

Е.В. Гайдукова

УСТОЙЧИВОСТЬ РЕШЕНИЯ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ МНОГОЛЕТНЕГО РЕЧНОГО СТОКА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ КЛИМАТА

E.V. Gaidukova

STABILITY OF THE SOLUTION MODEL OF RIVER FLOW FORMATION IN CLIMATE CHANGE

Рассматриваются возможности учета климатических сценариев и антропогенного воздействия на водосборы при оценке критерия устойчивости формирования многолетнего стока. Выполнены расчеты по некоторым водосборам Европейской территории России.

Ключевые слова: критерий устойчивости, антропогенная нагрузка, климатические сценарии, многолетний годовой сток.

The possibilities of accounting of climate scenarios and anthropogenic impacts on river basins were considered in the assessment of the stability criterion of river flow formation. Calculations were made on some catchments of the European territory of Russia.

Key words: stability criterion, anthropogenic pressure, climate scenarios, annual runoff.

Введение

При долгосрочной оценке последствий изменения климата широко используется уравнение Фоккера–Планка–Колмогорова (ФПК), точнее, аппроксимирующая его система уравнений для начальных моментов статистически стационарного режима формирования стока. До появления в гидрологии этой системы уравнений понятие «неустойчивость», в основном, встречалось в смысле неустойчивости эмпирических оценок начальных моментов из-за ограниченной продолжительности рядов наблюдений. В данной статье под этим понятием подразумевается степень устойчивости решения системы уравнений для моментов, выражаемая в численных значениях, так называемого, критерия устойчивости. Сделанные расчеты распределения критерия устойчивости по территории России для текущего климата показали наличие значительных территорий, неустойчивых по третьему и (в меньшей степени) по второму моментам [1, 2]. Это указывает на то, что существуют проблемы с правильной аппроксимацией эмпирических распределений кривыми из класса семейств распределений Пирсона; ситуация может ухудшиться при прогнозной оценке гидрологического режима по определенным климатическим сценариям.

Методика исследования

Для вычисления критерия устойчивости β используется формула (см. [1]), которая следует из того факта, что автокорреляционная функция в виде экспоненты является частным решением уравнения ФПК для марковских случайных процессов:

$$\beta = 2k \ln r + 2, \tag{1}$$

где k — коэффициент стока; r — коэффициент автокорреляции в рядах многолетнего стока при годовой сдвигке (лаге). Для того чтобы оценить устойчивость по критерию β в новых климатических условиях надо знать сценарные значения k и r .

Коэффициент стока связывается с параметрами, которые есть в климатических сценариях (нормами температуры воздуха \bar{T} и осадков \bar{X}), путем использования формулы Н.А. Багрова ($E = f(\bar{X}, E_0)$) (здесь E_0 — испаряемость) и Л. Тюрка ($E_0 = f(T)$)) [3]:

$$k = 1 - \text{th} \frac{300 + 25\bar{T} + 0,05\bar{T}^3}{\bar{X}}. \tag{2}$$

Другим параметром, от которого зависит β , является коэффициент автокорреляции r . Чтобы знать его значения в новых климатических условиях можно воспользоваться зависимостью $r(1) = f(\bar{q})$, где \bar{q} — норма модуля стока. На рис. 1 представлена зависимость, построенная по данным 520 станций, расположенных по всему Земному шару, имеющих продолжительные ряды наблюдений за годовым стоком (до 1990 г.) и замыкающих зональные площади водосборов.

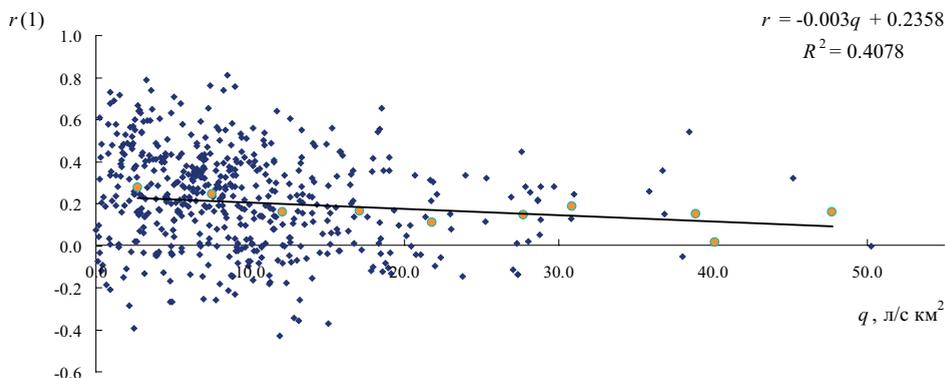


Рис. 1. Зависимость коэффициентов автокорреляции от модуля годового стока

Прогнозируемые и фактические вероятностные характеристики многолетнего стока зависят не только от климата, но и факторов подстилающей поверхности водосборов. Для исследования реакции речного стока на урбанизацию водосбора применялся

