

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ В МНОГОЛЕТНЕЙ ДИНАМИКЕ ГОДОВОГО СТОКА РЕК

В. Д. Красов, Л. О. Сысоев

Воронежский государственный университет, Россия

Поступила в редакцию 1 декабря 2015 г.

Аннотация: В статье на примере р. Воронеж дается оценка многолетней динамики годового стока в условиях нестационарности, вызванной природными и антропогенными факторами. Предлагается метод расчета «условно естественного стока» за нестационарный период.

Ключевые слова: годовой сток, нестационарность, «условно естественный сток», метод оценки.

Abstract: The article represents the estimation of a longstanding dynamics in annual flow (in terms of the Voronezh River) in nonstationarity, evoked by natural and anthropogenous factors. The estimation method of «conventionally natural flow» for the nonstationary period is submitted in the article.

Key words: annual flow, nonstationarity, «conventionally natural flow», estimation method.

Режим речного стока в современных условиях характеризуется наличием нестационарности, возникающей под воздействием природных и антропогенных факторов. Наличие данного явления в случае уменьшения водности может привести к снижению уровня хозяйственного использования рек и дополнительным рискам в водообеспечении различных объектов водного хозяйства. Нестационарность в многолетней динамике речного стока приводит к трансформации гидрологических характеристик, и – что особенно важно – параметров проектируемых водохранилищ и прудов. С этой точки зрения учет нестационарности в задачах управления водными ресурсами затрагивает ряд важных разделов гидрологии и теории регулирования речного стока, что требует нового научного оснащения.

В настоящей работе озвученная проблема рассматривается применительно к стоку реки Воронеж. Река Воронеж является левым притоком Дона, имеет длину 342 км и площадь водосбора 21,6 тыс. км². В бассейне реки находится несколько водохранилищ, из них самое крупное Воронежское с полным объемом 204 млн. м³ (создано в 1972 г.) и Матырское с полным объемом 144 млн. м³, а также около 370 прудов объемом 120 млн. м³.

В бассейне реки Воронеж расположены крупные центры сосредоточенного водопотребления (города Воронеж и Липецк). По данным [2] общий забор воды в 2000 году оценивался в 852 млн. м³. В речную сеть отводилось 391 млн. м³, в том числе в Липецкой и Тамбовской областях 218 млн. м³. Перечисленные формы водопользования в совокупности с климатическим воздействием являются факторами уменьшения речного стока. Как показывает анализ интегральных кривых стока масштабы проявления нестационарности в многолетней динамике водности реки Воронеж весьма существенны (рис.). За период с 1972-2014 годов средний сток реки Воронеж по сравнению с предшествующим периодом 1931-1971 годов у села Чертовицкое снизился на 13,6%. Последующий анализ нестационарности проводится на примере стока реки Воронеж у города Липецка за период с 1931 по 2014 годы (84 года). Динамика параметров фактического стока реки Q_{fi} показана в таблице 1.

Данные, представленные в таблице 1, указывают на существенную трансформацию параметров стока реки Воронеж за период после 1971 год, что свидетельствует о наличии в исходном ряду признаков нестационарности. Отмечается уменьшение среднего значения на 14,8% и значительное увеличение остальных параметров: коэффициентов вариации, асимметрии, их соотношения, а также коэффициента автокорреляции.

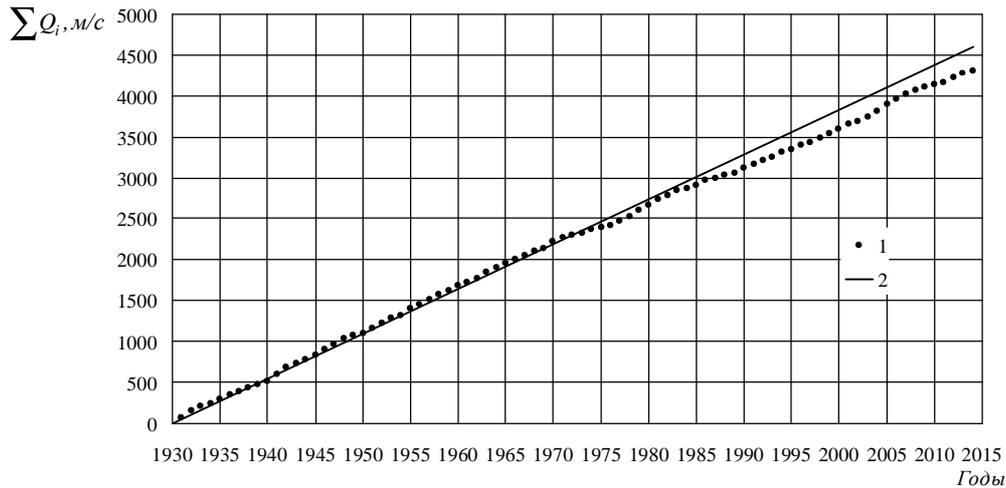


Рис. Интегральная кривая стока реки Воронеж у города Липецка за период 1931-2014 годов

- 1 – при фактическом стоке за период 1931-2014 годов.
- 2 – при среднем стоке за период 1931-1971 годов.

