

УДК 556.512

ЦИКЛИЧНОСТЬ ГОДОВОГО СТОКА ЗАПАДНОЙ ДВИНЫ

канд. геолог. наук, доц. А.А. ВОЛЧЕК
(Полесский аграрно-экологический институт НАН Беларуси, Брест),
канд. техн. наук В.В. ЛУКША
(Брестский государственный технический университет)

Рассмотрены амплитудные и фазово-частотные характеристики спектральных разложений ряда годовых расходов воды реки Западная Двина на последовательных временных интервалах длиной 32 года. Проведен совместный анализ периодограмм годового стока и годовых атмосферных осадков. Установлены периоды колебаний речного стока, что дает возможность моделирования и прогнозирования годовых расходов воды. Параллельное использование спектрально-временного анализа для выявления цикличности колебания речного стока позволило более полно исследовать внутреннюю структуру рядов годового стока.

Введение. Средний годовой расход является устойчивой характеристикой оценки изменения речного стока, только значительные нарушения формирования водных ресурсов могут сказаться на изменениях колебаний его значений. В то же время внутригодовое перераспределение стока может существенно и не повлиять на годовой сток. Поэтому наряду с исследованиями годовых расходов необходимо детальное изучение сезонных изменений стока рек.

На сегодняшний день имеется достаточно продолжительный (более 100 лет) ряд наблюдений за годовыми расходами воды Западной Двины, что позволяет на основании различных методов исследования получать результаты, свидетельствующие о вековых колебаниях стока реки, и выделять периоды этих колебаний. Это позволит прогнозировать дальнейшие изменения водности реки в связи с прогнозируемым изменением климата.

Исходные материалы и методы исследования. Исходными данными для анализа внутренней структуры временных рядов годовых расходов воды послужили данные инструментальных наблюдений с 1877 по 2000 год (124 года) за водным режимом Западной Двины у города Витебска. Также использовались измеренные данные суммарных годовых атмосферных осадков по метеостанции «Витебск» за 1947 – 2000 годы.

Сегодня исследование внутренней структуры временных рядов выполняется различными методами: построением разностных интегральных кривых, корреляционных, автокорреляционных и спектральных функций; использованием спектрально-временного анализа (СВАН), причем каждый из них имеет свои преимущества и недостатки. Одним из наиболее предпочтительных методов считается спектральный анализ, основанный на разложении функций, графически представляемых как колебательный процесс, в ряд Фурье.

Цель спектрального анализа состоит в том, чтобы разложить временной ряд с циклическими компонентами в несколько синусоидальных и косинусоидальных функций с различной длиной волны. В результате спектрального анализа можно раскрыть несколько повторяющихся циклов различных длин в ряде времени, колебания значений в котором сначала напоминали случайный процесс.

Практическая реализация спектрального анализа заключается в аппроксимации с любой точностью заданной функции H на интервале времени t с помощью конечного набора гармонических составляющих, т.е.

$$H(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^m (a_n \cos n\omega_1 t + b_n \sin n\omega_1 t), \quad (1)$$

или

$$H(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^m (A_n \cos(n\omega_1 t - \varphi_n)), \quad (2)$$

где n – номер гармоники; $\omega_1 = 2\pi f_1$ – угловая частота повторения; a_0 , a_n и b_n – коэффициенты ряда Фурье; m – число гармоник; A_n и φ_n – соответственно амплитуда и начальная фаза n -й гармоники.

Коэффициенты a_n и b_n для дискретных числовых рядов определяются по формулам:

$$a_n = \frac{2}{N} + \sum_{i=1}^N (y_i \cos \omega_i \Delta t), \quad (3)$$

$$b_n = \frac{2}{N} + \sum_{i=1}^N (y_i \sin \omega_i \Delta t), \quad (4)$$

где N – число членов ряда на интервале $T_n = 1/f_n$; Δt – отрезок времени между соседними членами ряда.

