентрировано большинство жертв. Около 2/3 из них жило в левобережной зоне, расположенной на возвышенном берегу реки, несмотря на то, что к моменту катастрофы этот участок города был залит на глубину не более 1 м. Указана возможная причина смертельного парадокса – затопление этой зоны волной типа бора, т.е. ударной волной, возникшей на поверхности левобережного мелководья при втекании туда «горба воды», сформированного в горах на притоках р.Адагум.

Смоделируем пространственно-временное распределение расходов реки Адагум и ее притоков с помощью гидравлической модели речного стока, описанной в монографии [9].

Кратко опишем гидравлическую модель стока. Ее основой служат данные о рельефе рассматриваемого региона с пространственным разрешением порядка 60×90 м, подробно описанные в [9]. Перенос воды из ячейки в ячейку в модели вычисляется по данным о направлениях потоков и коэффициентам релаксации поверхностного $T_s(x, y, t)$, подземного $T_d(x, y, t)$ и руслового $T_r(x, y, t)$ стоков.

Общий расход воды Q ($\text{м}^3/\text{с}$), поступающей в каждую ячейку, состоит из суммы

$$Q = R_s + R_d + (P_w - E_w) + F_{in}, \quad (1)$$

где R_s – сток с поверхности; R_d – подземный сток; P_w – осадки; E_w – испарение с поверхности воды; F_{in} – приток из вышележащих ячеек.

© В.А.Иванов, К.Е.Краевский, А.В.Прусов, 2017

В каждой ячейке одновременно вычисляются изменения объемов воды в трех условных бассейнах: V_s , V_d , V_r – поверхностном, подповерхностном и русловом, где суммируются потоки из соседних ячеек, плюс локальный поверхностный и подземный стоки, минус излишки после заполнения депрессий рельефа.

Каждой ячейке с координатами (x, y) соответствует система трех обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка

$$\frac{dV_s}{dt}(x, y, t) + \frac{1}{T_s(x, y, t)}V_s(x, y, t) = R_s(x, y, t), \quad (2)$$

$$\frac{dV_d}{dt}(x, y, t) + \frac{1}{T_d(x, y, t)}V_d(x, y, t) = R_d(x, y, t), \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{dV_r}{dt}(x, y, t) + \frac{1}{T_r(x, y, t)}V_r(x, y, t) = & [1 - a(x, y, t)] \left[\frac{V_s}{T_s} + \frac{V_d}{T_d} \right] + \\ & + a(x, y, t) \cdot [P_w(x, y, t) - E_w(x, y, t)] + F_{in}(x, y, t), \end{aligned} \quad (4)$$

Начальные условия

$$V_s(x, y, 0) = V_{os}(x, y), \quad V_d(x, y, 0) = V_{od}(x, y), \quad V_r(x, y, 0) = V_{or}(x, y), \quad (5)$$

где $a(x, y, t)$ – доля площади поверхности ячейки, занятая водой; T_s , T_d , T_r – характерные времена релаксации поверхностного, подземного и руслового стоков соответственно; P_w , E_w – осадки и испарение с поверхности воды; F_{in} – сумма потоков из соседних ячеек.

В модели используются данные о типах землепользования с пространственным разрешением 1 км [10].

Время $T_r(x, y, t)$ определялось как отношение расстояния $D(x, y)$ между центрами данной ячейки и ячейки, лежащей ниже по течению, к средней скорости течения $u(x, y, t)$ в данной точке. Скорость u , а значит и T_r , вычислялись по формуле Шези [11]: коэффициент T_r на каждом шаге по времени пересчитывался для каждой ячейки по формуле

$$T_r(x, y, t) = \frac{D(x, y)}{u(x, y, t)_{cp}}, \quad (6)$$

где $u(x, y, t)_{cp} = C(x, y, t) \sqrt{R(x, y, t) \cdot i(x, y, t)}$, R – гидравлический радиус; i – уклон; C – коэффициент трения.

Для его определения применялась эмпирическая формула [11]

$$C = R^y \cdot \frac{1}{n}, \quad (7)$$

где $y = 2,5\sqrt{n} - 0,13 - 0,75\sqrt{R}(\sqrt{n} - 0,1)$.

