



УДК 551.46:532

© 2012

Академик НАН Украины В. А. Иванов, И. А. Овчаренко,  
А. В. Прусов, М. В. Шокуров

## Моделирование катастрофических паводков в регионе Южного берега Крыма

*На основе последовательного применения региональной модели атмосферной циркуляции и гидравлической модели речного стока восстановлена картина развития экстремальных ливневых паводков на малых реках севастопольского региона и Южного берега Крыма. Полученные результаты можно рассматривать как первый шаг на пути краткосрочного прогнозирования неблагоприятных и опасных процессов в Крыму — паводков и селей.*

Одной из особенностей гидрологического режима рек и временных водотоков Южного берега Крыма (ЮБК) является формирование в течение всего года паводков, обусловленных выпадением интенсивных ливневых осадков [1]. При этом реки и временные водотоки могут за несколько и на несколько часов превратиться из ручейков в потоки, в десятки и сотни раз превосходящие свои среднегодовые значения. Иногда (раз в 20–50 лет) эти потоки становятся катастрофическими [2]. Именно такие редкие ливневые паводки переводят задачу прогноза экстремальных паводков из просто интересных гидрологических задач в разряд самых актуальных. На начальном этапе решения этой задачи попытаемся реконструировать несколько *известных случаев* развития экстремальных паводков. Будем последовательно применять адаптированные к региону ЮБК мезомасштабную атмосферную модель [3, 4] и гидравлическую модель речного стока [5].

**Атмосферная модель.** В отделе взаимодействия атмосферы и океана Морского гидрофизического института НАН Украины с начала 2007 г. выполняется оперативный прогноз атмосферной циркуляции для региона Черного моря (<http://vao.hydrophys.org>). Система анализа и прогноза атмосферной циркуляции основана на свободно распространяемой мезомасштабной модели MM5 версии 3.7 и ее более современного варианта WRF, адаптированных к региону Черного моря. Модель хорошо зарекомендовала себя при оперативных прогнозах. С ее помощью удалось воспроизвести и описать структуру редкого явления — квазитропического циклона [6–8], а также структуру мезомасштабных вихрей [9].

Модель состоит из гидродинамического блока, содержащего уравнение Навье–Стокса с учетом силы Кориолиса, уравнение неразрывности, уравнение переноса тепла и уравнение состояния воздуха. К гидродинамическому блоку добавляются физические блоки,

зависящие от гидродинамических переменных и, в свою очередь, влияющие на них. Можно выделить шесть основных физических процессов, для каждого из которых выписываются дополнительные уравнения. Это перенос инфракрасного и видимого солнечного излучения, процесс формирования облачности и осадков, кучевая конвекция, турбулентные потоки импульса, тепла и влаги в атмосферном пограничном и приземном слоях, и перенос тепла и влаги в верхнем слое почвы.

Для расчета экстремальных осадков были выбраны параметризации физических процессов, используемые и проверенные четырехлетней практикой оперативного прогноза для региона Черного моря:

1. Для параметризации пограничного слоя выбрана схема Pleim–Xiu, в которой для случая неустойчивой стратификации пограничного слоя реализована нелокальная схема параметризации турбулентных потоков импульса, тепла и влаги.

2. Для параметризации кучевой конвекции использовалась схема Kain–Frisch-2, рассчитанная на масштабы меньше 30 км.

3. Для расчета переноса излучения в атмосфере применялась схема RRTM, в которой перенос инфракрасного излучения можно рассчитать с детальным распределением по частотам.

4. Для расчета фазовых переходов воды и льда и переноса гидрометеоров в облаках использовалась схема Graupel с несколькими формами льда и несколькими формами жидкой воды в облаках.

5. Для расчета потоков тепла и влаги на поверхности суши применялась пятислойная модель почвы с явным расчетом температуры и влажности почвы в верхнем слое толщиной 2 м.