Конечная цель спектрального анализа – нахождение спектральной функции $D = f(\omega)$, описывающей распределение дисперсии D исходного ряда по различным частотам ω . Амплитудно- и фазово-частотные характеристики (АЧХ и ФЧХ) спектра определяются по формулам [1]:

$$A_n(f) = \sqrt{a_n^2(f) + b_n^2(f)}; \quad (5)$$

$$\varphi(f) = -\arctg\left(\frac{b_n(f)}{a_n(f)}\right). \quad (6)$$

Как известно, величины A_n и D_n взаимосвязаны ($D_n = A_n^2/2$ для крайних и $D_n = A_n^2$ для промежуточных значений n), с практической точки зрения важнее представляется провести анализ АЧХ спектра, определяющего конкретные значения амплитуд годовых расходов воды на различных частотах. Кроме того, как отмечается в [1], так как выделяемые на АЧХ гармоники в реальном природном процессе могут быть нестабильными и с течением времени возможно изменение АЧХ, оптимальный вариант – построение АЧХ спектра для одних и тех же точек на последовательных временных интервалах.

Совместный спектральный анализ годовых расходов воды и суммарных атмосферных осадков выполнялся с использованием кросс-периодограмм, показывающих зависимость кросс-амплитуды от периодов колебаний вышеназванных величин. Кросс-амплитуда A_k является мерой ковариации (среднее попарных произведений отклонений) между относительными периодами (частотами) колебаний двух рассматриваемых рядов.

Расчет и построение графиков показателей когерентности между циклическими компонентами двух рядов наблюдений (в нашем случае годовых расходов и суммарных годовых атмосферных осадков) позволяют оценить корреляционную связь между периодами колебаний стока и осадков, т.е. выделить наиболее существенные совместные периоды (частоты) колебаний. Графики показателей фазовых сдвигов дают возможность оценить асинхронность в периодичности колебаний осадков и стока.

В последнее время для более тонких исследований временных рядов применяется спектрально-временной анализ. В этом методе спектры вариации вычисляются на скользящих временных отрезках (временное окно) и изображаются в виде СВАН-диаграмм. Длина окна не должна быть слишком малой, поскольку при этом уменьшается точность спектрального анализа, а также не дается четкого представления о низких частотах. Однако завышенная длина окна также не дает полной информации, так как при этом будут сглаживаться высокочастотные колебания. В нашем случае временное окно составило 40 лет, т.е. примерно треть полного периода (1877 – 2000 гг., 124 года).

Спектр вариаций есть набор амплитуд гармонических составляющих, которые получаются спектральным разложением флуктуирующей величины на конкретном временном отрезке. Периоды гармоник (или обратные им величины – частоты) на СВАН-диаграммах откладываются на вертикальной оси; время, отвечающее середине окна, – на горизонтальной. Глубина тона (степень зачерненности) отвечает соответствующей амплитуде. Более сильная зачерненность на диаграмме соответствует большей амплитуде спектра.

Повторяемость доминирующих ритмов выражается в виде более или менее продолжительных зачерненных полос. Этот признак показывает продолжительность существования ритмических изменений. Об интенсивности процессов можно судить по прилагаемому справа от СВАН-диаграммы легендам.

Определение параметра хаотизации также представляет собой вид спектрально-временного анализа. На оси абсцисс откладывается календарное время, а на оси ординат – степень «заполненности» спектра. Монохроматическому процессу соответствует нулевой уровень, а белому шуму – единица.

Анализ результатов исследований. Значения годовых расходов воды и суммарных годовых атмосферных осадков были разделены на две группы, соответствующие 32 годам наблюдений: 1947 – 1978 и 1969 – 2000 годы.

Преобразованные в периодограммы АЧХ годового стока Западной Двины, рассчитанные с помощью уравнений (3), (4) и (5), показаны на рис. 1.

Анализ рис. 1 показывает, что в рядах годового стока присутствуют циклические изменения с интервалами 4 – 5 и 10 – 12 лет, причем сами циклы различны как по длительности, так и по амплитудам. Цикличность колебаний годового стока Западной Двины изменилась с одного периода в 4 года за интервал 1947 – 1978 до двух в 4 и 11 лет за интервал 1969 – 2000 годы при одновременном четком выделении этих двух циклов.

Отмеченные изменения цикличности годового стока в первую очередь связаны с колебаниями такого стокообразующего фактора, как атмосферные осадки. Для подтверждения этого факта на рис. 2 приведены периодограммы суммарных годовых атмосферных осадков по метеостанции «Витебск».

