

В.А. Кузьмин, И.С. Гаврилов, С.В. Ерёмкина, К.В. Шеманаев

ОЦЕНИВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АНТРОПОГЕННЫХ И КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТОКА

V.A. Kuzmin, I.S. Gavrilov, S.V. Eryomina, K.V. Shemanaev

ASSESSING THE CLIMATIC AND ANTHROPOGENIC IMPACTS ON RUNOFF GENERATION

Рассмотрены принципы оценивания влияния антропогенных и климатических изменений на формирование речного стока. Показан способ идентификации причин нарушения однородности и стационарности гидрологических рядов. Предложен метод статистического оценивания основных гидрологических характеристик в условиях изменения климата и переменной антропогенной нагрузки на речные бассейны.

Ключевые слова: статистическое прогнозирование, моделирование, данные, временные ряды, однородность, стационарность, изменение климата, переменная антропогенная нагрузка, точки разладки, тренды, моменты.

Basic principles of assessing the climatic and anthropogenic impacts on runoff generation are considered. A way to identify reasons of discarding hydrological time series is shown. A method of statistical assessment of basic hydrological characteristics used in hydraulic design under climatic and anthropogenic impact is proposed.

Keywords: statistical forecasting, modeling, data, time series, homogeneity, time invariance, global change, variable human impact, discord points, trends, moments.

Изменения климата и переменная антропогенная нагрузка на речные водосборы приводят к нарушению однородности и стационарности временных рядов, отражающих процессы формирования стока и используемых при решении различных задач гидрологического и гидротехнического проектирования [4-13]. В результате выполненные ранее расчёты основных гидрологических характеристик становятся ненадёжными, и возрастает гидрометеорологическая уязвимость как уже существующих, так и находящихся в стадии строительства гидротехнических сооружений [1-3, 13].

Цель данной статьи – обозначить основные принципы оценивания влияния антропогенных и климатических изменений на формирование речного стока, которые должны пройти обсуждение гидрологической общественностью. Затем (возможно, претерпев некоторые изменения) они могут стать основой для разработки нормативной литературы, регламентирующей расчёты основных гидрологических характеристик при наличии антропогенных и климатических изменений (например, [15, 16]).

Предлагаемая методика оценивания влияния антропогенных и климатических изменений на процесс формирования стока в водохранилища ГЭС состоит из двух основных (1, 2) и одной опциональной части (3):

1. Анализ временного ряда тестируемых гидрологических или метеорологических характеристик (среднего годового расхода воды, среднего расхода воды за половодье,

- средних месячных расходов воды, средних расходов за межлетний период, годовых минимальных и максимальных расходов, а также метеорологических статистических характеристик – средних осадков, испарения и т.д.) на предмет обнаружения одной или нескольких точек разладки [1, 2, 17, 18]. Наличие точек разладки является атрибутом нарушения однородности и стационарности рассматриваемого гидрометеорологического процесса вследствие влияния антропогенных и/или климатических изменений (рисунок 1).
2. Расчёт статистических характеристик для отдельных интервалов рассматриваемого временного ряда, находящихся между точками разладки. Определяемые статистики количественно характеризуют влияние антропогенных и климатических изменений на исследуемые процессы, обуславливающие формирование стока.
 3. При необходимости результаты оценивания влияния антропогенных и климатических изменений на процесс формирования стока воды могут быть использованы для статистического прогнозирования возможных сценариев притока воды, анализа гидрометеорологических рисков, вызванных антропогенными и климатическими изменениями, оценивания гидрометеорологической уязвимости гидротехнических сооружений и т.д.

Рассмотрим перечисленные расчётные процедуры более подробно.

Появление точек разладки временного ряда, отражающего как отдельные стокообразующие факторы, так и сам сток является наиболее ярким и важным признаком влияния антропогенных и климатических изменений на процесс его формирования. Поэтому их обнаружение следует рассматривать как самый первый и ключевой шаг анализа изменчивости исследуемых процессов [1, 2].

