

## Численное моделирование экстремального ливневого паводка в Ялте в сентябре 2018 года

И. А. Свищева, А. Е. Анисимов \*

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

*\*e-mail: anatolii.anisimov@mhi-ras.ru*

### Аннотация

В работе рассмотрены результаты численного моделирования случая экстремального ливневого паводка в Ялте 6 сентября 2018 г., приведшего к ряду негативных социально-экономических последствий. Паводок произошел в результате выпадения экстремального количества осадков на плато Ай-Петри, Ялтинской и Гурзуфской яйлах. Цель исследования состояла в получении и анализе количественных характеристик ливневого паводка на основе современных методов численного моделирования гидрологических процессов. Для ее достижения к территории Крыма была адаптирована гидрологическая модель *WRF-Hydro* с пространственным разрешением 90 м. В качестве входных полей данных использовались верифицированные результаты расчета по атмосферной модели *WRF* с конвективно-разрешающим шагом по пространству. Получены количественные характеристики поверхностного стока и руслового расхода горных рек, построены гидрографы расхода в их устьях. Отмечено, что основной приток в реки происходит в верховьях в районе плато и горных склонов, причем это верно как для общего поверхностного, так и для руслового стока. Русловый расход характеризуется резким подъемом и постепенным по времени снижением, за 9 ч с момента начала ливня большая часть влаги достигла устьев рек. Максимальные рассчитанные значения расхода для Дерекойки ( $6 \text{ м}^3/\text{с}$ ) и Учан-Су ( $8 \text{ м}^3/\text{с}$ ) меньше, чем пиковые значения, наблюдавшиеся в прошлые периоды, однако они хорошо согласуются с типичными оценками расхода при экстремальных ливневых паводках в теплое время года. Значимый русловый расход воспроизводится и для прочих рек Южного берега Крыма, в частности для р. Авунды.

**Ключевые слова:** гидрологическое моделирование, Крым, осадки, экстремальный ливневый паводок, *WRF-Hydro*

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ по теме № 0555-2021-0002 «Фундаментальные исследования процессов взаимодействия в системе океан – атмосфера, определяющих региональную пространственно-временную изменчивость природной среды и климата».

**Для цитирования:** Свищева И. А., Анисимов А. Е. Численное моделирование экстремального ливневого паводка в Ялте в сентябре 2018 года // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2022. № 3. С. 43–53. doi:10.22449/2413-5577-2022-3-43-53

© Свищева И. А., Анисимов А. Е., 2022



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

# Numerical Modeling of Extreme Flash Flood in Yalta in September 2018

I. A. Svisheva, A. E. Anisimov \*

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

\*e-mail: anatolii.anisimov@mhi-ras.ru

## Abstract

The paper considers the results of numerical modeling of the extreme flash flood in Yalta on September 6, 2018, which led to a number of negative socio-economic consequences. The flood occurred as a result of extreme rainfall on the Ai-Petri plateau, Yalta and Gurzuf yailas. The purpose of the study was to obtain and analyze the quantitative characteristics of flash floods based on modern methods of numerical modeling of hydrological processes. To achieve it, the WRF-Hydro hydrological model with a spatial resolution of 90 m was adapted to the territory of Crimea. The atmospheric forcing fields for WRF-Hydro were based on the verified convective-resolving WRF simulations. Quantitative characteristics of surface runoff and channel discharge of mountain rivers were obtained, and hydrographs of discharge at their mouths were constructed. It is noted that the main inflow into the rivers occurs in the upper reaches in the area of the plateau and mountain slopes, and this is true both for the total surface and channel runoff. The channel discharge is characterized by a sharp rise and a gradual decrease in time; within 9 hours from the start of the rainfall, most of the moisture reached the mouths of the rivers. The maximum calculated discharge values for the Derekoika ( $6 \text{ m}^3/\text{s}$ ) and Uchan-Su ( $8 \text{ m}^3/\text{s}$ ) Rivers are less than historical peaks, but they are in good agreement with typical discharge estimates during extreme flash floods in the warm season. The significant channel discharge is also reproduced for other rivers of the southern coast of Crimea, in particular for the Avunda River.

**Keywords:** hydrological modeling, Crimea, precipitation, flash flood, WRF-Hydro

**Acknowledgements:** the study was carried out under state assignment no. 0555-2021-0002 of FSBSI FRC MHI RAS “Fundamental studies of the interaction processes in the ocean-atmosphere system conditioning the regional spatial-temporal variability of natural environment and climate”.