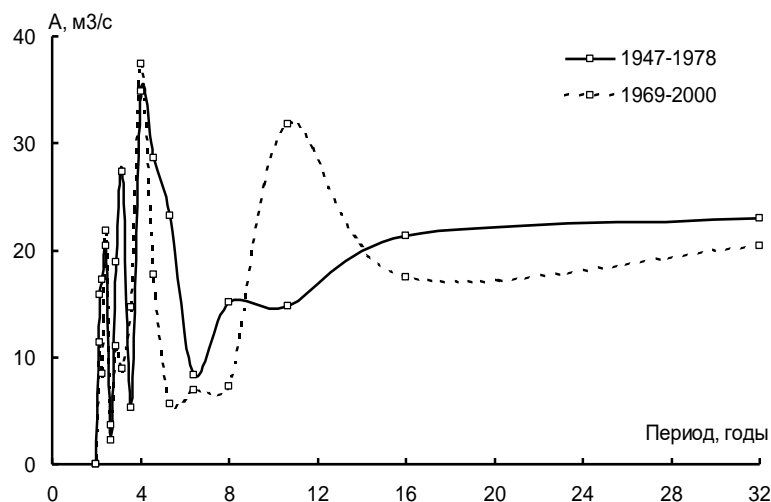


Рис. 1. Периодограммы годового стока за 1947 – 1978 и 1969 – 2000 гг. реки Западная Двина (г. Витебск)

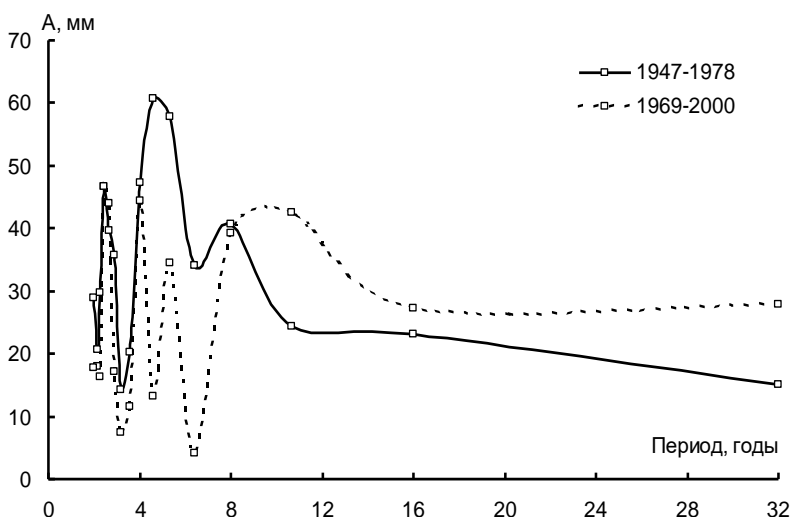


Рис. 2. Периодограммы суммарных годовых атмосферных осадков за 1947 – 1978 и 1969 – 2000 гг. по метеостанции «Витебск»

Для периодограмм суммарных годовых атмосферных осадков можно отметить общее выделение 2 – 4- и 8 – 12-летних циклов. В отличие от годового стока, более синхронный ход графиков периодограмм здесь наблюдается в интервале 1947 – 1978 гг. Для более конкретного выделения совместных циклов колебаний осадков и стока на рис. 3 и 4 построены кросс-периодограммы и графики показателя когерентности между циклическими компонентами исследуемых величин.

Анализируя рис. 3 и 4 можно прийти к выводам, что для Западной Двины наиболее существенная связь между циклами изменений годовых стока и атмосферных осадков наблюдается при 5-летних колебаниях за период 1947 – 1978 и 4-, 16-летних циклах за период 1969 – 2000 гг.

В общем большая часть протяженности графиков показателя когерентности лежит выше значимого коэффициента корреляции (0,7), что на оси Y соответствует приблизительно значению $0,5(\sqrt{0,5} \approx 0,70)$, что подтверждает синхронность цикличности изменения годового стока и атмосферных осадков.

Фазово-частотные характеристики годового стока, преобразованные в периодограммы и вычисленные с помощью (6), приведены на рис. 5.