Климатические изменения и переменная антропогенная нагрузка на водосбор водохранилища ГЭС могут проявляться разнообразно, как это проиллюстрировано на рисунке 1.

Например, климатические изменения и переменная антропогенная нагрузка могут проявиться в скачкообразном изменении центра распределения вероятности рассматриваемого ряда (рис. 1а), его размаха (рис. 1б), степени асимметричности (рис. 1в), изменении тренда (рис. 1г) или любом сочетании перечисленных стохастических характеристик [1-3].

Важно подчеркнуть, что обнаружение и сопоставление точек разладки «входных» (метеорологических) и «выходных» (гидрологических) процессов является чрезвычайно эффективным способом идентификации природы изменений, происходящих на водосборе. Так, например, если время разладки гидрологического ряда совпадает со временем разладки метеорологического ряда или несколько задерживается по отношению к нему, то можно сделать вывод о том, что обнаруженные изменения процесса формирования стока на водосборе обусловлены, скорее всего, изменением климата (что не отрицает возможности влияния антропогенных изменений). Если же при анализе метеорологических процессов точек разладки не обнаружено, очевиден вывод о том, что обнаруженные изменения процесса формирования стока на водосборе обусловлены антропогенными причинами (крайне редко – уникальным сочетанием климатических процессов, каждый из которых продолжает оставаться однородным и стационарным) [1-3].

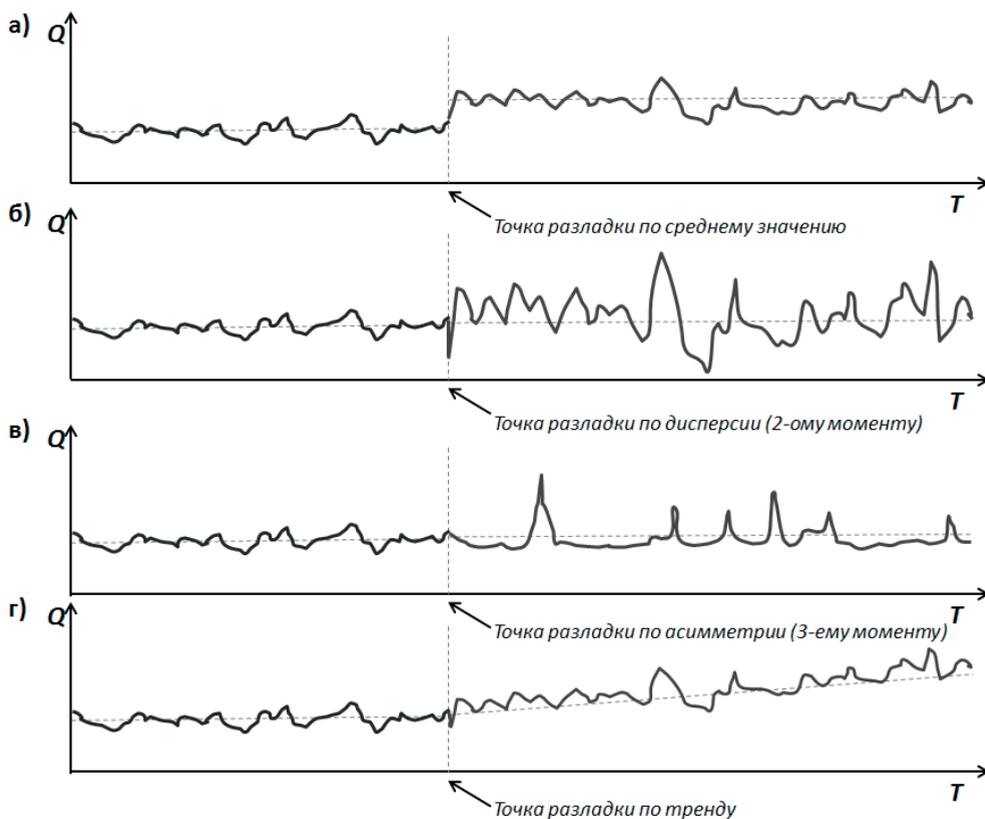


Рис. 1. Примеры различных видов точек разладки:

- а* – по среднему значению;
- б* – по дисперсии (2-ому моменту) при постоянном среднем значении;
- в* – по асимметрии (3-ему моменту) при постоянном среднем значении;
- г* – по изменению линии тренда при постоянной дисперсии.