**For citation:** Svisheva, I.A. and Anisimov, A.E., 2022. Numerical Modeling of Extreme Flash Flood in Yalta in September 2018. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 43–53. doi:10.22449/2413-5577-2022-3-43-53

## Введение

Для горных районов Черноморского региона характерны атмосферные осадки ливневого типа, которые вызывают на реках экстремальные паводки, называемые в англоязычной литературе *flash flood*, или внезапные паводки [1]. Это кратковременные, но крайне интенсивные явления, приносящие существенный социэкономический ущерб. Известен паводок на реках Южного берега Крыма 19–20 июня 1987 г., а также наводнения в 1960-х гг., когда на реках Дерекойке и Учан-Су (Водопадной) в Ялте были зафиксированы исторические максимумы расхода воды. В июне 2021 г., согласно данным с гидропостов, расходы этих рек в 3.4–6.0 раз превысили нормы и установили новые рекорды. Уровень воды в это время повышался более чем на полтора метра: на Дерекойке 18 июня 2021 г. уровень воды поднялся на 167 см,

на Водопадной – на 163 см. В Ялте пострадали сотни домов, в капитальном ремонте или реконструкции нуждаются 117 улиц. Глобальное потепление делает эту проблему еще более актуальной из-за увеличения частоты и интенсивности ливней в регионе. Известно, что в других регионах в оперативную практику введен прогноз подобных опасных явлений на основе гидрологических численных моделей [2], в то время как в Крыму этот вопрос на настоящий момент обойден вниманием. Адаптация, тестирование и оценка воспроизводимости подобных экстремальных гидрологических явлений на территории Крыма является весьма актуальной научной и прикладной задачей. Цель настоящего исследования состояла в получении и анализе количественных характеристик ливневого паводка в Ялте в сентябре 2018 г. на основе использования современных методов численного моделирования гидрологических процессов.

### **Материалы и методы**

В современных условиях можно использовать численные модели речного стока для определения вероятности возникновения экстремальных паводков и построения сценариев их развития. В частности, для Крыма адаптирована модель *WRF-Hydro*. Данная модель состоит из четырех основных блоков: моделей земной поверхности, поверхностных вод, подземных вод и руслового стока.

#### *Входные данные*

В качестве входных данных с дискретностью 1 ч по времени и 900 м по пространству используются результаты расчета по атмосферной модели *WRF* с динамическим ядром *ARW*<sup>1)</sup> с конвективно-разрешающим шагом по пространству следующих параметров: коротковолнового и длинноволнового излучения, удельной влажности и температуры воздуха на высоте 2 м, атмосферного давления у поверхности, компонент скорости ветра на высоте 10 м, количества осадков, свойств подстилающей поверхности (доля растительности, *LAI* (*Leaf area index*)). Описание численного эксперимента и конфигурации модели *WRF* приведено в [3, 4]. Данные рельефа генерируются на основе данных *HydroSHEDS* спутникового инструмента *Shuttle Radar Topography Mission* с разрешением 90 м [5]. Поскольку выпадение экстремальных осадков и возникновение внезапного паводка – быстрые процессы, расчет по *WRF-Hydro* выполнялся для интервала в одни сутки. За исходную временную точку расчета было принято – 6 ч от начала выпадения осадков, как и в более ранних работах по рекам данного региона [6].

#### *Модель земной поверхности NOAA*

В одномерной модели земной поверхности *NOAH* с пространственным разрешением 900 м на основе уравнения радиационно-теплового баланса выполняется расчет вертикальных потоков и тепло- и влагосодержания почвы. С учетом свойств подстилающей поверхности, данных о растительности и пористости почвы рассчитываются: количество влаги, задерживаемое пологом леса, прямое испарение с поверхности грунта и растительного покрова,

---

<sup>1)</sup> A description of the advanced research WRF model version 4 / W. C. Skamarock [et al.]. Boulder : NCAR, 2019. 148 p. (NCAR Technical Note ; no. NCAR/TN-556+STR). doi:10.5065/1dfh-6p97

транспирация, поверхностный и подповерхностный сток, поток влаги вглубь грунта. Глубину слоев почвы в *WRF-Hydro* можно задать вручную, при этом общая глубина столба почвы и толщина отдельных слоев почвы постоянны во всей области модели. В нашем случае в двухметровой колонне грунта в *WRF-Hydro* используется четыре слоя почвы толщиной сверху вниз 100, 300, 600 и 1000 мм. Классификация земного покрова задается в соответствии с продуктом *USGS* или *MODIS Modified IGBP*; классификации почв предоставлены базой данных *STATSGO* с шагом 1 км [7].

