

*Е.В. Шевнина*

**ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ МОДЕЛИ  
ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА ВЕСЕННЕГО ПОЛОВОДЬЯ  
НА ТЕРРИТОРИИ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ**

*E.V. Shevnina*

**RESULTS OF SPRING FLOOD FORMATION  
MODEL CALIBRATION FOR RUSSIAN ARCTIC**

*Проведен сбор и анализ ретроспективной гидрометеорологической информации в пределах водно-ресурсной границы Российской Арктики, который позволил выделить циклы водности максимального стока весеннего половодья, для параметризации стохастической модели. Получены оценки ретроспективных вероятностных прогнозов максимального стока с использованием критериев Колмогорова и  $\chi^2$ .*

*Ключевые слова: стохастическая модель формирования максимального стока весеннего половодья, параметризация, изменение климата, Российская Арктика.*

*The historical hydrometeorological data within the water resource boundary of the Russian Arctic has been collected and analyzed. The multiyear water cycles of spring flood maximum flow have been found for parameterization of stochastic model. The retrospective probability forecast of maximum spring flow has been obtained using  $\chi^2$  and Kolmogorov criteria.*

*Key words: stochastic model of maximal spring flow, parameterization of model, climate change, Russian Arctic.*

**Введение**

Для расчета значений максимального стока малых обеспеченностей применяются различные математические модели. Чаще всего используется модель в виде уравнения Пирсона, которая является частным случаем уравнения Фоккера–Планка–Колмогорова для условий стационарного режима. Решением уравнения Пирсона являются семейство кривых Пирсона, которые в практике гидрологических расчетов аппроксимируют тремя начальными моментами распределения. Для решения прогностической задачи влияния климатических изменений на статистические характеристики максимального стока также используется уравнение Пирсона, записанное в виде системы уравнений для начальных моментов вероятностных распределений [2]. Такая прогностическая модель формирования стока (в том числе и слоя стока весеннего половодья) включает четыре параметра, численные значения которых определяются по данным ретроспективных наблюдений. При этом при прогнозе часть параметров модели, связанных с интенсивностью случайной составляющей климатических и бассейновых флуктуаций, оставляют неизменными.

Параметризация модели проводится на основе материалов наблюдений на гидрологических постах, где имеются выраженные циклы водности, выделяемые согласно существенности различий в выборочных оценках начальных мо-

ментов распределений по критериям Стьюдента, Фишера и Колмогорова–Смирнова. Циклы водности являются аналогом изменений статистических моментов вероятностных распределений водного стока вследствие флуктуаций внешнего воздействия (климатических характеристик). Численные значения параметров модели используются для оценки долгосрочных изменений статистических характеристик максимального стока на основе сценариев изменения климата (см., например, [14]). Оценка прогнозов на основе циклов водности является характеристикой достоверности долгосрочной оценки стока в будущем климате.

Целью работы является получение оценки прогнозов статистических моментов слоя стока весеннего половодья, основанной на модели формирования стока в виде уравнения моментов при условии неизменности части ее параметров. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Сбор и анализ гидрометеорологической информации в пределах водно-ресурсной границы Российской Арктики.

2. Выбор репрезентативных водосборов, где в многолетнем режиме стока весеннего половодья наблюдались циклы водности.

3. Определение численных значений параметров модели формирования стока весеннего половодья на территории Российской Арктики на основе данных ретроспективных наблюдений.

4. Оценка поверочных прогнозов первых трех начальных моментов вероятностных распределений, полученных для циклов водности.

Достижение поставленной цели позволит сделать вывод о качестве методики долгосрочной оценки статистических характеристик стока весеннего половодья, основанной на стохастической модели формирования стока в виде уравнения моментов при условии неизменности части ее параметров. По результатам работы будет решен вопрос о необходимости учета изменений параметров модели, связанных с интенсивностью случайной составляющей климатических и бассейновых флуктуаций, для улучшения результатов прогнозирования.

### **Исходные данные и методика исследования**

Объектом исследования является территория, ограниченная водно-ресурсной экологической границей Российской Арктики [1].

