

УДК 502/504:556.16

Г. Х. ИСМАЙЛОВ, Н. В. МУРАЩЕНКОВА

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Московский государственный университет природообустройства»

ОЦЕНКА РЕЧНОГО СТОКА В БАССЕЙНЕ РЕКИ ВОЛГИ

Рассматриваются методические подходы оценки изменения стока реки Волги в первой половине XXI века. Для оценки будущего изменения речного стока используются две концепции. Концепция стационарности предусматривает, что статистические параметры (норма стока, коэффициент изменчивости и др.) речного стока со временем остаются постоянными и не претерпевают изменений. Концепция нестационарности предполагает, что речной сток формируется как непрерывный случайный процесс с изменяющимися статистическими параметрами.

Речной сток, нестационарность, наблюдения, гравитационные и антропогенные факторы, временные ряды, вероятностно-статистическая оценка.

There are considered methodical approaches to the assessment of changes in the Volga river flow in the first half of the twenty-first century. To estimate future changes in the river flow two concepts are used. The concept of stationarity assumes that statistical parameters (flow rate, variability ratio, etc.) of the river flow remain constant over time and do not undergo changes. The second concept of nonstationarity assumes that the river flow is formed as a continuous random process with changing statistical parameters.

River flow, nonstationarity, observations, gravitation and human factors, time series, probabilistic and statistical assessment.

Существуют две концепции оценки возможных изменений речного стока. Согласно первой, в основе формирования речного стока лежит представление о его стохастической природе. Это предопределяет вероятностное описание закономерностей изменчивости речного стока во времени и пространстве с использованием наблюдаемых временных рядов. При этом выявленные закономерности распространяются и на будущее. Такой подход подразумевает стационарность процессов формирования речного стока и, как следствие, возможность вероятностного предвидения его характера и параметров в обозримом будущем.

Однако со временем, по мере удлинения рядов инструментальных наблюдений тех или иных характеристик климата, в

частности речного стока, становится все более заметной пространственная и временная неоднородность, свойственная отдельным отрезкам исходных временных рядов. Пространственная неоднородность обусловлена в основном ландшафтной пестротой поверхности земли, а временная неоднородность формируется преимущественно под влиянием нестационарности внешних воздействий на климатическую и гидрологическую системы, в том числе радиационных (колебания инсоляции, создаваемые эффектами орбитального движения Земли вокруг Солнца), гравитационных (лунные и солнечные приливы, прямые и косвенные воздействия других планет) и антропогенных. Анализ фактических данных показал, что временные ряды климатических и

гидрологических характеристик содержат циклы колебаний, характеризующиеся некоторой повторяемостью, но различающиеся по своим параметрам, что формирует вторую концепцию, включающую в себя антропогенно-обусловленное (нестационарное) изменение речного стока.

Таким образом, для всех временных рядов климатических и гидрологических характеристик характерна полицикличность (изменчивость в разных временных диапазонах), нестационарность и отсутствие монотонности.

Принятие соответствующей концепции изменения речного стока в будущем предопределяет и выбор методов оценки этих изменений. Так, концепция стационарности климата и процессов гидрологического цикла предусматривает использование вероятностно-статистических методов. Принятие концепции нестационарности приводит к необходимости выявления однонаправленных тенденций (трендов) во временных рядах речного стока и определяющих его климатических и антропогенных факторов с последующей экстраполяцией детерминированной составляющей временного ряда, а также к установлению функциональных связей между факторами воздействия и характером отклика.

Вероятностно-статистическая оценка изменения речного стока исходит из предположений о стационарности полученных временных рядов речного стока как бассейна в целом, так и отдельных частных его водосборов.

