

УДК 556.047

АНАЛИЗ МНОГОЛЕТНИХ КОЛЕБАНИЙ ГОДОВОГО СТОКА ВОДЫ РЕКИ ЗАПАДНАЯ ДВИНА

С.И. ПАРФОМУК

(Брестский государственный технический университет, Брест)

Исследована стационарность временных рядов годового стока реки Западная Двина в двух створах: Витебск и Полоцк. Рассмотрена устойчивость средних, дисперсии и коэффициентов автокорреляции для различных версий исследуемых временных рядов. Годовые колебания расходов воды Западной Двины описаны с помощью простой и сложной моделей Маркова.

Западная Двина – одна из основных рек Беларуси. Она является типичной трансграничной рекой Европы, протекает по территории трех государств: Латвии, Беларуси и России; может служить полигоном для оценки различных изменений. В задачу исследования входило установление стационарности временных рядов годового стока рек с различной степенью антропогенной нагрузки. Для этих целей использованы временные ряды годовых расходов воды реки Западная Двина в двух створах: Витебск и Полоцк. Длина исследуемых временных рядов составляет 124 года (с 1877 по 2000 гг.).

В таблице 1 представлены выборочные оценки основных статистических параметров рассматриваемых временных рядов годового стока за период с 1877 по 2000 годы.

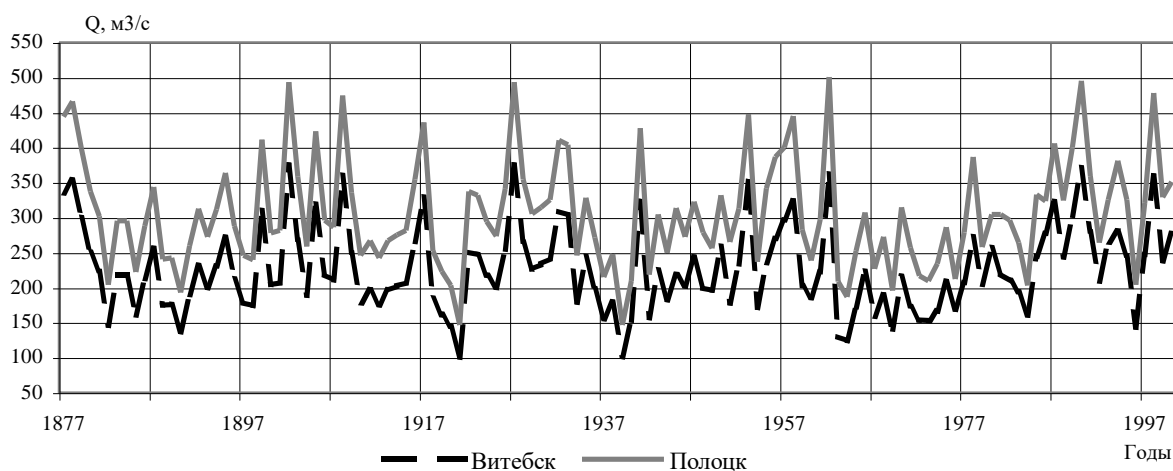
Таблица 1

Основные статистические характеристики годового стока реки Западная Двина

Створ	Норма стока, \bar{Q} , м ³ /с	Коэффициент вариации C_v	Коэффициент асимметрии C_s	Коэффициент автокорреляции $\gamma(1)$
Витебск	226	0,27	0,57	0,27
Полоцк	306	0,25	0,62	0,24

Эмпирические кривые обеспеченности для обоих створов соответствуют распределению Пирсона III типа при $C_s = 2C_v$. Поскольку функция распределения вероятностей годового стока при таких оценках параметров незначительно отличается от таковых для нормального распределения, применение параметрических критериев для проверки статистических гипотез можно считать допустимым.

На рисунке представлены гидрографы годовых расходов воды реки Западная Двина. На гидрографах четко прослеживается цикличность колебаний. Можно выделить три явно выраженных двадцатилетних тренда по увеличению водности: с 1890 по 1910, с 1940 по 1960 и с 1970 по 1990 годы.