Параметры поперечных сечений русел р.Адагум и ее притоков для определения гидравлического радиуса по формуле (7) приведены в [4]

Следуя методике [13], выпавшие осадки P переводились в склоновый сток R с помощью специального эмпирического коэффициента C_n , зависящего от инфильтрационных свойств почвы, растительного покрова, количества водонепроницаемых площадей, барьеров и потенциальных хранилищ воды на поверхности (ямки, канавки и т.п.):

$$R = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S}, \quad (8)$$

где R – сток (мм); P – осадки (мм); S – влагоемкость почвы после начала стока (мм); I_a – начальный отбор (мм).

При этом

$$I_a = 0,2S, \quad R = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S}, \quad S = \left(\frac{1000}{C_n} - 10 \right) \cdot 25,4. \quad (9)$$

При отладке модели вместо полей атмосферных осадков использовались композитные поля среднегодовых (а также среднемесячных) величин склонового стока из [13]. Таким образом были оценены коэффициенты стока на 5 – 7 июля 2012 г.

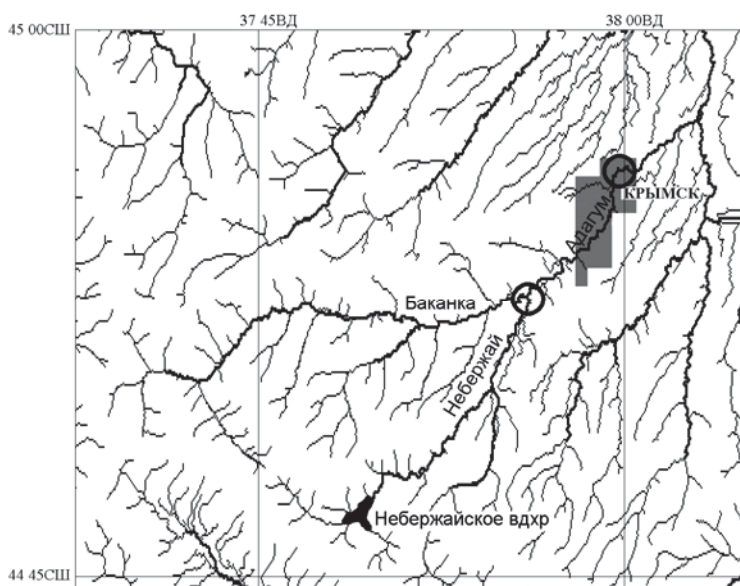
Ключевым параметром нашей модели является поле направлений склоновых потоков, которое в каждой ячейке рассчитывается через возвышение поверхности. Рассмотрим регион Краснодарского края размером $45^\circ - 44^\circ 45'$ с.ш., $37^\circ 45' - 38^\circ$ в.д. Средняя высота водосбора р.Адагум 220 м. На водосборе расположено 17 озёр общей площадью 6,21 км² [4]. Вблизи водораздела территория представляет собой типичный низкогорный ландшафт. Высоты местности здесь изменяются от 100 до 150 м на западе и до 600 – 800 м в восточной части. Склоны гор, покрытые густым лиственным лесом, пересечены долинами многочисленных горных рек. Лесистость водосбора составляет 70 %, распаханность – 5 %. Долины рек в верховьях имеют характер ущелий с крутыми, обрывистыми склонами. При выходе на равнину долины рек значительно расширяются, водоразделы сглаживаются и постепенно сливаются с окружающей низменностью. Долина р.Адагум до города Крымск имеет ящикообразную форму при ширине дна около 1,2 км. Склоны на преобладающем протяжении умеренно крутые высотой около 40 м. Пойма двухсторонняя, неровная, у истоков реки шириною 200 – 250 м, высотой 1,0 – 1,2 м, сложенная галечником, поросшая кустарником. В верхней части г.Крымска пойма сужается до 30 – 40 м и понижается до 0,8 м. Ниже города и до устья ширина поймы 15 – 50 м и высота 0,4 – 0,8 м. Пойма часто затапливается при дождевых паводках. Русло реки извилистое, слабо разветвленное, хорошо выраженное. Берега на преобладающем протяжении на верхнем и среднем участках крутые, местами отвесные.

