

ТРАНСФОРМАЦИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ИЗЪЯТИЙ СТОКА

В. Д. Красов

Воронежский государственный университет, Россия

Исследуются недостаточно изученные аспекты изменения гидрологических параметров при антропогенном воздействии на сток рек. В качестве модели используются длительные последовательности годового стока, полученные на основе трехпараметрического распределения С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля. Рассматривается влияние интервала «нулевого» стока, образующегося при учете изъятия на кривых распределения вероятностей. Даются количественные оценки антропогенных изменений параметров стока.

Ключевые слова: гидрологические параметры, изъятие стока, трансформация.

The article deals with the aspects of hydrological characteristics resulting from anthropological impact on the rivers run-off. The model is long sequences of the annual run-off, which were identified on the basis of three-parametric distribution of S.N. Kritskiy and M.F. Menkel. The article considers the influence of the interval of the «zero» run-off, resulting from withdrawing probabilities distribution on the curve. The article also provides quantity estimation of anthropological changes of the run-off characteristics.

Key words: hydrological parameters, withdrawal of run-off, transformation.

Тема, вынесенная в заголовок статьи, относится к числу недостаточно изученных аспектов исследований, связанных с оценкой влияния антропогенного фактора на поверхностные водные ресурсы. Изъятие воды из рек для хозяйственных целей, особенно в районах традиционного орошения, достигает весьма значительных размеров. Характерный пример – крупнейшие среднеазиатские реки Амударья и Сырдарья. По данным А.Е. Асариной [1, 3] затраты стока в их бассейнах в период 1971-85 гг. достигли более 80 процентов естественных водных ресурсов. В некоторые годы Сырдарья вообще не доносила свои воды до Аральского моря¹.

С задачей оценки изменения гидрологических параметров практика проектирования сталкивается при установлении располагаемых водных ресурсов в перспективе, ограниченной определенным уровнем развития экономики, а также при разработке правил управления режимом существующих водохозяйственных систем.

1. Общие положения

Пусть имеется ненарушенный хозяйственной деятельностью человека хронологический ряд величин годового стока в виде модульных коэффициентов k_i ($k_i = \frac{Q_i}{\bar{Q}}$, где Q_i – среднегодовой расход воды, $\bar{Q}$ – среднее значение ряда) продолжительностью n лет ($i=1, 2, \dots, n$), отражающий стационарные условия формирования стока, с параметрами: среднее $\bar{k}$, стандарт σ , коэффициенты вариации C_v и асимметрии C_s . Обозначим через a_{ni} и $\bar{a}_{ni}$ (в долях нормы стока) текущие значения изъятия и его среднюю величину на протяжении ряда. Примем $a_{ni} = \bar{a}_{ni} = \text{const}$ и оценим параметры $\bar{k}^*$, σ^* , C_v^* и C_s^* измененных рядов, образованных по соотношению (символ «*» относится к измененному ряду):

$$k_i^* = k_i - a_{ni}, \quad (1)$$

При появлении в измененном ряду отрицательных значений будем полагать $k_i^* = 0$.

По свойствам статистических рядов оценки параметров измененного стока будут равны:

$$\begin{aligned} \bar{k}^* &= \bar{k} - \bar{a}_{ni} \\ \sigma^* &= \sigma \end{aligned} \quad (2)$$

© Красов В.Д., 2008

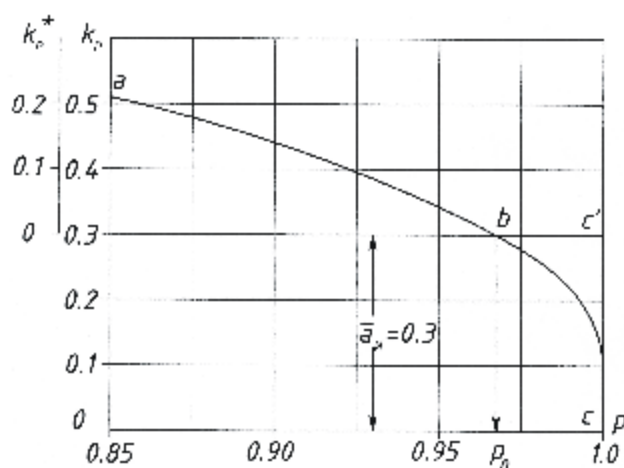
¹ Статья В.Д. Красова подготовлена в 80-х годах прошлого столетия, по техническим причинам не была опубликована. Автор внес изменения с учетом нового материала и представил ее в журнал 20 лет спустя (гл. редактор).