Обнаружение точек разладки может быть выполнено на основе метода главных компонент (аналоги – метод PCA (Principle Component Analysis) и метод SSA (Singular Spectrum Analysis), основанного на преобразовании одномерного временного ряда в многомерный ряд. Способ преобразования одномерного ряда в многомерный представляет собой «свёртку» временного ряда в матрицу, содержащую фрагменты временного ряда, полученные с некоторым сдвигом (лагом). Общий вид сдвиговой процедуры напоминает «гусеницу», поэтому сам метод нередко так и называют – «Гусеница»: длина фрагмента называется длиной «гусеницы», а величина сдвига одного фрагмента относительно другого шагом «гусеницы». Базовый инструментарий для реализации этого подхода содержится в таких программных продуктах, как «MATLAB» [18] и «Caterpillar v3.40» [17].

Алгоритм обнаружения точек разладки состоит из нескольких этапов:

- **Этап 1.** Развёртка одномерного ряда в многомерный.
- **Этап 2.** Анализ главных компонент: сингулярное разложение выборочной ковариационной матрицы
- **Этап 3.** Отбор главных компонент, среди которых можно выделить относящиеся к тренду (медленно меняющиеся), периодические и шумовые. (На данном этапе выполняется обнаружение разладки – это делается на основе сравнения структуры ряда на базовом и тестовом участках, после чего строится матрица неоднородности, определяются функции разладки и выполняется анализ найденных структурных изменений).
- **Этап 4 (опциональный).** Восстановление одномерного ряда отобранными главными компонентами с учётом обнаруженных точек разладки.

Более подробно процедура обнаружения разладки описана в [1, 2, 17, 18].

Для количественного описания влияния климатических изменений и антропогенного воздействия на рассматриваемый водосбор для каждого интервала временного ряда между обнаруженными точками разладки необходимо найти следующие стохастические параметры:

1. Параметры тренда: линейного ($Q = at + b$), в том числе нулевого, или нелинейного (выражаемого экспоненциальной, степенной, периодической или любой другой функцией);
2. Статистические параметры остаточных отклонений Δ , получающихся путём вычета из исходного ряда значений тренда (или среднего значения при наличии нулевого тренда): среднее значение $\bar{\Delta}$, а также второй и третий центральный моменты (μ_{Δ}^2 и μ_{Δ}^3). При необходимости можно также вычислить коэффициенты вариации и асимметрии (C_v и C_s), используемые при инженерном проектировании [7].

Относительные или абсолютные изменения указанных статистик являются характеристиками влияния климатических изменений и антропогенного воздействия на рассматриваемый водосбор. Они определяются для каждой части исходного временного и заносятся в сводную таблицу 1, предназначенную для автоматического документирования расчётов, выполняемых в рамках анализа влияния климатических или антропогенных факторов на процесс формирования стока.

В соответствии с Гл. II, ст. 8 Федерального закона РФ от 21.07.1997 г. № 117-ФЗ (ред. от 14.07.2008 г.) «О безопасности гидротехнических сооружений» [16], обеспечение безопасности гидротехнических сооружений осуществляется, в частности, на основании установления критериев их безопасности, оснащения гидротехнических сооружений техническими средствами в целях постоянного контроля за их состоянием, обеспечения необходимой квалификации работников, обслуживающих гидротехническое сооружение. В Гл. II, ст. 9 этого Закона говорится, что собственник гидротехнического сооружения и эксплуатирующая организация, в частности, обязаны обеспечивать разработку и своевременное уточнение критериев безопасности гидротехнического сооружения. Эта процедура выполняется на основании рекомендаций, представленных в нормативной литературе – строительных нормах и правилах (СНиП) и сводах правил (СП). Согласно ранее используемому СНиП 2.01.14-83 «Определение основных расчетных гидрологических характеристик» и пришедшему ему на смену Своду Правил по проектированию

