

УДК 556.5+519.22

В.И. ОСАДЧИЙ, Н.Н. ОСАДЧАЯ, Л.А. КОВАЛЬЧУК, Ю.Б. НАБИВАНЕЦ

Украинский гидрометеорологический институт ГСЧС Украины и НАН Украины

пр. Науки, 37, Киев, 03028, Украина

## **СТОХАСТИЧЕСКОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ ГИДРОГРАФА РАВНИННОЙ РЕКИ НА ГЕНЕТИЧЕСКИЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ СТОКА**

Дано теоретическое обоснование и разработан метод стохастического разделения гидрографа на генетические составляющие водного стока: поверхностную, внутриводосборную и подземную. Верификация метода осуществлена по результатам автоматизированных наблюдений за динамикой расходов воды р. Богуславка.

*Ключевые слова:* сток, поверхностный, внутриводосборный, подземный, гидрограф, расходы, вероятность, плотность, закон, Gaussian

Речной сток представляет собой совокупность водных потоков, достигающих русловой сети не только различными путями, но и с различной скоростью. Вода, движущаяся по поверхности склона или в приповерхностном слое почвы, идентифицируется наиболее быстрым поверхностным стоком и отражается восходящей ветвью гидрографа. Воды первого водоносного горизонта, связанные с дневной поверхностью, принято называть внутриводосборным стоком. Он движется с меньшей скоростью по сравнению с поверхностным стоком и обычно ассоциируется с нисходящей ветвью гидрографа. Воды, перемещающиеся в насыщенном водоносном горизонте, формируют самую медленную глубоководную подземную составляющую. Они отождествляются со слабо изменяющейся частью гидрографа и являются основным источником питания реки в период межени [3]. Соотношение каждого из перечисленных видов водного стока в формировании общего расхода воды существенно отличается в зависимости от физико-географической зоны [1, 5, 6].

Речной водосбор представляет собой единую водно-динамическую систему, в пределах которой происходит кругооборот влаги и транспортируемых веществ. В процессе перераспределения атмосферных осадков в пределах различных компонентов ландшафта их химический состав претерпевает существенную трансформацию, что оказывает влияние на качество речной воды. Современные представления о массопереносе веществ базируются на диффузионном механизме, отражающем взаимодействие в системе «твердая фаза – вода». Движущей силой этого процесса является градиент концентраций, а масса диффузионного потока тесно связана с площадью соприкосновения контактирующих сред. С этой точки зрения, для потоков воды, стекающих в замедленном режиме, наиболее вероятным является переход веществ из твердой фазы, на основании чего полагается, что роль внутриводосборной составляющей наиболее существенна.

Использование концепции различных генетических категорий стока для оценки и прогноза геохимического потока вещества в пределах речного водосбора сдерживается отсутствием надежного способа разделения его гидрографа, анализ которого до сих пор основывается на графическом методе с высокой долей субъективности. Как графические методы [2], так и числовые фильтры, широко используемые в работах зарубежных авторов [7], подтвердили свою надежность для выделения глубоководного подземного стока. В то же время для выделения внутриводосборной составляющей предложен лишь эмпирический метод GROUND [8].

В связи с вышеизложенным, целью данной работы было теоретическое обоснование и разработка стохастического метода разделения гидрографа на генетические составляющие стока.

### **Материал и методы исследований**

В качестве исходного материала использованы результаты автоматизированных наблюдений за ходом стока на р. Богуславка (г. Богуслав), полученные Болуславской экспериментальной

станцией УкрГМИ в 1982 г. На основании записей самописца был сформирован непрерывный ряд значений расходов воды с 10-ти минутным разрешением, насчитывающий более 52 тыс. записей. Кроме этого, использованы ежедневные значения расходов р. Богуславка за период 1950 – 1998 гг.

### Результаты исследований и их обсуждение

Теоретической основой разделения гидрографа на генетические составляющие послужили фундаментальные положения теории вероятностей и гидрологии суши:

- 1) расходы общего стока и расходы поверхностной, внутрипочвенной и подземной составляющей пропорциональны их вероятностям;
- 2) закон статистического распределения расходов общего стока является свёрткой законов статистических распределений расходов каждой из составляющих;
- 3) законы статистических распределений расходов общего стока и его составляющих предопределены гидрометеорологическими условиями формирования отдельных фаз стока. А именно, условиями зимней и летне-осенней межени, половодья с учётом пойменного регулирования, летних и осенних паводков;
- 4) полагали, что статистические распределения внутрипочвенного и подземного стока подчинены закону Гаусса.

Для реализации стохастического разделения стока из ряда первоначальных наблюдений были сформированы выборки, соответствующие основным фазам гидрологического режима реки – половодье, паводок, межень. Исходный ряд и полученные выборки были параметризованы путем определения математических ожиданий  $m$ , стандартных отклонений  $\sigma$  и эксцессов  $\varepsilon$ .

