

УДК 556.16«45» : 631.67 : 519.24.001.57

Применение методов статистического моделирования при оценке изменений годового стока рек под влиянием орошения

Кандидат техн. наук Е. Д. Гопченко,
кандидат географ. наук Н. С. Лобода

Авторами разработаны способы, позволяющие моделировать влияние прудов и водохранилищ, а также орошения на статистические параметры временных рядов годового стока. Учитывая ограниченность фактических рядов наблюдений за стоком, при исследовании направления и степени воздействия факторов хозяйственной деятельности на водные ресурсы применен метод статистических испытаний.

В итоге построена методика, которая дает возможность учесть (раздельно и совместно) влияние искусственных водоемов и орошения на норму стока, коэффициенты вариации и асимметрии.

Возрастающие масштабы водохозяйственных мероприятий и необходимость управления сложными водохозяйственными системами с целью комплексного и рационального использования имеющихся водных ресурсов дали толчок «технологическому» [7, 8] направлению в гидрологии, предусматривающему предвычисление и оценку возможных изменений стока рек под влиянием антропогенной деятельности. Если принять во внимание, что длительность гидрологических рядов в редких случаях превышает 60 лет, из которых последние 20 приходятся на период интенсивного хозяйственного освоения территории, становится понятным возрастающий интерес к построению новых методов расчета различных характеристик стока с учетом факторов антропогенного воздействия.

Удовлетворение потребностей сельского хозяйства в воде для целей орошения осуществляется за счет годового стока рек, зарегулированных прудами и водохранилищами. Дифференцированная оценка изменений годового стока под влиянием искусственных водоемов и орошения возможна лишь при наличии достаточно длинных рядов естественного стока и надежных сведений о динамике показателей, определяющих уровень хозяйственного освоения водосборов. Такие данные в лучшем случае имеются только по крупным бассейнам рек. Что же касается малых и средних рек, то здесь учет водопотребления зачастую ведется несистематично или вовсе отсутствует. Поэтому большое значение приобретает создание имитационных моделей стока путем моделирования рядов на основе исходно заданных параметров функционирующих водохозяйственных систем. Категорию начально заданных элементов при этом составляют параметры естественного стока (норма, коэффициенты вариации и асимметрии), а также данные, определяющие размеры и характер хозяйственной деятельности на водосборе. Сюда относятся площади орошаемых земель и искусственных водоемов, уровень оптимального увлажнения почв при поливах, коэффициенты полезного действия оросительных систем и т. п.

Для целей моделирования в настоящее время широко применяют статистические приемы, построенные на непосредственном использовании реализаций процесса стока — наблюдаемых или искусственно разыгранных.

Использование методов статистических испытаний [6—8] в водохозяйственных расчетах опирается на гипотезу о стационарности временных рядов стока. Степень влияния на водные ресурсы хозяйствен-

ной деятельности обуславливается как природными факторами, тесно связанными с колебаниями климата и имеющими в общем стохастический характер, так и уровнем развития хозяйственной деятельности [2]. Так, например, влияние прудов и водохранилищ как искусственных объектов ландшафта может быть выражено с помощью балансового уравнения [3]

$$Y_b F = Y_e (F - \Sigma F_b) - (Z_b - X) \Sigma F_b, \quad (1)$$

где Y_b — слой годового стока при наличии в бассейне прудов и водохранилищ;

ΣF_b — суммарная площадь водной поверхности искусственных водоемов;

X — атмосферные осадки;

Z_b — слой испарения с поверхности водоемов;

F — площадь водосбора;

Y_e — слой годового стока в условиях ненарушенного режима.

Из выражения (1) видно, что уменьшение стока в результате дополнительного испарения с водной поверхности определяется разностью $(Z_b - X)$, которая изменяется зонально (но зависит от водности года), а также суммарной площадью водной поверхности ΣF_b . В маловодные годы разность $Z_b - X$ резко возрастает, а в многоводные уменьшается [13]. Соответствующим образом будет изменяться и величина потерь годового стока:

$$\Delta Y = Y f_b + (Z_b - X) f_b. \quad (2)$$

Здесь f_b — выраженная в долях от общей площади водосбора величина ΣF_b . При постоянном уровне хозяйственного освоения территории ($f = \text{const}$) временные ряды бытового стока будут удовлетворять условию стационарности, и, следовательно, к ним применимы те же методы вероятностного анализа, что и к рядам естественного стока.