Гидрографы годового стока воды реки Западная Двина

Рассмотрим устойчивость выборочных статистик (средних, дисперсии, коэффициентов автокорреляции) для двух версий исследуемых временных рядов: фактической (наблюденной) и антропогенной (периода массовых мелиораций). В таблице 2 приведены основные статистические параметры этих интервалов исследуемых временных рядов.

Таблица 2

Основные статистические параметры годовых расходов воды временных рядов реки Западная Двина

Период, год	Параметры для створа Витебск / Полоцк			
	Q _{ср} , м ³ /с	σ, м ³ /с	C _v	r(1)
1877 – 1964	226 / 307	63,0 / 80,0	0,28 / 0,26	0,20 / 0,20
1965 – 2000	226 / 302	59,0 / 73,2	0,26 / 0,24	0,45 / 0,34

В таблице 3 представлена матрица статистических критериев Стьюдента, Фишера и автокорреляции и их критические значения для двух исследуемых периодов.

Таблица 3

Статистические критерии (числитель) и их критические значения (знаменатель)

1877 – 1964 гг.	1965 – 2000 гг.		
Створ	t-критерий для средних	F- критерий для дисперсии	Критерий для автокорреляции
Витебск	0,00/1,99	1,14/1,65	1,41/1,96
Полоцк	0,29/1,99	1,19/1,65	0,75/1,96

Анализ средних значений годовых расходов воды для двух рассматриваемых периодов, на которые разбиты исходные временные ряды, показывает, что можно принять нулевую гипотезу и различия в средних величинах нужно признать несущественными. Нулевая гипотеза о равенстве дисперсии также является верной. Различий в коэффициентах автокорреляции на 5 %-ном уровне значимости не установлено.

При изучении закономерностей многолетних колебаний речного стока большой интерес представляет сопряженный анализ динамики стока и обобщенных характеристик циркуляции атмосферы. В качестве последних обычно используется классификация Г.Я. Вангенгейма – А.А. Гирса, основанная на трех формах циркуляции: *W* (западной), *E* (восточной) и *C* (меридиональной) [1]. Подробно этот вопрос для метеорологических рядов рассмотрен в монографии В.Ф. Логинова [2], где приведен их полный анализ.

Рассмотрим связь временных рядов годовых расходов реки Западная Двина.

Как видно из табл. 4, диапазон изменения характеристик годового стока весьма значителен и крайние его значения существенно больше (меньше) аналогичных значений для *n*-летних периодов исходных рядов.

Таблица 4

Основные статистические параметры годовых расходов воды

Период	Тип циркуляции	Параметры для створа Витебск / Полоцк			
		Q _{ср} , м ³ /с	σ _{Q_{ср}} , м ³ /с	C _v	r(1)
1881 – 1890	C	192 / 262	38,8 / 48,9	0,20 / 0,19	-0,17 / -0,17
1891 – 1928	W	230 / 311	62,2 / 78,6	0,27 / 0,25	0,16 / 0,16
1929 – 1939	E	216 / 292	61,7 / 78,1	0,29 / 0,27	0,47 / 0,46
1940 – 1948	C	211 / 288	51,4 / 65,6	0,24 / 0,23	-0,77 / -0,81
1949 – 1964	E + C	234 / 321	72,5 / 92,7	0,31 / 0,29	-0,09 / -0,07
1965 – 1988	E	206 / 278	46,2 / 55,6	0,22 / 0,20	0,43 / 0,17
1989 – 2000	W	268 / 353	61,4 / 80,9	0,23 / 0,23	0,11 / 0,14

Проверка гипотезы об однородности рассматриваемых параметров годового стока для периодов с разными типами циркуляции основана на использовании критериев Стьюдента и Фишера [3]. Подробная характеристика различий в рассматриваемых периодах приведена в табл. 5 – 10.