После расчета *NOAH* модельные переменные (избыток инфильтрации (поверхностный сток), глубина накопленной воды и влажность почвы) интерполируются из сетки с низким разрешением (900 м) на сетку с высоким разрешением (90 м) и передаются модулям подземных и поверхностных вод. Подземный сток происходит на крупной сетке, в то время как наземный – на мелкой сетке. Затем *WRF-Hydro* рассчитывает глубину грунтовых вод в соответствии с глубиной верхнего подповерхностного слоя насыщенного грунта.

#### Подземный сток

В *WRF-Hydro* подземный латеральный сток рассчитывается до поверхностного стока, чтобы обеспечить добавление эксфильтрации из полностью насыщенных ячеек сетки к избытку инфильтрации, рассчитанному с помощью модели земной поверхности, что в конечном итоге обновляет значение поверхностного напора для поверхностного стока. Баланс массы для каждой ячейки на временном шаге модели  $\Delta t$  можно рассчитать по изменению уровня грунтовых вод  $\Delta z$ :

$$\Delta z = \frac{1}{\Phi(i,j)} \frac{Q_{net}(i,j)}{A} \Delta t,$$

где  $\Phi$  – пористость почвы;  $A$  – площадь ячейки;  $Q_{net}$  – горизонтальный поток насыщенной подземной влаги для ячейки  $i, j$ :

$$Q_{net}(i,j) = h_{i,j} \sum \gamma_{x(i,j)} + h_{i,j} \sum \gamma_{y(i,j)},$$

где  $h_{i,j} = \left(1 - \frac{z_{i,j}}{D_{i,j}}\right)^{n_{i,j}}$  и  $\gamma_{x,y(i,j)} = -\left(\frac{w_{i,j} Ksat_{i,j} D_{i,j}}{n_{i,j}}\right) \cdot \beta_{x,y(i,j)}$ .

Здесь  $z$  – уровень грунтовых вод;  $D$  – толщина грунта;  $Ksat$  – насыщенная гидравлическая проводимость;  $n$  – параметр, определяющий скорость убывания  $Ksat$  с глубиной (= 1 в наст. вр.);  $w$  – ширина ячейки, фиксированная для регулярной сетки;  $\beta$  – уклон уровня грунтовых вод (рассчитывается как отношение разницы глубин грунтовых вод между двумя соседними ячейками сетки к шагу сетки).

Данный метод рассматривает почву как единый однородный столб. Следовательно, изменение глубины грунтовых вод необходимо повторно сопоставить со слоями почвы модели поверхности земли. С учетом временного масштаба движения подземных вод и ограничения в структуре модели существует значительная неопределенность во времени, необходимым для надлежащего «разгона» систем подземных вод.

### Поверхностный сток

На следующем этапе определяется поверхностный сток. Гидравлические градиенты аппроксимируются как уклон уровня грунтовых вод между соседними ячейками сетки по методу самого крутого спуска  $D8$  [8]. Полностью нестационарная, явная конечно-разностная формулировка диффузионной волны [9] с более поздней модификацией Огдена является способом представления наземного стока, который возникает, когда глубина воды в ячейке сетки превышает глубину удерживания. Как и в [9], уравнение неразрывности для наземной одномерной паводковой волны комбинируется с диффузионной волновой формулировкой уравнения импульса. Для учета трения используется уравнение Мэннинга с указанием коэффициента шероховатости для поверхностного стока. Этот коэффициент был получен из [10] и сопоставлен с классификациями земного покрова.

При масштабах местности в диапазоне от 30 до 300 м формулировка диффузионной волны представляет собой упрощение более общих уравнений Сен-Венана для мелкой воды. Двумерное уравнение неразрывности для паводковой волны, обтекающей земную поверхность, имеет вид

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_l}{\partial l} = i_e,$$

где  $h$  – глубина поверхностного течения;  $i_e$  – избыток инфильтрации;  $q_l$  – единичный расход в направлении самого крутого спуска  $l$ , рассчитывается

с использованием уравнения Мэннинга  $q_l = \alpha_l h^\beta$ , где  $\beta = \frac{5}{3}$ ;  $\alpha_l = \frac{S_{fl}^{1/2}}{n_{OV}}$ ;

$n_{OV}$  – коэффициент шероховатости поверхности (настраиваемый параметр);  $S_{fl}$  – уклон трения в направлении  $l$ , вычисляемый из уравнения импульса

для направления  $l$ :  $S_{fl} = S_{ol} - \frac{\partial h}{\partial l}$ , где  $S_{ol}$  – уклон местности в направлении  $l$ ;

$\partial h / \partial l$  – изменение глубины водной поверхности в направлении  $l$ .