Расчетная область атмосферной циркуляции в Крымском регионе была составлена из четырех телескопически вложенных доменов с последовательно возрастающим разрешением. Самый большой домен имеет разрешение 27 км и охватывает весь Черноморский регион. На границе этого домена ставятся граничные условия, взятые из анализа глобальной модели. Следующий домен с разрешением 9 км охватывает часть Черного моря (40–48° с. ш., 28–40° з. д.). Граничные условия для второго домена берутся из первого. Третий домен вложен в центр второго, имеет разрешение 3 км, охватывает почти весь Крымский полуостров (43,0–45,9° с. ш., 32,0–35,9° з. д.). Граничные условия для третьего домена берутся из второго домена. Наконец, четвертый домен с разрешением 1 км вложен в центр третьего, охватывает ту часть Крымского полуострова, в которой наблюдалось выпадение экстремальных осадков (44–45° с. ш., 33–35° з. д.).

В качестве начальных и граничных условий на боковых границах использовались данные глобальных моделей. Мы использовали результаты оперативного анализа и прогноза GDAS (Global Data Assimilation System)/GFS (Global Forecast System) за 2008–2010 гг. с разрешением  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ . Большую роль для атмосферной циркуляции, и особенно для глубокой кучевой конвекции в Крымском регионе, играет температура поверхности Черного моря. Здесь использовались результаты измерений температуры поверхности моря.

Выпадение экстремальных осадков — процесс скоротечный, поэтому расчет атмосферной циркуляции выполнялся на 1 сут, отступив на 12 ч от экстремума осадков.

Результатом расчета атмосферной циркуляции стали трехмерные массивы температуры и потенциальной температуры, геопотенциала, горизонтальной и вертикальной скорости, завихренности, потенциальной завихренности и дивергенции, относительной и удельной влажности, содержания воды в жидкой и твердой фазах в облаках, потоков излуче-

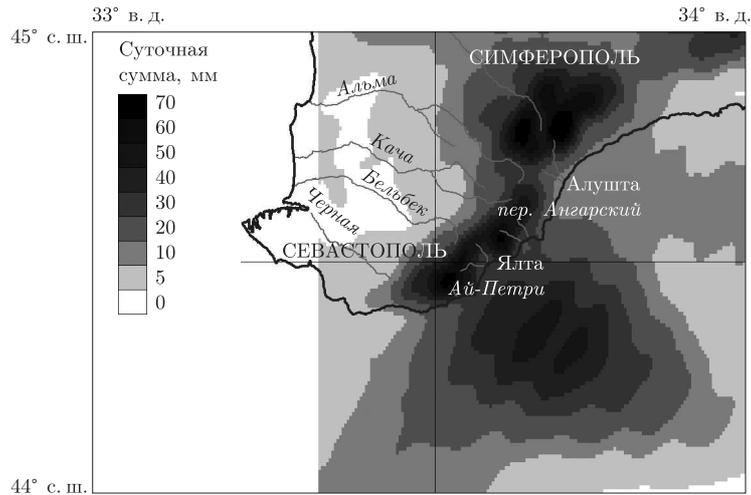


Рис. 1. Пространственное распределение суточных сумм осадков 22.09.08 г.

ния в видимом и инфракрасном диапазонах, вертикальных турбулентных потоков тепла и влаги.

Двухмерные массивы, характеризующие состояние атмосферы, — это потоки явного и скрытого тепла на поверхности, направленные вверх и вниз потоки солнечного и инфракрасного излучения на поверхности, температура и влажность на высоте 2 м, температура поверхности, температура и влажность почвы на пяти уровнях, давление на поверхности, давление на уровне моря, конвективные и внутримассовые осадки, облачность верхнего, среднего и нижнего ярусов, интегральное по высоте содержание воды в трех фазах, ветер на высоте 10 м, напряжение трения на поверхности, длина Монина–Обухова, толщина атмосферного пограничного слоя, тип атмосферного пограничного слоя.

При выборе синоптических ситуаций с экстремальными осадками и для валидации модельных оценок использовались архивы 22-х крымских метеостанций за 2005–2010 гг. После предварительного анализа были выбраны два эпизода с экстремальными осадками: 21–22 сентября 2008 г. и 23 октября 2006 г. (эти данные здесь не приводятся). 21–22 сентября 2008 г. отмечались сильные ливни в юго-восточной части Крыма. Например, на Ангарском перевале менее чем за 12 ч выпало более 80 мм осадков.

