

## ОЦЕНКА КАЧЕСТВА МЕТОДИКИ ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОЛЕТНЕГО СЛОЯ СТОКА ВЕСЕННЕГО ПОЛОВОДЬЯ НА РЕТРОСПЕКТИВНОМ МАТЕРИАЛЕ

канд. техн. наук *Е.В.ШЕВНИНА*

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: aqua@ari.nw.ru

*Проведен сбор и анализ ретроспективной гидрометеорологической информации в пределах водно-ресурсной границы Российской Арктики. Выполнена параметризация модели формирования слоя стока весеннего половодья. Получены прогнозные оценки нормы, коэффициентов вариации и асимметрии стока при различных вариантах задания параметров модели. Оценка ретроспективных вероятностных прогнозов основана на использовании критерия Колмогорова. Качество предлагаемой методики прогнозирования оценивалось на основании процента оправдавшихся условных прогнозов.*

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

### ВВЕДЕНИЕ

Для решения вопроса о практической применимости новой методики прогноза необходимо установить степень достоверности предлагаемого подхода [Наставления, 1962]. Одним из критериев достоверности методики прогнозирования является процент оправдавшихся прогнозов. При этом прогноз считается оправдавшимся, если прогнозируемая величина отличается от фактической на величину меньшую допустимой погрешности. Поскольку вопрос о применимости методики прогноза решается до начала ее эксплуатации, установление достоверности (оценку качества) методики проводят на ретроспективном материале.

Настоящая работа проделана для получения количественной оценки качества методики прогнозирования начальных статистических моментов слоя стока весеннего половодья. Прогноз статистических характеристик возможен благодаря использованию уравнения, описывающего эволюцию плотности вероятности (уравнение Фоккера–Планка–Колмогорова). В данной работе эта модель использована после необходимых упрощений в виде системы уравнений для моментов.

Параметризация модели проводится методом идентификации (в узком смысле, т.е. определением численных значений коэффициентов модели) на основе материалов наблюдений на гидрологических постах, где имеется значительная разница в оценках первого начального момента при рассмотрении выборок, полученных в различные временные интервалы (периоды водности). Статистическая значимость выборочных оценок первого момента проверяется по критерию Стьюдента. Такие периоды являются аналогом изменений статистических моментов вероятностных

распределений водного стока вследствие колебаний внешнего воздействия (климатических характеристик).

Условные прогнозы статистических характеристик слоя стока весеннего половодья (полученные по модели в виде системы уравнений для начальных статистических моментов) использовались для построения кривых обеспеченностей в рамках принятого в гидрологии распределения Пирсона III типа. Далее проводилось их сравнение с эмпирическими кривыми, полученными для выделенных периодов водности. Решение об их соответствии (оправдываемости условного прогноза) принималось на основании критерия Колмогорова на различных уровнях значимости. Процент оправдавшихся прогнозов определяет качество предлагаемой методики долгосрочного прогнозирования статистических характеристик максимального стока.

Целью работы является оценка качества предлагаемой методики на ретроспективном материале, при различных вариантах задания параметров модели формирования стока в виде уравнения моментов. Ранее подобная работа была проделана в отношении методик долгосрочного прогнозирования статистических характеристик годового и минимального стока в работах [Коваленко, 2006; Викторова, 2002]. Оценка методики прогнозирования статистических характеристик максимального стока для арктической зоны России проводится впервые.

В работе проведен сбор и анализ гидрометеорологической информации в пределах водно-ресурсной границы Российской Арктики, выбраны ряды стока весеннего половодья, где наблюдались периоды водности, проведена параметризация модели и даны условные прогнозы начальных моментов распределений максимального стока для различных вариантов задания параметров.

#### **ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ**

Для решения задачи выделения периодов водности использовались данные наблюдений за стоком весеннего половодья на 57 гидрологических постах, расположенных на территории, ограниченной водно-ресурсной экологической границей Российской Арктики [Иванов, 1991]. Данные опубликованы в изданиях Государственного водного кадастра (ГВК) «Основные гидрологические характеристики» и «Многолетние данные о ресурсах поверхностных вод» за период с начала наблюдений по 1980 год. Кроме того, на основе ежедневных расходов воды за период апрель–сентябрь на 37 гидрологических пунктах, опубликованных в изданиях ГВК («Гидрологический ежегодник»), получены ряды слоя стока за период 1981–2008 гг. Расчет слоя стока весеннего половодья проводился с соблюдением требований Методических рекомендаций [Методические рекомендации, 1962].