Моделирование рядов годового стока при фиксированных значениях f_b может быть осуществлено на основе балансового соотношения (2) с помощью методов Монте-Карло [2, 5], позволяющих увеличить объем информации об ожидаемом режиме. Сущность метода статистических испытаний состоит в создании более длительных рядов, соответствующих по своим свойствам коротким исходным рядам. Необходимыми параметрами для генерирования рядов годового стока являются: норма, коэффициенты вариации и асимметрии, а также сведения о наличии внутривидных корреляций. Базисом при моделировании рядов годового стока служат ряды естественного стока. Определение статистических параметров рядов годового стока в естественных условиях его формирования возможно после их «восстановления» известными в гидрологии методами [14].

Учитывая технические трудности, связанные с недостатком исходной информации по стоку и водопотреблению, авторами [4, 9] для территории юга Украины и Молдавии ряды естественного годового стока рек были получены по методу гидролого-климатических расчетов, разработанному В. С. Мезенцевым [10, 11]. Их статистическая обработка позволила вычислить для естественных условий нормы стока \bar{Y}_e и коэффициенты вариации C_{v_e} .

Коэффициенты асимметрии, установленные по сравнительно коротким выборкам, как известно [7], обладают большими погрешностями, поэтому их чаще всего нормируют по соотношению с C_v . В частности, для территории юга Украины и Молдавии C_{s_e}/C_{v_e} в среднем равно 1,7. Возможность такого осреднения подтверждается результатами совместного анализа рядов естественного стока, выполненного по методике

С. Н. Крицкого, М. Ф. Менкеля [7]. Поскольку многолетняя изменчивость в рядах стоковых характеристик в значительной мере определяется увлажненностью территории, для юга Украины и Молдавии оказалось возможным обосновать региональную зависимость между C_{v_e} и \bar{Y}_e :

$$C_{v_e} = \frac{5,6}{\bar{Y}_e^{0,62}} \quad (3)$$

Моделирование рядов естественного стока проще всего осуществляется с помощью таблицы случайных чисел Дж. Д. Вильямса [1], из которой в определенном порядке выбираются числа, принимаемые за обеспеченности величин годового стока. По полученной выборке составляются искусственные многолетние гидрологические ряды, удовлетворяющие выбранному типу кривой распределения и исходным числовым параметрам \bar{Y}_e , C_{v_e} и C_{s_e}/C_{v_e} .

При генерации рядов бытового стока зарегулированных рек удобнее уравнение (1) преобразовать к виду

$$Y_b = Y_e (1 - f_b \alpha), \quad (4)$$

где α — безразмерный коэффициент, характеризующий колебания климатических характеристик,

$$\alpha = 1 + \frac{Z_b - X}{Y_e} \quad (5)$$

Данный коэффициент является функцией водности года и может быть представлен зависимостью $\alpha = \varphi(Y_e)$, обоснованной авторами в работе [3]. Эта связь применяется для увязки по обеспеченности водности года Y с разностью $Z_b - X$, представленной в виде безразмерного коэффициента α . Величина антропогенного параметра f_b назначается произвольно в любых заданных пределах. Для каждой из реализаций бытового стока, соответствующих заданным величинам f_b , рассчитываются норма \bar{Y}_b , коэффициенты изменчивости C_{v_b} и асимметрии C_{s_b} . По полученным данным могут быть построены зависимости вида $\bar{Y}_b = \varphi(f_b)$, $C_{v_b} = \varphi(f_b)$ и $C_{s_b} = \varphi(f_b)$, позволяющие оценить статистические параметры рядов бытового стока по принятым уровням хозяйственного освоения территории.