Алгоритм расчета детально рассмотрен на примере фазы половодья. Принимая во внимание, что подземные воды являются постоянным источником питания реки, очевидно, что часть выборки половодья будет иметь нормальное распределение. Это было установлено по близости к нулю выборочных значений эксцесса и эксцентриситета ранжированного ряда. По выделенной нормально распределённой части выборки половодья вычислили  $m_{\text{подз}}$ . Математическое ожидание расходов стока более высоких горизонтов ( $m_{\text{верх}}$ ) вычислялось суммарно для поверхностного и внутрипочвенного стока по разнице между соответствующими показателями исходного ряда  $m_{\text{исх}}$  и выборки подземного стока:

$$m_{\text{верх}} = m_{\text{исх}} - m_{\text{подз}}$$

Стандартные отклонения подземного стока  $\sigma_{\text{подз}}$  и стока верхних горизонтов  $\sigma_{\text{верх}}$  приравнивались к стандартному отклонению расходов исходного  $\sigma_{\text{исх}}$  ряда.

Аналогичным путем осуществляли определение  $m$  и  $\sigma$  внутрипочвенного и поверхностного стока. В этом случае вместо выборки половодья использовался вычисленный ряд стока верхних горизонтов. По выделенной нормально распределенной части указанного ряда вычислялось математическое ожидание внутрипочвенного стока  $m_{\text{почв}}$ .

Эксцессы расходов подземного  $\varepsilon_{\text{подз}}$  и внутрипочвенного  $\varepsilon_{\text{почв}}$  стока, согласно рабочим гипотезам об их нормальности, принимались = 0; эксцесс расходов поверхностного стока  $\varepsilon_{\text{пов}}$  приравнивался к эксцессу расходов исходного ряда  $\varepsilon_{\text{исх}}$ .

Вычисленные таким образом статистические параметры рядов фактического стока ( $m_{\text{исх}}$ ,  $\sigma_{\text{исх}}$ ,  $\varepsilon_{\text{исх}}$ ), суммарного стока верхних горизонтов ( $m_{\text{верх}}$ ,  $\sigma_{\text{исх}}$ ,  $\varepsilon_{\text{исх}}$ ), поверхностного ( $m_{\text{пов}}$ ,  $\sigma_{\text{верх}}$ ,  $\varepsilon_{\text{верх}}$ ), внутрипочвенного ( $m_{\text{почв}}$ ,  $\sigma_{\text{верх}}$ ,  $\varepsilon_{\text{почв}} = 0$ ) и подземного ( $m_{\text{подз}}$ ,  $\sigma_{\text{исх}}$ ,  $\varepsilon_{\text{подз}} = 0$ ) стока стали основой для идентификации законов их статистических распределений. Для этой цели была использована модель симметричного экспоненциального распределения Gaussian-1 [4]:

$$p(x, t) = \frac{\alpha}{2 \lambda \sigma \Gamma(1/\alpha)} \exp\left(-\left|\frac{x - m}{\lambda \sigma}\right|^\alpha\right), \quad (1)$$

где  $\lambda = \sqrt{\frac{\Gamma(1/\alpha)}{\Gamma(3/\alpha)}}$ ,  $\Gamma(z)$  – гамма-функция ( $\Gamma(z) = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{z-1} dt$ , при  $\text{Re } z > 0$ ),  
 $\sigma = \sigma(t)$  – стандартное отклонение,  $m = m(t)$  – центр распределения,  $\alpha = \alpha(t)$  – характеристика распределения, однозначно определяющая параметр формы экспоненциальных распределений, эксцесс ( $\varepsilon$ ):  $\varepsilon = \frac{\Gamma(1/\alpha)\Gamma(5/\alpha)}{(\Gamma(3/\alpha))^2}$  (2)

Если  $\alpha < 1$ , то модель (1) описывает распределения, близкие по своим свойствам распределению Коши;  $\alpha = 1$  – распределение Лапласа, имеющее более островершинный вид по сравнению с нормальным распределением;  $\alpha = 2$  – соответствует нормальному распределению;  $\alpha > 2$  – распределение близкое к трапецеидальным;  $\alpha \rightarrow \infty$  – равномерное распределение.

Функция распределения, рассчитанная на основании плотности вероятности, позволила вычислить вероятности расходов подземного стока и суммарного стока верхних горизонтов. Основываясь на допущении о пропорциональности расходов их вероятностям, полученные значения вероятностей были переведены в расходы воды.

По аналогичной схеме разделили расходы интегрального стока верхних горизонтов на поверхностную и внутripочвенную составляющие.

На завершающем этапе путём суммирования рассчитанных расходов отдельных генетических составляющих стока были рассчитаны общие расходы р. Богуславки.

Верификация разработанной процедуры разделения стока проводилась на основании корреляции значений наблюдаемых расходов со значениями рассчитанных общих расходов при  $r = 1$ .

О состоятельности метода судили также по его возможностям отражать фундаментальные соотношения между генетическими составляющими стока, в частности, блокирование подземного питания, обусловленное береговым регулированием в результате подъёма уровня воды (рис.).