При этом оценка средних статистических значений имеет следующий вид:

$$\bar{X}_{n+\tau} = \bar{X}_n \pm t_p K \sigma_{\bar{X}_n}, \quad (1)$$

где \bar{X} – среднеегодовое значение речного стока; n – продолжительность исходного временного ряда; τ – продолжительность перспективного отрезка времени; t_p – критерий достоверности Стьюдента для уровня вероятности p ; K – коэффициент уменьшения точности оценки в зависимости от продолжительности перспективного периода τ ; $\sigma_{\bar{X}_n}$ – оценка среднеквадратичной ошибки среднего исходного временного ряда; [1].

Оценка погрешности определения среднего статистического значения находится с учетом коэффициента автокорреляции в исходном временном ряду:

$$\sigma_{\bar{X}_n} = \frac{\sigma_X}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{1+r(1)}{1-r(1)}}, \quad (2)$$

где σ_X – стандарт отклонения годовых величин речного стока для исходного ряда продолжительностью n лет.

Квазистационарность временных рядов речного стока приводит к необходимости выявления циклов в колебаниях климатических и гидрологических характеристик и однонаправленных тенденций (трендов), свойственных отдельным фазам (подъема и спада) этих циклов, а также к установлению функциональных (корреляционных) связей между факторами внешнего воздействия (климатическими, антропогенными) и характером отклика (речным стоком). В этом случае альтернативой гипотезе однородности многолетних колебаний речного стока служит модель тренда [2]:

$$X(t) = m(t) + \varepsilon(t), \quad (3)$$

где функция $m(t)$ описывает закономерные изменения характеристики X во времени; $\varepsilon(t)$ – чисто случайные колебания.

Для обнаружения тренда достаточно хорошо используются непараметрические методы, например метод ранговой корреляции Спирмена [3]. Они требуют минимальных допущений, однако не позволяют давать его количественного описания. Эту задачу решают с помощью параметрических методов, например, функция тренда $m(t)$ может быть представлена так:

$$m(t) = a_0 + a_1 \varphi(t), \quad (4)$$

где $\varphi(t)$ – заданная функция времени.

На примере бассейна реки Волги, ресурсы речного стока которого удовлетворяют потребности в пресной воде населения и хозяйства Центрального, Приволжского, Южного и Уральского федеральных округов России, попытаемся оценить возможные ресурсы стока в первой половине XXI века согласно рассмотренным концепциям. В качестве исходных использовались временные ряды годовых значений элементов водного баланса (ЭВБ) бассейна реки Волги до города Волгограда ($F = 1,36$ млн км²) за период 1892/1893–2000/2001 годов ($N = 109$ лет). Для всех временных рядов были определены выборочные оценки параметров распределения вероятностей, оценки параметров линейных трендов за рассматриваемый период, а также оценки коэффициентов взаимной корреляции ЭВБ (табл. 1, 2).

Изменение элементов водного баланса в бассейне реки Волги за рассматриваемый период приведены на рисунке 1. Как видно из рисунка, годовой сток и суммарные атмосферные осадки имеют тенденцию к увеличению, тогда как суммарное испарение за рассматриваемый период снижается.

Таблица 1

Выборочные оценки основных статистических параметров временных рядов годовых величин ЭВБ зоны формирования стока бассейна реки Волги (до города Волгограда) за 1892/1893 – 2000/2001 годы ($N = 109$ лет), мм/год

Статистический параметр	Элемент водного баланса					
	РГ	РГ	ЕГ	±VГ	Р-Е	Р-Р
Среднегодовое значение	646	189	457	0	189	457
Максимум	820	283	454	-83	366	537
Минимум	484	138	422	76	62	346
Амплитуда	336	145	32	159	304	191
Стандарт	71	33	31	33	60	56
Коэффициент вариации C_v	0,11	0,18	0,07	-	0,32	0,12
Коэффициент асимметрии C_s	0,22	0,36	0,14	-	0,64	0,24
$r[1]$	0,07	0,43	-0,10	0,09	0,32	-0,14

Таблица 2

Корреляционная матрица элементов годового водного баланса зоны формирования бассейна реки Волги (до города Волгограда)