Основные трудности при определении направлений склоновых потоков возникают в плоской части региона, где ошибка в определении высоты места даже в 1 м может привести к серьезному искажению гидрографической картины. При поиске направлений стока в изучаемом регионе (бассейне реки) необходимо иметь географические координаты основных элементов его гидрографической сети (русел рек, контуров озер, водохранилищ, болот, плотин, дамб и т.п.). При этом точность их привязки должна быть не хуже точности используемых цифровых данных о возвышении уровня поверхности. Такие данные, полученные, например, по результатам аэрофотосъемок, имеются. В нашем случае для данных *DTED Level 1* желательная точность привязки гидрографической сети должна быть как на топографических картах масштаба 1 : 50000 – 1 : 100000 (горизонтальный шаг в массивах *DTED Level 1* составляет 3").

Не имея координат составляющих гидрографической сети, приступать к построению карты направлений потоков по данным цифровых моделей уровня в автоматическом режиме практически бессмысленно. Погрешности в данных о рельефе и грубое разрешение по вертикали (1 м) неминуемо приведут к значительным искажениям истиной картины дренажной сети: исчезнут некоторые реально существующие русла, появятся новые «реки» и «озера». Бракованные значения в массиве данных о рельефе мы заменили на среднеарифметические соседних ячеек. После этого по методике, описанной в [9], была построена карта направлений потоков (рис.1).

«Заполнение» исследуемой области водой с временным шагом в 12" продолжалось до достижения стационарного решения задачи (2) – (5), а именно, около 24-х модельных часов. В результате получились значения расходов, хорошо соответствующие данным многолетних наблюдений: у рек Баканка и Неберджай в местах впадения в Адагум 1,16 и 0,84 м³/с соответственно. У р.Адагум в районе г.Крымск 3,76 м³/с. Таким образом, модельные ливни в рассматриваемом регионе у нас начались 6 июля 2012 г. на фоне вышеуказанных значений стока.

Основной входной параметр в системе (1) – (5) – атмосферные осадки по данным [4] в г.Крымск – представлен на рис.2. Там же описаны синоптические условия [4]: «в предшествующие катастрофическому паводку двое суток в средней тропосфере на территорию Северного Кавказа оказывал влияние высотный циклон с центром над северо-востоком Турции (давление в центре 572 гп дам), 5 – 6 июля он сместился на юго-запад Краснодарского края, углубившись на 4 – 6 гп дам. Суммарный дефицит в слое 850 – 500 гп дам составлял 0,7 – 1,5 °С, что указывало на значительное влагосодержание воздушной массы в этом районе. К 4:00 6 июля у земли в обширной области пониженного давления образовался частный циклон с центром над востоком Азовского моря (давление в центре 1005 гп дам). В течение дня 6 июля



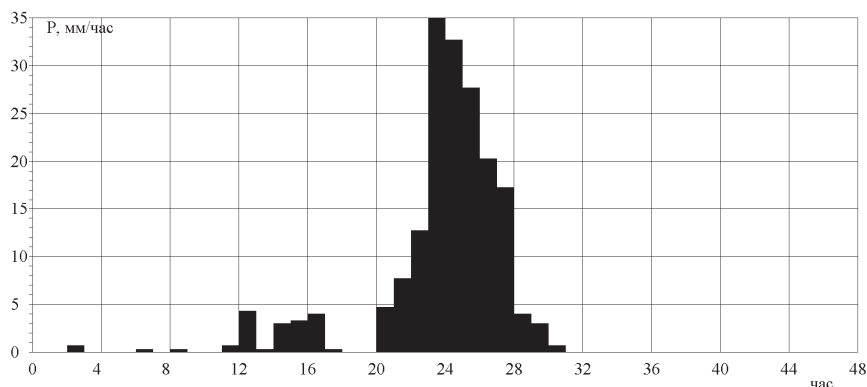
Р и с . 1 . Карта направлений склоновых потоков.