Ряды многолетних характеристик были проверены на стационарность режима формирования стока весеннего половодья согласно рекомендациям [Пространственно-временные колебания, 1988; СП33-101-2003, 2004] с использованием критериев Стьюдента, Фишера и Колмогорова–Смирнова. Из дальнейшего рассмотрения были исключены ряды, где в последние десятилетия наблюдаются статистически значимые тренды начальных моментов вероятностных распределений [Шевнина, 2011]. Выделение периодов водности проводилось на основе методики, изложенной в работе [Пространственно-временные колебания, 1988], с использованием критерия Стьюдента в качестве метрики различий норм стока в многолетнем ряду. Значимыми приняты различия норм (при смене маловодного/многоводного периода на многоводный/маловодный), полученные на 10 %-м уровне значимости.

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 [Специализированные массивы, 2011; Klein, 2002; Razuvaev, 1993]. Для каждого водосбора рассчитаны нормы годовых осадков для выбранных периодов водности.

Описание математического аппарата предлагаемого подхода следует работам [Коваленко и др., 2006; Коваленко и др., 2011]. Основой стохастической модели формирования речного стока является дифференциальное уравнение первого порядка, широко используемое в практике гидрологических прогнозов:

$$dQ/dt = -(1/k\tau)Q + \dot{X}/\tau, \quad (1)$$

где  $Q$  – скользящие осредненные расходы воды (модули или слой) в замыкающем створе речного бассейна;  $k$  – коэффициент стока;  $\tau$  – время релаксации речного бассейна, соответствующее радиусу корреляции (как правило, один год).

После переобозначений и введения в (1) случайной составляющей получим стохастическое дифференциальное уравнение (модель линейного формирующего фильтра):

$$dQ = [-(\bar{c} + \tilde{c})Q + \bar{N} + \tilde{N}]dt, \quad (2)$$

где  $c = 1/k\tau = \bar{c} + \tilde{c}$ ;  $N = \dot{X}/\tau = \bar{N} + \tilde{N}$  (здесь  $\bar{c}, \bar{N}$  – математические ожидания;  $\tilde{c}, \tilde{N}$  – коррелированные друг с другом белые шумы с интенсивностями  $G_{\tilde{c}}, G_{\tilde{N}}$  и взаимной интенсивностью  $G_{\tilde{c}\tilde{N}}$ ).

Следуя работе [Баруча-Рид, 1969], интерпретируем (2) как марковскую эволюцию плотности вероятности  $p(Q, t)$ , для описание которой справедливо уравнение Фоккера–Планка–Колмогорова (ФПК):

$$\frac{\partial p(Q;t)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial Q}[A(Q;t)p(Q;t)] + 0,5\frac{\partial^2}{\partial Q^2}[B(Q;t)p(Q;t)], \quad (3)$$

где  $A$  и  $B$  – коэффициенты сноса и диффузии, определяющиеся физико-статистическими параметрами, входящими в (2). Для стационарных случайных процессов уравнение (3) переходит в уравнение Пирсона:

$$\frac{dp}{dQ} = \frac{Q-a}{b_0 + b_1Q + b_2Q^2} p, \quad (4)$$

решением которого является семейство кривых  $p(Q)$ , широко применяемых в практике инженерной гидрологии. Коэффициенты  $a, b_0, b_1, b_2$  принято находить таким образом, чтобы аналитическая кривая  $p(Q)$  лучше всего соответствовала эмпирическим точкам.

Коэффициенты (4) связываются формулами с параметрами  $\bar{c}, \bar{N}, G_{\tilde{c}}, G_{\tilde{N}}, G_{\tilde{c}\tilde{N}}$  и приобретают физический смысл в «гидрологическом» контексте. Это дает возможность, меняя факторы формирования стока (климатические или подстилающей поверхности бассейнов) через параметры  $\bar{c}$  и  $\bar{N}$ , т. е. через осадки  $\dot{X}$  и величины, влияющие на коэффициент стока  $k$ , оценивать чувствительность к подобным изменениям кривой плотности вероятности.