Таблица 5

Статистические критерии (числитель) и их критические значения (знаменатель)
для средних различных интервалов временного ряда годовых расходов воды реки Западная Двина (Витебск)

Период	Период					
	1891 – 1928	1929 – 1939	1940 – 1948	1949 – 1964	1965 – 1988	1989 – 2000
1881 – 1890	2,41/2,07	1,06/2,11	0,92/2,13	1,90/2,06	0,88/2,09	3,53/2,09
1891 – 1928		0,69/2,12	0,95/2,14	0,16/2,06	1,78/2,00	1,85/2,09
1929 – 1939			0,17/2,10	0,69/2,06	0,48/2,13	2,04/2,08
1940 – 1948				0,89/2,07	0,30/2,16	2,30/2,09
1949 – 1964					1,37/2,07	1,36/2,06
1965 – 1988						3,11/2,11

Таблица 6

Статистические критерии (числитель) и их критические значения (знаменатель)
для дисперсии различных интервалов временного ряда годовых расходов воды реки Западная Двина (Витебск)

Период	Период					
	1891 – 1928	1929 – 1939	1940 – 1948	1949 – 1964	1965 – 1988	1989 – 2000
1881 – 1890	2,58/2,84	2,54/3,14	1,76/3,23	3,50/3,01	1,42/2,91	2,51/3,10
1891 – 1928		1,02/2,67	1,46/3,05	1,36/1,95	1,82/1,93	1,03/2,54
1929 – 1939			1,44/3,35	1,38/2,85	1,78/2,27	1,01/2,85
1940 – 1948				1,99/3,22	1,23/2,38	1,43/3,31
1949 – 1964					2,46/2,12	1,39/2,70
1965 – 1988						1,76/2,24

Таблица 7

Статистические критерии (числитель) и их критические значения (знаменатель)
для автокорреляции различных интервалов временного ряда годовых расходов воды реки Западная Двина (Витебск)

Период	Период					
	1891 – 1928	1929 – 1939	1940 – 1948	1949 – 1964	1965 – 1988	1989 – 2000
1881 – 1890	0,81/1,96	1,31/1,96	1,54/1,96	0,17/1,96	1,44/1,96	0,56/1,96
1891 – 1928		0,88/1,96	2,70/1,96	0,78/1,96	1,08/1,96	0,14/1,96
1929 – 1939			2,85/1,96	1,34/1,96	0,12/1,96	0,82/1,96
1940 – 1948				1,90/1,96	3,22/1,96	2,16/1,96
1949 – 1964					1,56/1,96	0,47/1,96
1965 – 1988						0,87/1,96

Таблица 8

Статистические критерии (числитель) и их критические значения (знаменатель)
для средних различных интервалов временного ряда годовых расходов воды реки Западная Двина (Полоцк)

Период	Период					
	1891 – 1928	1929 – 1939	1940 – 1948	1949 – 1964	1965 – 1988	1989 – 2000
1881 – 1890	2,41/2,07	1,06/2,11	0,98/2,13	2,11/2,06	0,80/2,09	3,22/2,09
1891 – 1928		0,69/2,12	0,87/2,14	0,39/2,06	1,93/2,00	1,57/2,09
1929 – 1939			0,11/2,10	0,88/2,06	0,55/2,13	1,82/2,08
1940 – 1948				1,02/2,07	0,44/2,16	2,00/2,09
1949 – 1964					1,68/2,07	0,96/2,06
1965 – 1988						2,88/2,11

Таблица 9

Статистические критерии (числитель) и их критические значения (знаменатель)
для дисперсии различных интервалов временного ряда годовых расходов воды реки Западная Двина (Полоцк)

Период	Период					
	1891 – 1928	1929 – 1939	1940 – 1948	1949 – 1964	1965 – 1988	1989 – 2000
1881 – 1890	2,58/2,84	2,55/3,14	1,80/3,23	3,59/3,01	1,29/2,91	2,73/3,10
1891 – 1928		1,01/2,67	1,44/3,05	1,39/1,95	2,00/1,93	1,06/2,06
1929 – 1939			1,41/3,45	1,41/2,85	1,98/2,27	1,07/2,94
1940 – 1948				1,99/3,22	1,40/2,38	1,52/3,31
1949 – 1964					2,78/2,12	1,31/2,72
1965 – 1988						2,12/2,24

Проведенные исследования показали, что анализируемые ряды годовых расходов воды реки Западная Двина можно признать однородными по трем статистическим критериям с некоторыми допущениями. В то же время можно полагать, что для отдельных временных периодов с преобладанием того или иного типа атмосферной циркуляции условия стационарности не выполняются. Переход же от одного состояния к другому происходит в естественных условиях под воздействием внешних климатических факторов, существенно изменяющих соотношение между осадками и испарением в пределах территории бассейна Западной Двины.