и ночи 7 июля местоположение приземного циклона и давление в центре существенно не изменились, что обусловило продолжительность осадков. По данным ИСЗ 6 июля 2012 г. около 14:00 отчетливо просматривается мезовихрь в виде локального плотного облачного массива, который по ведущему юго-западному потоку смещался на северо-запад Черноморского побережья Краснодарского края. В вечерние часы 6 – 7 июля 2012 г. массив объединился с облачностью в районе Новороссийска – Геленджика. Вовлечение в циркуляцию фронта влажного морского воздуха с очень теплой поверхности моря (23 – 24 °С) внесло дополнительный вклад в развитие конвекции. Вынужденный подъем влажного воздуха усиливался также из-за орографической особенности местности в районе Новороссийска – Геленджика. Высота Кавказского хребта в этом районе составляет 600 – 700 м. В результате в юго-западных районах Краснодарского края мощная кучево-дождевая облачность сохранялась в течение суток, постоянно поддерживаемая высокой конвективной неустойчивостью атмосферы, что обусловило выпадение очень сильных и продолжительных дождей в этом районе.

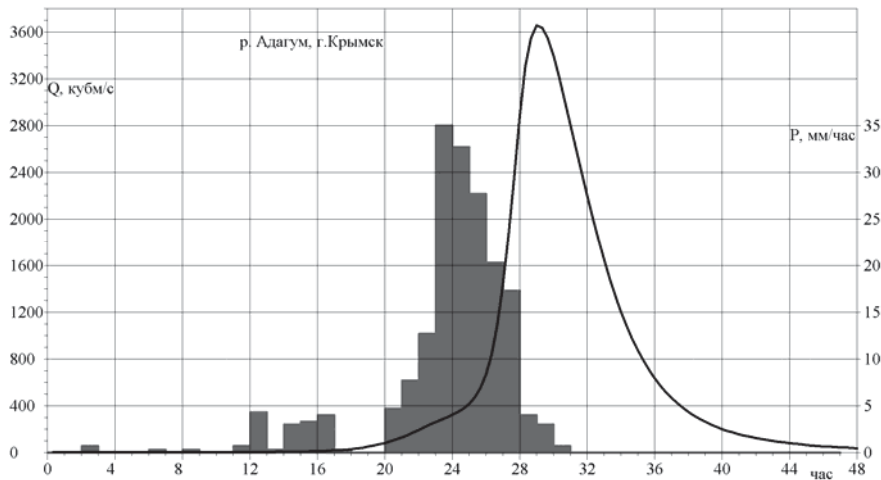
Выпавшие в течение 6 – 7 июля осадки являются экстремальными и не наблюдались ранее за всю историю инструментальных наблюдений. Суммы суточных осадков по метеостанции Крымск ранее не превышали 80 мм, а в ночь с 6 на 7 июля сумма осадков достигла 156 мм. Зона экстремальных осадков охватила всю территорию бассейна р.Адагум.»

Поскольку данных наблюдений атмосферных осадков, кроме приведенных на рис.2, у нас нет и не предвидится, для начала рассмотрим сценарий развития паводка на водосборе р.Адагум, предположив одинаковый временной ход часовых сумм осадков (как на рис.2) в каждой точке водосбора. Результат моделирования представлен на рис.3 Черная кривая – гидрограф в точке г.Крымск, где по данным оценок из [4] максимальный расход р.Адагум составил 1500 м³/с. Видим, что максимальный модельный расход (3650 м³/с) отличается от реального более, чем на 250 % т.е предположение об однородности пространственного распределении осадков на водосборе р.Адагум следует отвергнуть.

