

УДК 502/504:556.16

Г. Х. ИСМАЙЛОВ, Н. В. МУРАЩЕНКОВА

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

ОЦЕНКА ЦИКЛИЧНОСТИ МНОГОЛЕТНИХ КОЛЕБАНИЙ ГОДОВОГО СТОКА РЕКИ ДОН*

В статье излагаются вопросы, связанные с многолетними колебаниями стока реки Дон. Приводятся результаты исследования циклических колебаний речного стока, полученные при использовании корреляционного и спектрального методов анализа временных рядов.

Годовой сток, колебания стока, цикличность, водность, многоводный период, автокорреляционная функция, спектральная плотность.

The article considers the questions connected with long-term fluctuations of the Don river flow. There are given research results of cyclic fluctuations of the river flow which were obtained at usage of correlation and spectral methods of the time series analysis.

Annual flow, fluctuations of flow, cyclicity, water content, high water period, autocorrelation function, spectral density.

Речной сток – интегральная характеристика многих геофизических факторов (атмосферных осадков, температуры и влажности воздуха, солнечной радиации) и физико-географических условий бассейна (ландшафта, почв, растительности). Особенность речного стока – цикличность его колебаний в многолетнем разрезе, которая является причиной существования внутрирядных связей. Анализ цикличности многолетних колебаний речного стока может рассматриваться как один из этапов исследования большой проблемы – изучения условий формирования стока и других геофизических процессов в многолетнем разрезе с целью получения прогноза на будущий период.

Проблема исследования цикличности колебаний речного стока имеет давнюю историю и существует с середины XX века. В изучении природы цикличности можно выделить две точки зрения. Одни исследователи считают, что главная причина цикличности речного стока обусловлена геофизическими, гелиофизическими и приливообразующимися

процессами. По мнению других, цикличность есть свойство любой случайной последовательности. По-видимому, в многолетних колебаниях речного стока проявляется как первое, так и второе.

Для оценки многолетних колебаний речного стока применяют разностные интегральные кривые, по которым можно визуально проследить смену маловодных и многоводных лет и их чередование. Но оценка цикличности, полученная визуальным методом, оправдывается только в очевидных случаях. Поэтому для выявления тенденции к периодичности и определения циклов различной продолжительности используют корреляционные и спектральные функции, допуская, что исследуемые ряды принадлежат стационарному случайному процессу.

Корреляционная функция стационарного случайного ряда определяется так:

$$C_x(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t)x(t+\tau)dt.$$

Эта функция характеризует связь между членами ряда, отстоящими друг от друга на величину τ . Вместо корреляционной функции $C_x(\tau)$ пользуются автокорреляционной, чтобы подчеркнуть, что функция относится к одному ряду [1]:

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 07-05-00121а).

$$r_x(\tau) = \frac{C(\tau)}{C(0)}$$

Вычисление ординат автокорреляционной функции выполняется по выражению:

$$r_x(\tau) = \frac{\sum_{i=1}^{N-\tau} (x_i - \bar{x})(x_{i+\tau} - \bar{x})}{(N - \tau) \sigma_x^2},$$

$$\tau = 0, 1, 2, \dots, m$$

где N – число членов исходного ряда наблюдений; τ – сдвиг во времени; \bar{x} , σ_x^2 – соответственно среднее значение и дисперсия ряда.

Определив автокорреляционную функцию и выполнив преобразование Фурье, получим выражение для нормированной спектральной плотности:

$$\bar{S}_x(T) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\omega} r_x(\tau) \cos \frac{2\pi}{T} \tau d\tau. \quad (1)$$

где $\omega = \frac{2\pi}{T}$ – частота колебаний; T – период колебаний.

Заменив интеграл (1) суммой и приняв интервал между наблюдениями равным единице и $r(0) = 1$, будем иметь следующее выражение для вычисления спектральной плотности:

$$\bar{S}_x(T) = \frac{1}{2\pi} + \frac{1}{\pi} \sum_{i=1}^m r_x(\tau) \cos \frac{2\pi}{T} \tau.$$

Для снижения роли случайных ошибок, а также для достижения стационарного ряда применяют сглаживание, или фильтрацию исходного ряда. Основной целью фильтрации является выделение из исследуемого ряда гармоники с частотами $f_1 \leq f \leq f_h$ и подавление

ление всех прочих составляющих.

Осуществляется фильтрация с помощью преобразования вида

$$\tilde{x}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau)x(t + \tau)d\tau,$$

где $h(t)$ – весовая функция фильтра.

Любая фильтрация предусматривает изменения амплитуд гармоник процесса $x(t)$. Функция, определяющая характер изменения амплитуд при прохождении ряда через фильтр, называется частотной характеристикой фильтра [1].

