

## ОЦЕНКА СЛУЧАЙНОСТИ МНОГОЛЕТНИХ КОЛЕБАНИЙ СРЕДНЕГО ГОДОВОГО СТОКА РЕК БАССЕЙНА САМАРЫ

При дослідженні динаміки багаторічного стоку річок басейну Самари виконана перевірка рядів їх середніх річних витрат на випадковість із використанням критерію стрибків. Розглянуто особливості застосування цього непараметричного критерію при проведенні аналізу характеристик рядів стоку.

**Введение.** Речной сток является итогом взаимодействия сложного комплекса процессов, составляющих наземную часть круговорота воды в природе. Вследствие этого он обладает большим числом степеней свободы, поскольку функционирование механизма его формирования зависит от большого числа факторов. Действие независимых или относительно независимых друг от друга природных явлений и событий на процесс образования стока проявляется в общем детерминировано, но с разной интенсивностью в различные промежутки времени, что обуславливает реализацию не детерминированных, а стохастических процессов. В результате, многолетние колебания стока носят как закономерный, так и случайный характер. Элемент случайности во временных последовательностях характеристик стока может быть различным. Отсутствие случайности указывает на вполне детерминированный характер изменения стока и принципиальную возможность количественного предсказания его будущих значений.

**Постановка проблемы.** Многолетние колебания речного стока можно рассматривать как хронологически упорядоченную последовательность стадий (серий лет) повышения и понижения водности, характеризующихся разным направлением, продолжительностью, интенсивностью и амплитудой. В течение каждой серии лет происходят определенные количественные изменения водности, что приводит к качественному переходу гидрологической системы на иной уровень или в другое состояние. Длительность таких стадий изменяется от одного года до нескольких лет, они отчетливо выделяются на эмпирических кривых стока и образуют элементарный уровень сложной иерархической структуры его многолетних колебаний. Образование группировок однонаправленного изменения характеристик стока может быть следствием преимущественного воздействия генетически разнородных групп факторов и свидетельством наличия внутрирядных связей. В этом случае анализ серийности колебаний и тенденций группирования элементов ряда представляет дополнительные возможности получения информации о процессе стока и условиях его формирования в конкретные годы или периоды времени, которую впоследствии можно использовать для целей прогноза.

Известно, что в теоретических последовательностях случайных величин, характеризующихся отсутствием внутрирядных связей, смежные элементы выборки также могут образовывать группировки различной длины. Учет серийности в этом случае не имеет смысла, поскольку такие группировки элементов не несут информации о природе процесса и закономерностях его проявления во времени.

Следовательно, в случае выявления каких-либо тенденций при изучении динамики стока, проверка исследуемых рядов его колебаний на случайность дает ос-

нования для принятия решения о наличии или отсутствии зависимости последующих расходов от предыдущих, т. е. внутрирядных связей. Результаты проверки определяют выбор математической модели для описания процесса стока конкретных рек и методики дальнейшего его исследования.

**Цель работы.** Исследование случайности и независимости рядов средних годовых расходов рек бассейна Самары в связи с выявлением при анализе структуры многолетних колебаний их стока серий лет повышения и понижения водности.

**Изложение основного материала.** Проверка рядов стока на случайность является частью более общего исследования, посвященного изучению динамики многолетних колебаний стока рек бассейна Самары. Материалом для исследования были ряды средних годовых расходов девяти рек, сток которых изучался на двенадцати водосборах с площадью от 120 до 19800 км<sup>2</sup>. Продолжительность рядов стока, использованных при проведении исследования, варьирует от 23 до 75 лет.

Проверка рядов стока на случайность и независимость проводится методами математической статистики и основана на нулевой гипотезе об отсутствии внутрирядных связей. Формальная постановка задачи выглядит следующим образом: имеется ряд из  $n$  наблюдений над одной случайной величиной, упорядоченной во времени. Нулевая гипотеза состоит в том, что наблюдения получены независимо между собой из одной и той же генеральной совокупности. Для принятия или отклонения нуль-гипотезы сравнивают характеристики рядов стока с аналогичными характеристиками теоретической выборки того же размера, состоящей из случайных и независимых элементов. В качестве критериев случайности, по которым производится сравнение, могут быть использованы такие признаки, как отклонения членов ряда от медианы или среднего значения, общее число, повторяемость и продолжительность группировок элементов (серий), число экстремумов последовательности, число повышений и понижений ряда и т. д. [1; 2]. Отсутствие существенных различий фактической и теоретической выборок по критерию сравнения дает основания с выбранным уровнем достоверности принять нулевую гипотезу и признать ряд стока случайным. Если же при сравнении выборок по указанным признакам выявляются достоверные их различия, нулевая гипотеза отклоняется и с заданным уровнем надежности ряд стока можно считать неслучайным, т. е. обладающим внутрирядными связями.