Рассмотрим новый сценарий развития паводка с модельным пространственно-временным распределением осадков (рис.4) на водосборе р.Адагум: временной ход, как на рис.2, но пропорционально высоте места. Этот сце-



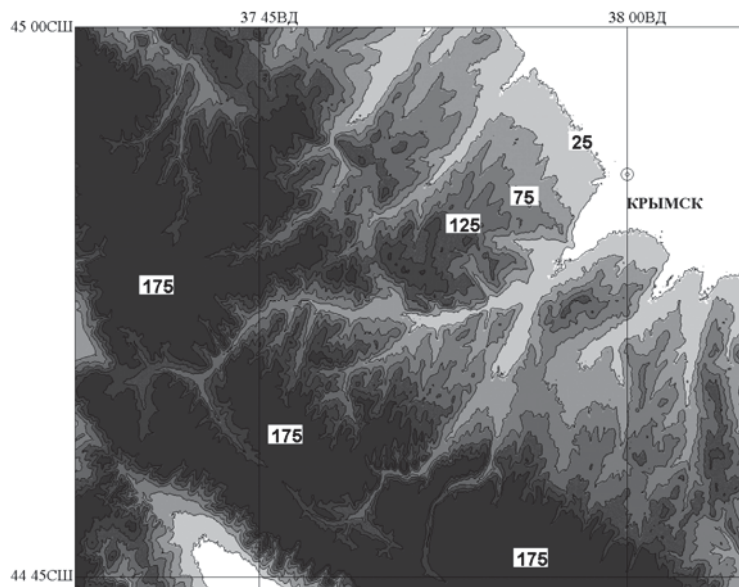
Р и с . 2 . Часовые слои осадков в г.Крымск (6 – 7 июля 2012 г.) [4].



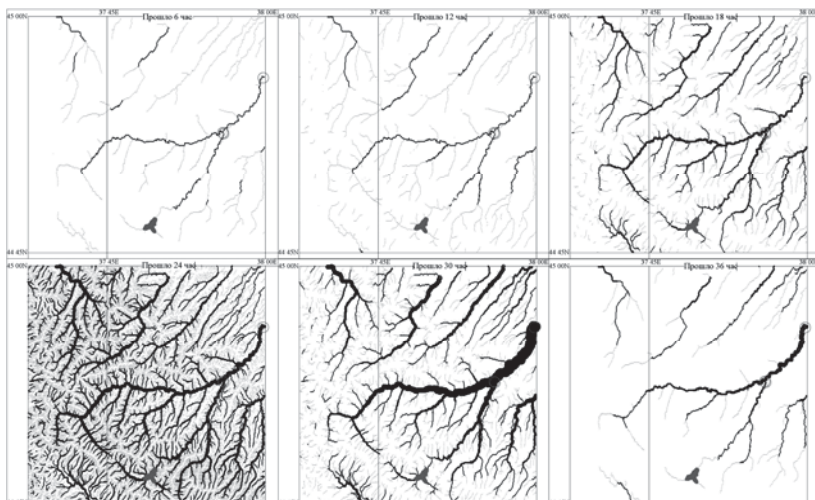
Р и с . 3 . Модельный гидрограф (черная кривая) р.Адагум, г.Крымск (левая шкала) при одинаковом распределении осадков (правая шкала) в каждой точке водосбора.

нарий представлен на рис.5 в виде кадров через каждые 6 часов после начала катастрофического паводка. Видно, как расходы на реках водосбора Адагума вырастают в сотни раз выше номинала и достигают значений, соответствующих данным измерений (например, 1500 м³/с для р.Адагум в Крымске).

На рис.6 приведены гидрографы рек Неберджай, Баканка, Адагум с учетом Неберджаевского водохранилища. Причем их модельные максимальные расходы совпадают с данными наблюдений. Максимальный модельный расход р.Адагум (зеленая кривая), посчитанный без учета Неберджаевского водохранилища, отличается от максимального расхода с учетом этого водохра-



Р и с . 4 . Модельное пространственное распределение суточных осадков (мм/сут) в бассейне р.Адагум.