Для решения задачи выделения циклов водности использовались данные за стоком весеннего половодья на 60 гидрологических постах, опубликованные в изданиях Государственного Водного Кадастра (ГВК) «Основные гидрологические характеристики» и «Многолетние данные о ресурсах поверхностных вод» за период с начала наблюдений по 1980 г. Кроме того, получены данные о слое стока весеннего половодья за период 1981–2008 гг., рассчитанные на основе ежедневных расходов воды за период апрель–сентябрь. Данные о ежедневных расходах на 37 гидрологических пунктах опубликованы в изданиях ГВК («Гидрологический ежегодник»). Расчет слоя стока весеннего половодья проводился с использованием требований [5].

Ряды многолетних характеристик проверены на стационарность режима формирования стока весеннего половодья согласно рекомендациям [6, 8] с использованием критериев Стьюдента, Фишера и Колмогорова–Смирнова. Из дальнейшего рассмотрения исключены ряды, где в последние десятилетия наблюдаются статистически значимые тренды начальных моментов вероятностных распределений.

Выделение циклов водности проводилось на основе методики, описанной в работе [6]. Алгоритм выделения циклов водности представлен на рис. 1. Исходный ряд разбивался на две части (А-А'), для которых определялись нормы стока весеннего половодья и оценивалась однородность ряда по критерию Стьюдента. Расчет производился со сдвижкой 1 год до достижения правой границы (В-В'). Минимальный объем выборки составил 15 лет. Достижение критерия Стьюдента критического значения на 10 %-ном уровне значимости считалось границей, разделяющей циклы водности (Б-Б').

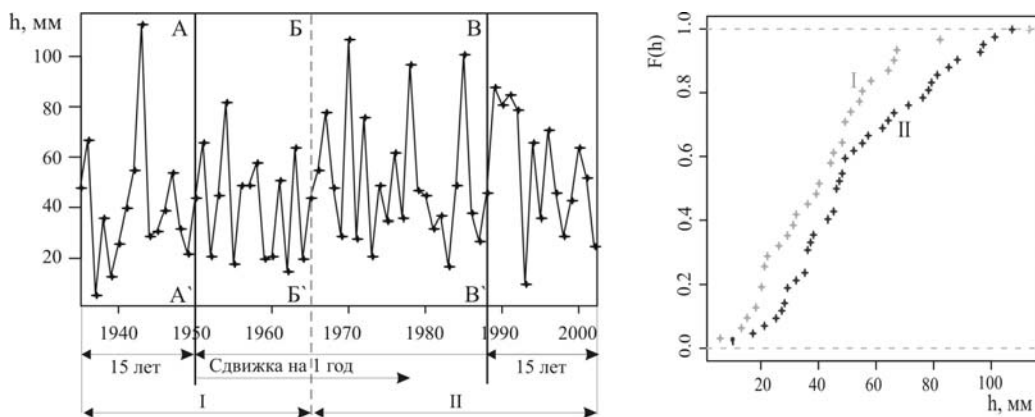


Рис. 1. Алгоритм выделения циклов водности (слева) и эмпирической распределений накопленных вероятностей слоя стока весеннего половодья для периодов 1935–1965 гг. (I) и 1966–2002 гг. (II) (справа) (р. Яна – Верхоянск)

Для оценки нормы годовых осадков, которые входят в качестве внешнего воздействия в модель формирования стока весеннего половодья, собраны данные наблюдений на 33 метеостанциях, расположенных в бассейнах исследуемых рек. При наличии пропусков в рядах годовых сумм осадков использовались приемы восстановления данных на основе множественной парной корреляции с привлечением данных наблюдений соседних метеостанций (14 станций). Источники опубликованных данных о годовых суммах осадков представлены в публикациях [9, 12, 13]. Для каждого водосбора реки рассчитаны нормы годовых осадков для выбранных периодов, характеризующих циклы водности.

В общем случае решение задачи идентификации параметров стохастической модели формирования стока описано в [2]. В настоящей работе применялся алгоритм параметризации модели, согласно [4]. При этом параметры модели,

связанные с изменением интенсивности случайной составляющей климатических и бассейновых флуктуаций, не менялись. Определение моментов теоретических распределений, аппроксимирующих эмпирические данные, осуществлялось методом L-моментов в рамках кривых Пирсона III типа [15].