В настоящем исследовании проверка рядов на случайность осуществлялась с использованием критерия скачков. Критерий скачков относится к непараметрическим статистическим критериям проверки гипотез, при его использовании не требуется допущений о типе и параметрах исходного распределения проверяемого ряда и, отсутствуют ограничения, связанные с размером выборки, что может быть важно при гидрологических исследованиях. Выбор именно этого статистического критерия для проверки рядов наблюдений за стоком обусловлен методическими особенностями концепции серий лет повышения и понижения водности [4; 5], которая использовалась при анализе структуры многолетних колебаний средних годовых расходов рек бассейна Самары.

В общем случае, серией называется последовательность элементов (членов ряда), одинаковых по какому-либо признаку, непосредственно перед и после которой стоят элементы другого вида. Длина серии определяется числом элементов в ней. Чаще всего в качестве признака серий берется знак отклонений элементов от медианы, реже – от среднего значения ряда наблюдений [1].

В настоящем исследовании выделение серий производилось на основе «реального», а не «относительного» (отклонение от медианы либо среднего значения

ряда) изменения водности. Выделение серий заключалось в группировании значений стока последовательных лет по признаку принадлежности к определенному состоянию изменения водности реки. Серии лет повышения стока образуются смежными элементами ряда, которые удовлетворяют условию  $q_i < q_{i+1}$  и рассматриваются как совокупность состояний увеличения водности. И наоборот, члены ряда, отвечающие условию  $q_i > q_{i+1}$ , образуют серии понижения. При таком подходе сохраняется физическая природа изменчивости рядов наблюдений при визуальном анализе гидрографов стока и выделении составляющих многоуровневой иерархической структуры многолетних колебаний водности.

Последний год каждой серии лет повышения (понижения) стока характеризуется, соответственно, максимальным (минимальным) значением расхода. В эти завершающие серии годы процесс стока достигает относительно «экстремального» для данного временного интервала состояния однонаправленного изменения водности. Критерием выделения таких локальных экстремумов в последовательности наблюдений является смена знака приращения расходов смежных лет. Экстремумы-максимумы удовлетворяют условию  $q_{i-1} < q_i > q_{i+1}$ , экстремумы-минимумы, соответственно, условию  $q_{i-1} > q_i < q_{i+1}$ . Смежные серии лет повышения и понижения образуют элементарный цикл колебаний стока, который характеризует законченный процесс изменения водности в течение данного периода времени. Циклы ограничены смежными экстремумами-минимумами и включают один экстремум-максимум. Выделение серий и локальных экстремумов создает предпосылки для использования критерия скачков при анализе рядов наблюдений за стоком на случайность.

В соответствии с [3, с. 195] «скачки определяются как непрерывающиеся последовательности одних и тех же состояний». Существующие разновидности критерия отличаются способом преобразования исходных рядов наблюдений в последовательности, элементы которых находятся в одном из двух состояний. Наиболее распространенными способами такого преобразования являются схемы дихотомизации элементов фактического ряда по отношению к среднему значению или медиане, а также метод скачков вверх и вниз [3].

С учетом использованного в исследовании метода структуризации рядов средних годовых расходов рек бассейна Самары, для проверки гипотезы о случайности последовательности в наибольшей степени подходит статистическая процедура исследования числа скачков вверх и вниз. Эта разновидность критерия скачков считается наиболее мощным его вариантом, поскольку использует изменение величины каждого элемента выборки по отношению к смежным элементам, а не к одному и тому же значению, как в случае медианы или среднего. Дихотомизация последовательностей с помощью метода скачков вверх и вниз применяется в случаях, когда исходный ряд представлен не двумя различными состояниями элементов выборки, а совокупностью наблюдений, отличающихся по величине. Рассматривая только разности между значениями соседних элементов выборки такую «количественную» последовательность легко преобразовать в последовательность «качественную», имеющую только два состояния (или три, если имеются равные значения смежных элементов ряда, что не является препятствием при дальнейшем использовании метода). Такая трансформация рядов наблюдений дает возможность использовать для их исследования те же процедуры, что и для случая последовательностей с двумя взаимоисключающими состояниями.

