

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАКСИМАЛЬНОГО СТОКА К АНТРОПОГЕННОМУ ИЗМЕНЕНИЮ КЛИМАТА

В.А. Хаустов

Российский Государственный гидрометеорологический университет, 195196,
Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., д. 98 E-mail: vitaly.khaustov3@mail.ru
Сайт: <http://hva.rshu.ru/>

ВВЕДЕНИЕ

Методы расчета основных гидрологических характеристик для строительного и водохозяйственного проектирования, планирование и осуществление мероприятий по долгосрочному использованию водных ресурсов основаны на концепции стационарности многолетних колебаний стока. Однако имеющиеся в распоряжении гидрологов и климатологов данные, явно указывают на то, что имеют место долгопериодные изменения характеристик речного стока, осадков и температуры воздуха. Разработаны методики, в частности [4], исторической реконструкции характеристик стока. Данные измерений [2, 3] указывают на то, что возможны изменения климата антропогенного характера. Существуют разнообразные сценарии его изменения (как на потепление, так и на похолодание). В связи с этим возникает задача оценки чувствительности различных отраслей экономики к подобным изменениям.

В настоящее время при проектировании гидротехнических сооружений используются максимальные расходы воды заданной обеспеченности. Для створа проектируемого сооружения строят известными в гидрологии способами кривую обеспеченности, с которой снимаются максимальные расходы с вероятностями превышения, нормируемыми СНиПами. Завышение этого значения снижает экономическую эффективность сооружения, занижение – приводит к разрушению, материальному ущербу и человеческим жертвам. Однако такой подход возможен, если существуют многолетние ряды наблюдений за слоем стока весеннего половодья. В контексте рассматриваемой задачи использована модель, позволяющая строить прогнозные кривые обеспеченности, ориентируясь на гидрометеорологические параметры, заложенные в климатическом сценарии.

СТОХАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ РЕЧНОГО СТОКА

Как известно, для описания распределения рядов стока (в частности слой стока весеннего половодья) используют уравнение Пирсона

$$\frac{dp}{dQ} = \frac{Q - a}{b_0 + b_1Q + b_2Q^2} p,$$

где p – плотность вероятности; Q – слой стока; a, b_0, b_1, b_2 – коэффициенты, численные значения которых можно найти, решая обратную задачу для данного уравнения при известном распределении $p(Q)$.

В таком виде это уравнение не может быть использовано для прогностических целей, так как в нем не раскрыт физический смысл коэффициентов a, b_0, b_1, b_2 , которые подбираются формальным образом, чтобы решение лучше всего соответствовало эмпирической кривой. Этот недостаток можно устранить [5], если

речной бассейн рассматривать как формирующий фильтр и описывать динамическим уравнением первого порядка:

$$dQ/dt = cQ + N,$$

где $c = 1/k\tau$, k – коэффициент стока, τ – время релаксации; $N = \bar{X}/\tau$, \bar{X} – интенсивность осадков; t – время. Вводя белые шумы ($c = \bar{c} + \tilde{c}$, $N = \bar{N} + \tilde{N}$) с интенсивностями $G_{\tilde{c}}$, $G_{\tilde{N}}$, $G_{\tilde{c}\tilde{N}}$ и применяя известную в теории случайных процессов процедуру стохастического обобщения (при этом важное значение имеет тот факт, что исходное динамическое уравнение – первого порядка, а введенные шумы имеют нулевой радиус корреляции), приходим к описанию марковского случайного процесса формирования речного стока с помощью уравнения Фоккера – Планка – Колмогорова (ФПК):

$$\frac{\partial p(Q, t)}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial Q} [A(Q, t)p(Q, t)] + 0.5 \frac{\partial^2}{\partial Q^2} [B(Q, t)p(Q, t)],$$