Существенных изменений фазовых периодограмм двух рассматриваемых периодов в интервале периодов 0 – 7 лет не обнаружено (см. рис. 5). Можно отметить изменение формы фазовых периодограмм для периодов более 8 лет, что связано с такими же процессами в колебаниях атмосферных осадков и изменениями климата.

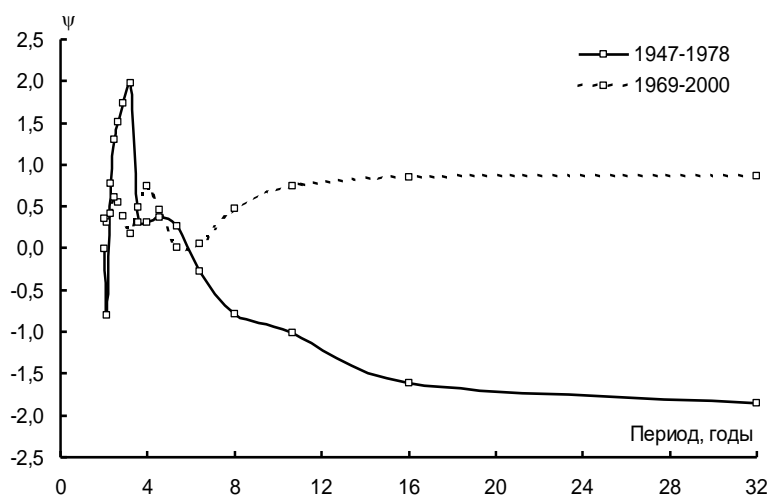


Рис. 3. Кросс-периодограммы суммарных годовых атмосферных осадков (Витебск) и годового стока за 1947 – 1978 и 1969 – 2000 гг. (р. Западная Двина – Витебск)

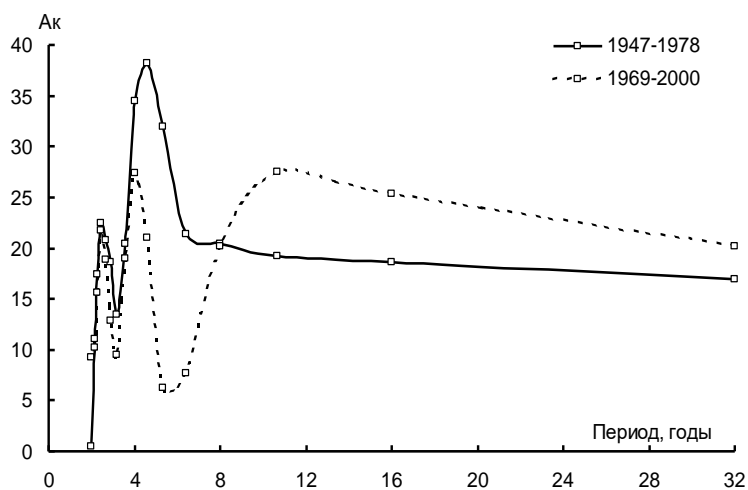


Рис. 4. Графики показателя когерентности годовых суммарных атмосферных осадков (Витебск) и годового стока за 1947 – 1978 и 1969 – 2000 гг. (р. Западная Двина – Витебск)

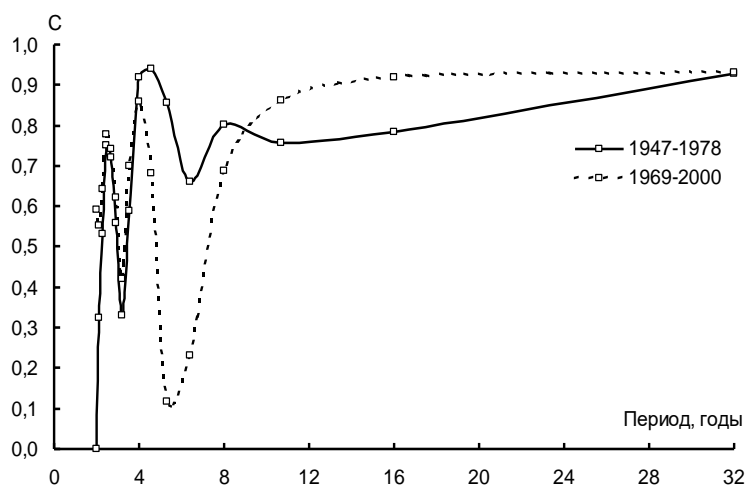


Рис. 5. Фазовые периодограммы годового стока за 1947 – 1978 и 1969 – 2000 гг. (р. Западная Двина – Витебск)