Таблица 10

Статистические критерии (числитель) и их критические значения (знаменатель) для автокорреляции различных интервалов временного ряда годовых расходов воды реки Западная Двина (Полоцк)

Период	Период					
	1891 – 1928	1929 – 1939	1940 – 1948	1949 – 1964	1965 – 1988	1989 – 2000
1881 – 1890	0,81/1,96	1,30/1,96	1,71/1,96	0,22/1,96	0,78/1,96	0,61/1,96
1891 – 1928		0,86/1,96	2,91/1,96	0,71/1,96	0,03/1,96	0,07/1,96
1929 – 1939			3,00/1,96	1,26/1,96	0,79/1,96	0,08/1,96
1940 – 1948				2,14/1,96	2,80/1,96	2,39/1,96
1949 – 1964					0,68/1,96	0,47/1,96
1965 – 1988						0,09/1,96

Когда тренд явно не выражен, необходимо рассматривать совместно выборочные автокорреляционную (АКФ) и частную автокорреляционную (ЧАКФ) функции данного процесса, с помощью которых определяются характер изменения годового стока рек. При этом используются критерии оценки степени нестационарности процесса и выбора модели [1, 4]. Для реки Западная Двина АКФ и ЧАКФ имеют значительную величину при $\tau = 1$, тогда как все остальные значения их ординат статистически незначимы и характеризуются чередованием положительных и отрицательных значений, что соответствует такому виду модели, как авторегрессия первого порядка. Следовательно, рассматриваемый процесс годового стока может быть идентифицирован моделью следующего вида:

$$Q(t) = Q_{cp} + r(1) \cdot [Q(t-1) - Q_{cp}] + \xi(t), \tag{1}$$

где $Q(t)$ и $Q(t-1)$, м³/с – годовые расходы воды в t -й и предшествующий ему $(t-1)$ -й годы; $\xi(t)$ – гауссовский «белый шум» с нулевым средним и $\sigma_{\xi} = \sigma_Q \sqrt{1-r(1)^2}$.

Результаты проведенных исследований закономерностей многолетних колебаний годовых расходов воды реки Западная Двина послужили основанием для описания годовых расходов воды в виде простой цепи Маркова, т.е.

$$Q(t) = r(1) \cdot Q(t-1) + \xi(t), \tag{2}$$

где $Q(t)$ – расход воды текущего года; $Q(t-1)$ – расход воды в предшествующий год; $\xi(t)$ – независимая от Q случайная величина.

Первое слагаемое в правой части (2) можно трактовать как сток, обусловленный аккумуляцией водосборной части атмосферных осадков предшествующего года и сбросом их в русло реки в данном году. При этом случайная составляющая $\xi(t)$ в (2), очевидно, должна включать в себя и ту часть стока текущего года, которая сформирована за счет осадков этого года. В результате можно записать следующие уравнения [2]:

$$Q(t) = aQ(t-1) + bW_{oc}(t) + \xi(t_1); \tag{3}$$

$$Q(t) = cW_{oc}(t-1) + dW_{oc}(t) + \xi(t_2), \tag{4}$$

где $W_{oc}(t)$ и $W_{oc}(t-1)$ – годовые осадки текущего и предшествующего годов.

Располагая сопряженными временными рядами годовых значений атмосферных осадков и речного стока, коэффициенты a, b, c, d из (3) и (4) можно определить с помощью аппарата множественной регрессии.

