

Академик НАН Украины **В. А. Иванов, И. А. Овчаренко,  
А. В. Прусов**

## Моделирование активного метода борьбы с паводками

*На підставі гідравлічної моделі річкового стоку розглянуто сценарій розвитку катастрофічного зливового паводка 23–27 липня 2008 р. в українській частині басейну р. Сирет, а також сценарій можливого розвитку цього паводка після застосування двох емкостей, що акумулюють воду, у гірській та рівнинній частинах басейну. Показано, що у випадку застосування цих емкостей катастрофу можна було б запобігти.*

По сообщениям средств массовой информации [<http://www.lenta.ru/>], из-за катастрофического паводка, обрушившегося на регион Карпат 23–27 июля 2008 г., погибли или пропали без вести 38 человек, были подтоплены 1014 населенных пунктов, 45 тыс. домов, 65 тыс. га сельскохозяйственных угодий. Повреждены и затоплены 780 км автомобильных дорог, 591 автомобильный и 652 пешеходных моста.

Основные факторы, обусловившие эту катастрофу, можно разбить на две группы: *природные* и *антропогенные*. К природным относятся чрезмерное количество осадков, значительно превысившее водорегулирующую способность геоэкологической системы Карпат, а также перенасыщенность влагой лесных массивов и почвы непосредственно перед паводком; к антропогенным — отсутствие целостной системы гидротехнических сооружений, плохой уход (или отсутствие ухода) за руслами рек и потоков, дорожными сооружениями и подпорными стенками, несвоевременное проведение противоэрозионных и противооползневых мероприятий, некачественное лесохозяйствование.

Ясно, что пассивные методы защиты (дамбы, подпорные стенки) против таких паводков малоэффективны. Следует активной использовать регулирование водных потоков аккумулятивными емкостями, что доказано практикой их применения в Украине (на р. Днестр) и за рубежом (например, в Венгрии на р. Тиса). О необходимости применения так называемых сухих емкостей — как радикальном средстве сдерживания катастрофических паводков — сказано в Государственной целевой программе комплексной противопаводковой защиты в бассейнах рек Днестр, Прут и Сирет, которая утверждена Постановлением Кабинета Министров Украины от 27 декабря 2008 г. № 1151.

Прежде чем начать работы по созданию “сухих” емкостей следует на основе физико-математического моделирования оценить, какое количество емкостей потребуются; определить их точное местоположение и гидрологические параметры (ширина, высота плотин, пропускная способность и т. п.); проанализировать экономические и экологические последствия строительства.

Для примера смоделируем катастрофический паводок, вызванный летним ливнем в бассейне р. Сирет (*рум. Siret*), и возможные последствия строительства там аккумулятивных емкостей.

Отметим три сценария: 1) имитация катастрофического ливневого паводка 23–27 июля 2008 г.; 2) тот же паводок, но при наличии одной “сухой” емкости в горной части р. Сирет; 3) тот же паводок при наличии двух “сухих” емкостей: на р. Сирет и р. Малый Сирет.

Для оценок используем гидравлическую модель водостока [1, 2], использующую данные о возвышении земной поверхности из массива DTED Level 1 (пространственный шаг равен 3'' [http://edc.usgs.gov/]).

Рассмотрим регион Украинских Карпат размером  $74,4 \times 55,8$  км =  $1200 \times 600$  ячеек ( $48^\circ 20'$  с. ш. —  $47^\circ 50'$  с. ш.,  $25^\circ 10'$  в. д. —  $26^\circ 10'$  в. д.). Гидрографическая сеть региона довольно сложна: кроме главных рек — Сирет, Малый Сирет, Михидра — имеется множество малых рек, каналов, плотин, водохранилищ, дамб. Рельеф региона трансформируется от гор на западе (населенные пункты Долишний Шепот — Лопушна — Берегомет — Луковец) до плато (высотой порядка 300 м) на востоке (Каменка — Черепковцы — Сирет (Румыния)).

Нами применялся описанный в литературе [3] алгоритм автоматизированного определения направлений потоков, использующий данные о гидрографической сети региона, полученные с топографических карт масштаба 1 : 50 000 и 1 : 100 000.

Входными данными модели являются возвышение земной поверхности, а также данные (модельные или наблюдаемые) об атмосферных осадках, испарении, поверхностном и грунтовом стоках.