Для каждой из двух описанных выше синоптических ситуаций были выполнены расчеты атмосферной циркуляции. Трехмерные и двухмерные выходные массивы модели сохранялись с дискретностью 2 мин. Модельный ливень в Ялте продолжался с небольшими перерывами от 13 до 18 ч. За это время на водосборы рек Учан-Су и Дерекойка в разных местах водосборов выпало осадков 20–70 мм и более. Сравнение наблюдаемых осадков с модельными показало их хорошее совпадение. На рис. 1 показаны суточные суммы осадков, выпавших на рассматриваемый регион. После окончания ливня в Ялте подобный ливень начался в Алуште (водосборы рек Улу-Узень и Демерджи).

Следует заметить, что при расчете с высоким пространственным разрешением мгновенное расположение мезомасштабных конвективных областей с обильными осадками может несколько отличаться от реального. Причины такого несоответствия достаточно хорошо известны и связаны с уменьшением предсказуемости при увеличении пространственного разрешения. Нельзя ожидать точного и детального воспроизведения региональной моде-

лю расположения, размеров и формы каждого отдельного мезомасштабного конвективно-го образования.

В настоящее время предпринимаются попытки усвоения мезомасштабными моделями измерений, выполняемых метеорологическими радарными, которые измеряют трехмерное распределение осадков, воды и льда в облаках. Метеорадары обладают высоким разрешением, и поэтому усвоение их данных могло бы повысить предсказуемость мезомасштабных конвективных процессов.

**Гидравлическая модель.** Располагая данными о пространственно-временном распределении осадков, подадим их на вход гидравлической модели речного стока [5]. Будем оценивать сток на водосборах рек Ялты (Учан-Су, Дерекойка) и Алушты (Улу-Узень, Демерджи). Основой гидравлической модели стока служат данные о рельефе рассматриваемого региона с пространственным разрешением  $60 \times 90$  м [5].

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 ( $\text{м}^3/\text{с}$ ), 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;  $(P_w - E_w)$  — осадки минус испарение с поверхности воды;  $F_{in}$  — 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 русловом, где суммируются потоки из соседних ячеек, плюс локальный поверхностный и подземный стоки, минус излишки после заполнения депрессий рельефа. Кроме метеоданных, использовались данные о типах землепользования с пространственным разрешением 1 км [10].

Следуя методике, описанной в [11], успешно применяемой, например, в модели SWAT (Soil and Water Assessment Tool, <http://swatmodel.tamu.edu/>), выпавшие осадки  $P(t)$  переводились в склоновый сток  $R(t)$  с помощью специального эмпирического коэффициента  $C_n$ , зависящего от инфильтрационных свойств почвы, растительного покрова, количества водонепроницаемых площадей и т. п.:

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

где  $R(t)$  — сток, мм;  $P(t)$  — осадки, мм;  $S(t)$  — влагоемкость почвы после начала стока, мм;  $I_a$  — начальный отбор, мм. При этом

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

При отладке модели кроме полей атмосферных осадков использовались композитные поля среднегодовых (а также среднемесячных) величин склонового стока из работы [12].

“Заполнение” водой с временным шагом в 12 с продолжалось до достижения русловыми стоками рек стационарного состояния, а именно, около 24-х модельных часов. Это время соответствует времени добегания воды от истоков рек Бельбек, Кача и Альма до моря. В результате получились значения расходов, хорошо соответствующие данным многолетних наблюдений.