$$C_v^* = \frac{\sigma}{\bar{k} - \bar{a}_n} \quad (2)$$

$$C_s^* = C_s$$

Соотношения (2) «работают» только до изъятий, равных минимальному значению $k_{\min}$ в исходной последовательности стока. Если $\bar{a}_n > k_{\min}$, то в измененном ряду (с учетом ограничения по отрицательным величинам) появляются нулевые значения k_i^* в диапазоне вероятностей превышения $(1-p_0)$, где p_0 – левая граница интервала «нулевого» стока по вероятности. Поскольку в теоретических распределениях вероятности нижний предел стока равен нулю, то нулевые значения стока, вообще говоря, появляются при любом изъятии, превышающем нуль. Общий вид кривых вероятности превышения стока для подобных случаев представлен на рис. 1. Как видно из рисунка, кривая измененного стока представляет собой кривую естественного стока при перенесении начала кривой вверх на величину $\bar{a}_n$.

В связи с появлением интервала «нулевого» стока (в дальнейшем ИНС) следует подчеркнуть следующее. Во-первых, последовательность k_i^* разбивается на две неоднородные части, общий стандарт которых в принципе характеризует эту последовательность лишь формально. Во-вторых, вводить новые, усеченные распределения вероятностей здесь нет необходимости – для определения квантилей стока в зоне $p < p_0$ можно использовать исходную кривую распределения, начало ко-



abc – исходная кривая
abc' – кривая при изъятии $\bar{a}_n = 0,3$
bc' – интервал «нулевого стока»

Рис. 1. Кривая вероятности превышения годового стока ($C_v = 0,5$, $C_s = 2C_v$)

торой перенесено вверх на величину изъятия. В-третьих, фактическая средняя величина стока будет превышать разность $(\bar{k} - \bar{a}_n)$ на величину корректирующего слагаемого s , то есть:

$$\bar{k}^* = \bar{k} - \bar{a}_n + s \quad (3)$$

В-четвертых, знание параметров объединенной (с ИНС) последовательности может быть полезно при оценке изменения параметров регулирования стока.

Анализ показывает, что наименее чувствительны к росту изъятий, и соответственно, ИНС реки с высокой многолетней естественной зарегулированностью. Так, для рек с $C_v = 0,10$ даже при изъятии, равном половине нормы стока, вероятность ИНС составляет всего 0,032. В то же время для рек с высокой изменчивостью стока ($C_v = 1,0$) уже при изъятии $\bar{a}_n = 0,1$ вероятность нулевого интервала достигает 0,096 и интенсивно возрастает с увеличением изъятия.

2. Оценка изменений гидрологических параметров

Общие изменения параметров стока под воздействием изъятия воды складываются из двух составляющих: влиянием самого изъятия $\bar{a}_n$ и поправки на появление ИНС, вызываемого изъятием. Исследуем вначале роль суммарного воздействия названных факторов. Для этой цели используем следующий подход, в реализации которого использованы результаты исследований, приведенных в [2]. На основе решения уравнения трехпараметрического гамма-распределения С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля сформируем последовательности модульных коэффициентов стока k_i большой продолжительности N для различного сочетания исходных параметров. Затем зададимся диапазоном изъятий $\bar{a}_n$ и с использованием соотношения (1) получим трансформированные ряды величин k_i^* . Далее установим параметры стока последовательностей k_i^* : $\bar{k}^*$, σ^* , C_v^* и C_s^* .