Использовалась линейная модель [2], в которой перенос воды из точки в точку вычислялся по данным о направлении потока 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 ( $\text{м}^3/\text{с}$ ), поступающей в каждую ячейку, состоит из суммы:

$$R_s + R_d + (P_w - E_w) + F_{in},$$

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

В каждой ячейке одновременно вычисляются изменения объемов воды в трех условных бассейнах:  $V_s$ ,  $V_d$ ,  $V_r$  — поверхностном, подповерхностном и речном, 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:

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

$$\frac{dV_d}{dt}(x, y, t) + \frac{1}{T_d(x, y, t)}V_d(x, y, t) = R_d(x, y, t), \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{dV_r}{dt}(x, y, t) + \frac{1}{T_r(x, y, t)}V_r(x, y, t) = \\ = [1 - \alpha(x, y, t)] \left[ \frac{V_s}{T_s} + \frac{V_d}{T_d} \right] + \alpha(x, y, t)[P_w(x, y, t) - E_w(x, y, t)] + F_{in}(x, y, t) \end{aligned} \quad (3)$$

и начальные условия:

$$V_s(x, y, 0) = V_{0s}(x, y), \quad V_d(x, y, 0) = V_{0d}(x, y), \quad V_r(x, y, 0) = V_{0r}(x, y), \quad (4)$$

где  $\alpha(x, y, t)$  — доля площади поверхности ячейки, занятая водой.

Использовались данные о типах землепользования с пространственным разрешением 1 км [4].  $T_r(x, y, t)$  определялось как отношение расстояния  $L(x, y)$  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 коэффициент  $T_r$  вычислялись по формуле Шези, согласно справочнику П. Г. Киселева (1957):  $T_r$  на каждом шаге по времени пересчитывался в каждой ячейке по формуле

$$T_r(x, y, t) = \frac{L(x, y)}{u(x, y, t)_{\text{ср}}}, \quad (5)$$

где  $u(x, y, t)_{\text{ср}} = C(x, y, t)\sqrt{r(x, y, t) \cdot i(x, y, t)}$ ;  $r$  — гидравлический радиус;  $i$  — уклон;  $C$  — коэффициент трения. Для его определения применялась эмпирическая формула по Киселеву:

$$C = r^y \frac{1}{n}, \quad (6)$$

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

Следуя методике [5], успешно применяемой, например, в модели SWAT (Soil and Water Assessment Tool, <http://swatmodel.tamu.edu/>), выпавшие осадки переводились в склоновый сток 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.):

$$R_s = \frac{(P - I_0)^2}{(P - I_0) + S}, \quad (7)$$

где  $R_s$  — сток, мм;  $P$  — осадки, мм;  $S$  — влагоемкость почвы после начала стока, мм;  $I_0$  — начальный отбор, мм. При этом

$$I_0 = 0,2S, \quad R_s = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S}, \quad S = \left( \frac{1000}{C_N} - 10 \right) \cdot 25,4. \quad (8)$$

При настройке модели вместо полей атмосферных осадков использовались композитные поля среднегодовых значений склонового стока из работы [6]. “Заполнение” водой с временным шагом в 12 с длилось до достижения стационарного решения задачи (1)–(4) — около семи модельных суток. Это время соответствует времени добегания воды от истока р. Сирет до населенного пункта Сирет (рис. 1). В результате получились значения расходов, хорошо соответствующие данным многолетних наблюдений в пунктах, указанных на рис. 1.

Получить поле атмосферных осадков с пространственно-временным разрешением, соответствующим задаче (1)–(4), по данным сети метеопостов, конечно, нельзя. Остается либо аппроксимировать доступные данные наблюдений на более мелкую пространственно-временную сетку, либо, используя подходящую региональную модель атмосферной циркуляции, рассчитывать поля осадков с нужным пространственно-временным разрешением.

Пространственно-временное поле атмосферных осадков (летний ливень 23–27 июля 2008 г.) в данной работе было сформировано следующим образом. В качестве реперного был выбран временной ход 12-секундных сумм осадков, сформированный из наблюдаемых в г. Новоднестровске 3-часовых сумм [архив <http://rp5.ru/>].