и строительству 33-101-2003 [15], расчёт эксплуатационных характеристик различных гидротехнических сооружений основан на статистическом анализе рядов наблюдений за гидрометеорологическими характеристиками и предположении их однородности и стационарности (или наличия стабильного тренда). Однако установленные факты изменения климата делают это предположение некорректным, а выполненные ранее расчёты – неверными (с точки зрения корректности отражения изменившихся стохастических особенностей гидрометеорологических процессов и явлений), что частично объясняет тенденцию к возрастанию числа техногенных катастроф во всём мире. Таким образом, существующий порядок предписываемого законом уточнения критериев безопасности ГЭС не гарантирует адекватности получаемых оценок и, следовательно, не в состоянии обеспечить надлежащую безопасность, поскольку в РФ практически отсутствует теоретическая и методическая база для создания расчетных методик, учитывающих климатические изменения. Анализ трендов основных гидрометеорологических процессов и полей, определяющих пространственно-временную изменчивость водных ресурсов РФ, показал, что на территории нашей страны существуют несколько областей, испытывающих значительное влияние глобальных изменений и переменной антропогенной нагрузки. Одной из таких областей является юг Западной Сибири – зона функционирования Новосибирской, Майнской, Саяно-Шушенской и Богучанской ГЭС. Для этих ГЭС очевиден рост гидрометеорологической уязвимости, которую можно оценить по изменению основных гидрологических характеристик, используемых при проектировании ГЭС. В условиях изменения климата и переменной антропогенной нагрузки эти характеристики должны определяться с учётом априорной неоднородности и нестационарности геофизических процессов, определяющих пространственно-временную изменчивость водных ресурсов, используемых для производства электроэнергии. В ранее используемых СНиП и современных СП [15] используется менее гибкий подход, который изменения климата игнорирует, поскольку исследуемые гидрологические процессы считаются однородными и стационарными.

Таблица 1

Сводная таблица документирования расчётов, выполняемых в рамках анализа влияния климатических или антропогенных факторов на процесс формирования стока

№ п/п	Тип точки	Дата	Причина разладки
Ряд 1 (например, средний водный эквивалент снега на момент начала весеннего половодья)			
1	Начало ряда		—
2	Точка разладки 1		Климатическая
...
N-1	Точка разладки K		Антропогенная
N	Конец ряда		—
Ряд 2 (например, максимальный годовой расход воды в створе X)			
1	Начало ряда		—
2	Точка разладки 1		Не установлена
...

В настоящее время авторами данной статьи осуществляется автоматический мониторинг разладок гидрологических временных рядов, который служит основой для статистического прогнозирования поведения ряда после последней точки разладки. Он включает:

- расчёт среднего ожидаемого значения рассматриваемого ряда на момент времени T , выполняемый путём обычной (линейной) или нелинейной экстраполяции или методом главных компонент;
- расчёт второго и третьего центральных моментов остаточных отклонений (μ_{Δ}^2 и μ_{Δ}^3). При необходимости можно также вычислить коэффициенты вариации и асимметрии (C_V и C_S) [1-3, 5],
- построение ожидаемого распределения вероятности рассматриваемой гидрологической или метеорологической переменной, среднее значение, размах и асимметричность которого соответствует значениям этих статистик, рассчитанным во время выполнения предыдущих шагов. При необходимости это распределение может быть визуализировано. Спрогнозированные моментные характеристики также можно использовать для расчёта обеспеченности основных гидрологических характеристик, применяемых при проектировании плотин ГЭС и других ГТС [15, 16].