Алгоритм оценки численных значений параметров модели следующий: для одного из периодов водности оценивались численные значения параметров модели, а по другому периоду производились поверочные прогнозы начальных моментов распределений. Прогнозные кривые обеспеченности сравнивались с эмпирическими. Их соответствие оценивалось по критериям согласия Колмогорова и  $\chi^2$  [2, 3].

### **Результаты и их обсуждение**

Анализ многолетних рядов слоя стока весеннего половодья за период с начала наблюдений по 2008 г. показал, что на 18 выбранных водосборах наблюдаются статистически значимые тренды начальных моментов вероятностных распределений слоя стока весеннего половодья [11]. Поэтому бассейны этих рек далее были исключены из дальнейшего рассмотрения.

Многолетние ряды слоя стока весеннего половодья на 76 гидрологических постах использовались для решения задачи выделения циклов водности. При этом, удлинённых рядов (с начала наблюдений до 2002 г.) составило 19, а коротких (с начала наблюдений по 1980 г.) – 57. Циклы водности, определённые как статистически значимые на 10 %-ном уровне значимости расхождения нормы стока, наблюдались в 47 % удлинённых рядов и в 25 % случаях для рядов с данными до 1980 г. Общее число рядов, где наблюдались циклы водности, составило 23, что составляет 30 % от общего числа.

Для каждого водосбора получены нормы годовых осадков по данным репрезентативных метеостанций, соответствующие периодам водности. Оценки нормы слоя стока весеннего половодья, продолжительность периодов водности и нормы осадков репрезентативных метеостанций представлены в табл. 1.

Анализ полученных результатов показал, что на 13 гидрологических постах (51%) наблюдалось увеличение стока, т.е. маловодная фаза первого периода цикла водности сменялась многоводной фазой второго периода. Относительное увеличение нормы стока составило от 11 до 30 %. На 10 гидрологических постах (49 %) сток за весеннее половодье уменьшался, т.е. многоводная фаза сменяла маловодную. Относительное снижение нормы стока составило от 8 до 21 %. При этом фазы водности сопровождалась синхронной сменой фазы в приходной составляющей (осадков) в 70 % случаев (16 водосборов), асинхронность поведения стока за половодья по отношению к осадкам наблюдалась в 30 % случаев (7 гидрологических постов).

Для каждого периода водности были рассчитаны основные статистические характеристики стока весеннего половодья, согласно работе [7], и дан прогноз нормы коэффициентов вариации и асимметрии. Результаты представлены в табл. 2.

**Статистические характеристики выделенных циклов водности  
и изменчивость нормы осадков на водосборах Российской Арктики**

Код поста	Река–Пост	I-й период цикла водности			II-й период цикла водности		
		Годы	Слой стока, мм	Норма осадков, мм	Годы	Слой стока, мм	Норма осадков, мм
03403	Куонапка–Джалинда	1943–1984	98	255	1985–2002	116	262
03414	Яна–Верхоянск	1935–1965	41	177	1966–2002	52	178
03518	Нера–Ала Чубук	1944–1985	67	227	1986–2002	85	222
01176	Бохапча–5,4 км от устья	1934–1949	111	421	1950–1980	141	435
01309	Сеймчан–2,1 км выше устья р. Чапаев	1941–1956	190	273	1957–77	157	305
01623	Средникан–Средникан	1935–1950	148	426	1951–1980	180	431
09425	Турухан–Янов стан	1941–1970	232	491	1971–1999	256	494
11574	Пяку–Пур–Тарко–Сале	1954–1970	133	482	1971–2001	162	514
11805	Надым–Надым	1955–1974	162	490	1975–1991	142	471
70410	Печора–Якша	1914–1929	302	516	1930–1993	276	564
70414	Печора–Троицко–Печорское	1938–1956	250	490	195–1980	278	601
70047	Солза–Сухие Пороги	1928–1958	190	525	1959–1980	155	552
70153	Юг–Подосиновец	1931–1945	126	575	1946–1980	144	591
70180	Вычегда–М. Кужба	1930–1956	147	491	1957–1980	167	550
70360	Лодьма–Коровкинская	1939–1958	219	533	1959–1977	174	546
70366	Кулой–Кулой	1927–1958	134	467	1959–1980	110	446
70466	Уса Петрунь	1936–1956	374	483	1957–1980	432	558
70509	Ижма Усть–Ухта	1933–1947	189	465	1948–1980	162	534
70531	Пижма–Боровая	1937–1963	129	486	1964–1980	150	552
70522	Ухта–Ухта	1934–1949	170	473	1950–1980	144	535
71104	Кола–1429 км Октябрьской ж.д.	1928–1953	182	350	1954–1994	203	459
71199	Умба–Паялка	1931–1958	180	414	1959–1994	149	475
71241	Ена–15,5 км от устья	1934–1948	100	451	1949–1980	129	557

