

*В.А. Хаустов*

## **К МЕТОДИКЕ СЦЕНАРНЫХ ОЦЕНОК ВЕРОЯТНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СЛОЯ СТОКА ВЕСЕННЕГО ПОЛОВОДЬЯ**

*V.A. Khaustov*

### **ON A METHOD OF THE SPRING FLOOD MULTI-YEAR STATISTICS LONG-TERM ESTIMATION**

*Дана сценарная оценка изменений вероятностных характеристик слоя стока весеннего половодья для Европейской территории России. Построены карты аномалий стока. Рассмотрены климатические сценарии по модели HadCM3, предполагающие увеличение нормы осадков, повышение нормы и снижение коэффициента вариации слоя стока весеннего половодья в целом по региону. Наибольшая чувствительность вероятностных характеристик к изменениям климата выявлена на территории Кольского п-ва и Южного Урала, наименьшая – в Карелии.*

*Ключевые слова: изменения климата, сценарная оценка, вероятностные характеристики, слой стока весеннего половодья, аномалии.*

*The long-term assessment for changes in multi-year spring flood statistic have been presented for European part of Russian Federation. The spring flood statistic anomalies maps are submitted and shown. The results of the HadCM3 model for climate scenarios with increasing of average annual precipitation are used for long-time assessment of spring flood multi-year statistic. The average increasing and the variations coefficient decreasing for spring flood are expected for the whole European part of Russia. The most significant changes of multiyear statistics have been identified for Kola Peninsula and Southern Urals. The minimal changes in multiyear statistics of spring flood have been obtained for Karelia region.*

*Key word: climate change, long-term assesment, multi-year statistic, runoff of spring flood, anomalies.*

#### ***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 [10]. Однако имеющиеся в распоряжении гидрологов и климатологов данные явно указывают на то, что имеют место долгопериодные изменения характеристик речного стока, осадков и температуры воздуха [9].

Оценка влияния антропогенных изменений климата на гидрологический режим и водные ресурсы дана в сборнике [6]. Там указано, что в результате комплексного статистического анализа многолетних колебаний стока установлено, что начиная со второй половины 70-х гг. XX в. на Европейской территории России происходят изменения во внутригодовом изменении стока большинства рек, которые не наблюдались

ранее. К примеру, в бассейнах рек Волги, Дона и Днепра увеличение меженного стока за период с 1980 по 2000 г. достигало 20–40 % от нормы, а для некоторых районов (северная часть бассейна рек Волга, бассейна Оки) даже 50–70 %. При этом на всей рассматриваемой территории произошло увеличение годового стока рек, в то время как сток весеннего половодья по большинству рек снизился. Таким образом, увеличение водности рассматриваемых рек и наблюдающаяся длительная многоводная фаза обусловлены ростом меженного стока. Анализ данных наблюдений за последние 100 лет позволил прийти к выводу о том, что такая ситуация является необычной, так как ранее все значительные маловодные и многоводные фазы определялись прежде всего величиной стока весеннего половодья.

Существуют разнообразные сценарии изменения климата (как на потепление, так и на похолодание). Информация по ним и прогнозные метеорологические характеристики опубликованы в открытом доступе на официальном сайте Центра распространения данных (DCC) межправительственной группы по изменению климата (IPCC), как указано в методических рекомендациях [7]. В связи с этим возникает задача оценки чувствительности различных отраслей экономики к подобным изменениям, использующих вероятностные характеристики слоя стока весеннего половодья.

В настоящее время при проектировании гидротехнических сооружений используются максимальные расходы воды заданной обеспеченности. Для створа проектируемого сооружения строят 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 максимальными расходами воды. В контексте рассматриваемой задачи необходимо иметь модель, позволяющую строить прогнозные кривые обеспеченности, ориентируясь на гидрометеорологические параметры, заложенные в климатическом сценарии.

При наличии климатических сценариев для оценки возможных изменений водных ресурсов и водного режима рек используются различные методические подходы. Зависимость между климатическими переменными и стоком лежит в основе фундаментального в гидрологии уравнения водного баланса. Для годовых средних многие авторы эмпирически (методом регрессии) получали зависимости стока от осадков и испарения. Подобные графики были сделаны М.И. Будыко [3]. Он объединил в комплексном методе два основных балансовых уравнения — тепла и влаги и две эмпирические зависимости для определения стока и испарения с поверхности суши. В ГГИ разработана воднобалансовая модель с декадным расчетным интервалом времени [5], позволяющая прогнозировать время прохождения пика половодья и максимальный месячный расход воды.