способ, предложенный Б.С. Устюжаниным [5], по которому замена природных ландшафтов урбанизованными приводит к изменению коэффициентов годового стока:

$$k = k_0 + \alpha\gamma, \tag{3}$$

где k — коэффициент поверхностного годового стока с учетом влияния всех урбанизованных территорий в определенной широтной зоне; k_0 — коэффициент стока в естественных условиях; α — параметр, зависящий от широты местности, который увеличивается с юга на север.

В работе [5] в текстовом формате приведены численные значения параметров из формулы (3); на рис. 2 они переведены в табличную и графическую формы для удобства при практическом использовании.

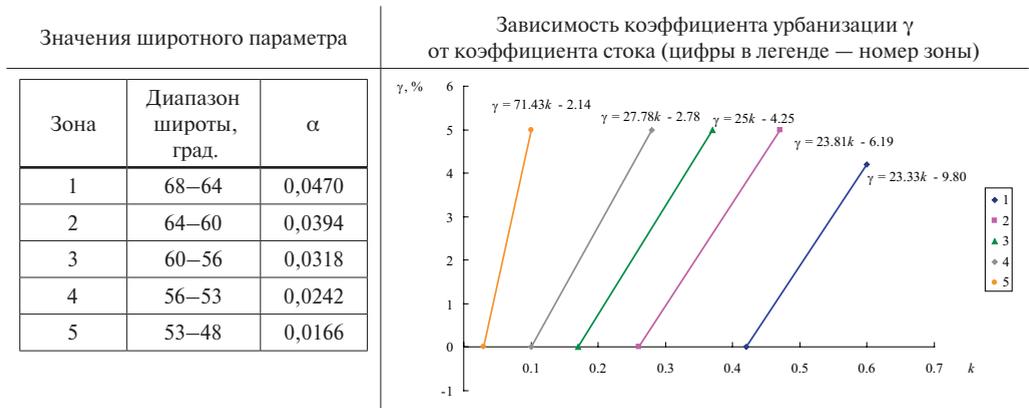


Рис. 2. Численные значения параметров из формулы Б.С. Устюжанина

Результаты исследования

Было выбрано пятнадцать репрезентативных речных бассейнов, исходя из широтной зональности, определенной в методике оценки чувствительности критерия устойчивости к изменениям антропогенных нагрузок. Расположение центров выбранных водосборов показано на рис. 3, информация по выбранным речным бассейнам представлена в таблице (в ней использованы следующие обозначения: F — площадь водосбора, h — норма слоя стока, X — норма осадков, C_v — коэффициент вариации стока, C_s — коэффициент асимметрии).

Прогнозные нормы температуры воздуха и осадков брались по трем климатическим сценариям Commit, SRA1B и SRA2 по модели HadCM3 [4]. По сценарию Commit скорость изменения концентрации парниковых газов остается на уровне 2000 г. По сценарию SRA1B происходит очень быстрое экономическое развитие стран и рост численности населения; максимум достигается в середине столетия и после этого снижается, так как развиваются новые и более эффективные технологии с альтернативными источниками энергии. По сценарию SRA2 происходит непрерывное увеличение

численности населения на Земле, локальный экономический рост, который приводит к медленному развитию новых технологий.