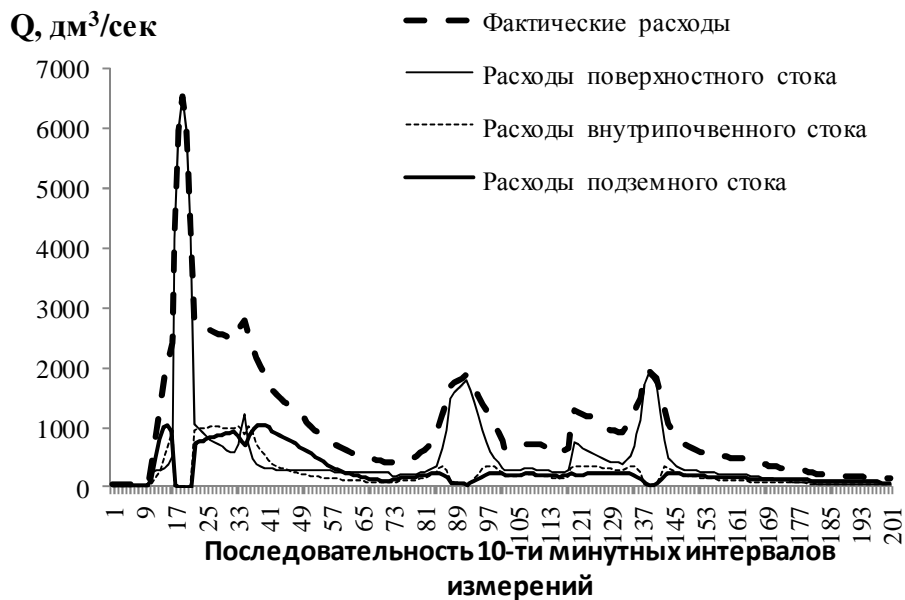


Рис. Результаты стохастического разделения гидрографа р. Богуславка на генетические составляющие стока в период прохождения паводка 1-2 июля 1982 г.

**Выводы**

Полученные результаты разделения стока р. Богуславки показали, что глубоководное подземное питание, составляющее 44% годового, соответствует региональным закономерностям гидролого-гидрогеологических процессов. Поверхностный склоновый сток, достигающий 36% годового объема, наблюдается в период снеготаянья или летне-осенних паводков при формировании высоких расходов. Эта составляющая представлена восходящей ветвью гидрографа стока. Внутриводная фаза стока наименьшая - 19%. Этот генетический тип стока появляется в период высоких расходов воды и наблюдается на нисходящей ветви гидрографа.

1. *Картвелишвили Н. А.* Теория вероятностных процессов в гидрологии и регулировании речного стока / Н. А. Картвелишвили. – Л.: Гидрометеиздат, 1967. – 290 с.
2. *Куделин Б. И.* Принципы региональной оценки естественных ресурсов подземных вод / Б. И. Куделин. – М.: МГУ, 1960. – 344 с.
3. *Кучмент Л. С.* Формирование речного стока / Л. С. Кучмент, В. Н. Демидов, Ю. Г. Мотовилов. – М.: Наука, 1983. – 216 с.
4. *Новицкий П. В.* Оценка погрешностей результатов измерений / П. В. Новицкий, И. А. Зограф. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.
5. *Пособие по определению расчётных гидрологических характеристик.* – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 447 с.
6. *Соколовский Д. Л.* Речной сток / Д. Л. Соколовский. – Л.: Гидрометеиздат, 1968. – 538 с.
7. *Chapman T. A.* comparison of algorithms for stream flow recession and baseflow separation / T. A. Chapman // *Hydrological Processes.* – 1999. – Vol. 13. – P. 701–714.
8. *Dolezal F.* Methods of runoff separation applied to small stream and tile drainage runoff / F. Dolezal, Z. Kulhavy, T. Kvitek [at all] // *Interdisciplinary approaches in small catchment hydrology: Monitoring and research.* – Ed. by Holko L., Miklanek P. – IHP-VI Technical Documents in Hydrology. – Paris: UNESCO, 2003. – № 67. – P. 131–136.

*В.І. Осадчий, Н.М. Осадча, Л.А. Ковальчук*

Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України, Київ

#### СТОХАСТИЧНЕ РОЗДІЛЕННЯ ГІДРОГРАФА РІВНИННОЇ РІЧКИ НА ГЕНЕТИЧНІ СКЛАДОВІ СТОКУ

Дано теоретичне обґрунтування та розроблено метод стохастичного розділення гідрографа на генетичні складові водного стоку: поверхневу, внутрішню і підземну. Верифікація методу здійснена за результатами автоматизованих спостережень за динамікою витрат води р. Богуславка.

*Ключові слова:* Стік, поверхневий, внутрішній, підземний, гідрограф, витрати, ймовірність, щільність, закон, Gaussian

*V. Osadchy, N. Osadcha, L. Kovalchuk*

Ukrainian Hydrometeorological Institute, State Service on Emergencies and NAS of Ukraine, Kyiv

#### STOCHASTIC SEPARATION OF LOWLAND RIVER HYDROGRAPH INTO THE GENETIC COMPONENTS OF RUNOFF

The rationale was formed and stochastic algorithm of runoff separation was developed. Method was verified on automated observation data for Boguslavka River.

*Key words:* Runoff, direct flow, interflow, baseflow, hydrograph, discharges, probability, density, law, Gaussian