### Русловый сток

В *WRF-Hydro* реализованы дополнительные модули для представления процессов течения в руслах рек. Приток в речную сеть является однонаправленным процессом, т.е. всегда положителен по отношению к элементу русла. Если слой стока в ячейках сетки, обозначенных как «русловые», превышает локальную глубину удерживаемых вод, то излишек объема стока передается из модели поверхностных вод в русловую модель.

Как правило, приток в русло основан на расчете баланса массы. Вода направляется в русло, когда глубина запасенной воды ячеек сетки русла превышает заданную глубину удерживания. Глубина запасенной воды в любой ячейке сетки является комбинацией локального избытка инфильтрации, количества воды, поступающей в ячейку сетки из поверхностного стока, и эксфильтрации из подземного стока. Каждая ячейка сети русел представлена в форме трапеции, как показано на рис. 1.

Параметры боковой уклон русла ( $z$ ), ширина дна ( $B_w$ ) и шероховатость ( $n$ ) в настоящее время заданы по умолчанию как функции порядка потока Стрелера. Порядок потоков – это положительное целое число, которое используется

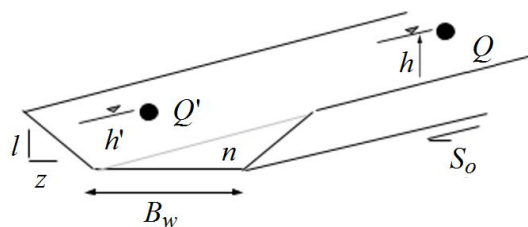


Рис. 1. Схема русла.  $S_o$  – наклон русла;  $z$  (м) – боковой уклон;  $B_w$  (м) – ширина дна

Fig. 1. Channel scheme.  $S_o$  – channel slope;  $z$  (m) – side slope;  $B_w$  (m) – bottom width

в геоморфологии и гидрологии для обозначения уровня ления в речной системе. В методе Стралера устанавливают самый низкий порядок (номер 1), начиная с верховья реки, которое является самой высокой точкой. Каждый сегмент потока или реки трактуется как узел в дереве. Когда два потока одного порядка сливаются, они образуют поток следующего порядка. Когда потоки меньшего

порядка вливаются в поток с большим порядком, порядки потоков не меняются. Отметим, что определение параметров стока русла как функции порядка потока корректно для относительно небольших водосборных бассейнов (как в нашем случае), но не для больших регионов.

Русловые ячейки получают горизонтальный приток из поверхностного стока, который фактически является однонаправленным. Таким образом, при выходе реки из берегов области затопления в явном виде в *WRF-Hydro* не воспроизводятся. Для интегрирования уравнений диффузионного волнового потока используется решение Ньютона – Рафсона первого порядка. В отличие от наземных паводковых волн, русловые паводковые волны имеют значительно большие глубины потока и амплитуды волн, что потенциально может привести к большим градиентам импульса и сильному ускорению распространяющейся волны. Для корректного воспроизведения таких паводковых волн необходимо верно задавать временные шаги модели, чтобы удовлетворить условиям Куранта. В *WRF-Hydro* в модуле диффузионной волны для руслового стока используется переменный шаг по времени: начальное значение временного шага устанавливается равным временному шагу модели поверхностного стока. Данный шаг является в свою очередь функцией шага сетки (в нашем случае – 5 с). Если во время интеграции модели критерии сходимости Ньютона – Рафсона для значений расхода потока вверх и вниз по течению не соблюдаются, временной шаг модели русел уменьшается в два раза и схема решения уравнения Ньютона – Рафсона выполняется повторно<sup>2)</sup>.