Основных потребителей гидрологической информации интересуют статистически обеспеченные значения расчетных гидрологических характеристик на перспективу. Поэтому в работе, при всем многообразии методик прогнозирования максимального стока, использована стохастическая модель максимального стока, объединяющая необходимые и случайные факторы его формирования и допускающая решение в виде кривой обеспеченности.

### *Методика сценарной оценки максимального стока*

С конца 80-х гг. прошлого века на кафедре гидрофизики и гидропрогнозов РГГМУ начали широко применяться стохастические дифференциальные уравнения для моделирования и прогнозирования гидрологического режима, формирующегося в рамках простых марковских процессов. Наиболее широко кафедрой освоена модель для одномерной условной плотности вероятности, которая приводит (при определенных допущениях) к уравнению Фоккера-Планка-Колмогорова (ФПК). Краткое изложение эволюционной модели формирования многолетнего речного стока дано в методических рекомендациях [7], более полное – в учебнике [8]. В них также приведены результаты апробации модели для всех видов стока, кроме максимального дождевого происхождения. Установлено, что эффективность использования ее для максимального стока хуже чем для годового, но в 70 % случаев на 5–10 %-ном уровне значимости гарантирует получение вполне приемлемых результатов.

Технология применения этой модели для сценарной оценки изменения кривой плотности вероятности состоит из двух этапов. На первом этапе определяются численные значения параметров по известному решению – закартированным в Атласе [2] моментам распределения плотности вероятности  $p(Y)$  (среднемультилетнему слою стока весеннего половодья  $\bar{Y}$ , коэффициенту вариации и соотношению коэффициентов асимметрии и вариации  $C_s/C_v$ ) и Атласе [1] годовой сумме осадков. Выбор периода осреднения закартированных характеристик (до середины 80-х гг. прошлого столетия) не случаен. Он подразумевает отсутствие существенных антропогенных нагрузок на сток и атмосферу, а также значимых трендов в рядах наблюдений за их характеристиками в нашем историческом прошлом.

На втором этапе в коэффициентах сноса и диффузии меняют численные значения параметров, связанных с климатическим сценарием (прогнозные осадки  $\dot{X}$ , температура воздуха – через коэффициент стока  $k$ ) и факторами подстилающей поверхности (также, в основном, через  $k$ ). Такую процедуру выполняют по всему заданному региону с требуемой дискретностью, производят численное решение уравнения ФПК и строят карту изолиний расчетных гидрологических характеристик (моментов), определяемых по решению  $p(Q)$ .

В данной статье принят ряд допущений. Принимается гипотеза квазистационарности формирования речного стока и годовых осадков. Учитывается в модели лишь аддитивное внешнее воздействие ( $\dot{X}$ ) – сценарная климатическая характеристика (норма годовых осадков). Изменения приземной температуры и факторы подстилающей поверхности, вводимые в модель мультипликативно (например через  $k$ , входящий в параметр  $c$ ) на данном этапе работ приходится игнорировать. Данное упрощение связано с условностью понятия коэффициента максимального стока из-за сложности выделения стокообразующих осадков.

Согласно рекомендациям [7] система дифференциальных уравнений решается для двух начальных моментов распределения, а соответствующие параметры модели принимаются постоянными и для периода параметризации, и для сценарного. Соотношение  $C_s/C_v$  также остается неизменным при сценарной оценке стока.

Регион исследования включает в себя Кольский п-ов и Карелию, Северный край ограничен Северным полярным кругом, на востоке – долготой 58°, на юге – широтой 52°, на западе – государственной границей (на рис. 1 выделен темным цветом).