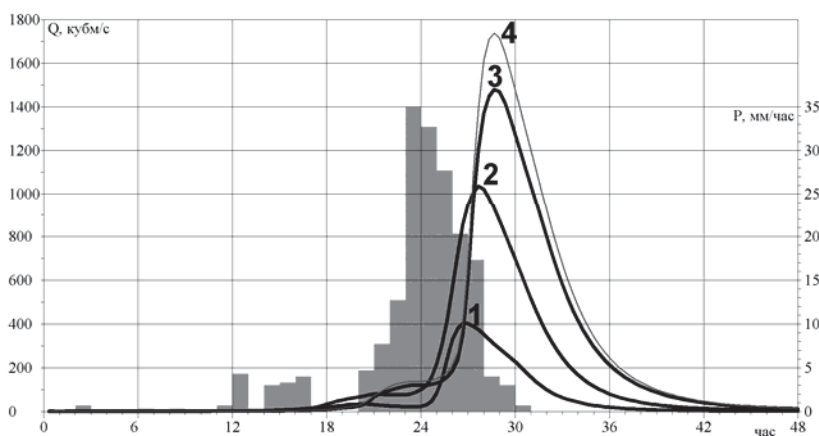


Р и с . 5 . Развитие паводка через 6, 12, 18, 24, 30, 36 часов.

нилища на $258 \text{ м}^3/\text{с}$, что доказывает важную, но не решающую роль Неберджаевского водохранилища в развитии катастрофического паводка 6 – 7 июля 2012 г.

Несколько слов о Неберджаевском водохранилище [4]. Сооружение имеет шахтный водосброс с диаметром шахты 4,3 м. Отметка гребня плотины 185 м, отметка нормального подпорного уровня 182 м, отметка форсированного подпорного уровня 183,5 м. Отметка паводочного шахтного водосброса, при превышении которого начинается автоматический слив воды, составляет 182 м. Максимально допустимый сбросной расход через шахтный водосброс равен $130 \text{ м}^3/\text{с}$.

Сброс из водохранилища начался в автоматическом режиме после 5:45 7 июля, при достижении отметки уровня 182 м. В течение 7 июля сброс составил $60 - 80 \text{ м}^3/\text{с}$, а 8 июля $10 - 40 \text{ м}^3/\text{с}$. Приток в водохранилище в период



Р и с . 6 . Расходы рек Неберджай (1), Баканка (2) и Адагум с учетом (4) и без учета (5) Неберджаевского водохранилища, $\text{м}^3/\text{с}$ (левая шкала), часовые суммы осадков, $\text{мм}/\text{ч}$ (правая шкала).

интенсивного поступления воды с 23:00 6 июля до 5:45 7 июля составил около $130 \text{ м}^3/\text{с}$. Максимальное значение во время наиболее интенсивного дождя могло превышать несколько сотен $\text{м}^3/\text{с}$. Таким образом, Неберджаевское водохранилище в период прохождения паводка выполнило свою защитную функцию, снизив поступление паводочных вод в р.Адагум в период наиболее интенсивного развития паводка.

Выводы. Согласно данным наблюдений [4] и нашим расчетам, главная причина катастрофического наводнения, в ночь с 6 на 7 июля в бассейне р.Адагум – высокие, не наблюдавшиеся никогда осадки. Основное ядро осадков, сформировавшее катастрофический паводок в бассейне р.Адагум, относится к периоду с 22:00 6 июля по 3:00 7 июля. В этот период шли непрерывные дожди с интенсивностью, достигавшей 35 – 45 мм в час. Суммарное количество осадков, выпавших за эти 5 часов в г.Крымск, составило 124 мм.

На условия прохождения паводочной волны оказали влияние антропогенные факторы: два подпорных сооружения – железнодорожный и автомобильный мосты, пролеты которых были забиты карчем. Максимальный расход воды, прошедшей 7 июля по р.Адагум через г.Крымск, составил около $1500 \text{ м}^3/\text{с}$ (у нас $1474 \text{ м}^3/\text{с}$). У р.Баканка максимальный расход оценен в $1040 \text{ м}^3/\text{с}$ (у нас $1021 \text{ м}^3/\text{с}$). У р.Неберджай $800 \text{ м}^3/\text{с}$ (у нас $403 \text{ м}^3/\text{с}$), это различие требует объяснения.

Неберджаевское водохранилище в период прохождения паводка выполнило свою защитную функцию, снизив поступление паводочных вод в р.Адагум в период наиболее интенсивного развития паводка более, чем на $200 \text{ м}^3/\text{с}$.