где коэффициенты сноса ($A(Q, t)$) и диффузии ($B(Q, t)$) определяются выражениями

$$A = -(\bar{c} - 0,5G_{\tilde{c}})Q - 0,5G_{\tilde{c}\tilde{N}} + \bar{N},$$

$$B = G_{\tilde{c}}Q^2 - 2G_{\tilde{c}\tilde{N}}Q + G_{\tilde{N}}.$$

Технология применения этой модели для прогноза кривой плотности вероятности состоит из двух этапов. На первом этапе по известному решению (закартированных в СНиПах моментах распределения $p(Q)$) определяются численные значения параметров ($G_{\tilde{c}}$, $G_{\tilde{N}}$, $G_{\tilde{c}\tilde{N}}$). На втором этапе в коэффициентах сноса и диффузии меняют численные значения параметров, связанных с климатическим сценарием (прогнозные осадки \bar{X} , температура воздуха – через коэффициент стока k) и факторами подстилающей поверхности (также, в основном, через коэффициент стока k). Такую процедуру выполняют по всему заданному региону с требуемой дискретностью, производят численное решение уравнения и строят карту изолиний расчетных гидрологических характеристик (моментов), определяемых по решению $p(Q)$.

На начальном этапе работ выполнена оценка внутривременной связи в рядах слоя стока весеннего половодья для ЕТР. Рассчитаны и картированы коэффициенты автокорреляции со сдвижкой один год ($r_{(1)}$), дан анализ их значимости. Значительная часть рассматриваемых рядов имеет численные значения $r_{(1)}$ ниже средней квадратической ошибки их определения, т.е. процесс формирования стока весеннего половодья в выявленных регионах может оказаться не марковским. Данные выводы не противоречат целям исследования – поскольку существующие сценарии изменения климата соответствуют равновесной ситуации, то стохастический режим формирования стока будет статистически установившимся. В уравнении ФПК $\partial p/\partial Q \approx 0$ и оно переходит в уравнение Пирсона, которым рекомендуется описывать кривые распределения рядов всех видов стока, в том числе и максимального.

Далее выполнена апробация стохастической модели формирования максимального стока. Для этого ряды слоя стока весеннего половодья делились по специально

разработанной методике. Эта методика предполагала несколько вариантов разбиения (изменялось число членов ряда обеих половин), но фактическое деление выполнено при условии, что значение коэффициента Стьюдента (см. [6]) было максимальным. Это означает, что выполнено деление ряда с максимальным различием в средних значениях его половин (см. рисунок 1).

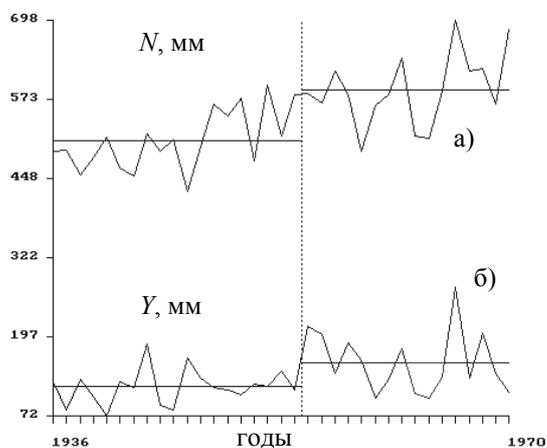


Рисунок 1. Хронологические графики суммы годовых осадков (а) и слоя стока весеннего половодья (б).

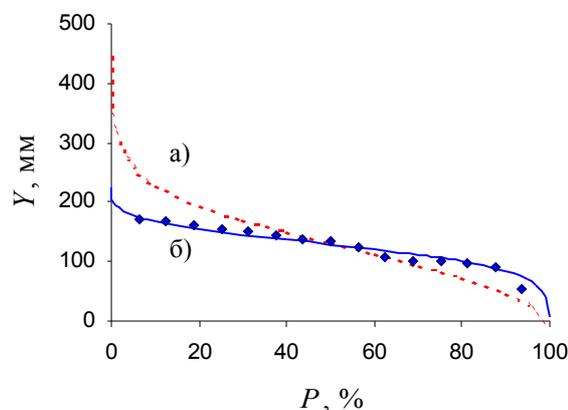


Рисунок 2. Фактическая (а) и прогнозная (б) кривые обеспеченности слоя стока весеннего половодья.