Так как в практической гидрологии из-за коротких рядов наблюдений ограничиваются 3–4 моментами вероятностных распределений, то имеет смысл аппроксимировать (3) системой дифференциальных уравнений для начальных моментов  $m_i$ :

$$\begin{aligned}
dm_1/dt &= -(\bar{c} - 0,5G_{\bar{c}})m_1 - 0,5G_{\bar{c}\bar{N}} + \bar{N}; \\
dm_2/dt &= -2(\bar{c} - G_{\bar{c}})m_2 + 2\bar{N}m_1 - 3G_{\bar{c}\bar{N}}m_1 + G_{\bar{N}}; \\
dm_3/dt &= -3(\bar{c} - 1,5G_{\bar{c}})m_3 + 3\bar{N}m_2 - 7,5G_{\bar{c}\bar{N}}m_2 + 3G_{\bar{N}}m_1; \\
dm_4/dt &= -4(\bar{c} - 2G_{\bar{c}})m_4 + 4\bar{N}m_3 - 14G_{\bar{c}\bar{N}}m_3 + 6G_{\bar{N}}m_2.
\end{aligned} \tag{5}$$

Этой системы уравнений достаточно для определения всех расчетных гидрологических характеристик: нормы  $\bar{Q} = m_1$ , коэффициентов вариации  $C_v = f(m_1, m_2)$  и асимметрии  $C_s = f(m_1, m_2, m_3)$ , а также эксцесса  $E = f(m_1, m_2, m_3, m_4)$ .

Решение прогностической задачи разбивается на два этапа: по имеющимся начальным моментам (из данных наблюдений или карт), находим  $m_i$  и по ним выполняем параметризацию модели (5), т. е. находим  $\bar{c}$ ,  $\bar{N}$ ,  $G_{\bar{c}}$ ,  $G_{\bar{N}}$ ,  $G_{\bar{c}\bar{N}}$ . Затем меняем (в соответствии с климатическим сценарием) значения  $c(\dot{X}, T)$  и  $N(\dot{X})$ , находим прогнозные значения моментов  $m_i^{\text{пр}}$ .

Ситуацию можно (а по практическим соображениям – нужно) упростить [Коваленко, 2009], поскольку в практике четвертый момент  $m_4$  не используется (из-за коротких рядов наблюдений), а в отношении коэффициента асимметрии принято соотношение  $C_s/C_v$  (по той же причине). Кроме того, климатические сценарии носят квазистационарный характер, т.е. выделяется временной промежуток, например в 20 лет, и для него указываются характеристики метеозлементов. Тогда на каждом таком интервале процесс формирования многолетнего стока можно рассматривать как статистически стационарный ( $dm_i/dt \approx 0$ ).

Таким образом, система (5) сводится к системе уравнений для  $m_1$  и  $m_2$ :

$$\begin{aligned}
-\bar{c}m_1 + \bar{N} &= 0 \\
-2\bar{c}m_2 + 2\bar{N}m_1 + G_{\bar{N}} &= 0,
\end{aligned} \tag{6}$$

где:  $\bar{c} = 1/k\tau$  – математическое ожидание величины обратно пропорциональной коэффициенту стока ( $\tau = 1$ , поскольку процесс относится к марковскому типу);  $\bar{N} = \bar{X}$  – математическое ожидание интенсивности внешнего воздействия (осадков);  $G_{\bar{N}}$  – величина случайной составляющей интенсивности внешних воздействий (осадков);  $m_1$  и  $m_2$  – выборочные оценки первого и второго момента распределений рядов стока весеннего половодья.

Решение задачи идентификации параметров модели (6) проводится по алгоритму согласно работе [Коваленко и др., 2011]. Условные прогнозы статистических характеристик максимального стока получены на ретроспективном материале о периодах водности для нескольких вариантов задания параметра  $\bar{c}$  (табл. 1). Принято, что неизменным остается соотношение  $C_s/C_v$  (коэффициентов вариации и асимметрии). Определение моментов теоретических распределений, аппроксимирующих эмпирические данные, осуществлялось в рамках кривых Пирсона III типа согласно работе [Рождественский, 1974].