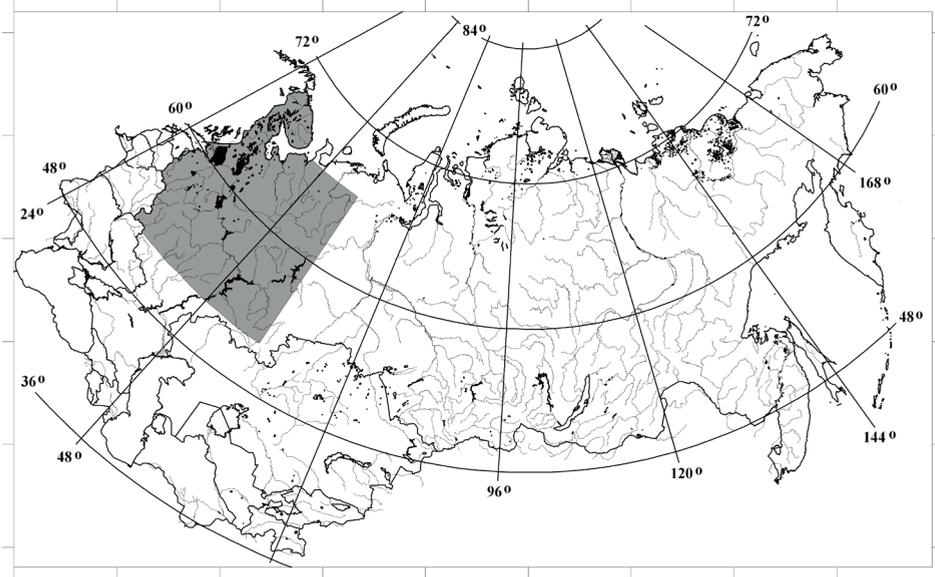


Рис. 1. Регион исследования.

Для решения поставленной задачи на первом этапе формируется база данных вероятностных характеристик слоя стока весеннего половодья и нормы годовой суммы осадков. Выполняется перевод «бумажных» карт гидроклиматических параметров в электронный вид. Изолинии соответствующей характеристики «оцифровываются» средствами ГИС и результаты сохраняются в общем файле в формате: координаты точек, численное значение соответствующей изолинии. Далее выполняется интерполяция значений характеристик в узлах заданной сетки. В работе ее шаг принят 50 км. На рис. 2 приведен пример распределения точек слоя стока половодья по региону соответствующего расположению изолиний на исходной карте (а), новые изолинии и узлы расчетной сетки с шагом 50 км (б).

В соответствии с выводами статьи [4] об определении климатической сценарной модели, характеризующей усредненные условия формирования максимального стока, рассматриваются четыре сценария изменения климата: 1) *COMMIT*, 2) *A1B*, 3) *A2* и 4) *B1*, реализованных по модели *HadCM3*. Наибольшие отрицательные отклонения нормы осадков к периоду 2040–2069 гг. ожидаются по первому, по которому концентрация парниковых газов остается на уровне 2000 г. По алгоритму, изложенному в рекомендациях [7], выполняется извлечение из архива сценарных годовых осадков и расчет их значений в узлах заданной сетки.

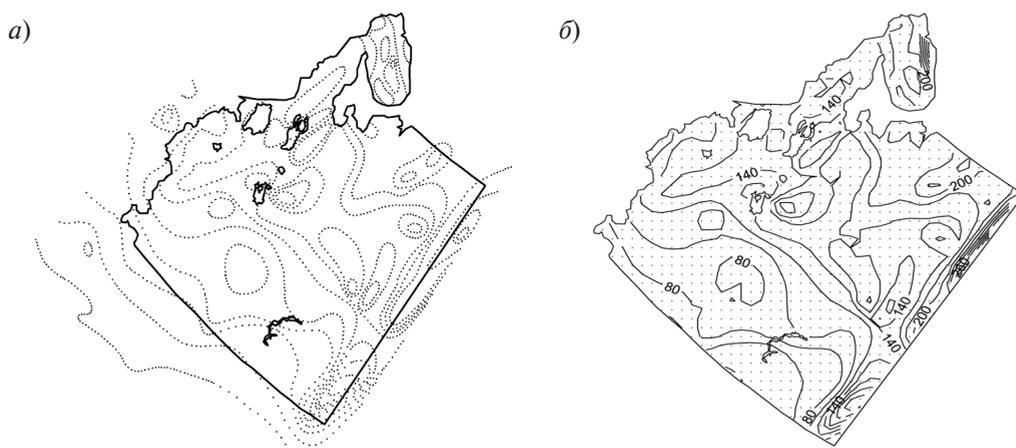


Рис. 2. Распределение точек слоя стока половодья по региону, соответствующее расположению изолиний на исходной карте (а), новые изолинии и узлы расчетной сетки с шагом 50 км (б).

После построения электронных карт гидроклиматических характеристик выполняется приведение их численных значений к единой координатной сетке по специально разработанной методике. В основе этой методики лежит подбор координат близлежащих узлов различных карт. Форма результатов обобщения исходной базы данных приводится в табл. 1. В качестве примера результатов расчета по модели ФПК в табл. 2 приводятся численные значения параметров для 10-й точки. При задании шага 50 км на рассматриваемой территории располагается 1037 узлов расчетной сетки.