Моделирование рядов бытового стока при ирригационном водопотреблении выполняется по аналогичной схеме, в которой основное расчетное уравнение имеет следующий вид:

$$Y_{op} = Y_e - M f_{op} \frac{1 - a_b}{\eta}, \quad (6)$$

где Y_{op} — слой стока с водосбора в условиях оросительных мелиораций;

f_{op} — относительная площадь орошаемых земель;

η — коэффициент полезного действия оросительных систем;

M — оросительная норма;

a_b — коэффициент возвратных вод.

Общее количество воды, которое необходимо подать на поле, может быть рассчитано по методу гидролого-климатических расчетов для каждого месяца вегетационного периода с учетом конкретного соотношения ресурсов тепла и влаги в бассейне, предшествующего увлажнения почвы, ее структурного и механического состава [12]:

$$m_0 = Z_m v'_0 - X, \quad (7)$$

где m_0 — проектная поливная норма;

v_0 — относительная влажность почвы, выраженная в долях от наименьшей влагоемкости, при которой данный вид растений наиболее продуктивно вегетирует;

r — параметр, характеризующий водно-физические свойства почвы, назначается в зависимости от структурного или механического состава почвогрунтов на орошаемых массивах;

Z_m — максимально возможное испарение.

Оросительная норма M за год вычисляется как сумма поливных норм за вегетационный период и фактически является величиной, характеризующей дефицит водопотребления в расчете на некоторый среднеструктурный гектар орошаемых земель без учета дифференциации по типу культур. Так как наиболее благоприятные условия развития различных видов сельскохозяйственных растений отличаются, главным образом, потребностью во влаге, моделирование рядов годового стока при орошении выполняется для трех уровней оптимального увлажнения почвы: $v_0 = 1,0; 0,9; 0,8$.

Так же, как и при оценке влияния искусственных водоемов, влияние оросительных мероприятий можно разделить на природную и антропогенную составляющие. Базисная часть уравнения (6) выражается в виде дефицитов водопотребления сельскохозяйственных культур M . Закономерности многолетних колебаний последних удовлетворяют требованию стохастической стационарности процесса [2], а значит, к ним применимы те же математические схемы, что и при статистическом описании речного стока.

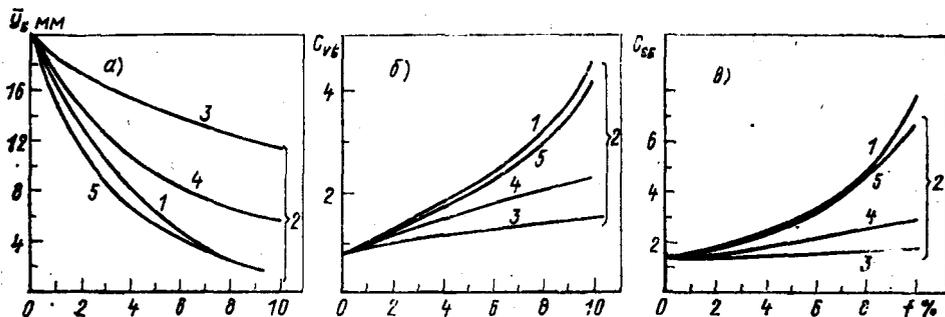
Однако генерация искусственных рядов годового стока в условиях орошения осложнена отсутствием достаточно тесной связи между дефицитами водопотребления за вегетационный период и величиной годового стока. Чтобы учесть при моделировании ряда соответствие стока и оросительных норм по обеспеченности без больших потерь в точности расчета, можно использовать группировки маловодных (обеспеченность стока $P > 75\%$), многоводных ($P < 25\%$) и средних по водности ($25 < P < 75\%$) лет. Так, в соответствие величинам годового стока, попадающим в группу маловодных лет ($P > 75$), ставились оросительные нормы M , осредненные в интервале обеспеченности $P < 25\%$. И наоборот, значения годового стока высокой обеспеченности ($P < 25\%$) комбинировались со средними значениями дефицитов водопотребления, имеющих вероятность превышения $P > 75\%$. Другими словами, уравнение расчета рядов годового стока при различных площадях орошения $f_{ор}$ может быть записано в следующем виде:

$$Y_{ор, p} = Y_{ер} - M_{ср, 100-p} f_{ор} \frac{1 - a_0}{\eta}. \quad (8)$$

Такой подход оправдывается реальными физическими процессами, происходящими на водосборе: в засушливые годы возрастает дефицит водопотребления сельскохозяйственных культур, а значения годового стока уменьшаются; в многоводные годы необходимость в больших затратах воды на орошение отпадает.