В дальнейшем следует сравнить результаты моделирования расхода рек в бассейне р.Адагум 6 – 7 июля 2012 г., используя пространственно-временное распределение осадков на основе мезомасштабной модели атмосферной циркуляции (отдел взаимодействия атмосферы и океана Морского гидрофизического института РАН).

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2014-0010 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем Черного и Азовского морей на основе современных методов контроля состояния морской среды и гридтехнологий», а также частично при поддержке РФФИ, грант № 16-41-910495 р_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Краевский К.Е., Архипова О.Е. Моделирование экстремальных катастрофических паводков на малых реках // Экология. Экономика. Информатика.– Ростов н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН, 2014.– С.104-108.
2. Краевский К.Е., Шевердяев И.В., Архипова О.Е. Подход к подготовке входных данных для гидрологической модели НЕС // Экология. Экономика. Информатика.– Ростов н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН, 2015.– С.256-262.
3. Краевский К.Е., Прусов А.В., Архипова О.Е., Шевердяев И.В. Моделирование экстремальных ливневых паводков в бассейнах рек Западного Кавказа на примере реки Адагум // Экология. Экономика. Информатика.– Ростов н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН, 2015.– С.589-595.

4. *Георгиевский В.Ю., Ткаченко Ю.Ю.* Катастрофический паводок в бассейне р. Адагум 6-7 июля 2012 г. и его причины / Отчет. <http://meteoweb.ru/biblio/27.pdf>
5. *Мельникова О.Н., Показеев К.В., Рождественский А.Е.* Анализ гидрологической обстановки катастрофического наводнения в Крымске // VII Всероссийский гидрологический съезд.– СПб, 2013. <http://sibnigmi.ru/GidroCongress>
6. *Днестрянский И.Н., Лобановский Ю.И.* Наводнение в Крымске: причины и механизмы затопления города. http://artofwar.ru/i/iwan_d/text_0470.shtm
7. *Матишов Г.Г., Клеценков А.В.* Кубанский паводковый кризис. Климат, геоморфология, прогноз. Крымск, июль 2012 г.– Ростов н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН, 2012.– 116 г.
8. *Иванов В.А., Свищева И.А., Прусов А.В., Шокуров М.В.* Прогнозирование катастрофических паводков на основе региональной модели атмосферной циркуляции Южного Крыма // Экологическая безопасность прибрежных и шельфовых зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь, 2011.– вып.25, т.2.– С.396-418.
9. *Иванов В.А., Прусов А.В.* Речной сток юга Украины: количественные оценки паводков, принципы управления и прогноз.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006.– 232 с.
10. *Masson V., Champeaux J-L, Chauvin F., Meriguet C., Lacaze R.* Global database of land surface parameters at 1 km resolution in meteorological and climate models // J. Climate.– 2003.– v.16, № 9.– P.1261-1282.
11. *Киселев П.Г.* Справочник по гидравлическим расчетам.– М.: Госэнергоиздат, 1957.– 352 с.
12. *Urban Hydrology for Small WaterSheds* // US Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Conservation Engineering Division.– Technical Release 55.– 1986.– 152 p.
13. *Fekete B.M., Vörösmarty C.J., Grabs W.* Global Composite Runoff Fields Based on Observed River Discharge and Simulated Water Balances.– Koblenz: WMO-Global Runoff Data Centre, 1999.– 109 p.

Материал поступил в редакцию 13.04.2017 г.
После доработки 24.08.2017 г.

V.A.Ivanov, K.E.Kraevskij, A.V.Prusov

SIMULATING SCENARIOS OF DEVELOPMENT OF CATASTROPHIC FLOWS ON THE MOUNTAIN RIVERS OF THE AZOV-BLACK SEA BASIN

The simulation of flood caused by extreme rainfalls in the Adagum river basin are presented. It is concluded that the used models are suitable as the basis for the development of a prognostic system of catastrophic floods in mountainous areas with complex relief.

KEYWORDS: river, rain, flood, simulation