Использование критерия скачков для анализа рядов гидрологических наблюдений рассмотрено в [4]. Применительно к поставленной в данном исследовании

задаче проверки на случайность рядов средних годовых расходов рек бассейна Самары, порядок использования критерия скачков был следующим. Фактическая выборка преобразовывалась в последовательность, состоящую из элементов двух типов. Дихотомизация рядов многолетних колебаний рек бассейна Самары проводилась в зависимости от знака приращения соседних величин стока в соответствии с принципом выделения серий. При положительном приращении смежных лет (в сериях лет повышений) численные значения стока заменялись знаками «плюс», при уменьшении расходов (в сериях понижения) значения лет заменялись знаком «минус». Тем самым исходные ряды среднегодовых расходов рек были трансформированы в последовательности знаков, отражающих чередование двух взаимоисключающих друг друга состояний. Для исследуемых рядов стока это состояния повышения и понижения водности, т. е. серии лет соответствующего знака. Было определено количество зафиксированных состояний повышения ( $n_1$ ) и состояний понижения ( $n_2$ ).

Смена знака означает появление скачка в последовательности. Число скачков в исследуемых рядах стока можно отождествить с количеством локальных экстремумов, поскольку числу полностью сформировавшихся серий лет повышений и понижений водности рек соответствует общее число экстремумов-максимумов и экстремумов-минимумов. Следовательно, количество локальных экстремумов в фактической последовательности принимается как общее число скачков (обозначается через  $U$ ). Критические значения числа скачков  $U$  для фиксированных  $n_1$ ,  $n_2$  и заданного уровня значимости  $\alpha$  содержатся в соответствующих таблицах. Однако, если число возможных размещений каждого из состояний больше десяти, распределение величины  $U$  довольно хорошо аппроксимируется нормальным распределением [3]. Поэтому для случая  $n_1 > 10$  и  $n_2 > 10$  при проверке рядов стока на случайность с помощью критерия скачков можно использовать таблицы стандартного нормального распределения.

В соответствии с [3] среднее число экстремумов  $\bar{U}$  в случайной последовательности с  $n_1$  состоянием повышения и  $n_2$  понижением равно:

$$\bar{U} = \frac{2n_1n_2}{n_1 + n_2} + 1 \quad (1)$$

Дисперсия среднего числа экстремумов вычисляется по формуле

$$\sigma_{\bar{U}}^2 = \frac{2n_1n_2(2n_1n_2 - n_1 - n_2)}{(n_1 + n_2)^2(n_1 + n_2 - 1)} \quad (2)$$

По полученным характеристикам рассчитывается критерий скачков

$$Z = \frac{U - \bar{U}}{\sigma_{\bar{U}}}, \quad (3)$$

где  $U$  — наблюдаемое число экстремумов.

Для проверки гипотезы о случайности числа элементов последовательности производится сравнение величины критерия  $Z$ , рассчитанного для фактической выборки, с его значением для теоретической последовательности такого же размера. Нулевая гипотеза утверждает, что нет существенного различия между наблюдаемым в фактической выборке числом скачков и средним числом скачков для случайной последовательности того же объема

$$H_1: U = \bar{U}$$

Постановка гипотезы в такой формулировке подразумевает использование двустороннего критерия для ее проверки. Нулевая гипотеза отклоняется, если име-

ет место любое нарушение случайности в последовательности (скачков слишком мало, либо слишком много) и принимается альтернативная гипотеза

$$H_1 : U \neq \bar{U}.$$

Как упоминалось выше, при  $n_1 > 10$  и  $n_2 > 10$  критерий скачков  $Z$  можно рассматривать, как нормированное отклонение  $t$  в нормальном распределении. Поэтому для определения вероятности неслучайности совпадений числа локальных экстремумов в теоретических и фактических выборках по рассчитанным величинам критерия скачков можно пользоваться графиком  $t = f(p, \%)$ , построенным по таблицам значений интеграла вероятностей [6].

Результаты исследования на случайность рядов средних годовых расходов рек бассейна Самары, проведенного в соответствии с рассмотренной методикой, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Сопоставление фактического и теоретического числа экстремумов многолетних колебаний годового стока рек бассейна Самары

Река, гидропост	Число лет в сериях		Число экстремумов		Критерий скачков, $Z$	Вероятность неслучайности фактического числа экстремумов, %
	повышения	понижения	фактическое	теоретическое		
Самара, с. Кохановка	22	22	26	23,0	0,92	64
Самара, с. Кочережки	32	34	40	34,0	1,50	87
Б. Терновка, с. Богдановка	21	27	27	24,6	0,70	52
Былк, с. Самарское	9	13	15	11,6	1,52	87
Волчья, пгт Васильковка	39	35	40	37,9	0,49	38
Волчья, с. Андреевка	19	19	23	20,0	0,99	68
Волчья, х. Артемовский	10	17	16	13,6	1,02	69
Соленая, с. Новопавловка	23	25	27	25,0	0,60	45
Мокр. Ялы, х. Грушевский	37	35	40	37,0	0,72	53
Малая Терса, с. Троицкое	19	28	32	23,6	2,56	98
Ср. Терса, х. Раздолье	14	16	20	15,9	1,52	87
Гайчур, с. Андреевка	30	36	39	33,7	1,32	81