С целью подтверждения статистической значимости выявленных на периодограммах циклов построены автокорреляционная функция ряда годовых расходов воды Западной Двины за период 1877 – 2000 годы, график которых показаны на рис. 6.

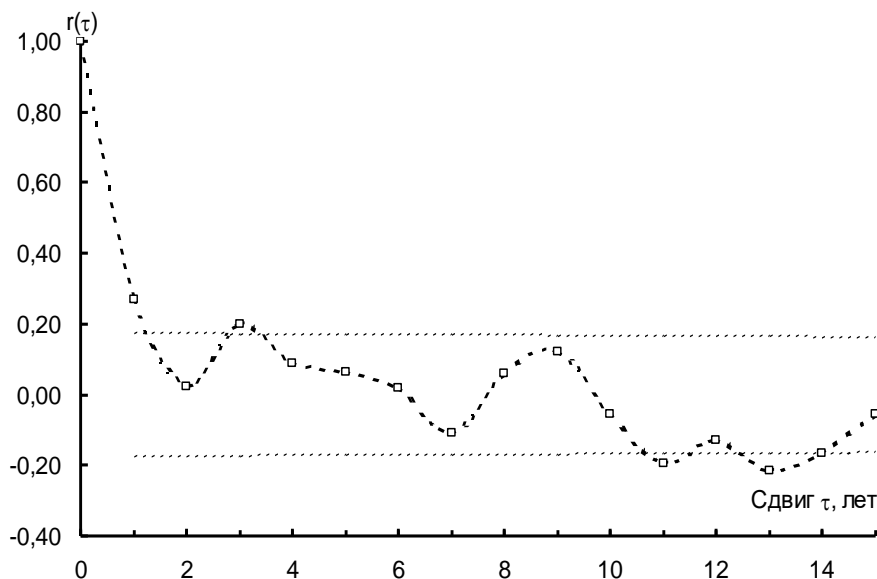


Рис. 6. Автокорреляционная функция годового стока р. Западной Двины (Витебск) за весь период наблюдений (1877 – 2000 годы).

Пунктирными линиями выделен доверительный интервал «белого шума» 95 %-ной обеспеченности

При сопоставлении графика с доверительным интервалом «белого шума» 95 %-ной вероятности превышения, приходим к выводу, что, циклы длиной около 3 и 11 лет, регистрируемые периодограммами, неслучайны. Эта длина циклов близка к среднearифметической периодичности всплесков, зафиксированных на данном временном интервале. При этом реальная длина циклов, как отмечалось выше, с течением времени изменялась.

Результаты использования СВАН-анализа для определения цикличности ряда годового стока Западной Двины приведены на рис. 7.

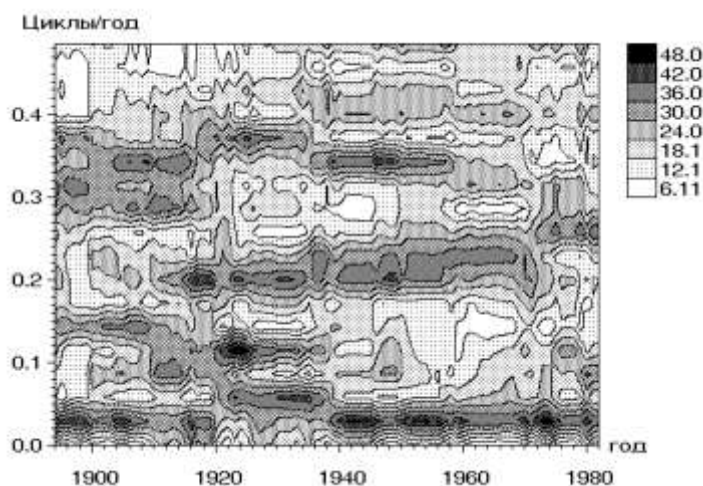


Рис. 7. СВАН-диаграмма годовых расходов воды р. Западной Двина (Витебск)

Анализируя рис. 7 можно отметить, что для годового стока р. Западной Двина (Витебск) характерно несколько выдающихся циклов длительностью около 2,94 лет (1890 – 1920 гг.); 5,0 (1910 – 1980 гг.) и 25,0 лет (1910 – 1980 гг.).