Для рассмотренных смежных периодов рассчитаны статистические параметры слоя стока весеннего половодья (\bar{Y} , C_v и C_s). Выполнена серия перекрестных прогнозов для двух вариантов: при постоянном коэффициенте максимального стока (k) и при фактическом ($k_{\text{факт}}$), допуская, что известно его значение на перспективу. Оценка прогнозов выполнена по критерию Колмогорова (см. [6]), т.е. для различных уровней значимости показано согласие фактической и прогнозной кривой обеспеченности (см. рисунок 2). Результаты говорят о том, что при данном критерии согласия коэффициент стока является значимым параметром модели для увеличения оправдываемости прогнозов. Однако для получения полной картины применимости данной методики прогнозирования необходимо использовать дополнительные критерии согласия, такие как χ^2 и $n\omega^2$.

Высокая степень оправдываемости прогноза параметров распределения слоя стока весеннего половодья позволила использовать стохастическую модель формирования максимального стока для оценки гидрологических последствий изменения климата для ЕТР на перспективу. Решая эту задачу, выполнили параметризацию модели в узлах расчетной сетки с шагом в 30 км для ЕТР.

В качестве внешнего воздействия в стохастической модели формирования максимального стока использовалась информация из климатических сценариев (многолетние нормы осадков). Был рассмотрен наиболее распространенный сценарий изменения климата, связанный с увеличением CO_2 в атмосфере. Метод, лежащий в основе моделирования антропогенного изменения климата, базируется на модели циркуляции атмосферы и океана (МЦОА). Для экономических регионов России получены относительные изменения осадков к 2020 и 2100 годам. К примеру, в Волго-Вятском районе относительное изменение осадков составят 1.12 к 2020 г. и 1.28 – к 2100 г.

Для рассматриваемой территории выполнены численные расчеты по модели ФПК учитывающие два варианта изменения климата. По этим данным построены прогнозные карты статистических параметров слоя стока весеннего половодья, а также его аномалий. На рисунке 3 представлены зоны аномалий слоя стока весеннего половодья и коэффициента вариации для сценариев климата к 2100 г.

При возможном увеличении нормы осадков к 2010 г. в среднем на 8 – 9 % норма стока также увеличится на 7 – 9 %, коэффициент вариации и асимметрии понизится на 2 – 7 % и 2 – 6 % соответственно. К 2100 году при увеличении нормы осадков на 18 – 21 % сток повысится на 16 – 20 %, коэффициенты вариации и асимметрии понизятся на 4 – 15 % и 5 – 12 % соответственно.

В результате выполненных исследований дана оценка изменчивости гидроклиматической ситуации базирующаяся на результатах измерений. Апробирована стохастическая модель формирования максимального стока. Построены электронные карты расчетных характеристик слоя стока весеннего половодья для современных климатических условий с использованием современных ГИС-технологий. По ним параметризирована стохастическая модель формирования максимального стока для ЕТР. Выполнено численное интегрирование уравнения ФПК для всех точек, используя данные наиболее вероятного сценария изменения климата.