Весовая функция $h(\tau)$ фильтра связана с частотной характеристикой $R(f)$ и имеет следующий вид:

$$h(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} R(f) \cos 2\pi f \tau df.$$

В основу оценки цикличности многолетних колебаний стока реки Дон положены данные о годовом стоке в различных створах по длине реки на верхнем, среднем и нижнем Дону, а также данные по боковой приточности на участках между указанными створами (таблица). В таблице представлены основные статистические параметры временных рядов годового стока реки Дон.

Основной объем стока (71 %) формируется на верхнем и среднем Дону (от истока до города Калач-на-Дону) на площади водосбора 222 тыс. км² (около 50 % общей площади всего бассейна). Среднее многолетнее значение стока в створе города Калач-на-Дону составляет 19,79 км³/год. Изменчивость стока

Основные статистические параметры годового стока реки Дон

Створ (участок)	n, лет	$W_{ср}$, км ³ /год	σ_w , км ³ /год	C_v	R(1)
Дон – город Георгиу Деж, F = 69 500 км ²	126	8,10	2,23	0,28	0,14
Дон – город Калач-на-Дону, F = 222 000 км ²	109	19,79	6,81	0,34	0,21
Дон – Цимлянская плотина, F = 255 000 км ²	126	20,22	7,00	0,35	0,24
Дон – станция Раздорская, F = 378 000 км ²	126	27,33	9,20	0,34	0,06
Боковая приточность на участках:					
Георгиу Деж – Калач-на-Дону	109	11,66	5,21	0,45	0,28
Калач-на-Дону – Цимлянская плотина	109	1,06	0,62	0,49	0,03
Цимлянская плотина – станция Раздорская	100	6,37	2,75	0,43	0,23

увеличивается с севера на юг, коэффициент вариации изменяется от 0,28 до 0,49.

Для выявления и оценки цикличности многолетних колебаний годового стока реки Дон применялись разностные интегральные кривые годового стока в замыкающем створе бассейна – станция Раздорская.

Анализ приведенной разностной интегральной кривой условно-

естественного годового стока реки Дон позволил выделить несколько циклов колебания стока различной продолжительности (рис. 1). Первый охватывает 34-летний период (1881/82–1914/15), в котором наблюдается шестилетний многоводный период (1894/95–1899/1900), сменяющийся устойчивым пятнадцатилетним периодом маловодья (1900/01–1914/15).

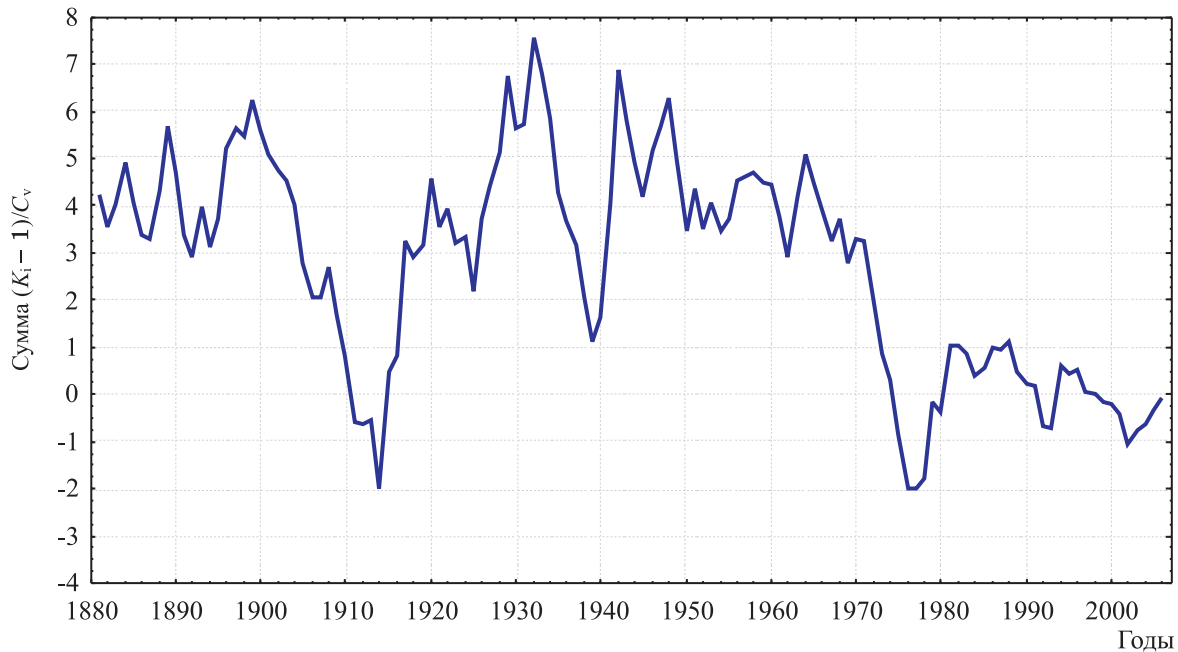


Рис. 1. Разностная интегральная кривая годового стока реки Дон у станции Раздорская за период с 1881/82 по 2006/07 годы