### Результаты

На рис. 2, *a* показана русловая сеть модели *WRF-Hydro* по данным на конечно-разностной сетке с разрешением 90 м. Основное внимание будет уделено стоку рек Учан-Су и Дерекойки, впадающих в Ялтинский залив. На рис. 2, *b* показано поле количества осадков за 6 сентября 2018 г., использованное в качестве входных данных. Основная доля суточной суммы осадков выпала с 06:00 до 09:00 UTC. Максимальное количество осадков было отмечено на плато Ай-Петри и Ялтинской яйле (около 100 мм). В районе Гурзуфской яйлы, которая относится к бассейну водосбора р. Дерекойки, выпало

<sup>2)</sup> The WRF-Hydro modeling system. Technical description. Version 5.1.1 / D. J. Gochis [et al.] // NCAR Technical Note. 107 p. URL: [https://ral.ucar.edu/sites/default/files/public/projects/wrf\\_hydro/technical-description-user-guide/wrf-hydro-v5.1.1-technical-description.pdf](https://ral.ucar.edu/sites/default/files/public/projects/wrf_hydro/technical-description-user-guide/wrf-hydro-v5.1.1-technical-description.pdf) (date of access: 10.09.2022).

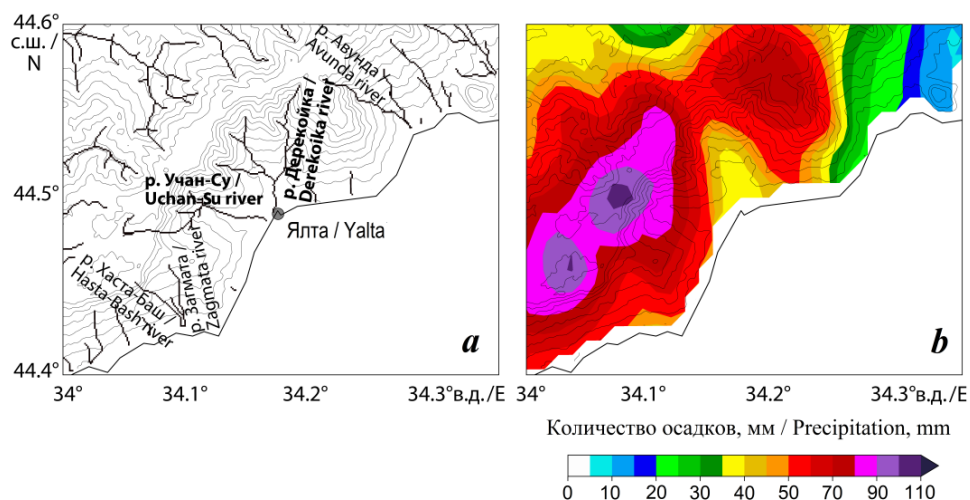


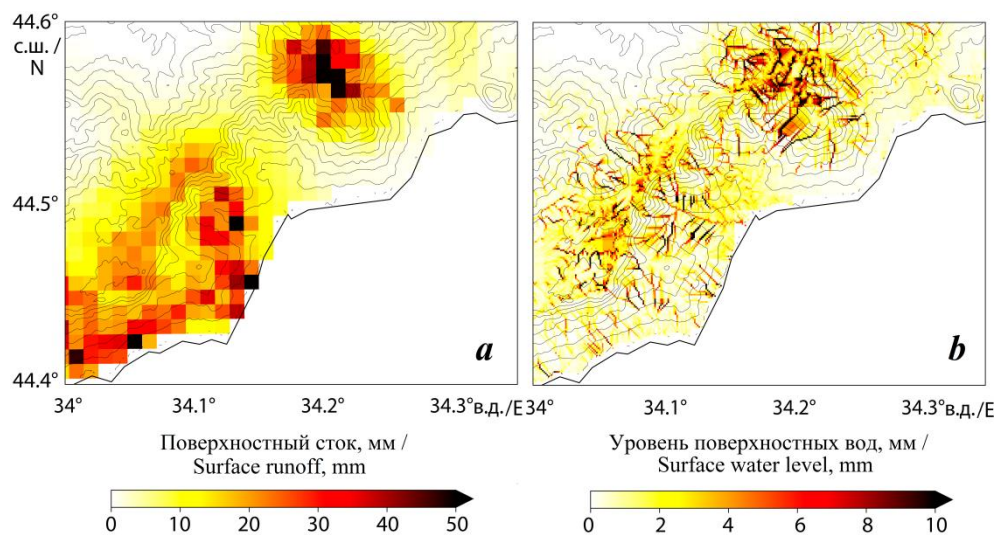
Рис. 2. Русловая сеть модели *WRF-Hydro* (a) и количество осадков за 6 сентября 2018 г. по модели *WRF* (b)

Fig. 2. Channel network of *WRF-Hydro* model (a) and precipitation amount for 6 September 2018 based on *WRF* model (b)

около 70 мм осадков. Оценки количества осадков были получены по данным модели *WRF* и прошли верификацию с использованием данных наблюдений на метеостанциях и радиолокационных измерений [3].