Предложенные принципы оценивания влияния антропогенных и климатических изменений на формирование речного стока следует рассматривать в качестве задела для будущих исследований, направленных на создание теории и методических основ расчёта критериев безопасности гидротехнических сооружений в условиях изменения климата, методик расчёта основных гидрологических характеристик и критериев безопасности для отдельных категорий ГТС (гидроэлектростанций, дамб, плотин и водохранилищ). Одной из таких работ является статистическое прогнозирование основных гидрологических характеристик, позволяющее оценить гидрометеорологические риски в условиях климатических изменений и переменной антропогенной нагрузки на речные водосборы.

Работа выполнена в рамках Федеральной Целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы» по теме «Разработка инновационных технологий мониторинга и прогнозирования гидрометеорологического режима внутренних водоёмов в целях повышения эффективности функционирования гидроэлектростанций» (контракт №16.515.11.5049 от 2 июня 2011 года).

Литература

1. *Владимиров А.М.* Гидрологические расчеты. – Л.: Гидрометеоздат, 1990. – 365 с.
2. Главные компоненты временных рядов: метод «Гусеница» / Под ред. Данилова Д.Л. и Жиглявского А.А. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 1997. – 307 с.
3. *Голяндина Н.Э.* Метод «Гусеница» – SSA: анализ временных рядов. Учебное пособие. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2004. – 76 с.
4. *Кузьмин В.А., Ванкевич Р.Е., Шеманаев К.В.* Оценивание увлажненности водосбора по данным дистанционного зондирования, наземных гидрометрических наблюдений и математического моделирования стока. // Ученые записки РГГМУ, 2011, № 22, с. 45-57.

5. Кузьмин В.А., Гаврилов И.С., Соколова Т.А., Тимофеев А.Ю. Расчет максимальных расходов весеннего половодья методом оптимизации интегрального поправочного коэффициента. // Ученые записки РГГМУ, 2010, № 14, с. 5-13.
6. Кузьмин В.А., Дикинис А.В. Комплексное использование данных дистанционного зондирования, наземных наблюдений и численных прогнозов погоды при автоматизированном прогнозировании стока. // Ученые записки РГГМУ, 2011, № 22, с. 16-27.
7. Кузьмин В.А., Заман А. Постобработка и корректировка прогнозов паводков, выпускаемых при помощи автоматизированных систем// // Метеорология и гидрология, 2009, № 8, с. 80-90.
8. Кузьмин В.А., Коротыгина У.Е., Макин И.С., Сергеенко С.Ю., Румянцев Д.Ю. Фоновое прогнозирование стока в режиме, близком к реальному времени. // Ученые записки РГГМУ, 2011, № 22, с. 38-44.
9. Кузьмин В.А. Краткосрочное прогнозирование катастрофических половодий и паводков. // Метеорология и гидрология, 2001, № 6, с. 89-95.
10. Кузьмин В.А. Отбор и параметризация прогностических моделей речного стока. // Метеорология и гидрология, 2001, № 3, с. 85-90.
11. Кузьмин В.А. Основные принципы автоматической калибровки многопараметрических моделей, используемых в оперативных системах прогнозирования дождевых паводков. // Метеорология и гидрология, 2009, № 6, с. 92-104.
12. Кузьмин В.А., Сурков А.Г., Шеманаев К.В. Принципы автоматической обработки данных в автоматизированных системах прогнозирования стока. // Ученые записки РГГМУ, 2011, № 22, с. 28-37.
13. Guide to Hydrological Practices, Volume I, Hydrology – From Measurement to Hydrological Information, WMO No. 168, Sixth edition, 2008.
14. Обзор Международной Организации по Стандартизации (International Organization for Standardization (ISO)) стандартов для метаданных с точки зрения ВМО: <http://www.wmo.int/pages/prog/www/WDM/reports/ET-IDM-2001.html>
15. Свод правил по проектированию и строительству 33-101-2003.
16. Федеральный закон РФ от 21.07.1997 г. № 117-ФЗ (ред. от 14.07.2008 г.) «О безопасности гидротехнических сооружений».
17. CATERPILLAR: <http://www.gistagroup.com/>
18. MATLAB: <http://www.mathworks.com/>