Варианты задания численных значений параметров можно разбить на две группы: при постоянных параметрах модели и при переменных. В первую группу входят варианты I и II, для которых при условном прогнозе параметр  $\bar{c}$  задается равным фактическому значению за предшествующий или условно прогнозный период. К этой группе можно отнести вариант VIII, когда параметр  $G_{\bar{N}}$  меняется по степенной зависимости, полученной по фактическим данным о норме осадков для всей рассматриваемой территории.

**Варианты задания прогностических параметров модели формирования стока  
весеннего половодья**

№	Расчет фактического значения параметра $\bar{c}$	Расчет условно-прогнозного значения параметра $\bar{c}_f^*$
I	$\bar{c} = \bar{N} / m_1$	$\bar{c}_f = \bar{c}$
II	$\bar{c} = \bar{N} / m_1$	$\bar{c}_f = \bar{N}_f / m_{1f}$
III	$k = m_1 / \bar{N}$ $k_T = 1 - \text{th}((300 + 25\bar{T} + 0,05\bar{T}^3) / \bar{N})$ $\beta = k / k_T$ $\bar{c} = 1 / k$	$k_{Tf} = 1 - \text{th}((300 + 25\bar{T}_f + 0,05\bar{T}_f^3) / \bar{N}_f)$ $k_f = \beta k_{Tf}$ $\bar{c}_f = 1 / k_f$
IV <sup>а, б</sup>	$k = m_1 / \bar{N}$ $k_R = f(\bar{N}, \bar{T})$ $\beta = k / k_R$ $\bar{c} = 1 / k$	$k_{Rf} = f(\bar{N}_f, \bar{T}_f)$ $k_f = \beta k_R$ $\bar{c}_f = 1 / k_f$
V <sup>а, б</sup>	$k_R = f(\bar{N}, \bar{T})$ $\bar{c} = 1 / k_R$	$k_{Rf} = f(\bar{N}_f, \bar{T}_f)$ $\bar{c}_f = 1 / k_{Rf}$
VI	$k_R = f(\bar{T})$ $\bar{c} = 1 / k_R$	$k_{Rf} = f(\bar{T}_f)$ $\bar{c}_f = 1 / k_{Rf}$
VII	$k_R = f(\bar{N}, \bar{T})$ $\bar{c} = 1 / k_R$	$k_{Rf} = f(\bar{N}_f, \bar{T}_f)$ $\bar{c}_f = 1 / k_{Rf}$
VIII	$\bar{c} = \bar{N} / m_1,$ $G_{\bar{N}} = 43,754\bar{N}^{0,9036}$	$\bar{c}_f = \bar{c},$ $G_{\bar{N}_f} = 43,754\bar{N}_f^{0,9036}$

*Примечание.* \* – индекс  $f$  означает, что величина задается на условно прогножном временном интервале.

Вторая группа вариантов задания параметров модели включает расчеты при постоянном параметре  $G_{\bar{N}}$ , в то время как условно прогнозный параметр  $\bar{c}$  задается по региональным зависимостям. Эти зависимости представлены в виде уравнений множественной линейной регрессии, параметры которых оценивались по фактическим данным о выборочных нормах осадков ( $\bar{N}$ ) и температуры воздуха ( $\bar{T}$ ) при различном региональном рассмотрении (варианты IV а и б). В варианте IV<sup>а</sup> параметры зависимости получены для Европейской части Арктики по данным постов Северного края, Карелии и Кольского полуострова. В варианте IV<sup>б</sup> предпринята попытка улучшить результаты для Северного края за счет использования зависимости, параметры которой были оценены по данным только региональных постов. В вариантах IV применялся переходной коэффициент, связывающий значения фактического коэффициента стока с вычисленным по регрессионной зависимости. Параметры зависимостей маловодного периода использовались для условных прогнозов на многоводный период водности и наоборот.

В варианте V<sup>a</sup> региональные зависимости получены по данным с разбивкой на периоды водности, а в варианте V<sup>б</sup> – без разбивки на периоды водности. В варианте VI параметр задается по зависимости только от нормы температуры воздуха. Условные прогнозы по варианту VII даны при прогностическом параметре  $\bar{t}$ , рассчитанном по регрессионной зависимости, построенной по годовым значениям осадков, температуры воздуха и слоя стока весеннего половодья. В варианте III для оценки коэффициента стока использовались формулы Тюрка и Багрова [Коваленко и др., 2006].