Процесс развивался приблизительно так: за сутки до начала катастрофы выпало более 10 мм осадков, что привело к увлажнению почвы и лесных массивов, а затем начался

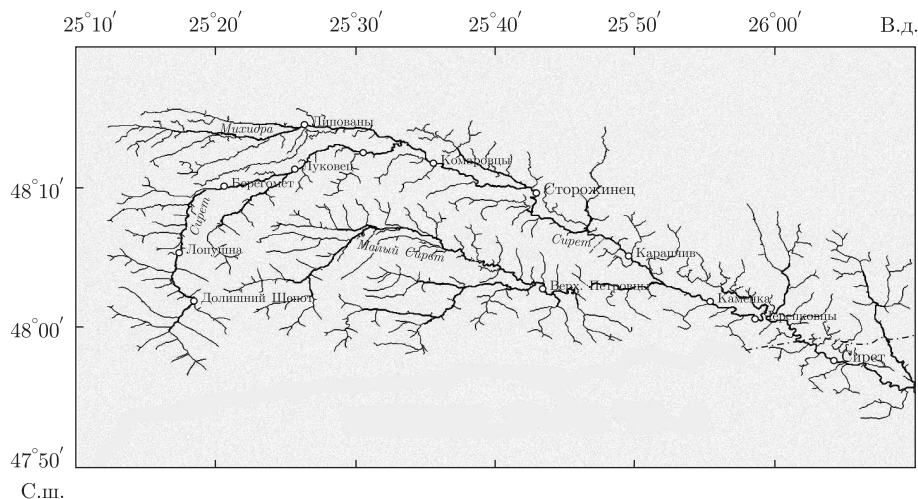


Рис. 1. Карта-схема направлений водных потоков в украинской части бассейна р. Сирет

катастрофический ливень. За первые 12 ч выпало 73 мм осадков. После часовой паузы — еще 27 мм. За вторые сутки выпало “всего” 25 мм. Третьи сутки — пауза (1 мм), а 26 июля (четвертые сутки) — новый удар: 78 мм.

Таким образом, за четверо суток с 23 по 26 июля 2008 г. в Новоднестровске выпало более 200 мм осадков (трех-четырёхмесячная норма [Национальный атлас Украины, <http://wdc.org.ua/atlas/>]).

Годовые суммы осадков в регионе, представленном на рис. 1, меняются от 1000 мм/год и более в западной (горной) части региона, до 600 мм/год в восточной части. Пропорционально этому пространственному распределению было сформировано поле атмосферных осадков для всего региона.

На рис. 2 показаны модельные гидрографы для населенных пунктов Долишний Шепот, Сторожинець, Сирет, полученные, исходя из сформированного нами поля пространственно-временного распределения осадков (гидрографы для остальных пунктов, отмеченных на рис. 1, не приведены).

Паводок такого масштаба, как наш модельный, случается в данном регионе примерно один раз в 50 лет. По данным работы [7], максимальный за 1952–2002 гг. расход р. Сирет в г. Сторожинець зафиксирован 13 июля 1969 г. и был равен  $816 \text{ м}^3/\text{с}$ . В нашем случае максимальный расход в пункте Сторожинець составил  $815 \text{ м}^3/\text{с}$  (см. рис. 2, тонкая сплошная линия, середина первых суток).

Посмотрим, какие изменения могли произойти, если бы на р. Сирет перед с. Лопушна (см. рис. 1) была проложена труба диаметром 2 м с защитной решеткой, а над ней построена плотина высотой около 20 м. В результате во время паводков часть воды  $Q$ , рассчитываемая по формуле (9), уходила бы через трубу дальше, в русло реки, а остаток временно аккумулировался бы в образовавшейся “сухой” емкости (максимальная площадь ее водного зеркала  $0,780 \text{ км}^2$ , максимальный объем  $8\,073\,000 \text{ м}^3$ ).

Расчет водоспуска  $Q$  ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) при плотине проводился по известным полуэмпирическим методикам на основе формулы Торричелли (см. справ. П.Г. Киселева, 1957). Приведем вариант расчета при истечении воды из трубы в атмосферу:

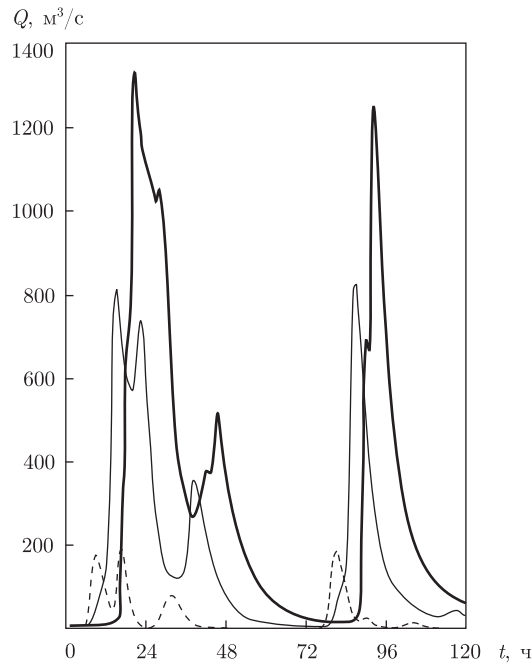


Рис. 2. Ожидаемый расход  $Q$  в пунктах Долишний Шепот (штриховая кривая), Сторожинец (тонкая кривая), Сирет (толстая кривая)

$$Q = \mu \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{2gH}, \quad (9)$$

где  $D$  — диаметр трубы;  $H$  — высота воды. Коэффициент расхода  $\mu$  равен

$$\mu = \frac{1}{\sum \sqrt{1 + \sum \zeta + \lambda \frac{l}{D}}}, \quad (10)$$

где  $\sum \zeta$  — сумма коэффициентов местных сопротивлений, учитывающих наличие (обязательное) решетки при входе в трубу, наличие затвора и плавного входа в нее (не обязательно);  $\lambda$  — коэффициент сопротивления по длине (для больших диаметров независимо от материалов стенок трубы  $\lambda \approx 0,025$ ).

Процесс заполнения и опорожнения этой аккумулирующей емкости в течение пяти паводковых суток иллюстрирует рис. 3, откуда видно, что максимальный объем воды в емкости достиг бы почти  $8\,000\,000 \text{ м}^3$ . Заметим, что даже при таком, экстремальном для данной аккумулирующей емкости объеме воды, ее уровень все равно бы не поднялся до проходящей рядом с плотиной автомобильной дороги (карта этого района не приводится).

В пунктах Долишний Шепот, Сторожинец, Сирет при наличии двух аккумулирующих емкостей приведены оценки ожидаемых расходов (рис. 4). К первой емкости добавлена вторая, в районе с. Верхние Петровцы на р. Малый Сирет (см. рис. 1). Ее параметры: диаметр трубы 3 м, высота плотины 11 м, максимальная площадь водного зеркала  $2,929 \text{ км}^2$ , максимальный объем  $13\,669\,000 \text{ м}^3$ .

Видно, что в пункте Долишний Шепот (выше 1-й емкости) никаких изменений не произошло, в пункте Сторожинец, на расход воды в котором влияет только первая аккумулирующая емкость, произошло значительное уменьшение расхода — в пиках с 800 до  $600 \text{ м}^3/\text{с}$ .

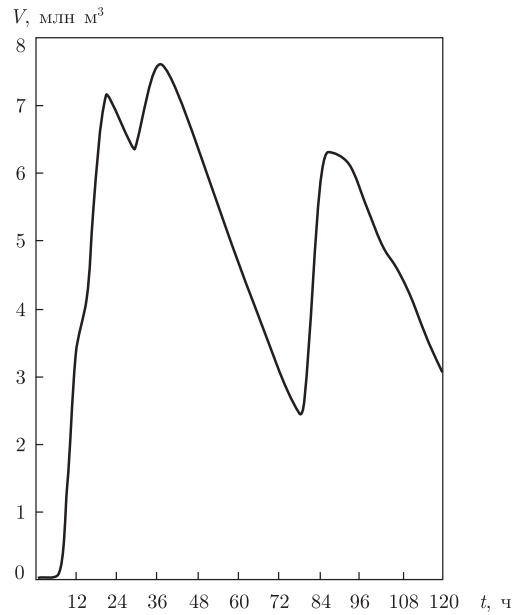


Рис. 3. Ожидаемое изменение объема  $V$  воды в аккумулирующей емкости на р. Сирет (выше с. Лопушна) во время паводка 23–27 июля 2008 г.