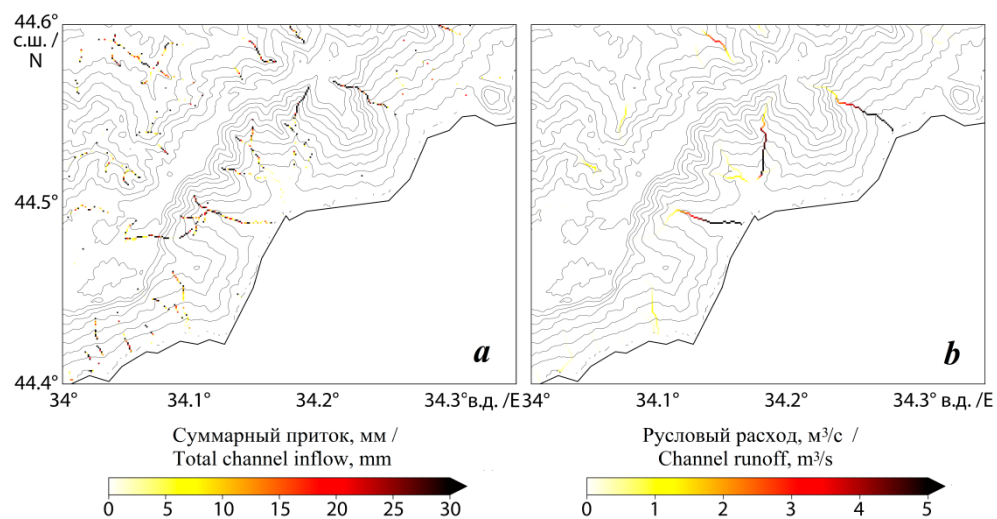
Из рис. 3 видно, что основной приток в реки происходит в верховьях в районе плато Ай-Петри и горных склонов, где суммарный сток за 12 ч превышает 30 мм, а то и 40 мм, а уровень поверхностных вод выше 10 мм. В низовьях же суммарный сток за 12 ч менее 20 мм, а уровень менее 2 мм. Максимальные значения полей суммарного поверхностного стока соответствуют максимальным значениям осадков на Ай-Петри и Гурзуфской яйле. В полях уровня максимальные значения отмечаются в районе Гурзуфской яйлы, где осадки выпали несколько позже, чем на Ай-Петри. Отметим, что доля влаги, которая попадает в поверхностный сток и передается для расчета в модуль распределения влаги на поверхности, рассчитывается по модели земной поверхности *NOAH* и определяется рядом настроечных параметров, зависящих от свойств и влажности почвы. В свою очередь, значение поверхностного уровня влаги на более мелкой 90-метровой сетке рассчитывается в модуле поверхностного стока и в основном определяется рельефом.

Рассмотрим рассчитанный по модели суммарный приток в русла и значения руслового расхода. Как и поверхностный сток, суммарный приток в русла за 12 ч (рис. 4, a), в верхнем течении рек превышает 30 мм, а в нижнем не достигает и 5 мм. Согласно результатам моделирования руслового расхода в 09:00 6 сентября 2018 г. (рис. 4, b), большая часть влаги к этому моменту почти достигла устьев рек. В результате уже отмеченного более раннего выпадения осадков на Ай-Петри максимум руслового расхода для Учан-Су также воспроизводится раньше, чем для Дерекойки. Значимый ( $> 5 \text{ м}^3/\text{с}$ ) русловый расход также воспроизводится для р. Авунды в районе Гурзуфа.