Параметр	РГ	РГ	ЕГ	VГ	Р-Е	Р-Р
РГ	1,00					
РГ		0,63				
ЕГ			0,53			
VГ				1,00		
Р-Е					1,00	
Р-Р						1,00

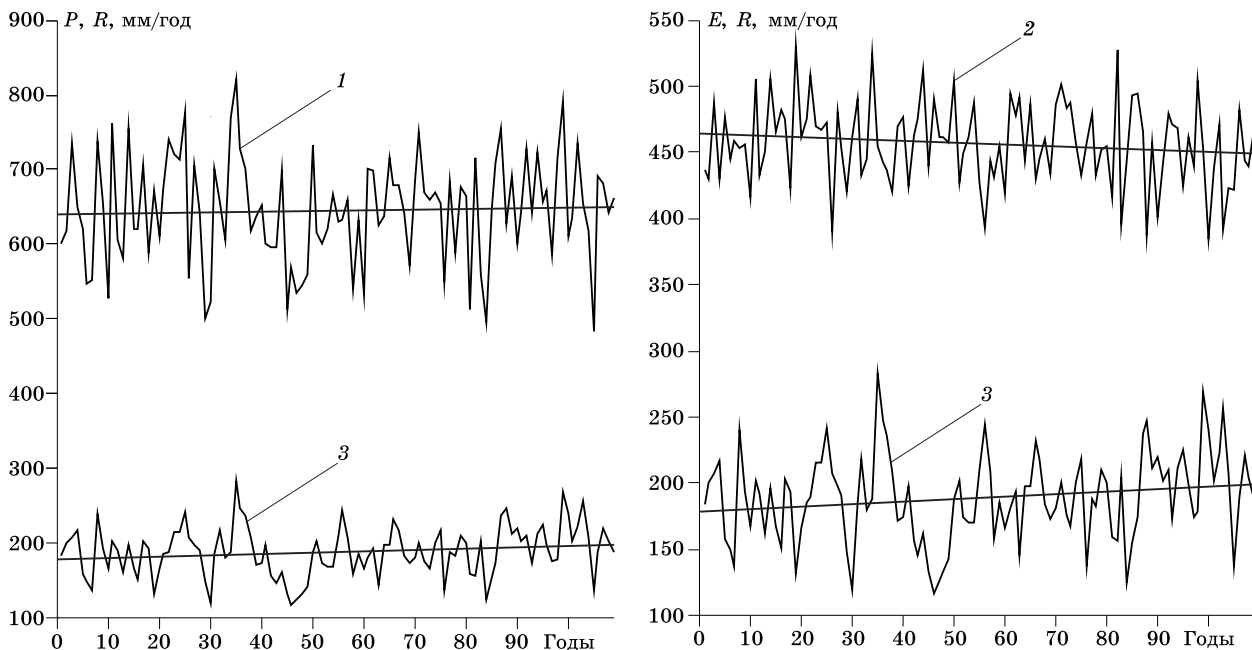


Рис. 1. Графики колебания годовых атмосферных осадков (1), суммарного испарения (2) и годового стока (3) реки Волги за 1892/1893–2000/2001 годы ($N=109$ лет)

Для оценки значимости линейного тренда ЭВБ использованы критерии Спирмэна и И. И. Поляка:

критерий Спирмэна –

$$\hat{\rho} = 1 - 6 \sum_{i=1}^n d_i^2 / (n^3 - n), \quad (5)$$

где d_i – разность между порядковым номером и рангом каждого хронологического значения ряда длиной n ;

критерий И. И. Поляка –

$$1) \bar{\sigma}^2 < \sigma^2; \quad 2) |a_1| > 2\sigma_{a_1}, \quad (6)$$

где σ^2 – дисперсия наблюдаемых величин от среднего значения; $\bar{\sigma}^2$ – дисперсия отклонения наблю-

денных величин от линии тренда, которая определяется по формуле

$$\bar{\sigma}^2 = \sigma^2(1 - R), \quad (7)$$

где R – коэффициент корреляции между наблюдаемой величиной и ее порядковым номером.