Характер построенных по смоделированным рядам кривых $Y_{ор} = \varphi(f_{ор})$, $C_{v, ор} = \varphi(f_{ор})$, $C_s, ор = \varphi(f_{ор})$ для территории юга Украины и Молдавии аналогичен тем, которые были получены при оценке влияния искусственных водоемов на параметры годового стока. С ростом величин f_v и $f_{ор}$ происходит уменьшение нормы Y и увеличение коэффициентов C_v и C_s [3, 9]. Причем эффект влияния хозяйственной деятельности во многом определяется увлажненностью территории. По мере перехода в более засушливые районы естественные водные ресурсы уменьшаются, а степень антропогенного воздействия увеличивается.

В качестве примера на рисунке приводятся зависимости \bar{Y}_6 , C_{v6} , C_{s6} (индекс «б» у параметров соответствует условиям зарегулированности стока прудами или водохранилищами или наличию оросительных мелиораций) от относительных площадей f_v и f_{op} (для трех уровней оптимального увлажнения $v_0=0,8; 0,9; 1,0$) при норме естественного стока $\bar{Y}_e=20$ мм.



Зависимости среднего многолетнего слоя стока (а), коэффициентов вариации (б) и асимметрии (в) рядов бытового стока от степени зарегулированности водосбора прудами и водохранилищами (1) и площадей орошаемого земледелия (2) при различных уровнях оптимального увлажнения.
 1) $v_0=0,8$; 4) $v_0=0,9$; 5) $v_0=1,0$.

Поскольку орошение и регулирование стока практически всегда взаимосвязаны, необходим и комплексный подход к оценке их совместного влияния на параметры годового стока. Удобным для этих целей является использование коэффициентов K_A , отражающих влияние хозяйственной деятельности на любой из рассматриваемых статистических параметров распределения в виде отношения

$$K_A = \frac{A_6}{A_e}, \tag{9}$$

где A_6 — значение искомого параметра A при уровне хозяйственного освоения территории, характеризуемого показателем f ; A_e — значение параметра A в естественных условиях формирования стока, когда $f=0$.

На основании рассчитанных для каждого статистического параметра индивидуальных коэффициентов влияния можно записать результирующие уравнения следующего вида:

$$\bar{Y}_6 = \bar{Y}_e (K_Y + K'_Y - 1), \tag{10}$$

$$C_{v6} = C_{ve} (K_{C_v} + K'_{C_v} - 1), \tag{11}$$

$$C_{s6} = C_{se} (K_{C_s} + K'_{C_s} - 1), \tag{12}$$

где $K_{\bar{Y}}$, K_{C_v} , K_{C_s} — коэффициенты влияния в условиях орошения; $K'_{\bar{Y}}$, K'_{C_s} , K'_{C_v} — коэффициенты влияния при наличии на водосборе искусственных водоемов. Коэффициенты K и K' можно представить графиками или номограммами в зависимости от f_{op} или f_v при различных значениях \bar{Y}_e . Кривые $K_A = \varphi(f_{op})$, кроме того, дифференцируются и по оптимальному увлажнению почвы v_0 . По ряду водосборов юга Украины и Молдавии, для которых имелись сведения о динамике суммарных площадей орошения и водной поверхности искусственных водоемов за многолетний период, была осуществлена проверка методики. Сравнение