Алгоритм оценки оправдываемости условного прогноза начальных моментов следующий: для маловодного периода водности по известным трем начальным моментам распределений рассчитывались численные значения параметров модели, а по многоводному периоду – выпускались условные прогнозные кривые обеспеченности (в рамках распределения Пирсона). Они сравнивались с фактическими, их соответствие оценивалось по критерию согласия Колмогорова [Коваленко и др., 2006]. Для многоводного и маловодного периодов проводилась такая же процедура. Всего было выпущено 46 условных прогнозов статистических характеристик стока весеннего половодья. Качество методики прогнозирования в каждом из вариантов задания параметров модели (6) определяется процентом оправдавшихся прогнозов.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Многолетние ряды слоя стока весеннего половодья на 76 гидрологических постах использовались для решения задачи выделения периодов водности. При этом количество удлиненных рядов (с начала наблюдений до 2002 г.) составило 19, а коротких (с начала наблюдений по 1980 г.) – 57. Периоды водности наблюдались в 47 % удлиненных рядов и в 25 % – для рядов с данными до 1980 г. Общее число рядов, где наблюдались периоды водности, составило 23, т.е. 30 % от общего числа (рис. 1).

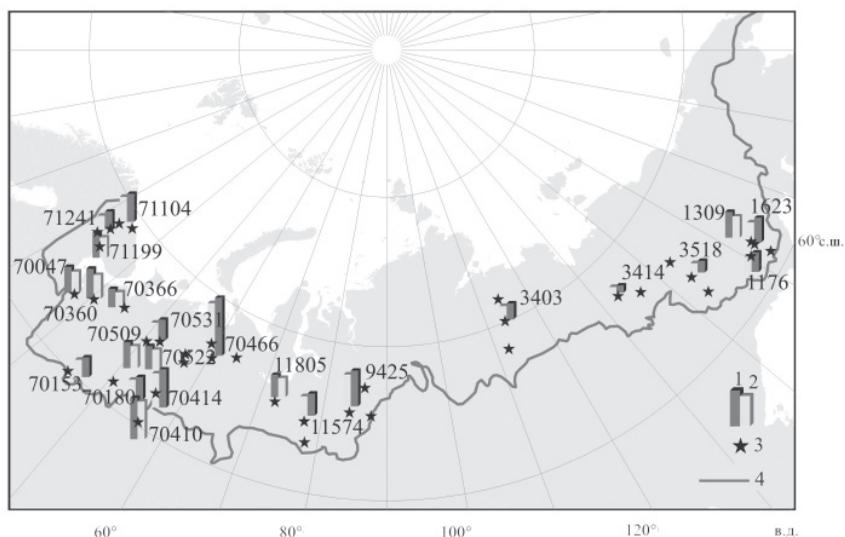


Рис. 1. Расположение гидрологических постов, по данным наблюдения которых выделены многоводные (1) и маловодные (2) периоды водности. 3 – репрезентативные метеорологические станции; 4 – граница водно-ресурсной границы Арктики [Иванов, 1991]; номер – код гидрологического поста согласно табл. 2.

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

Код поста	Река, пост	Маловодный период			Многоводный период		
		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	1957–1977	157	305	1941–1956	190	273
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	1975–1991	142	471	1955–1974	162	490
70410	Печора – Якша	1930–1993	276	564	1914–1929	302	516
70414	Печора – Троицко-Печорское	1938–1956	250	490	1957–80	278	601
70047	Солза – Сухие Пороги	1959–1980	155	552	1928–1958	190	525
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	1959–1977	174	546	1939–1958	219	533
70366	Кулой – Кулой	1959–1980	110	446	1927–1958	134	467
70466	Уса Петрунь	1936–1956	374	483	1957–1980	432	558
70509	Ижма – Усть-Ухта	1948–1980	162	534	1933–1947	189	465
70531	Пижда – Боровая	1937–1963	129	486	1964–1980	150	552
70522	Ухта – Ухта	1950–1980	144	535	1934–1949	170	473
71104	Кола – 1429-й км Октябрьской ж.д.	1928–1953	182	350	1954–1994	203	459
71199	Умба – Паялка	1959–1994	149	475	1931–1958	180	414
71241	Ена – 15,5 км от устья	1934–1948	100	451	1949–1980	129	557

Для каждого водосбора получены нормы годовых осадков по данным репрезентативных метеостанций, соответствующие периодам водности. Выборочные оценки нормы слоя стока весеннего половодья, продолжительность маловодных и многоводных периодов и нормы осадков репрезентативных метеостанций представлены в табл. 2.