Среднее квадратическое отклонение регрессионного коэффициента a_1 определяется по формуле

$$\sigma_{a_1} = \sqrt{\frac{12}{n(n-1)}} \sigma. \quad (8)$$

Если условия (5) и (6) не выполняются, то линейный тренд является незначимым с вероятностью 5 %. По расчетам

авторов, для рассматриваемых временных рядов получены значения критериев, приведенные в табл. 3.

Таблица 3

Оценка значимости линейного тренда элементов водного баланса с использованием статистических критериев Спирмэна и И. И. Поляка

ЭВБ	Критерий Спирмэна	Критерий И. И. Поляка
РГ	0,18	1) $\bar{\sigma}^2 < \sigma^2$; 2) $ a_1 > 2\sigma_{a_1}$ 1056 < 1089, 0,183 < 2,11
РГ	0,07	1) $\bar{\sigma}^2 < \sigma^2$; 2) $ a_1 > 2\sigma_{a_1}$ 5032 < 5041, 0,095 < 4,53
ЕГ	0,12	1) $\bar{\sigma}^2 < \sigma^2$; 2) $ a_1 > 2\sigma_{a_1}$ 1095 > 961, $ -0,14 < 1,96$

В результате проведенного анализа установлено, что оценки параметров линейного тренда для годовых величин ЭВБ в целом для рассматриваемого периода являются статистически незначимыми и, следовательно, говорить о наличии однонаправленных изменений ЭВБ бассейна реки Волги, свойственных естественным условиям на протяжении XX века, не

приходится.

В таблице 4 приведена оценка возможного изменения среднемноголетних величин элементов водного баланса бассейна реки Волги до города Волгограда для следующих значений:

$\tau = 20, 40$ и 60 лет, $t_{0,95} = 1,98$ и $K = 1,02$ ($\tau = 20$ лет), $1,13$ ($\tau = 40$ лет); $1,20$ ($\tau = 60$ лет) в соответствии с рекомендациями [1].

Таблица 4

Оценка среднемноголетних годовых величин ЭВБ бассейна реки Волги для первой половины XXI века, мм/год

Элементы водного баланса	Период			
	1914/1915–2000/2001 годы $\bar{X} \pm t_{95}\sigma_{\bar{X}}$	1914/1915–2020/2021 годы $\bar{X} \pm t_{95}K\sigma_{\bar{X}}$	1914/1915–2040/2041 годы $\bar{X} \pm t_{95}K\sigma_{\bar{X}}$	1914/1915–2060/2061 годы $\bar{X} \pm t_{95}K\sigma_{\bar{X}}$
Осадки \bar{P}	670±19	670±20	670±23	670±24
Сток R	190±13	190±14	190±15	190±16
Испарение \bar{E}	481±7	481±8	481±9	481±10

Как видно из этой таблицы, за период 1914/1915–2060/2061 годов ($n = 147$ лет) возможный диапазон изменения среднемноголетней величины атмосферных осадков составляет от 646 до 694 мм/год. В результате для первой половины XXI века (период 2001/2002–2060/2061 годы, $n = 60$ лет) возможное изменение годовых осадков составит от 700 до 640 мм/год.

Для речного стока диапазон изменения составляет 206...174 мм/год или для

периода 2001/2002–2060/2061 годов – от 209 до 171 мм/год. Для испарения соответственно 491...471 и 493...469 мм/год.

Всемирная метеорологическая организация в качестве периодов, характеризующихся относительной стационарностью климатических условий, рекомендует использовать 30-летние отрезки времени. В связи с этим была рассмотрена динамика средних 30-летних значений годового стока реки Волги у города Волгограда за период 1892/1893–2000/2001 годов (табл. 5).