Р и с . 3. Суммарный поверхностный сток за 12 ч 6 сентября 2018 (a) и уровень поверхностных вод в 8:00 UTC (b)

Fig . 3. Total surface runoff for 12 h on 6 September 2018 (a) and the surface water level at 8:00 UTC (b)



Р и с . 4. Суммарный приток в русло за 12 ч 6 сентября 2018 г. (a) и русловый расход в 09:00 (b)

Fig . 4. Total channel inflow for 12 h on 6 September 2018 (a) and channel runoff at 9:00 (b)



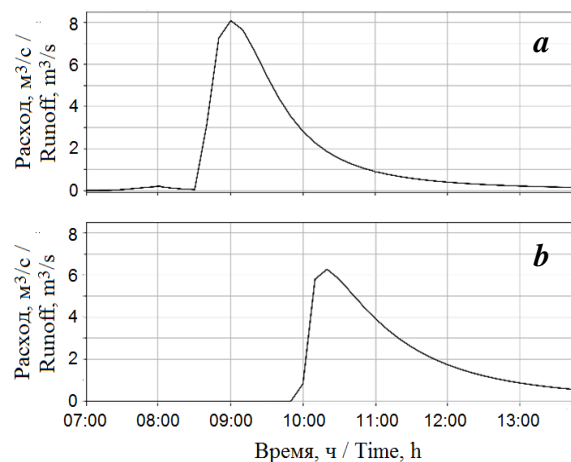


Рис. 5. Расход в устьях рек Учан-Су (а) и Дерекойки (б) за 6.09.2018 г.

Fig. 5. Runoff at the mouths of the Derekoika (a) and Uchan-Su (b) Rivers for 6 September 2018

Максимальный русловый расход Учан-Су ( $8 \text{ м}^3/\text{с}$ ) и Дерекойки ( $6 \text{ м}^3/\text{с}$ ) (рис. 5) меньше, чем пиковые значения расхода, наблюдавшиеся в прошлые периоды, однако он хорошо согласуется с типичными оценками расхода при внезапных паводках в теплое время года [11, 12]. Расход характеризуется резким подъемом и постепенным по времени снижением. Отсутствие расхода во время, предшествующее началу паводка, связано с коротким «разгонным» модельным периодом. Отметим, что наши оценки расхода для р. Дерекойки несколько ниже, чем полученные в другой работе по модели «Гидрограф», где оценка расхода превысила максимальные наблюдаемые значения ( $14.9 \text{ м}^3/\text{с}$ ) [13]. Этот результат, по-видимому, обусловлен меньшим суммарным количеством осадков во входных данных модели *WRF-Hydro*.