Для каждого из периода водности были рассчитаны выборочные значения трех начальных моментов распределений слоя стока весеннего половодья [Рождественский, 1974]. Относительные погрешности расчета нормы стока и коэффициентов вариации 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). Результаты оценки условных прогнозов по

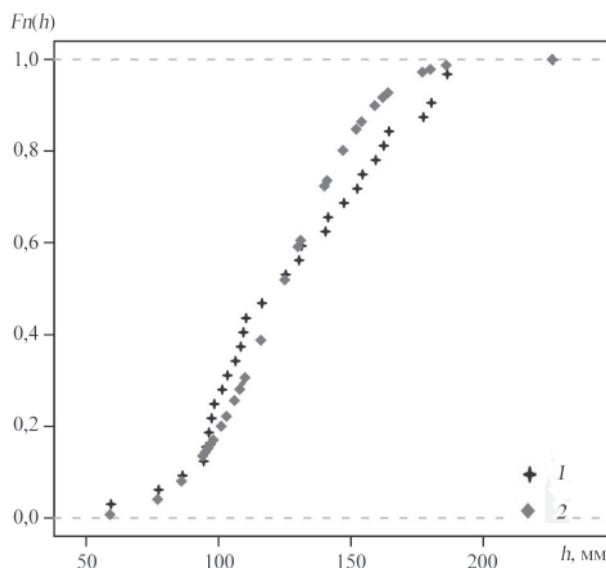


Рис. 2. Фактические (1) и условно прогнозные (2) накопленные вероятности слоя стока весеннего половодья (р. Ена – 15,2 км от устья, период 1949–1980 гг.).

критерию Колмогорова на различных уровнях значимости при различных вариантах задания параметров стохастической модели представлены в табл. 3. Общее число условных прогнозов на ретроспективном материале составило 46.

Как видно из таблицы, наилучшие условные прогнозы получены для варианта, когда параметр оценивался по фактическим данным прогнозного периода (гипотетическая ситуация). В реальности, располагая информацией об изменении норм

Таблица 3

**Процент оправдавшихся условных прогнозов статистических характеристик стока весеннего половодья с использованием критерия Колмогорова на 5 и 10 %-м уровнях значимости ( $\alpha$ ) [%]**

Вариант задания параметров	Арктическая территория									
	В целом		Восточная Сибирь		Низовья рек Обь и Енисей		Северный край		Карелия и Кольский п-ов	
	$\alpha=10$	$\alpha=5$	$\alpha=10$	$\alpha=5$	$\alpha=10$	$\alpha=5$	$\alpha=10$	$\alpha=5$	$\alpha=10$	$\alpha=5$
I*	43	57	42	75	67	83	41	45	33	33
II	96	98	92	100	100	100	95	95	100	100
III	35	43	58	67	33	33	27	36	17	33
IV <sup>a</sup>	33	50	42	75	0	17	41	50	17	33
IV <sup>b</sup>	39	50	42	67	67	83	32	36	33	33
V <sup>a</sup>	33	35	67	67	33	33	18	23	17	17
V <sup>b</sup>	35	43	42	58	17	33	36	41	33	33
VI	43	54	58	67	50	83	32	41	50	50
VII	46	54	50	67	33	50	36	41	83	83
VIII	35	52	42	67	50	83	27	41	33	33

Примечание. \* – нумерация соответствует табл. 1.

осадков и температуры воздуха (полученным по ретроспективным данным или из климатического сценария), оправдываемость условных прогнозов составляет около 70 % на всех уровнях значимости для большинства регионов. Методика долгосрочной оценки статистических характеристик слоя стока весеннего половодья дает наилучшие оценки на всех уровнях значимости при условном прогнозе с маловодного периода на многоводный.