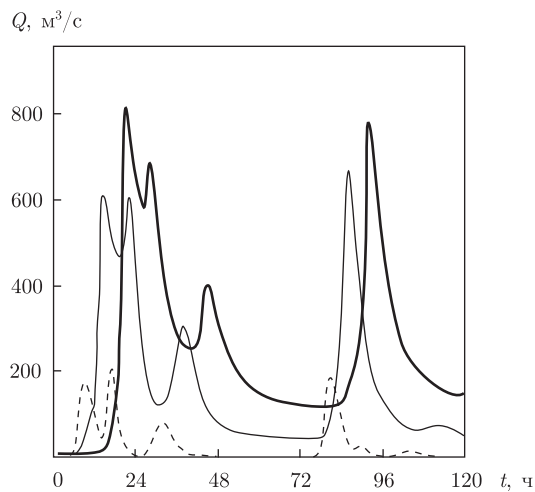


Рис. 4. Ожидаемый расход  $Q$  в пунктах Долишний Шепот (штриховая кривая), Сторожинец (тонкая кривая), Сирет (толстая кривая) при наличии двух аккумулирующих емкостей в с. Лопушна (р. Сирет) и с. Верхние Петровцы (р. Малый Сирет)

Отметим также более медленное спадание величины  $Q$  после прекращения дождя (см. временные интервалы от 48 до 72 ч и от 96 до 120 ч на рис. 2 и 4).

В населенном пункте Сирет (см. рис. 1) эффект еще сильнее из-за влияния на расход  $Q$  второй аккумулирующей емкости, “построенной” нами на р. Малый Сирет. Сравнивая рис. 2 и 4, убеждаемся, что максимумы  $Q$  уменьшились здесь с  $1200 \text{ м}^3/\text{с}$  и более до  $800 \text{ м}^3/\text{с}$ , что в пересчете на уровень воды в реке составляет примерно 1 м.

Таким образом, согласно предварительным оценкам, основанным на результатах физико-математического моделирования процесса развития ливневого катастрофического па-

водка на р. Сирет, — проблема катастрофических паводков в украинской части бассейна р. Сирет кардинально решается путем создания в регионе 3–4 емкостей, аккумулирующих часть руслового стока во время паводков.

Ввиду высокой стоимости проектов такого рода, вопрос о количестве емкостей, их точном местоположении и гидрологических параметрах требует более детальной экспериментальной и теоретической проработки после проведения полевых гидрогеологических изысканий. Потребуется повторное (уточняющее) моделирование, учитывающее результаты новых данных натурных наблюдений, а после него — анализ экономических и экологических аспектов проблемы (доступности места строительства, состояния гидрографической сети, заселенности района, развития промышленности и сельского хозяйства, сплава леса и т. п.).

1. *Иванов В. А., Прусов А. В.* Гидравлическая модель водной системы Украины // Доп. НАН України. – 2004. – № 9. – С. 119–125.
2. *Иванов В. А., Прусов А. В.* Речной сток юга Украины: количественные оценки паводков, принципы управления и прогноз. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. – 232 с. – [Сб.].
3. *Иванов В. А., Прусов А. В.* Автоматизированный поиск направлений водных потоков по данным цифровых моделей рельефа // Доп. НАН України. – 2006. – № 11. – С. 165–171.
4. *Masson V., Champeaux J.-L., Chauvin F. et al.* Global database of land surface parameters at 1 km resolution in meteorological and climate models // J. Climate. – 2003. – **16**, No 9. – P. 1261–1282.
5. *Urban Hydrology for Small Watersheds* // US Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Conservation Engineering Division. – Techn. Rel. 55. – Washington, 1986. – 152 p.
6. *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.
7. *Сусідко М. М., Полякова С. О., Щербак А. В.* Каталог характеристик дощових і сніго-дощових паводків на річках Карпатського регіону за 1989–2002 роки // Наук. праці Укр. наук.-дослід. гідрометеоролог. ін-ту, 2006. – Вип. 255. – С. 299–310.

*Морской гидрофизический институт  
НАН Украины, Севастополь*

*Поступило в редакцию 08.11.2010*

Academician of the NAS of Ukraine **V. I. Ivanov, I. A. Ovcharenko, A. V. Prusov**

### **Hydraulic river flow modeling: an active method of flood prevention**

*Using a hydraulic river flow model, we conduct the simulation of the catastrophic flood flow on the Ukrainian part of the Siret river on July 23–27, 2008. Results are compared with those of a simulation of the same flood but with two reservoir flood control systems installed in hilly and flat areas of the river basin. We conclude that the catastrophe could have been prevented by installing the two flood control systems.*