Таблица 5

Средний 30-летний условно-естественный годовой сток реки Волги у города Волгограда за 1892/1893–2000/2001 годы, мм/год

Средний 30-летний сток	30-летки				1892/1893–2000/2001
	1892/1893–1921/1922	1922/1923–1951/1952	1952/1953–1981/1982	1982/1983–2000/2001	
$R_{cp}^{(30)}$	184	183	189	206	189
$K_{cp}^{(30)}$	0,97	0,97	1,00	1,09	1,00

Рассматриваемый период характеризуется положительным линейным (нелинейным) трендом средних 30-летних величин годового стока:

$$R_{cp}^{(30)} = 0,247t_{cp}^{(30)} + 176; R^2 = 0,83; \quad (9)$$

$$R_{cp}^{(30)} = 0,004t_{cp}^2 - 0,271t_{cp}^{(30)} + 187, \quad (10)$$

где $t_{cp}^{(30)}$ – средний временной индекс последовательных 30-леток, равный соответственно 15,5; 45,5; 75,5; 105,5 и 60,5.

Рассмотрены две тенденции изменения среднемноголетних значений условно-естественного стока в первой половине XXI века: первая тенденция – линейная

– уравнение (9), вторая – нелинейная – уравнение (10).

В результате получим следующие оценки средних 30-летних величин годового стока (табл. 6). В целом за первую половину XXI века среднемноголетний сток реки Волги составит 211 мм/год (287 км³/год), т. е. увеличится на 22 мм/год (30 км³/год) по отношению к среднему стоку за период наблюдений (1892/1893–2000/2001) годов [при использовании для прогноза уравнения (9)].

Таблица 6

Средний 30-летний условно-естественный годовой сток реки Волги в первой половине XXI века, мм/год

Средний сток за 30 лет	30-летки		2001/2002–2060/2061
	2001/2002–2030/2031	2031/2032–2060/2061	
R_{cp}	$\frac{207}{214}$	$\frac{214}{238}$	$\frac{211}{226}$

Примечание: в числителе – данные, полученные по уравнению (9), в знаменателе – по уравнению (10).

В случае, когда процесс изменения стока будет подчиняться нелинейному закону (уравнение (10)), среднемноголетний сток реки Волги составит 226 мм/год (307 км³/год), т. е. увеличится на 37 мм/год (50 км³/год) по отношению к среднему стоку за период наблюдений.

В целом же за период 1892/1893–2060/2061 годов ($N = 169$ лет) средний годовой сток составит 197 мм/год (268 км³/год), т. е. увеличится на 8 мм/год (11 км³/год).

В качестве альтернативы допустим, что выявленный положительный тренд 30-летних средних значений годового стока после 2000 года сменится отрицательным трендом с интенсивностью снижения стока, равной его интенсивности в случае положительного тренда (8 мм за 60 лет). Таким образом, в целом за период 1881/1882–2060/2061 годов среднемноголетний годовой естественный сток будет равен стоку на протяжении всего XX века, т. е. в этом случае существенного изменения климата в бассейне реки Волги не произойдет. Будут происходить циклические колебания – чередование фаз потепления и похолодания разной интенсивности. Так ли это будет в действительности – покажут данные метеорологических и

гидрологических наблюдений в первой половине XXI века.

В дальнейшем авторы планируют провести оценку изменения стока реки Волги с использованием различных сценариев моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО).

1. Семенов С. М. Гидрогеологические прогнозы в системе мониторинга подземных вод – М.: Наука, 2005. – 105 с.
2. Христофоров А. В. Надежность расчетов речного стока. – М.: Изд-во МГУ, 1993. – 168 с.
3. Кендалл М. Дж., Стьюарт А. Статистические выводы и связи. – М.: Наука, 1973. – 900 с.

Материал поступил в редакцию 29.04.13.
Исмайлов Габил Худуш оглы, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Гидрология, метеорология и регулирование стока»
 Тел. 8 (495) 976-23-68
 E-mail: gabil-1937@mail.ru
Муращенкова Наталья Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидрология, метеорология и регулирование стока»
 Тел. 8 (495) 976-17-45
 E-mail: splain75@mail.ru