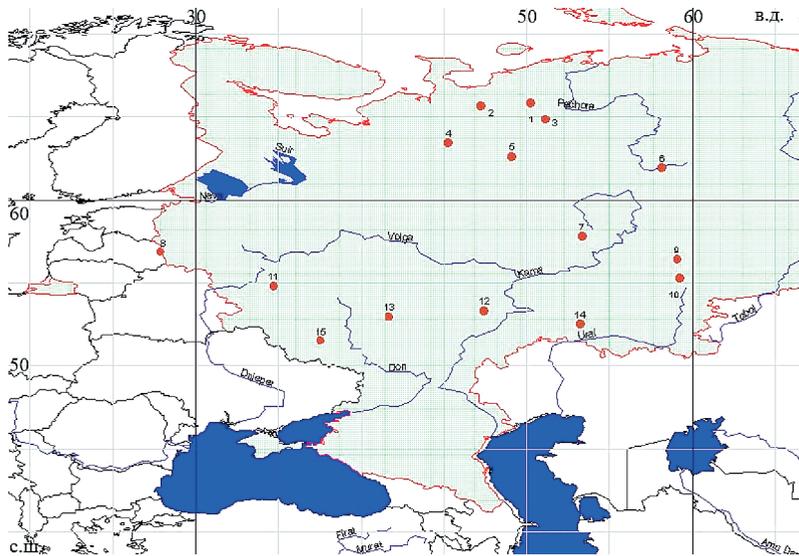


Рис. 3. Расположение репрезентативных бассейнов

Выбранные репрезентативные речные бассейны

№ на карте	Река	Станция	F , км ²	h , мм	X , мм	k	$r(1)$	β	C_v	C_s
1	Цильма	Трусово	20900	340	526	0,65	0,14	-0,56	0,17	-0,27
2	Пеза	Игумново	12000	324	559	0,58	0,16	-0,13	0,19	1,02
3	Пижма	Боровая	4890	298	552	0,54	0,28	0,61	0,17	-0,07
4	Пинега	Кулогоры	36700	314	604	0,52	0,20	0,30	0,23	-0,76
5	Яренга	Тохта	4930	276	600	0,46	0,48	1,33	0,31	-0,20
6	Печора	Якша	9620	493	605	0,81	0,06	-2,52	0,15	-0,09
7	Чепца	Глазов	9750	216	572	0,38	0,16	0,62	0,24	0,17
8	Утря	Большая Губа	2970	176	603	0,29	0,33	1,35	0,36	0,22
9	Уфа	Красноуфимск	14200	214	598	0,36	0,36	1,26	0,28	0,92
10	Ай	Лаклы	6440	231	566	0,41	0,19	0,63	0,30	0,39
11	Угра	Товарково	15300	181	693	0,26	0,23	1,23	0,26	0,59
12	Сызранка	Репьевка	4380	108	506	0,21	0,43	1,64	0,22	0,71
13	Цна	Княжево	13600	106	523	0,20	0,16	1,25	0,36	0,95
14	Самара	Елшанка	22800	64	423	0,15	0,49	1,78	0,46	1,02
15	Оскол	Старый Оскол	2060	100	563	0,18	0,22	1,47	0,29	0,17

Результаты оценки значения критерия устойчивости для репрезентативных бассейнов по различным климатическим сценариям (рис. 4) показывают, что по сценарию Commit прогнозные значения критерия устойчивости на 14 бассейнах из 15 станут меньше, на 4 бассейнах будет происходить потеря устойчивости по третьему моменту и только на одном бассейне — по второму моменту. Прогнозы по сценариям SRA1B и SRA2 мало отличаются друг от друга. Получено, что на трех бассейнах значения увеличатся. По сценарию SRA1B на двух бассейнах теряется устойчивость по третьему моменту, на пяти — по второму. По сценарию SRA2B отличие в большую сторону на один бассейн по третьему моменту. На трех бассейнах фактические значения β оказались отрицательными, что противоречит физическому смыслу β и связано, вероятно, с погрешностями исходных данных по этим бассейнам.