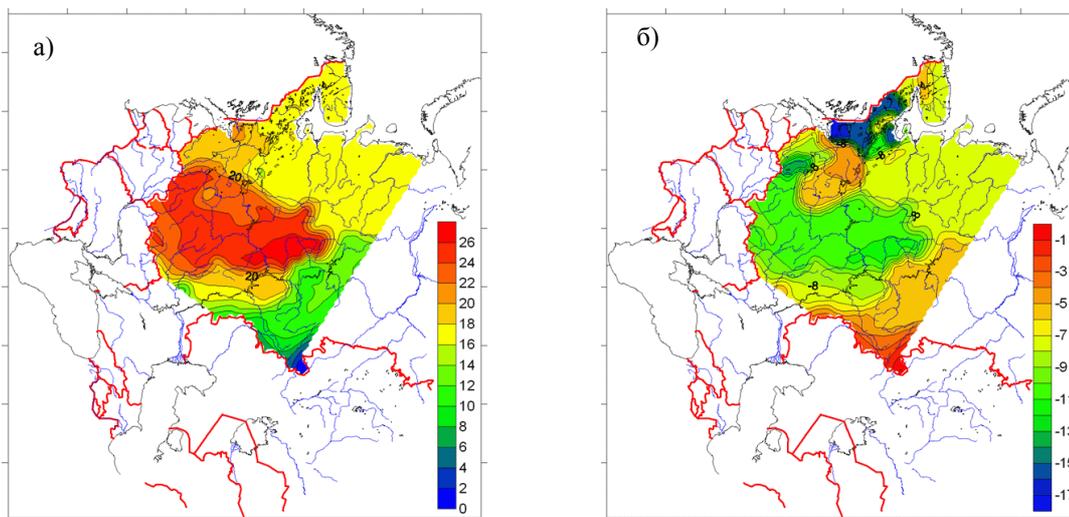


Рисунок 3. Аномалии (в %-ах) нормы слоя стока весеннего половодья (а) и коэффициента вариации (б) к 2100 г.

Построены карты расчетных характеристик максимального стока для новых климатических условий с использованием современных ГИС-технологий. Полученные в данной работе результаты позволяют кроме совершенствования самой методики построения карт аномалий максимального стока рек СНГ оценить возможные последствия изменения стока для экологии и отраслей национального хозяйства, использующих вероятностные характеристики слоя стока весеннего половодья.

В работе задача оценки чувствительности различных отраслей экономики к изменениям климата решается на примере гидротехнической отрасли. При

эксплуатации мостовых переходов наиболее ответственным периодом, когда подвергается испытанию устойчивость всех сооружений против воздействия речного потока, является период пропуска особенно высоких вод редко повторяющихся половодий или паводков. Нормы расчетной вероятности превышения устанавливаются технические условия на проектирование дорог и мостов в зависимости от их значения и капитальности сооружений.

ВОДООПАСНОСТЬ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

Помимо величины расчетных расходов условия эксплуатации сооружений определяются также коэффициентом вариации ряда максимальных расходов. Факторы, определяющие условия эксплуатации сооружений, в сумме характеризующие водоопасность отдельных районов, имеют географическое распределение. На основе анализа нормативных карт характеристик весеннего половодья и дождевых паводков, в работе [1] выделены районы различной водоопасности. Для районов, где расчетными являются максимальные расходы половодья, исходя из условий нормальной эксплуатации, выделены три зоны: малой водоопасности, расположенной к северу от изолинии $C_v = 0.35$; средней водоопасности – между изолиниями C_v , равными 0.35 и 0.9; большой водоопасности – южнее изолинии $C_v = 0.9$. Границы районов имеют в общем широтное направление.

Изменение климатической обстановки непосредственно скажется на условиях эксплуатации мостовых переходов. Изменения в гидрологическом режиме могут вызвать смещение границ зон различной водоопасности. На основании выполненных расчетов характеристик максимального стока построены современная и прогнозные карты зон водоопасности рассматриваемого региона. Вышеизложенное предполагает, что фактические распределения максимального стока обладают устойчивостью, по крайней мере, трех начальных моментов, без чего нельзя было бы картировать расчетные гидрологические характеристики.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Санкт-Петербурга (грант PD05-1.5-91).

ЛИТЕРАТУРА

1. Бегам А. Г., Алтуниев В. С., Цыпин В. Ш. Регулирование водных потоков при проектировании дорог. М.: Транспорт, 1977. 304 с.
2. Винников К. Я. Чувствительность климата. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 224с.
3. Изменения климата и их последствия. СПб.: Наука, 2002. 269с.
4. Коваленко В. В., Хаустов В. А. Опыт ретроспективной оценки гидрологического режима Русской равнины. Сборник "Моделирование и прогнозы гидрологических процессов". СПб.: изд. РГГМУ, 1999. С10-18с.
5. Коваленко В. В. Моделирование гидрологических процессов. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. 256 с.
6. Рождественский А. В., Чеботарев А. И. Статистические методы в гидрологии. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 424с.