Основные положения расчетно-методических построений приняты следующими: 1) коэффициент асимметрии $C_s = 2C_v$; 2) коэффициент вариации C_v в интервале $0,2 \div 1,0$ с шагом 0,1; 3) значения вероятностей превышения p модульных коэффициентов в диапазоне от 0,0001 до 1,0 с шагом 0,0001 (таким образом, количество членов каждой последовательности составило $N=10000$); 4) точность получения модульных коэффициентов $\varepsilon = 0,001$; 5) необходимый объем последователь-

Изменения параметров годового стока при изъятиях воды ($C_s = 2C_v$, $a_{nj} = \bar{a}_n = \text{const}$)

C_v	Параметры измененного стока	Изъятия $\bar{a}_n$					
		0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0,2	$\bar{k}^*$	1,000	0,900	0,800	0,700	0,600	0,500
	σ^*	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200
	C_v^*	0,200	0,222	0,250	0,285	0,333	0,399
	C_s^*	0,384	0,387	0,389	0,392	0,393	0,398
0,5	$\bar{k}^*$	1,000	0,900	0,801	0,703	0,608	0,519
	σ^*	0,499	0,499	0,499	0,496	0,489	0,476
	C_v^*	0,499	0,555	0,623	0,706	0,804	0,917
	C_s^*	0,987	0,987	0,995	1,028	1,099	1,213
1,0	$\bar{k}^*$	1,000	0,905	0,819	0,741	0,670	0,606
	σ^*	0,997	0,993	0,981	0,963	0,942	0,917
	C_v^*	0,998	1,097	1,198	1,301	1,405	1,512
	C_s^*	1,964	1,990	2,054	2,143	2,251	2,375

ности определился на основе изучения влияния шага по вероятности превышения и ϵ на сходимость процесса и конечные параметры последовательностей; 6) величина изъятия задавалась в пределах от 0 до 0,5 с шагом 0,1.

Некоторые результаты исследования, проведенного по описанному выше алгоритму, приведены в таблице.

Прежде всего, отметим достаточно удовлетворительное соответствие параметров полученных последовательностей исходным значениям (при $\bar{a}_n = 0$). Затем – обобщение по характеристикам измененного стока. Основной вывод – трансформация параметров стока под влиянием изъятия довольно существенная. Это особенно касается среднего и коэффициента вариации. В рассмотренном диапазоне случаев ($0 \leq \bar{a}_n \leq 0,5$) величина среднего для измененного стока ($\bar{k}^*$) находится в пределах: для $C_v = 0,2$ – от 10 до 50%, для $C_v = 1,0$ – от 9,5 до 39,4% среднего значения «естественного» стока.

Стандарт в большинстве случаев меняется мало; его существенные изменения связаны со значительным ростом изъятия в зоне высоких C_v . Так, до $C_v = 0,4$ (включительно) его изменения не превышают 3%, а при $C_v = 1,0$ составляют от 0,5 до 8,1% от исходных значений.

Коэффициент вариации C_v с ростом изъятия увеличивается, причем по мере перехода к более высоким C_v интервал его колебания при прочих равных условиях несколько суживается: для $C_v = 0,2$ он составляет $(1,11 \div 2,0) C_v$, а для $C_v = 1,0$ $(1,10 \div 1,52) C_v$.

Характерно, что изменения C_v^* по мере роста изъятия обнаруживает устойчивость в широком диапазоне C_v и $\bar{a}_n$. Это позволяет оценить рост C_v^* (по сравнению с C_v) при наиболее реальных величинах изъятия. К примеру, увеличение C_v^* при изъятии $\bar{a}_n = 0,1$ составит $10 \div 11\%$, при $\bar{a}_n = 0,2$ $20 \div 25\%$, при $\bar{a}_n = 0,3$ $30 \div 42\%$ (большая величина соответствует $C_v = 0,2$, меньшая $C_v = 1,0$).

Коэффициент асимметрии C_s^* с возрастанием изъятия повышается, но его изменения относительно исходных величин в целом менее существенны, чем для среднего и коэффициента вариации – даже для изъятий $\bar{a}_n = 0,5$ и $C_v = 0,8 \div 1,0$ они не превышают 25%. При $C_v = 0,2$ в диапазоне рассмотренных $\bar{a}_n$ изменения C_s^* находятся в пределах $1,3 \div 4,1\%$, а при $C_v = 1,0$ колеблются от 1,3 до 20,9%. Характерной особенностью C_s^* является относительное постоянство его изменений (небольших по величине) применительно к фиксированным изъятиям, не превышающим $\bar{a}_n = 0,2$, во всей области задания C_v . Так, при $\bar{a}_n = 0,1$ разность C_s^* и C_s колеблется от нуля до 1,3%, а при $\bar{a}_n = 0,2$ от 0,1 до 4,6%.