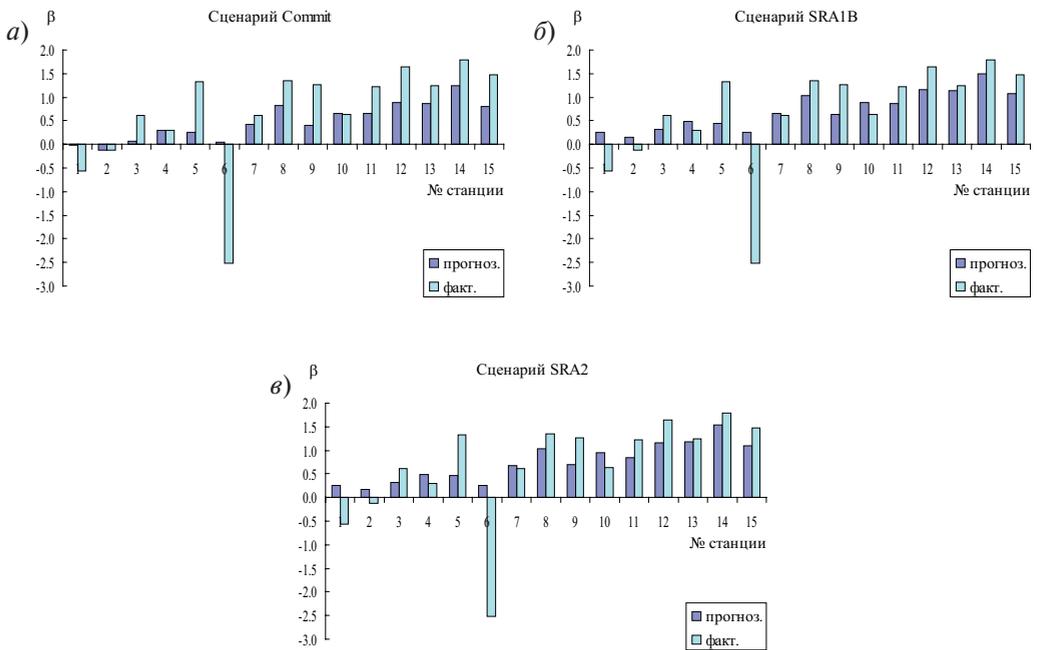


Рис. 4. Гистограммы сравнения прогнозных и фактических значений критерия устойчивости

На рис. 5 показано распределение прогнозных значений критерия устойчивости по Европейской территории России. Видно, что по климатическому сценарию Commit больше устойчивых территорий на севере. По всем трем сценариям степень неустойчивости увеличивается к югу.

С учетом формулы (3) были рассчитаны значения критерия устойчивости (т.е. с учетом степени урбанизации бассейнов) для современного климата и для трех климатических сценариев (рис. 6, 7). Прогноз критерия делался с учетом зависимости на рис. 1.

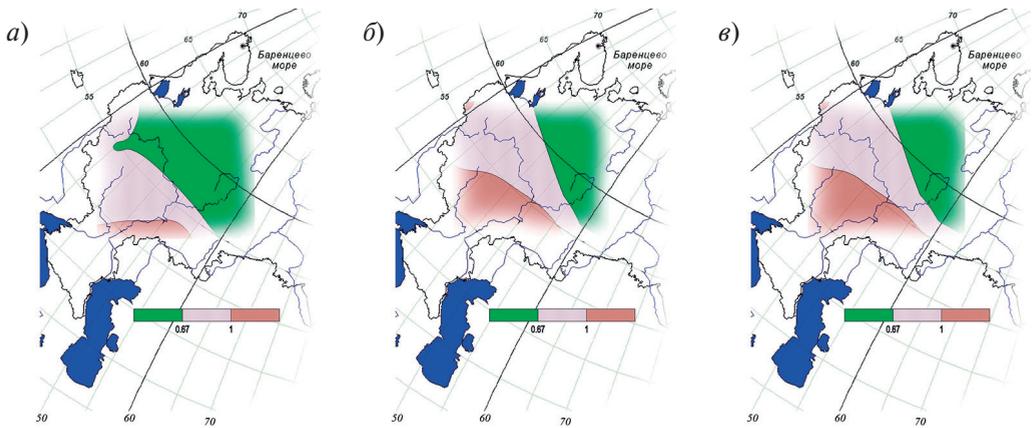


Рис. 5. Распределение прогнозных значений критерия устойчивости: а — по сценарию Commit; б — по сценарию A1B; в — по сценарию A2