Далее выделяются большие циклы, внутри которых имеются малые циклы, образованные 2, 3 и 4-летними группировками серий лет повышенной и пониженной водности. Например, цикл колебания стока с 1915/16 по 1939/40 годы содержит 11-летний (1915/16–1925/26) и 14-летний (1926/27–1939/40) малые циклы.

Предварительно до расчета и анализа автокорреляционной функции исходный ряд годового стока реки Дон был подвергнут пятилетнему скользящему осреднению.

Анализ автокорреляционной функции годового стока реки Дон позволяет утверждать, что в колебаниях стока проявляется тенденция к 2–3-летним и 11–13-летним, 23–25-летним циклам

(рис. 2). Из рисунка видно, что через 5–7 лет функция изменяет положительное значение коэффициента автокорреляции на отрицательное.

С помощью спектрального анализа можно более достоверно выявить высокочастотные компоненты и оценить их значимость. Приведение временного ряда к стационарному выполнено вычитанием выборочного среднего и удалением тренда, а скользящее сглаживание рассчитанных значений спектральной плотности произведено с помощью функции Бартлетта (ширина окна $n = 7$, весовые коэффициенты 0,000; 0,1111; 0,2222; 0,3333; 0,2222; 0,1111; 0,000).

Анализ функций спектральной плотности годового стока реки Дон показывает, что наибольшие значения

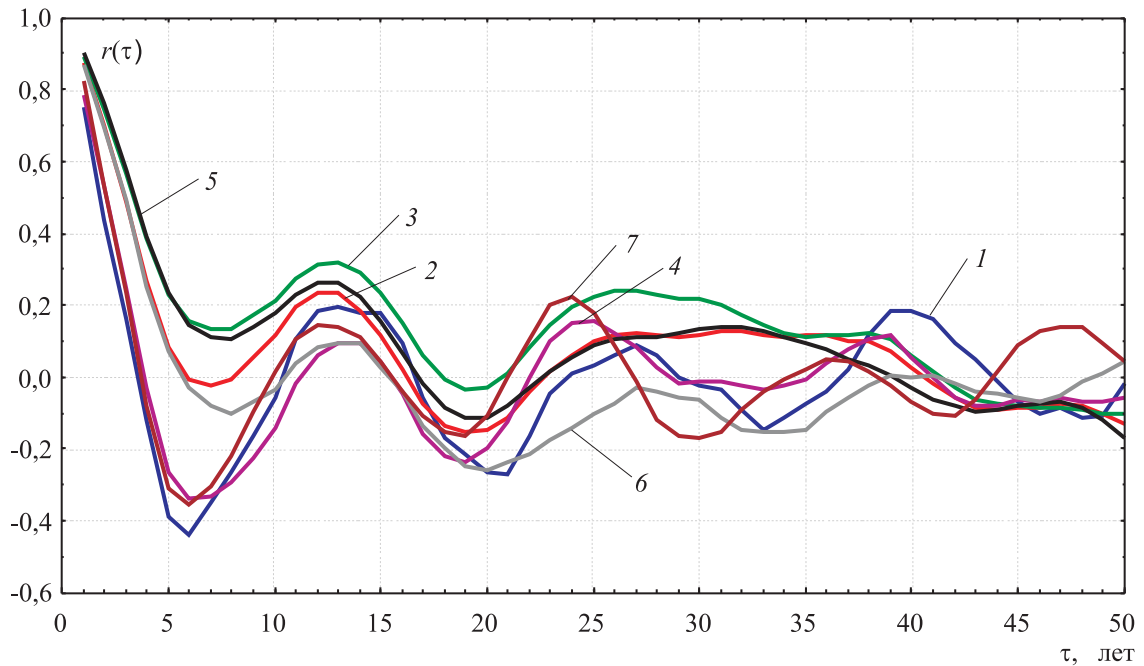


Рис. 2. Автокорреляционные функции годового стока реки Дон (при 5-летнем скользящем осреднении): 1 – город Георгию-Деж; 2 – город Калач-на-Дону; 3 – Цимлянская плотина; 4 – станица Раздорская; 5 – на участке между городом Георгию-Деж и городом Калач-на-Дону; 6 – на участке между городом Калач-на-Дону и Цимлянской плотиной; 7 – на участке Цимлянская плотина – станица Раздорская

спектральной плотности имеют частоты $\omega = 0,07...0,08$ с периодом 12–14 лет (рис. 3). Достоверно выделяются области частот, соответствующие временным масштабам 5–6 лет. Высокие частоты (циклы короткой продолжительности) представлены 2–3-летними циклами.