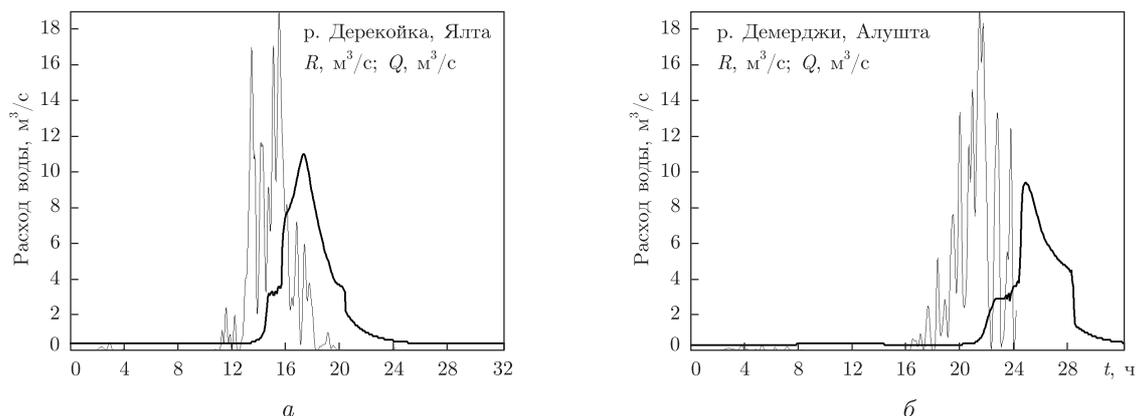


Рис. 2. Суммарный склоновый сток  $R(t)$  (тонкие кривые) и русловый сток  $Q(t)$  (жирные кривые) р. Деревкойка, Ялта, 22.09.08 г. (а) и р. Демерджи, Алушта, 22.09.08 г. (б)

Главными факторами, определяющими  $C_n$ , являются гидрологический тип почвы, тип подстилающей поверхности, обработка почвы, настоящие и предыдущие гидрологические условия. В США [13] принято в первом приближении разделять почвы на четыре группы, в зависимости от их скорости инфильтрации. Учет влияния карстовых образований на поверхностный сток строился на основе новых данных районирования карста Крыма [14].

На рис. 2, а показан временной ход суммарного склонового  $R(t)$ ,  $\text{м}^3/\text{с}$  и руслового  $Q(t)$ ,  $\text{м}^3/\text{с}$  стоков р. Деревкойка в районе ее устья (Ялта). Ливень на водосборе этой реки, а также второй реки ялтинского региона — Учан-Су (не приводится), начался после полудня в сопровождении южных ветров. Из рис. 2, а видно, как водосбор сглаживает быстро меняющуюся картину суммарного склонового стока водосбора р. Деревкойка. При этом временная задержка расхода  $Q(t)$  относительно  $R(t)$  составляет около 4 ч, что соответствует времени стекания по склонам, выпавших атмосферных осадков (около 0,5 ч), плюс время добегаания воды по руслу ( $\sim 3,5$  ч). Максимальный расход р. Деревкойка составил  $11 \text{ м}^3/\text{с}$  (для р. Учан-Су  $\sim 7 \text{ м}^3/\text{с}$ ). Такие значения расходов  $Q(t)$  можно назвать экстремальными, но не катастрофическими. Напомним, что среднегодовые расходы рек Деревкойка и Учан-Су составляют около 0,3 и  $0,5 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Через 8 ч похожая модельная картина (рис. 2, б) наблюдалась на водосборах рек Алушты: Демерджи и Улу-Узень. За эти 8 ч ветер поменял направление на северное. В регионе Алушты начался второй сильнейший ливень (выпала месячная норма осадков за 10–12 ч). При этом максимальные расходы  $Q(t)$  составили на р. Демерджи  $9 \text{ м}^3/\text{с}$ , а на р. Улу-Узень — около  $3 \text{ м}^3/\text{с}$ . Заметим, что на более крупных реках севастопольского региона — Черная, Бельбек, Кача и Альма в рассматриваемом случае ничего экстремального не произошло, что полностью соответствует картине пространственного распределения осадков на рис. 1.

Таким образом, расчеты на основе мезомасштабной модели атмосферной циркуляции и гидравлической модели речного стока дают удовлетворительные оценки экстремальных ливневых паводков в регионе ЮБК. Полученные результаты можно рассматривать как первый шаг к решению задачи краткосрочного прогноза катастрофических паводков и селей в этом регионе.