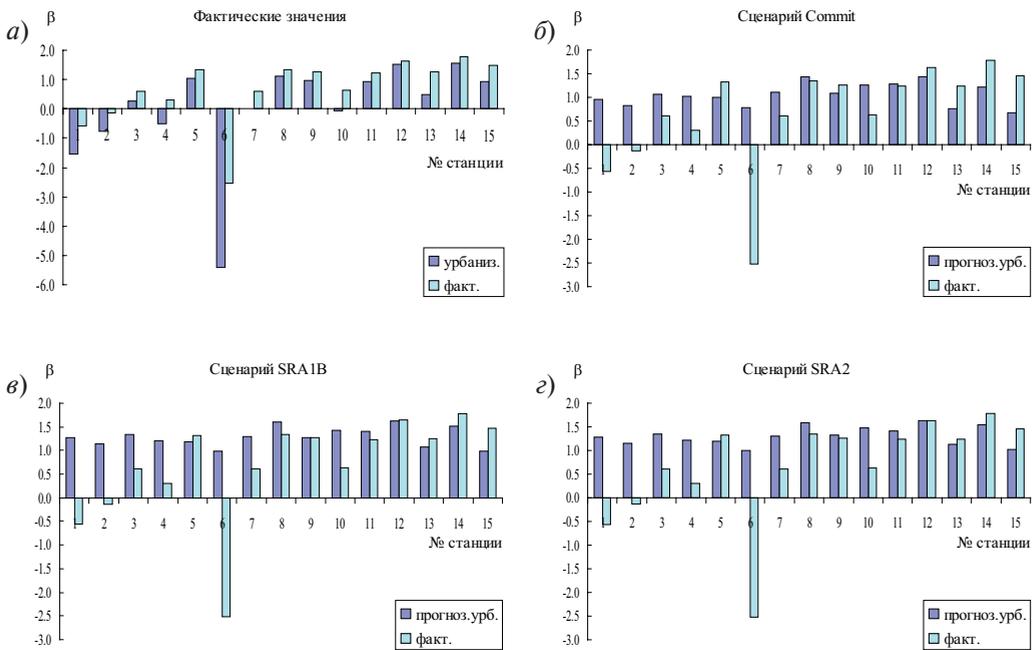


Рис. 6. Гистограммы сравнения прогнозных, с учетом антропогенных условий, и фактических значений критерия устойчивости

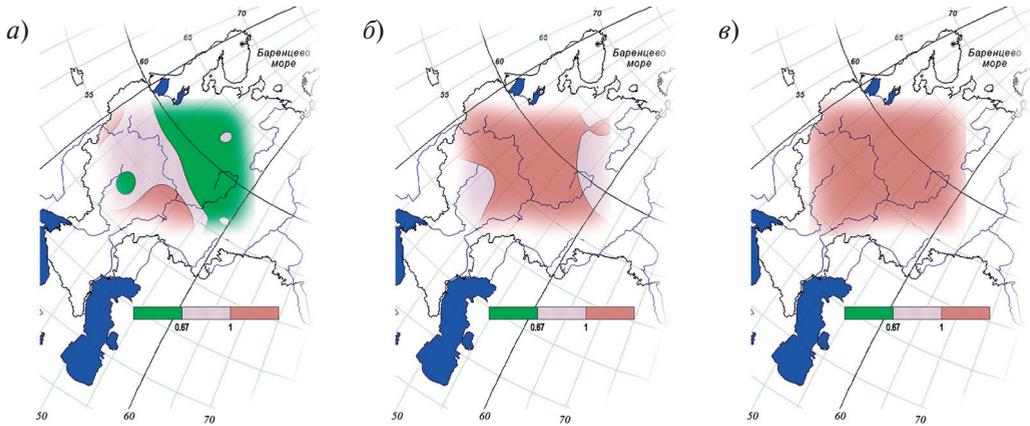


Рис. 7. Карты распределения значений критерия устойчивости с учетом антропогенных и климатических условий:
a — для современного климата; *b* — по сценарию Commit; *c* — по сценарию A1B и A2

Получено, что для современных условий учет урбанизированности бассейнов приводит к уменьшению критерия β , т.е. описание процесса формирования стока становится надежнее. При изменении климата число бассейнов с устойчивым формированием стока уменьшается, причем по сценариям A1B и A2 все рассматриваемые бассейны станут неустойчивыми по второму моменту. По сценарию Commit северные и южные бассейны станут неустойчивыми по третьему моменту, остальные бассейны также неустойчивы, но по второму моменту.

Выводы

На репрезентативных бассейнах предложена и реализована методика оценки чувствительности критерия устойчивости в условиях различных климатических и антропогенных сценариев. Выявлено, что учет антропогенной нагрузки на водосборе может привести к увеличению устойчивости, учет сценарных метеорологических характеристик приводит к потере устойчивости в будущем климате, совместный учет рассматриваемых факторов ведет к уменьшению устойчивости.

Исследования финансировались Министерством образования и науки РФ по теме: «Адаптация математических моделей формирования вероятностных характеристик многолетних видов речного стока к физико-географическим условиям России для целей обеспечения устойчивости их решений при моделировании и прогнозировании», № 1413, № государственной регистрации 01 2014 58678.

Литература

1. *Коваленко В.В.* Частично инфинитная гидрология. — СПб.: РГГМУ, 2007. — 230 с.
2. *Коваленко В.В., Гайдукова Е.В., Куаси М.К.* Устойчивость формирования вероятностного режима многолетнего речного стока в Арктическом регионе России. // Учёные записки РГГМУ, 2014, № 36, с. 7–12.
3. Методические рекомендации по оценке обеспеченных расходов проектируемых гидротехнических сооружений при неустановившемся климате. Под ред. В.В. Коваленко. — СПб.: РГГМУ, 2010. — 51 с.
4. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Том II. Последствия изменений климата. Под рук. С.М. Семенова. // Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). — М.: Росгидромет, 2008. — 291 с.
5. *Устюжанин Б.С.* Реакция речного стока на урбанизацию водосбора//Расчеты и прогнозы гидрологических характеристик. // Труды ЛГМИ, вып. 103. — Л.: изд. ЛПИ, 1989, с. 78–81.