Применительно к бассейну Западной Двины в замыкающем створе для годовых расходов воды, м³/с, получены следующие уравнения:

- Витебск:
$$Q(t) = 0,295Q(t-1) + 0,466W_{oc}(t) - 131,621 + \xi(t_1), \quad (5)$$

$$Q(t) = 0,446W_{oc}(t) + 0,170W_{oc}(t-1) - 158,915 + \xi(t_2); \quad (6)$$

- Полоцк:

$$Q(t) = 0,271Q(t-1) + 0,588W_{oc}(t) - 144,715 + \xi(t_1), \quad (7)$$

$$Q(t) = 0,549W_{oc}(t) + 0,241W_{oc}(t-1) - 188,182 + \xi(t_2). \quad (8)$$

Коэффициент множественной корреляции между стоком и определяющими факторами для уравнения (5) составляет $R = 0,69 > R^T_{(54, 5\%)} = 0,27$, при этом в интервал $\pm 5\%$ попало 18,9 % всех точек; $\pm 10\%$ – 37,7 %; $\pm 15\%$ – 52,8 %; $\pm 20\%$ – 73,6 %.

Коэффициент множественной корреляции между стоком и определяющими факторами для уравнения (6) составляет $R = 0,66 > R^T_{(54, 5\%)} = 0,27$, при этом в интервал $\pm 5\%$ попало 11,3 % всех точек; $\pm 10\%$ – 41,5 %; $\pm 15\%$ – 58,5 %; $\pm 20\%$ – 66,0 %.

Коэффициент множественной корреляции между стоком и определяющими факторами для уравнения (7) составляет $R = 0,66 > R^T_{(54, 5\%)} = 0,27$, при этом в интервал $\pm 5\%$ попало 20,8 % всех точек; $\pm 10\%$ – 35,9 %; $\pm 15\%$ – 62,2 %; $\pm 20\%$ – 67,9 %.

Коэффициент множественной корреляции между стоком и определяющими факторами для уравнения (8) составляет $R = 0,66 > R^T_{(54, 5\%)} = 0,27$, при этом в интервал $\pm 5\%$ попало 13,2 % всех точек; $\pm 10\%$ – 50,9 %; $\pm 15\%$ – 62,2 %; $\pm 20\%$ – 67,9 %.

Также была предпринята попытка описать годовые колебания расходов воды реки Западная Двина с помощью сложной модели Маркова со сдвигом до 50 лет.

При помощи аппарата регрессионно-корреляционного анализа были получены частные модели для створа:

- Витебск:

$$Q(t) = 0,25Q(t-3) + 0,24Q(t-5) + 0,31Q(t-24) + 46,1 + \xi(t), \quad (9)$$

- Полоцк:

$$Q(t) = -0,283Q(t-7) + 0,359Q(t-14) + 497,774 + \xi(t). \quad (10)$$

Коэффициент множественной корреляции для уравнения (9) составляет $R = 0,431 > R^T_{(74, 5\%)} = 0,232$, при этом в интервал $\pm 5\%$ попало 16,2 % всех точек; $\pm 10\%$ – 27,0 %; $\pm 15\%$ – 43,2 %; $\pm 20\%$ – 56,8 %.

Коэффициент множественной корреляции для уравнения (10) составляет $R = 0,394 > R^T_{(74, 5\%)} = 0,232$, при этом в интервал $\pm 5\%$ попало 16,2 % всех точек; $\pm 10\%$ – 35,1 %; $\pm 15\%$ – 43,2 %; $\pm 20\%$ – 56,8 %.

Проведенная оценка временных рядов годовых расходов воды реки Западная Двина за 124-летний период в створах Витебск и Полоцк позволяет сделать вывод об однородности изученных рядов годового стока. Нестационарность процесса многолетних колебаний годового стока Западной Двины можно отмечать лишь на отдельных отрезках временных рядов. Это обусловлено как естественно-климатическими, так и антропогенными изменениями гидрологического цикла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Исмайылов Г.Х., Федоров В.М. Анализ многолетних колебаний годового стока Волги // Водные ресурсы. – 2001. – Т. 28, № 5. – С. 517 – 525.
2. Логинов В.Ф. Причины и следствия климатических изменений. – Мн.: Наука і тэхніка, 1992. – 319 с.
3. Христофоров А.В. Теория случайных процессов в гидрологии. – М.: Изд-во МГУ, 1994. – 141 с.
4. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов, прогноз и управление. – М.: Мир, 1974. – Вып. 1. – 406 с.