Оценка статистической значимости различий числа экстремумов в теоретических и фактических выборках может быть получена при использовании доверительного интервала. Для этого, исходя из уровня значимости, выбранного при исследовании, необходимо определить границы критической области. Если фактическое значение  $Z$  не попадает в критическую область, нулевая гипотеза отвергается с вероятностью, превышающей выбранный уровень значимости. Это дает основания для вывода, что исследуемые данные не противоречат предположению о неслучайности появления экстремумов в рассматриваемых рядах стока.

**Выводы.** Как следует из данных таблицы 1, определенно неслучайным, с вероятностью более 98 %, можно считать ряд многолетних колебаний стока р. Малая Терса. Еще в 4 случаях из 11 число экстремумов в фактических выборках можно считать неслучайным с вероятностью более 81 и 87 %. Значения критерия скачков, рассчитанные для остальных шести рядов, относительно невелики, поскольку расхождение числа экстремумов в фактических выборках по сравнению с теоретическими не существенно. Вероятность неслучайности этих рядов не превышает 69%.

Тем не менее, в соответствии с принципами построения статистических гипотез, полученные результаты не дают оснований утверждать, что рассмотренные

последовательности являются случайными. Как отмечено в [3, с. 202] при оценке результатов проверки «...сам по себе факт случайности не может быть доказан, так как условие случайности содержится в нулевой гипотезе». В [7; 8] приведены результаты сопоставления фактических чисел серий лет повышений и понижений с теоретическими по большому количеству рядов стока. Относительно случаев незначительного различия или совпадения числа экстремумов в некоторых фактических и теоретических выборках был сделан вывод, что такие совпадения «...не свидетельствуют об их сходстве по существу [8, с. 7]. Экстремумы колебаний стока рек и их серии являются результатом действия конкретных комплексов физических факторов земного и внеземного происхождения, тогда как для случайных выборок такие факторы в принципе не могут быть определены».

### Библиографические ссылки

1. Шелутко В. А. Численные методы в гидрологии / В. А. Шелутко. – Л., 1983. – 153 с.
2. Владимиров А. М. Гидрологические расчеты / А. М. Владимиров. – Л., 1990. – 366 с.
3. Дэвис Дж. С. Статистический анализ данных в геологии. В 2 кн. Кн. 1 / Дж. С. Дэвис. – М., 1990. – 319 с.
4. Динамика многолетних колебаний речного стока / И. П. Дружинин, В. Р. Смага, А. Н. Шевнин – М., 1991. – 176 с.
5. Природа многолетних колебаний речного стока. – Новосибирск, 1976. – 336 с.
6. Дружинин Н. К. Логика оценки статистических гипотез / Н. К. Дружинин. – М., 1973. – 211 с.
7. Бережных Т. В. Сопоставление характеристик фактических и теоретических распределений серий лет повышения и понижения стока рек / Т. В. Бережных, А. Н. Шевнин // Водные ресурсы бассейна Байкала и Ангары. Предсказание, рациональное использование и охрана. – Иркутск, 1983. С. 11–12
8. Бережных Т. В. Серии лет повышений и понижений гидрометеоэлементов (причины, свойства, характеристики) : автореф. дис. на соискание ученой степени канд. геогр. наук / Т. В. Бережных. – Иркутск, 1984. – 16 с.

Надійшла до редколегії 18.02.09

УДК 550.378

О. Л. Аніщенко, Г. А. Галушка

*Дніпропетровський національний університет ім. Олеся Гончара*

## ОСОБЛИВОСТІ ЗАБРУДНЕННЯ ТРИТІЄМ ВОДНИХ ОБ'ЄКТІВ У ЗОНАХ ВПЛИВУ АЕС (НА ПРИКЛАДІ ЗАПОРІЗЬКОЇ АЕС)

Установлено, що концентрація тритію у прилеглих до території Запорізької АЕС водних об'єктах перевищує фонові показники, але значно менша, ніж зазначений у НРБУ-97 допустимий рівень потрапляння тритію до питної води.

На сьогоднішній день особливе місце серед груп речовин, що забруднюють навколишнє середовище, займають радіоактивні елементи. Одним з найважливіших, однак, маловивчених, елементів радіоактивного забруднення навколишнього середовища є тритій – радіоізопад водню з масовим числом 3 та періодом напіврозпаду 12,3 роки.

© О. Л. Аніщенко, Г. А. Галушка, 2009