Важным критерием в исследовании устойчивости цикличности временных рядов стока является параметр хаотизации. На рис. 8 приведено распределение параметра хаотизации для годовых расходов р. Западной Двина (Витебск).

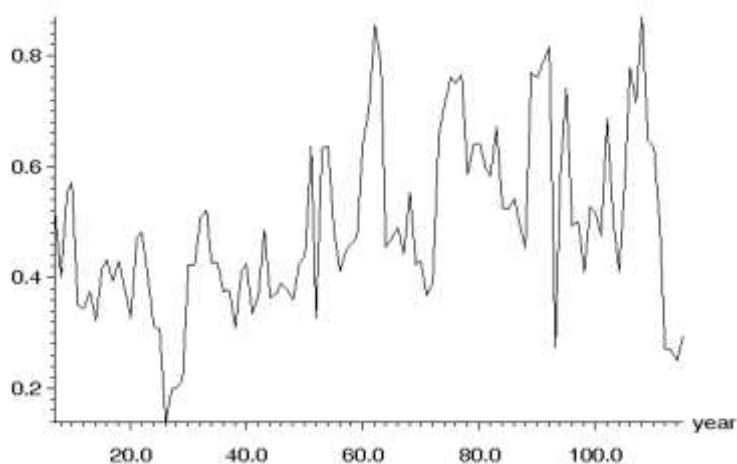


Рис. 8. Распределение параметра хаотизации временного ряда годовых расходов воды р. Западная Двина (Витебск)

Размах колебаний параметра хаотизации для реки Западная Двина (Витебск) составил 0 – 0,9. Следует отметить, что наблюдается тенденция увеличения параметра хаотизации в последние годы.

Заключение. На основании спектрального анализа годовых расходов воды выявлена цикличность колебаний речного стока Западной Двины. Отмечаются как короткопериодические (2 – 5 лет) и длиннопериодические (10 – 15 лет) циклы, при этом в интервале 1969 – 2000 годов амплитуды короткопериодических циклов имеют тенденцию к уменьшению, а длиннопериодические – к увеличению.

Совместный анализ годового стока и годовых атмосферных осадков с использованием кросс-спектрального анализа, графиков показателя когерентности и фазового сдвига показал, что выделенные циклы колебаний стока тесно связаны с колебаниями осадков, в целом преобладают 4- и 11-летние циклы.

Закономерное изменение циклов говорит о том, что они представляют собой вынужденные колебания, формирующиеся под воздействием крупномасштабных мощных энергетических факторов.

Результаты, полученные с использованием спектрального анализа в виде разложения в ряд Фурье, практически не отличаются от полученных нами ранее с использованием спектрально-временного анализа и других независимых методов оценки межгодовой изменчивости модулей речного стока [2].

В заключение отметим, что спектральный анализ дает возможность отслеживать динамику различных циклов гидрологических рядов, а также оценку возможности применения таких видов анализа при создании статистических моделей прогнозирования водного режима рек. Совместный анализ СВАН-диаграмм и временных распределений параметров хаотизации показал устойчивость циклов, а, следовательно, возможность построения прогностических оценок для годового стока воды Западной Двины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Педан В.В. Анализ структуры временных рядов весенних максимальных уровней природных вод // Водные ресурсы. – 2003. – Т. 30, № 6. – С. 688 – 695.
2. Volchak A.A., Luksha V.V. Chronological structure of long-term alteration of river flow of Belarus // Природнае асяроддзе Палесся: сучасны стан і яго змены: Матэрыялы междунар. канф. / ОПП НАН Беларусі. – Брест, 2002. – Т. 1. – С. 183 – 187.