Соотношение $\eta^* = \frac{C_s^*}{C_v^*}$ при фиксированном C_v с ростом изъятия имеют тенденцию к понижению, причем наиболее отчетливо она проявляется для низких C_v . Так, для $C_v = 0,2$ η^* падает почти в 2 раза, с 1,92 до 1,0 (большая величина

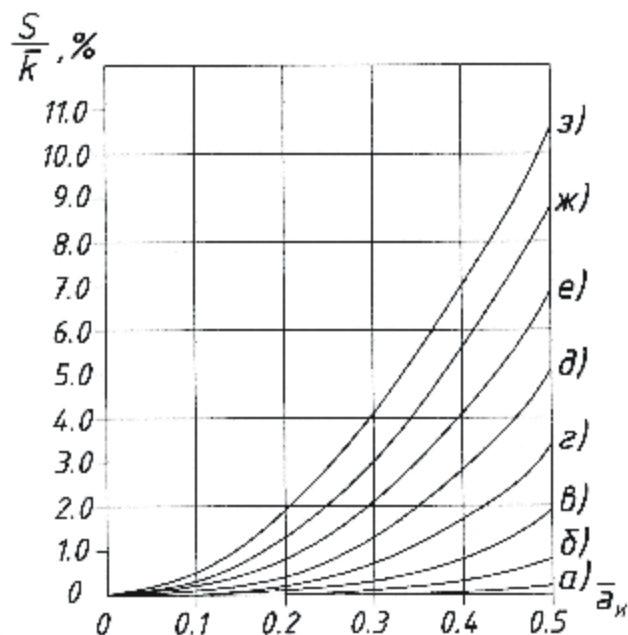


Рис. 2. Влияние интервала «нулевого» стока на норму стока. Зависимость $\frac{S}{k} = f(C_v, \bar{a}_n)$

- | | |
|----------------|----------------|
| а) $C_v = 0,3$ | д) $C_v = 0,7$ |
| б) $C_v = 0,4$ | е) $C_v = 0,8$ |
| в) $C_v = 0,5$ | ж) $C_v = 0,9$ |
| г) $C_v = 0,6$ | з) $C_v = 1,0$ |

относится к $\bar{a}_n = 0$, меньшее к $\bar{a}_n = 0,5$). При $C_v = 1,0$ η^* снижается на четверть, изменяясь от 1,97 до 1,57. Для изъятия $\bar{a}_n \leq 0,1$ снижение η^* составляет около 10% во всем диапазоне C_v , а для изъятия $\bar{a}_n = 0,2$ 13 ÷ 19% (меньшая величина – для $C_v = 1,0$).

Таким образом, при достаточно широкой амплитуде колебаний в целом, гидрологические параметры в зоне $\bar{a}_n \leq 0,1$ изменяются не более, чем на 10%.

3. Оценка влияния интервала «нулевого» стока

Представляет интерес вычленение из общего изменения гидрологических параметров под воздействием изъятия доли ИНС. Индикатором ощутимого влияния ИНС является повышение среднего значения $\bar{k}^*$ сверх разности $(\bar{k} - \bar{a}_n)$ или уменьшение стандарта измененной последовательности. Если принять за начало этого процесса факт изменения $\bar{k}^*$ или σ^* в третьем знаке после запятой, то влияние ИНС будет проявляться, начиная с $C_v = 0,3$ и изъятия $\bar{a}_n = 0,4$; для $C_v \geq 0,7$ его влияние сказывается уже при изъятии $\bar{a}_n = 0,1$.

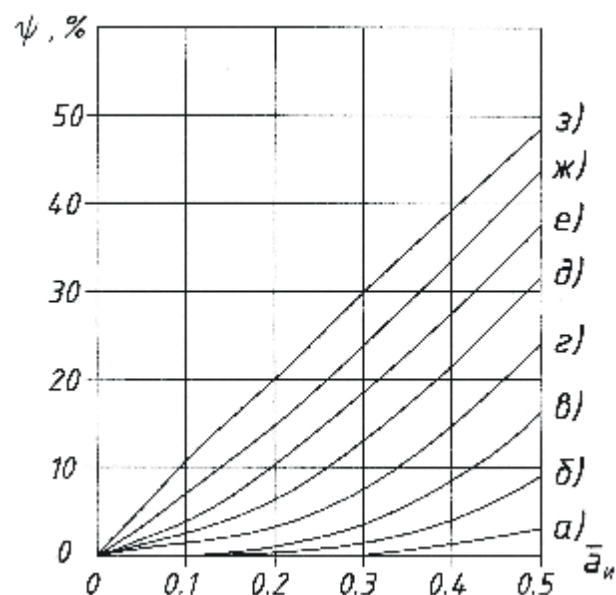


Рис. 3. Влияние интервала «нулевого» стока на коэффициент вариации. Зависимость $\psi = f_1(C_v, \bar{a}_n)$