**Табл. 2**

Относительные погрешности расчета норм стока и коэффициентов вариации для периодов водности составили в среднем 6 и 16 % соответственно. Относительные погрешности коэффициента вариации значительны вследствие малых объемов выборок.

Прогнозные значения нормы и коэффициентов вариации и асимметрии использовались для построения кривых накопленных вероятностей в рамках распределения Пирсона III типа, которые сравнивались с эмпирическими кривыми, полученными по фактическим данным наблюдений (рис. 2). Общее число прогнозов статистических характеристик стока весеннего половодья составило 46. Процент оправдавшихся прогнозов на различных уровнях значимости при использовании критерия Колмогорова и  $\chi^2$  представлен в табл. 3.

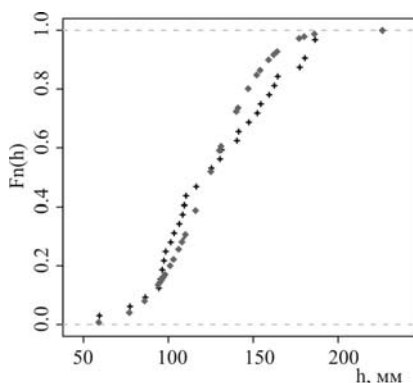


Рис. 2. Фактические (крестики) и прогнозные (ромбики) накопленные вероятности слоя стока весеннего половодья (р. Ена – 15,2 км от устья, период 1949–80 гг.)

Таблица 3

**Оправдываемость прогнозов по критериям согласия**

Уровень значимости, %	Оправдываемость, %	
	Колмогорова	$\chi^2$
20	28	36
10	43	48
5	57	51
1	73	52

Большинство прогнозов оправдались при относительных изменениях нормы стока весеннего половодья более чем на 20%.

Если в цикле водности происходит смена маловодного периода на многоводный, то оправдываемость прогнозов составила 50%. При этом, при синхронном увеличении нормы стока весеннего половодья и нормы осадков оправдываемость прогнозов составила 64%.

При смене многоводной ветви цикла водности на маловодную и при синхронном поведении норм осадков и стока половодья прогнозы оправдались на 53%.

В большинстве случаев, если прогноз оправдался по одному из периодов водности (при прогнозе маловодной ветви на многоводную), то прогноз по второму периоду водности также оправдался. Исключение составляют лишь реки

северо-востока Сибири, где оправдались прогнозы с маловодной фазы цикла водности на многоводную фазу.

Оправдываемость ретроспективных вероятностных прогнозов в целом по региону невелика, однако можно выделить районы, где при предложенной схеме параметризации модели формирования стока получены приемлемые результаты (табл. 4).

Таблица 4

**Оправдываемость прогнозов по критериям согласия для отдельных районов территории Российской Арктики**

Критерий согласия	Уровень значимости, %	Районы			
		Восточная Сибирь	Низовья р. Обь и Енисей	Северный Край	Кольский п-ов
Колмогорова	10	42	67	41	33
$\chi^2$		47	69	45	37
Колмогорова	5	75	83	45	33
$\chi^2$		81	84	48	37

**Выводы**

Проведен сбор и анализ ретроспективной гидрометеорологической информации в пределах водно-ресурсной границы Российской Арктики, который позволил выявить репрезентативные водосборы, в режиме стока весеннего половодья которых наблюдались циклы водности. Общее число гидрологических постов составило 23, что составляет 30 % от общего числа рассмотренных водосборов. Выделение двух периодов водности в каждом цикле и перекрестные прогнозы позволили получить 46 наборов прогностических значений нормы, коэффициентов вариации и асимметрии.