Таблица 1

Изменение параметров годового стока реки Воронеж у города Липецка по данным наблюдений

№	Период, годы и динамика		Параметры					
			Норма стока \bar{Q}_ϕ , м ³ /с	Стандарт s	Кэф. вариации Cv	Кэф. асимметрии Cs	Отношение $h = Cs / Cv$	Кэф. автокорреляции r
1	1931-2014		51,3	15,5	0,30	0,26	0,81	0,26
2	1931-1971		55,5	14,6	0,26	0,23	0,88	0,10
3	1972-2014		47,3	15,2	0,32	0,44	1,38	0,36
4	Разность (3-2)	абс.	-8,2	0,6	0,06	0,21	0,50	0,26
5		%	-14,8	4,1	23,1	91,3	56,8	в 2,5 раза

Представляет научный и практический интерес количественная оценка динамики гидрологических параметров в условиях нестационарности, определяемой заданными сценариями изменения водности рек [1]. При этом исходная последовательность стока, используемая в качестве основы для исследований, в оптимальном варианте должна соответствовать естественным условиям формирования водных ресурсов, что не имеет места в случае наличия нестационарности. Задача получения подобной последовательности весьма сложна, а методы ее решения не всегда дают приемлемые результаты. В настоящей работе предлагается подход, который может быть назван «методом автоиндикации». Сущность его заключается в следующем.

Пусть имеем две части одной хронологической последовательности фактического стока $Q_{\phi i}$

($i=1, 2, 3 \dots N$, где i – порядковый номер года, N – общий объем последовательности):

первая – $Q_{\phi 1i}$ объемом $N_1 (i=1, 2, \dots, N_1)$;

вторая – $Q_{\phi 2i}$ объемом $N_2 [i=(N_1+1), (N_1+2), \dots, N]$.

Первая часть отражает стационарные условия по стоку, вторая по отношению к первой имеет признаки нестационарности. Необходимо вторую часть последовательности $Q_{\phi 2i}$ трансформировать в величины условно естественного стока $Q_{e 2i}$, с тем чтобы вся последовательность $Q_{\phi i}$ стала близка к стационарной. Для этой цели строим две кривые вероятности превышения (эмпирические или теоретические) – для части $Q_{\phi 1i}$ и части $Q_{\phi 2i}$ и реализуем алгоритм:

$$Q_{\phi 2i} \rightarrow P_{2i} \rightarrow P_{1i} \rightarrow Q_{\phi 1i} \rightarrow Q_{e 2i}, \quad (1)$$

где P_{1i}, P_{2i} – вероятности превышения величин $Q_{\phi 1i}$ и $Q_{\phi 2i} (P_{1i}=P_{2i})$; $Q_{e 2i}$ – искомые, условно естествен-

Таблица 2

Параметры общей последовательности стока реки Воронеж у города Липецка с условно естественной частью

№	Период, годы	Среднее \bar{Q} , м ³ /с	Стандарт s , м ³ /с	Коэф. вариации C_v	Коэф. асимметрии C_s	Соотношение $h = C_s / C_v$	Коэф. автокорреляции r
1	1931-2014	55,6	14,5	0,26	0,32	1,21	0,19
2	1931-1971	55,5	14,6	0,26	0,23	0,88	0,10
3	1972-2014	55,6	14,4	0,26	0,43	1,65	0,29
4	Разность (3-2)	0,1	-0,2	0	0,20	0,77	0,19

Таблица 3

Оценки параметров модифицированных последовательностей

Сценарии	Параметры					
	\bar{Q}, \bar{Q}^* , м ³ /с	s, s^* , м ³ /с	C_v, C_v^*	C_s, C_s^*	h, h^*	r, r^*
Ест. ряд	55,6	14,5	0,261	0,315	1,207	0,194
$I = 0,10 \quad a_{I\max} = 5,56 \text{ м}^3/\text{с}$						
а	50,0	14,5	0,290	0,315	1,086	0,194
б	52,7	14,3	0,272	0,348	1,279	0,194
в	53,7	14,5	0,270	0,341	1,263	0,185
г	51,9	14,6	0,281	0,356	1,267	0,196
$I = 0,20 \quad a_{I\max} = 11,1 \text{ м}^3/\text{с}$						
а	44,5	14,5	0,326	0,315	0,966	0,194
б	49,9	14,7	0,294	0,377	1,283	0,204
в	51,8	14,6	0,282	0,359	1,273	0,195
г	48,2	14,8	0,307	0,393	1,280	0,217
$I = 0,30 \quad a_{I\max} = 16,7 \text{ м}^3/\text{с}$						
а	38,9	14,5	0,373	0,315	0,844	0,194
б	47,1	15,0	0,319	0,397	1,244	0,235
в	49,9	15,0	0,300	0,360	1,200	0,226
г	44,5	15,2	0,342	0,427	1,249	0,256

ные величины стока для второй части последовательности ($Q_{e2i} = Q_{\phi 1i}$).