Сценарной оценкой чувствительности параметров распределения слоя стока весеннего половодья к изменению климата (по *СОММТ*) являются карты распределения аномалий (в %) слоя стока весеннего половодья и коэффициента вариации (рис. 3), абсолютные и относительные изменения гидрометеорологических характеристик в табл. 3. В рамках указанных выше допущений о неизменности параметров модели для региона в целом ожидается уменьшение осадков и слоя стока половодья на 13 %, увеличение коэффициента вариации на 16 %.

В соответствии с указанным климатическим сценарием на северном побережье Кольского п-ва и Южном Урале выделяется снижение стока на 25–36 % и повышение  $C_v$  на 35–56 %. В Карелии наблюдается обратная тенденция – увеличение стока на 8 % и снижение  $C_v$  на 8 %.

Примером визуализации зависимости абсолютных и относительных изменений коэффициента вариации и годовых осадков является рис. 4. Изменчивость абсолютных значений (рис. 4а) имеет тесную связь лишь в области малых значений и в целом подчиняется географическим особенностям данного региона. Относительные изменения имеют однозначную криволинейную зависимость, вытекающую из численной схемы решения данной задачи (рис. 4б).

Таблица 1

Исходная база гидрометеорологических данных и климатические сценарии

№	Параметры стока (с карты)			$\dot{X}$ , мм	$k$	Сценарий $\dot{X}$ к периоду 2040–2069 гг.			
	$\bar{Y}$ , мм	$C_v$	$C_s/C_v$			1	2	3	4
1	38,8	0,72	2	527	0,07	431	435	421	431
2	39,5	0,82	2	494	0,08	412	416	399	409
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
10	45,9	0,63	2	554	0,08	464	471	450	465
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
1037	350	0,21	2	751	0,47	608	697	680	681
Среднее:	180	0,49	2	626	0,26	492	521	514	513

Таблица 2

Сценарная оценка (по СОММИТ) вероятностных характеристик стока весеннего половодья на примере 10-й расчетной точки

№	Исходные данные (карты)					Параметризация				
	$\bar{Y}$ , мм	$C_v$	$C_s/C_v$	$\dot{X}$ , мм	$C_s$	$\bar{c}$	$K$	$m_1^*$	$m_2^*$	$G_{\bar{N}}$
10	45,9	0,63	2	554	1.25	12,1	0,08	45,9	2934	19917
№	Сценарная оценка на период 2040–2069 г.							Изменения в %		
	$\dot{X}_{\text{сц}}$ , мм	$k$	$v$	$\bar{Y}_{\text{сц}}$ , мм	$m_1$	$m_2$	$C_v$	$C_s$	$\dot{X}$	$\bar{Y}$
10	464	0.08	12,1	38,4	2300	0,75	1,50	-16	-16	20

\*  $m_1$  и  $m_2$  – первый и второй начальные моменты распределения соответственно.

Таблица 3

Сценарная оценка изменений осадков и параметров стока весеннего половодья

Характеристика	$\dot{X}$		$\bar{Y}$		$C_v$	
	в мм	в %	в мм	в %		в %
минимальное	-289	-36	-95	-36	-0,02	-8
максимальное	49	8	12	8	0,28	56
среднее	-95	-13	-19	-13	0,06	16

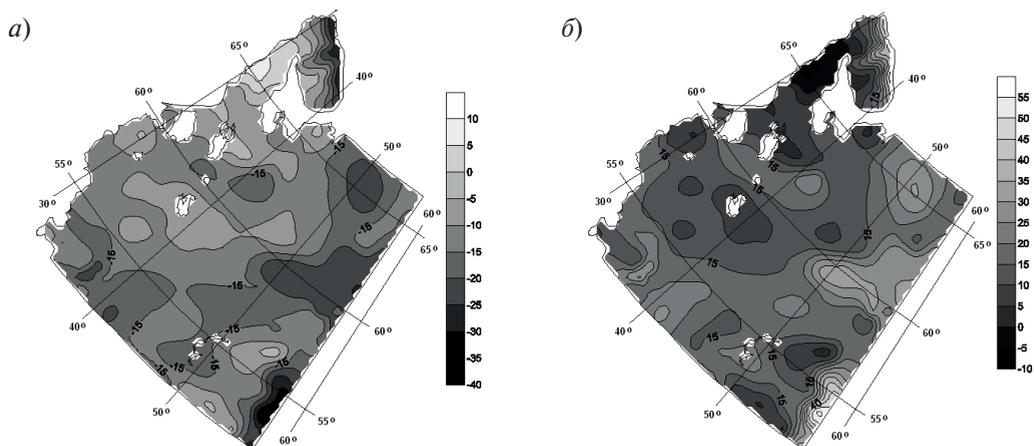


Рис. 3. Карты аномалий (в %) слоя стока весеннего половодья и годовых осадков (а) и коэффициента вариации (б) по сценарию COMMIT.