- | | |
|----------------|----------------|
| а) $C_v = 0,3$ | д) $C_v = 0,7$ |
| б) $C_v = 0,4$ | е) $C_v = 0,8$ |
| в) $C_v = 0,5$ | ж) $C_v = 0,9$ |
| г) $C_v = 0,6$ | з) $C_v = 1,0$ |

Выше было отмечено, что влияние ИНС на величину измененного среднего можно оценить с помощью введения корректирующего слагаемого s . Изменение величины s в процентах от $\bar{k}$ в диапазоне $C_v = 0,3 \div 1,0$ для $C_s = 2C_v$ дается на графике (рис. 2). График $\frac{s}{k} = f(\bar{a}_n, C_v)$ построен на основе данных, полученных по длительным последовательностям ($N=10000$). Отметим, что для $C_v \leq 0,2$ влияние ИНС не прослеживается во всем диапазоне изъятий. Область незначительного (до 1%) влияния ИНС на среднее значение стока простирается далее до $C_v \leq 0,8$ (изъятия $\bar{a}_n < 0,2$), и до изъятия $\bar{a}_n \leq 0,5$ при $C_v \leq 0,35$. Наивысшее значение $\frac{s}{k} = 10,6\%$ приходится на вариант $C_v = 1,0$, $\bar{a}_n = 0,5$.

Появление ИНС уменьшает коэффициент вариации. Долю ИНС в его изменении предлагается оценивать по выражению:

$$\psi = \frac{C_{v\phi}^* - C_v^*}{C_{v\phi}^* - C_v}, \quad (4)$$

где $C_{\text{вф}}^*$ – коэффициент вариации, определенный по формуле из соотношений (2).

График изменения $\psi = f_1(C_v, \bar{a}_n)$ представлен на рис. 3.

По величине ψ зона отсутствия или небольшого (до 1%) влияния ИНС на коэффициент вариации меньше, чем для s . Она доходит до $C_v = 0,5$ и изъятий $\bar{a}_n \leq 0,2$. Диапазон изменения ψ для $C_v = 0,3$ составляет 0-3%, для $C_v = 0,5$ уже 0-16,2%, а для $C_v = 1,0$ доходит до 10,8-48,5% (низкие значения характеризуют малые изъятия, высокие – большие изъятия).

Что касается C_s^* , то его изменения целиком обусловлены наличием ИНС.

В заключение отметим, что полученные в настоящей работе результаты могут быть использо-

ваны для оценки изменения водохозяйственных параметров под воздействием антропогенного фактора при многолетнем регулировании стока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Асарин А. Е. Уровенный режим Аральского моря при развитии водопотребления в бассейнах рек Сырдарьи и Амударьи / А. Е. Асарин // Тр. Гидропроекта. – 1964. – Сб. 12. – С. 211-221.
2. Крицкий С. Н. Гидрологические основы управления водохозяйственными системами / С. Н. Крицкий, М. Ф. Менкель. – М. : Наука, 1982. – 271 с.
3. Раткович Д. Я. Гидрологические основы водообеспечения / Д. Я. Раткович. – М. : РАН; Ин-т водных проблем, 1993. – 428 с.

Красов Вячеслав Дмитриевич

кандидат технических наук, доцент кафедры природопользования факультета географии и геоэкологии Воронежского государственного университета, г. Воронеж, т. (4732)66-56-54, E-mail: root@geogr.vsu.ru

Krasov Vyacheslav Dmitriyevich

PhD in technology, assistant professor of chair of management of nature of faculty of geography and geoecology of Voronezh State University, Voronezh, tel. (4732) 66-56-54, E-mail: root@geogr.vsu.ru