параметров бытового стока, вычисленных по изложенной методике и фактическим данным, указывает на то, что их соответствие находится в пределах точности определения каждого из указанных параметров. Авторами произведена также оценка уже происшедших нарушений естественного режима некоторых рек юга Украины и Молдавии на уровне хозяйственного освоения территории 1980 г. Наибольшие значения антропогенных факторов следующие: $f_{op} = 6,6\%$ и $f_b = 2,2\%$. По большинству водосборов среднее многолетнее значение годового стока уменьшилось на 30—40%, а по рекам Ялпук — г. Комрат ($F = 241 \text{ км}^2$, $f_b = 1,5\%$ и $f_{op} = 6,6\%$) и Сарата — с. Сарата ($F = 1110 \text{ км}^2$, $f_b = 0,5\%$ и $f_{op} = 1\%$) эти изменения достигли 62 и 58% соответственно. Коэффициенты вариации увеличились в среднем в 1,4, а C_s — в 1,16 раза.

Разработанная методика учета влияния оросительных мероприятий на характеристики годового стока рек является простейшей физико-математической моделью стока, позволяющей получить случайные ряды годового стока и их статистические параметры при изменяющихся в результате хозяйственной деятельности условиях формирования стока на водосборе (строительство прудов, водохранилищ и проведение оросительных мелиораций). Принцип построения расчетной методики может быть использован в любом районе страны, где интенсивно развивается орошаемое земледелие.

Литература

1. Алексеев Г. А. Графоаналитические способы определения и приведения к длительному периоду наблюдений параметров кривой распределения. — Труды ГГИ, 1960, вып. 73.
2. Воропаев Г. В., Местечкин В. Б. Физико-географические основы формирования водохозяйственных балансов. — М., Наука, 1981.
3. Гопченко Е. Д., Лобода Н. С. Влияние прудов и водохранилищ на характеристики годового стока рек зоны недостаточного увлажнения. — Метеорология и гидрология, 1984, № 4.
4. Гопченко Е. Д., Лобода Н. С. О влиянии хозяйственной деятельности на годовой сток рек юга Украины. — Труды УкрНИИ, 1984, вып. 200.
5. Картвелиашвили А. Н. Стохастическая гидрология. — Л., Гидрометеониздат, 1981.
6. Крицкий С. Н. О направлении исследований в области теории использования водных ресурсов. — Сб.: Проблемы изучения и комплексного использования водных ресурсов. М., Наука, 1978.
7. Крицкий С. Н., Менкель М. Ф. Гидрологические основы управления стоком. — М., Наука, 1981.
8. Кучмент А. С. Моделирование процессов формирования стока для управления водноресурсными системами. — Международные высшие гидрологические курсы ЮНЕСКО, 13-я сессия, 1982.
9. Лобода Н. С. Влияние орошения на годовой сток рек Причерноморской низменности. Деп. ВИНТИ: Гидрология суши, вып. 9(129), 1983.
10. Мезенцев В. С., Белоненко Г. В., Карнацевич И. В. и др. Гидрологические расчеты в мелиоративных целях. — Омск, 1980.
11. Мезенцев В. С. Расчеты водного баланса. — Омск, 1976.
12. Режимы влагообеспеченности и условия гидромелиораций степного края/Под ред. В. С. Мезенцева. — М., Колос, 1974.
13. Соколовский Д. Л. Речной сток. — Л., Гидрометеониздат, 1969.
14. Шикломанов И. А. Антропогенные изменения водности рек. — Л., Гидрометеониздат, 1979.

Одесский гидрометеорологический институт

Поступила
24 XII 1985

USE OF STATISTICAL MODELS FOR ESTIMATING IRRIGATION EFFECTS ON ANNUAL RUNOFF

E. D. Gopchenko, N. S. Loboda

Techniques were developed to model pond, reservoir and irrigation effects on the statistical parameters of annual runoff time series. Due to the shortage of available runoff series the statistical testing has been applied to investigate the ways and extent of man-made affecting the water resources. The resulted method enables to allow for (separately and jointly) effects of artificial basins and of irrigation on the normal runoff and the coefficients of variation and asymmetry.