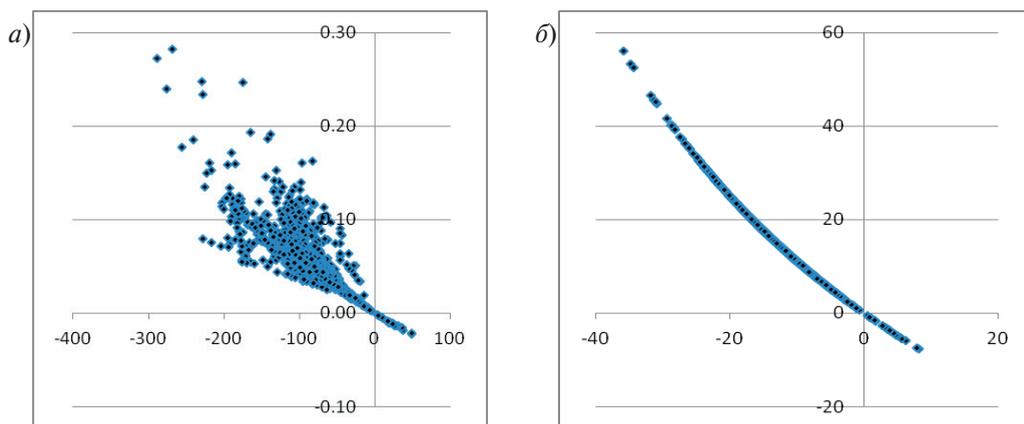


Рис. 4. Отношение абсолютных (а) и относительных (б) изменений коэффициента вариации к годовым осадкам.

**Выводы**

На основе гидрометеорологической базы данных, полученной при «оцифровке» карт атласов и дополненной климатическими сценариями, выполнена параметризация стохастической модели формирования стока. Полученные сценарные оценки (закартированные изменения параметров распределения слоя стока весеннего половодья на перспективу) имеют практическое значение при планировании комплексного использования водных ресурсов. Рассматривая сценарии, предполагающие увеличение нормы

осадков, следует ожидать повышение нормы и снижение коэффициента вариации слоя стока весеннего половодья в целом по региону. Наибольшая чувствительность вероятностных характеристик к изменениям климата выявлена на территории Кольского п-ва и Южного Урала, наименьшая – в Карелии.

Исследования финансировались Министерством образования и науки РФ (проект № 5.3400.2011, 14.В37.21.0678).

### Литература

1. Атлас мирового водного баланса. Приложение к монографии «Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли». – М. Л.: Гидрометеиздат, 1974, карта 7.
2. Атлас расчетных гидрологических карт и номограмм (Приложение 1 к «Пособию по определению расчетных гидрологических характеристик»). – Л.: Гидрометеиздат, 1986, листы 6, 8 и 9.
3. Будико М.И. Глобальная экология. – М.: Мысль, 1977. – 328 с.
4. Гайдукова Е.В. Определение усредненной климатической сценарной модели для долгосрочной оценки характеристик многолетнего речного стока. // Ученые записки РГГМУ, 2012, № 24, с. 18–25.
5. Георгиевский В.Ю., Ежов А.В., Шалыгин А.Л. и др. Оценка влияния возможных изменений климата на гидрологический режим и водные ресурсы рек бывшего СССР. // Метеорология и гидрология, 1996, № 11, с. 89–99.
6. Изменения климата и их последствия. – СПб.: Наука, 2002, с. 152–163.
7. Коваленко В.В., Викторова Н.В., Гайдукова Е.В., Громова М.Н., Хаустов В.А., Шевнина Е.В. Методические рекомендации по оценке обеспеченных расходов проектируемых гидротехнических сооружений при неустановившемся климате. / Под ред. В.В. Коваленко. – СПб.: РГГМУ, 2010. – 50 с.
8. Коваленко В.В., Викторова Н.В., Гайдукова Е.В. Моделирование гидрологических процессов. Изд. 2-е исправ. и доп. Учебник. – СПб.: РГГМУ, 2006. – 559 с.
9. Современные глобальные изменения природной среды. В 2-х томах. Т.1. – М.: Научный мир, 2006, с. 88–438.
10. СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. / Госстрой России. – М.: ФГУП ЦПП, 2004.