1. Олиферов А. Н., Тимченко З. В. Реки и озера Крыма. — Симферополь: Доля, 2005. — 214 с.
2. Клюклин А. А. Экстремальные проявления неблагоприятных и опасных экзогенных процессов в XX веке в Крыму // Геополитика и экогеодинамика регионов. — 2005. — Вып. 1. — С. 27–38.

3. *Dudhia J.* A non hydrostatic version of the Penn State-NCAR mesoscale model: Validation tests and simulation of an Atlantic cyclone and cold front // *Mon. Wea. Rev.* – 1993. – **121**. – P. 1493–1513.
4. *Skamarock W. C., Klemp J. B., Dudhia J. et al.* A description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR/TN – 475=STR; NCAR Technical Note, Mesoscale and Microscale Meteorology Division, National Center of Atmospheric Research. – June 2008. – 125 p.
5. *Иванов В. А., Прусов А. В.* Речной сток юга Украины: количественные оценки паводков, принципы управления и прогноз. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. – 232 с.
6. *Яровая Д. А., Ефимов В. В., Шокуров М. В. и др.* Квазитропический циклон над Черным морем: наблюдение и численное моделирование // *Мор. гидрофиз. журн.* – 2008. – № 3. – С. 41–55.
7. *Ефимов В. В., Шокуров М. В., Яровая Д. А.* Численное моделирование квазитропического циклона над Черным морем // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* – 2007. – **43**, № 6. – С. 667–686.
8. *Ефимов В. В., Станичний С. В., Шокуров М. В. и др.* Наблюдение квазитропического циклона над Черным морем // *Метеорология и гидрология.* – 2008. – № 4. – С. 53–62.
9. *Ефимов В. В., Шокуров М. В., Яровая Д. А. и др.* Статистика мезомасштабных циклонических вихрей над Черным морем // *Мор. гидрофиз. журн.* – 2009. – № 4. – С. 19–33.
10. *Masson V., Chauvin 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.
11. *Urban Hydrology for Small WaterSheds* // US Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Conservation Engineering Division. – Technical Release 55. – 1986. – 152 p.
12. *Fekete B. M., Vörösmarty C. J., Grabs W.* Global Composite Runoff Fields Based on Observed River Discharge and Simulated Water Balances. – Koblenz, Germany: WMO-Global Runoff Data Centre, Report #22, 1999. – 109 p.
13. *Brakensiek D. L., Rawls W. J.* Green-Ampt infiltration model parameters for hydrologic classification of soils // John Borrelli, Victor R. Hasfurther, and Robert D. Burman (ed.) *Advances in irrigation and drainage surviving external pressures* // *Proceedings of Am. Soc. Civ. Eng. specialty conference.* – New York, 1983. – P. 226–233.
14. *Вахрушев Б. А.* Районирование карста Крымского полуострова // *Спелеология и карстология.* – 2009. – № 3. – С. 39–46.

*Морской гидрофизический институт  
НАН Украины, Севастополь*

*Поступило в редакцию 06.02.2012*

**Академік НАН України В. О. Іванов, І. А. Овчаренко, О. В. Прусов,  
М. В. Шокуров**

### **Моделювання катастрофічних паводків в регіоні Південного берега Криму**

*На основі послідовного застосування регіональної моделі атмосферної циркуляції і гідравлічної моделі річкового стоку відновлена картина розвитку екстремальних зливових паводків на малих річках севастопольського регіону та Південного берега Криму. Отримані результати можна розглядати як перший крок на шляху короткострокового прогнозування несприятливих і небезпечних процесів в Криму – паводків і селів.*

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

### **Modeling of extreme flood flows on the south coast of the Crimea**

*Using the regional atmospheric circulation and hydraulic river flow models, we are able to predict an extreme flood flow in the small rivers of the Sevastopol region and the South Coast of the Crimea. The results can be used to produce the short-term forecasts of floods and torrents in the Crimea region.*