Проведенный анализ цикличности

колебания речного стока подтверждает результаты, приведенные в работах Г. П. Калинина, А. И. Давыдовой, Э. И. Саруханяна, Н. П. Смирнова [1, 2].

Тенденция в колебаниях годового стока, приводящая к появлению 2–3-летних циклов, отмечается также во многих других процессах,

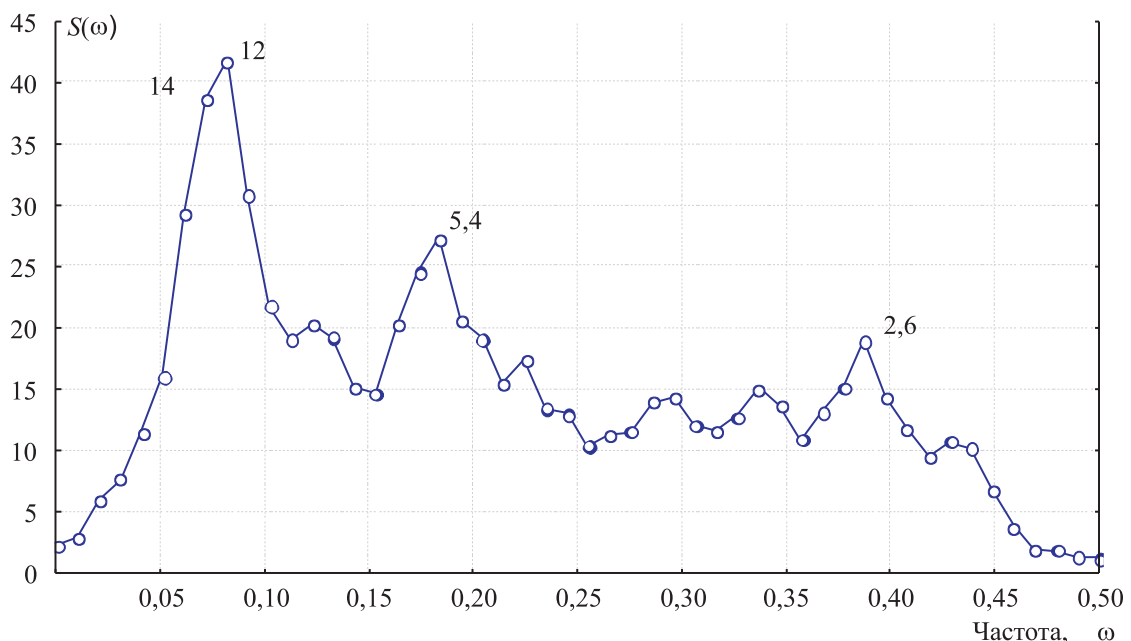


Рис. 3. Спектральная функция годового стока реки Дон у станицы Раздорская

происходящих как на поверхности Земли, так и в атмосфере. В работе [1] отмечено, что причиной двухлетней цикличности колебания стока является наличие квазидвухлетнего цикла стратосферных ветров в экваториальной зоне.

Выводы

Появление составляющей многолетних колебаний стока 5–7-летней продолжительности связано с влиянием на барическое поле Земли деформирующей силы, возникающей в результате движения земных полюсов; 11–13-летние циклы водности могут быть вызваны воздействием солнечной активности.

Обнаруженные циклические колебания стока генетически связаны с колебаниями барического поля Земли и циркуляцией атмосферы, возникающими под действием солнечной активности. Вследствие этого дальнейшие исследования изменчивости стока должны

предусматривать причинно-следственные связи: внешние воздействия-колебания атмосферной циркуляции – циклические колебания стока.

1. **Калинин Г. П., Давыдова А. И.** Циклические колебания стока рек северного полушария // Проблемы речного стока. – М. : Изд-во МГУ, 1968. – С. 4–10.

2. **Саруханян Э. И., Смирнов Н. П.** Многолетние колебания стока Волги. – Л. : Гидрометеоздат, 1971. – 166 с.

Материал поступил в редакцию 14.05.09.

Исмайылов Габил Худуш оглы, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Гидрология, метеорология и регулирование стока»
Тел. 8 (495) 976-23-68

E-mail: Ism37@mail.ru

Мураценкова Наталья Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидрология, метеорология и регулирование стока»

E-mail: splain75@mail.ru

Тел. 8 (495) 976-23-68