Предлагаемый метод использован для получения условно естественного стока Q_{e2i} реки Воронеж у города Липецка за период 1972-2014 годов. Контролем достаточной точности расчетно-методических операций стало практическое совпадение средних значений стока за периоды 1931-1971 годов и 1972-2014 годов (55,5 и 55,6 м³/с). В таблице 2 представлены параметры стока общей последовательности Q_i ($i = 1, 2, \dots, N$) с трансформированной, условно естественной частью.

Полученная последовательность стока реки Воронеж у города Липецка Q_i использовалась для оценки динамики параметров годового стока в

диапазоне рядов сценариев его уменьшения во времени [3]:

- а) константа $a_{Ii} = \bar{a}_I = I \bar{Q}$;
- б) прямая $a_{Ii} = \frac{m_1}{N} I \bar{Q}$;
- в) парабола-1 $a_{Ii} = \left(\frac{m_1}{N}\right)^2 I \bar{Q}$;
- г) парабола-2 $a_{Ii} = \left[1 - \left(\frac{N - m_1}{N}\right)^2\right] I \bar{Q}$.

В выражениях (2):

a_{Ii} , \bar{a}_I – текущее и среднее изменения стока;

I – максимальное изъятие в долях среднего стока; $i = 1, 2, \dots, N$; $m_i = i$.

С использованием соотношений (2) получены модифицированные последовательности стока реки Воронеж у села Чертовицкое Q_i^* в м³/с при различных сценариях его изменения во времени по соотношению (3):

$$Q_i^* = Q_i - a_{ii}, \quad (3)$$

где Q_i – расходы воды исходной последовательности; Q_i^* – расходы воды модифицированных последовательностей; «*» – символ модификации.

При $Q_i^* < 0$, Q_i^* полагалось равным 0.

Моментные оценки параметров модифицированных последовательностей стока реки Воронеж у города Липецка приводятся в таблице 3.

Данные таблицы 3 показывают, что трансформация параметров стока реки Воронеж у города Липецка при его изменении довольно существенная. Так, уменьшение среднего значения \bar{Q} в сценарии «константа» соответствует уровню изменению стока от 10 до 30 %. В сценариях непостоянного изменения изъятия во времени уменьшение среднего значения составляет $D\bar{Q} = cI\bar{Q}$, где c – коэффициент для сценария «прямая», равный 0,5, для сценария «парабола-1», равный 0,34 и для сценария «парабола-2», равный 0,67. Коэффициент вариации годового стока C_v при этом в сценарии

«константа» увеличивается от 0,26 при отсутствии изъятия до 0,37 при изъятии $a_{ii} = 0,3Q$, в сценарии «прямая» до 0,32, в сценарии «парабола-1» до 0,30 и в сценарии «парабола-2» до 0,34. Коэффициент асимметрии C_s в сценарии «константа» постоянен, а в случаях непостоянного изъятия во времени увеличивается в сценарии «прямая» до 0,40, в сценарии «парабола-1» до 0,36 и в сценарии «парабола-2» до 0,43.

Полученные результаты могут быть эффективно использованы при проектировании объектов эколого-водохозяйственного профиля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мишон В. М. Река Воронеж и ее бассейн : ресурсы и водно-экологические проблемы / В. М. Мишон. – Воронеж : Воронежский государственный университет, 2000. – 291 с.

2. Красов В. Д. Управление поверхностными водными ресурсами в условиях нестационарности / В. Д. Красов. – Воронеж : Научная книга, 2014. – 252 с.

REFERENCES

1. Mishon V. M. Reka Voronezh i ee basseyn : resursy i vodno-ekologicheskie problemy / V. M. Mishon. – Voronezh : Voronezhskiy gosudarstvennyy universitet, 2000. – 291 s.

2. Krasov V. D. Upravlenie poverkhnostnymi vodnymi resursami v usloviyakh nestatsionarnosti / V. D. Krasov. – Voronezh : Nauchnaya kniga, 2014. – 252 s.

Красов Вячеслав Дмитриевич
доктор технических наук, доцент кафедры природопользования факультета географии, геоэкологии и туризма Воронежского государственного университета, г. Воронеж, т. (473) 266-56-54, E-mail: krasovv_d@mail.ru

Сысоев Леонид Олегович
аспирант кафедры природопользования факультета географии, геоэкологии и туризма Воронежского государственного университета, г. Воронеж, т. (473) 266-56-54, E-mail: ls241701@rambler.ru

Krasov Vyacheslav Dmitriyevich
Doctor in Technical Sciences, Associate Professor of the Chair of Management of Nature of the Department of Geography, Geoecology and Tourism, Voronezh State University, Voronezh, tel. (473) 266-56-54, E-mail: krasovv_d@mail.ru

Sysoyev Leonid Olegovich
Post graduate student of the of Chair of Management of Nature the Department of Geography, Geoecology and Tourism, Voronezh State University, Voronezh, tel. (473) 266-56-54, E-mail: ls241701@rambler.ru