На основе данных ретроспективных наблюдений для каждого периода водности в цикле рассчитаны эмпирические значения нормы коэффициента вариации и асимметрии, а также определены численные значения параметров модели формирования стока весеннего половодья на территории Российской Арктики. В качестве внешнего воздействия использовались нормы годовых сумм осадков на водосборе, рассчитанные по данным репрезентативных метеорологических станций.

Проведена оценка прогнозов кривых обеспеченности, построенных на основании первых трех начальных моментов в рамках модели распределений семейства Пирсона III типа. В качестве метрики использовались критерии Колмогорова и  $\chi^2$ . Общее число прогнозов статистических характеристик стока весеннего половодья составило 46, из них оправдалось на 10 %-ном уровне значимости 43–47 %.

Оправдываемость прогнозов не зависит от смены периода водности в цикле: если прогноз оправдался по одному из периодов водности (при прогнозе маловодной ветви на многоводную), то прогноз по второму периоду водности также оправдался.

Следует признать, что прогностическое качество стохастической модели



формирования стока при неизменности части параметров при рассмотрении региона в целом неудовлетворительное. Однако для района, расположенного в низовьях рек Оби и Енисея модель может быть использована при неизменности ее параметров.

Для улучшения результатов прогнозирования необходимо учитывать изменения параметров модели, связанных с интенсивностью случайной составляющей климатических и бассейновых шумов.

Исследования выполнялись в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (номер гранта П740, научный руководитель: заведующий кафедрой гидрофизики и гидропрогнозов Российского Государственного гидрометеорологического университета профессор В.В. Коваленко).

### **Литература**

1. *Иванов В.В., Янкина В.А.* Водные ресурсы Арктики, их изученность и очередные задачи исследований // Проблемы Арктики и Антарктики, вып. 66, 1991, с. 118-128.
2. *Коваленко В.В., Викторова Н.В., Гайдукова Е.В.* Моделирование гидрологических процессов. – СПб.: РГГМУ, 2006. – 559 с.
3. *Коваленко В.В.* Гидрологическое обеспечение надежности строительных проектов при изменении климата. – СПб.: РГГМУ, 2009. – 100 с.
4. *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. – 51 с.
5. Методические рекомендации по составлению справочника по водным ресурсам СССР, вып. 7 ч. 1. Половодье. – Л., 1962. – 107 с.
6. Пространственно временные колебания стока рек СССР / Под ред. А.В. Рождественского. – Л.: Гидрометеоздат, 1988. – 375 с.
7. *Рождественский А.В., Чеботарев А.И.* Статистические методы в гидрологии. – Л.: Гидрометеоздат, 1974. – 424 с.
8. СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. – М.: Госстрой, 2004. – 74 с.
9. Специализированные массивы для климатических исследований // [Электронный ресурс]: ВНИИГМИ МЦД, 2011. – Режим доступа: [www.meteo.ru](http://www.meteo.ru). свободный. – На рус. яз.
10. *Хаустов В.А.* Чувствительность вероятностных характеристик максимального стока к антропогенным изменениям климата. В сб.: Экстремальные гидрологические события в Арало-Каспийском регионе // Труды международной научной конференции. Москва, 10–20 октября 2006. – М: Россельхозакадемия, 2006, с. 129-133.
11. *Шевнина Е.В.* Анализ стационарности многолетних рядов слоя стока весеннего половодья на водосборах Российской Арктики // Проблемы Арктики и Антарктики, 1(87), 2011, с. 56-64.
12. *Razuvaev V.N., Apasova E.G., Martuganov R.A., Steurer P., Vose R.*, 1993. Daily Temperature and Precipitation Data for 223 U.S.S.R. Stations. ORNL/CDIAC, Numerical data package – 040, Oak Ridge National laboratory, Oak Ridge, Tennessee, USA.
13. *Klein Tank, A.M.G. and Coauthors* Daily dataset of 20th-century surface air temperature and precipitation series for the European Climate Assessment. 2002. Int. J. of Climatology, 22, 1441-1453.
14. The IPCC Assessment Reports // [Электронный ресурс]: IPCC, 2009. – Режим доступа: <http://www.ipcc.ch>. Свободный. – На англ. яз.
15. *Hosking, J.R.M.* L-moments – Analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics: Journal of the Royal Statistical Society, Series B. 1990. vol. 52, p. 105–124.