### Заключение

В результате численного моделирования внезапного паводка в Ялте 6 сентября 2018 г. с использованием *WRF-Hydro* получены количественные характеристики поверхностного стока и руслового расхода горных рек, Южного берега Крыма. Паводок произошел в результате выпадения экстремального количества осадков на плато Ай-Петри. Модель *WRF-Hydro* была адаптирована к территории Южного берега Крыма и интегрировалась с пространственным разрешением 90 м. Использование входных данных из атмосферной модели *WRF* с конвективно-разрешающим шагом по пространству позволило детально учесть структуру осадков и воспроизвести основные характеристики паводка. В результате работы получены количественные характеристики поверхностного стока и руслового расхода горных рек. Максимальный русловый расход Дерекойки ( $6 \text{ м}^3/\text{с}$ ) и Учан-Су ( $8 \text{ м}^3/\text{с}$ ) меньше, чем пиковые значения расхода, наблюдавшиеся в прошлые периоды и полученные в других работах, однако он хорошо согласуется с типичными оценками расхода при внезапных паводках в теплое время года.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Kuksina L. V., Golosov V. N., Kuznetsova Yu. S.* Cloudburst floods in mountains: State of knowledge, occurrence, factors of formation // *Geography and Natural Resources*. 2017. Vol. 38, iss. 1. P. 20–29. doi:10.1134/S1875372817010036
2. *Givati A., Fredj E., Silver M.* Operational Flood Forecasting in Israel // *Flood Forecasting: A Global Perspective* / Ed. T. E. Adams and T. C. Pagano. Academic Press, 2016. Chapter 6. P. 153–167. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801884-2.00006-2>
3. Cloud-resolving modeling and evaluation of microphysical schemes for flash flood-producing convection over Black Sea / A. Anisimov [et al.] // *Journal of Hydrometeorology*. 2022 (in press).
4. *Ефимов В. В., Анисимов А. Е., Комаровская О. И.* Особенности летних и зимних осадков в северной части Черноморского региона на примере данных численного моделирования // *Морской гидрофизический журнал*. 2021. Т. 37, № 6. С. 727–741. doi:10.22449/0233-7584-2021-6-727-741
5. *Lehner B., Verdin K., Jarvis A.* New global hydrography derived from spaceborne elevation data // *Eos: Transactions American Geophysical Union*. 2008. Vol. 89, iss. 10. P. 93–94. doi:10.1029/2008EO100001
6. Моделирование катастрофических паводков в регионе Южного берега Крыма / В. А. Иванов [и др.] // *Доповіді Національної академії наук України*. 2012. № 8. С. 79–84.
7. *Miller D. A., White R. A.* A conterminous United States multilayer soil characteristics dataset for regional climate and hydrology modeling // *Earth Interactions*. 1998. Vol. 2, iss. 2. P. 1–26. [https://doi.org/10.1175/1087-3562\(1998\)002<0001:ACUSMS>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1087-3562(1998)002<0001:ACUSMS>2.3.CO;2)
8. *Greenlee D. D.* Raster and vector processing for scanned linework // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 1987. Vol. 53, iss. 10. P. 1383–1387. URL: [https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1987journal/oct/1987\\_oct\\_1383-1387.pdf](https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1987journal/oct/1987_oct_1383-1387.pdf) (date of access: 10.07.2022).
9. *Julien P. Y., Saghaian B., Ogden F. L.* Raster-based hydrologic modeling of spatially-varied surface runoff // *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*. 1995. Vol. 31, iss. 3. P. 523–536. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1995.tb04039.x>
10. *Vieux B. E.* Distributed hydrologic modeling using GIS. // *Distributed hydrologic modeling using GIS*. Dordrecht : Springer, 2001. Chapter 1. P. 1–17. (Water science and technology library ; vol. 38). [https://doi.org/10.1007/978-94-015-9710-4\\_1](https://doi.org/10.1007/978-94-015-9710-4_1)
11. *Овчарук В. А., Прокофьев О. М., Тодорова Е. И.* Особенности формирования паводков теплого периода на реках Горного Крыма // *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія»*. 2015. Вып. 42. № 1157. С. 99–106.
12. Прогнозирование катастрофических паводков на основе региональной модели атмосферной циркуляции Южного Крыма / В. А. Иванов [и др.] // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь, 2011. Вып. 25, т. 2. С. 396–418.
13. Моделирование формирования стока горной реки Дерекойки (полуостров Крым) / А. А. Землянскова [и др.] // *Четвертые виноградовские чтения. Гидрология от познания к мировоззрению*. Санкт-Петербург : Издательство ВВМ, 2020. С. 78–83.

Поступила 05.04.2022 г.; одобрена после рецензирования 25.04.2022 г.; принята к публикации 08.07.2022 г.; опубликована 25.09.2022 г.

*Об авторах:*

**Свищева Ирина Анатольевна**, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0003-1501-3720**, **ResearcherID: M-4451-2018**, **Scopus Author ID: 57212347523**, *svishcheva.iryana@gmail.com*

**Анисимов Анатолий Евгеньевич**, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-5530-5608**, **ResearcherID: ABA-1705-2020**, **Scopus Author ID: 42561044300**, *anatolii.anisimov@mhi-ras.ru*

*About the authors:*

**Irina A. Svishcheva**, Junior Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **ORCID ID: 0000-0003-1501-3720**, **ResearcherID: M-4451-2018**, **Scopus Author ID: 57212347523**, *svishcheva.iryana@gmail.com*

**Anatolii E. Anisimov**, Senior Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Ph.D. (Phys.-Math.), **ORCID ID: 0000-0002-5530-5608**, **ResearcherID: ABA-1705-2020**, **Scopus Author ID: 42561044300**, *anatolii.anisimov@mhi-ras.ru*

*Заявленный вклад авторов:*

**Свищева Ирина Анатольевна** – формулировка и постановка задачи, проведение вычислений с использованием математической модели, качественный и количественный анализ результатов, подготовка текста статьи и графических материалов

**Анисимов Анатолий Евгеньевич** – постановка проблемы, проведение вычислений с использованием математической модели, качественный и количественный анализ результатов, критический анализ и доработка текста

*Contribution of the authors:*

**Irina A. Svishcheva** – problem statement, qualitative and quantitative analysis of the results, model simulations, text and visualization preparation

**Anatolii E. Anisimov** – problem statement, model simulations, qualitative and quantitative analysis of the results, critical analysis and improvement of the text

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*All the authors have read and approved the final manuscript.*