Оценивая полученные на 10 %-м уровне значимости результаты, можно отметить, что для арктической территории в целом наилучшие результаты получены для варианта VII, когда прогностическое значение параметра задается по региональным зависимостям, параметры которых оценивались по данным о годовых коэффициентах стока (46 % оправдавшихся условных прогнозов). Этот же вариант дает наилучшие результаты для территории Карелии и Кольского полуострова. В Восточной Сибири наибольший процент оправдываемости получен для варианта V<sup>a</sup>. В северной части Средней Сибири (низовья рек Обь и Енисей) наилучшие результаты дает модель с постоянными параметрами (вариант I). Для Северного края наиболее удачными являются варианты I и VI<sup>a</sup>.

В большинстве случаев, если прогноз оправдался по одному из периодов водности (при условном прогнозе маловодного на многоводный), обратный условный прогноз также оправдался. Исключение составляют лишь реки северо-востока Сибири, где оправдываемость с маловодного периода на многоводный значительно выше.

## 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 периоды водности, выявленные на основе статистически значимого различия выборочных первых моментов при разбивке многолетнего ряда на две части. Общее число таких водосборов составило 23, т.е. 30 % от общего числа. Выделение двух периодов водности в многолетнем ряду и перекрестные условные прогнозы позволили получить 46 наборов пар значений нормы, коэффициентов вариации и асимметрии.

На основе данных ретроспективных наблюдений для каждого периода водности рассчитаны эмпирические значения нормы, коэффициентов вариации и асимметрии, а также определены численные значения параметров (в различных вариантах) 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.

Получена оценка методики долгосрочного прогнозирования вероятностных распределений слоя стока весеннего половодья на ретроспективном материале. Построение кривых обеспеченности (эмпирических и условно прогнозных) осуществлялось на основании первых трех начальных моментов в рамках модели распределений семейства Пирсона III типа. В качестве метрики использовался критерий Колмогорова. Общее число условных прогнозов составило 46. Рассмотрены различные варианты задания прогностических параметров модели формирования стока. Их можно разбить на две группы: при постоянных параметрах модели и при переменных.

Для большинства регионов Российской Арктики выбраны схемы параметризации стохастической модели формирования слоя стока весеннего половодья, при которых оправдываемость методики долгосрочной оценки вероятностных характеристик на

ретроспективном материале составляет около 70 % и выше (на 10 %-м уровне значимости по критерию Колмогорова). Наилучшие результаты получены при использовании региональных зависимостей, связывающих параметры модели с изменением характеристик внешнего воздействия. В таких случаях оправдываемость методики долгосрочной оценки может быть улучшена до 67–83 % (на 5 и 10 %-м уровне значимости).

Выявлено, что единой схемы параметризации стохастической модели формирования стока весеннего половодья, пригодной для территории Российской Арктики в целом, в рамках данного подхода предложить не удастся. Условные прогнозы двух начальных моментов вероятностных распределений в рассмотренных вариантах параметризации модели оправдываются на 33–46 %. Методическая оправдываемость вероятностных условных прогнозов по территории Северного края не превышает 41 %.

*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).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Баруча-Рид А.Т.* Элементы теории Марковских процессов и их приложения. М.: Наука, 1969. 511 с.

*Викторова Н.В.* Исследование применимости стохастической модели формирования летне-осеннего и зимнего минимального стока для оценки последствий антропогенного изменения климата: Дис. ... канд. техн. наук, спец. 25.00.27. СПб.: РГГМУ, 2002. 240 с.

*Иванов В.В., Янкина В.А.* Водные ресурсы Арктики, их изученность и очередные задачи исследований // Проблемы Арктики и Антарктики. 1991. Вып. 66. С. 118–128.

*Коваленко В.В.* Гидрологическое обеспечение надежности строительных проектов при изменении климата. СПб.: РГГМУ, 2009. 100 с.

*Коваленко В.В., Викторова Н.В., Гайдукова Е.В.* Моделирование гидрологических процессов. СПб.: РГГМУ, 2006. 559 с.

*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.  
Методические рекомендации по составлению справочника по водным ресурсам СССР. Вып. 7 Ч. 1. Половодье. Л.: Изд-во ГГИ, 1962. 107 с.

Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Ч. I. Прогнозы режима вод суши. Л.: Гидрометеоздат. 1962. 198 с.

Пространственно-временные колебания стока рек СССР / Под ред. А.В.Рожественского Л.: Гидрометеоздат, 1988. 375 с.

*Рожественский А.В., Чеботарев А.И.* Статистические методы в гидрологии. Л.: Гидрометеоздат, 1974. 424 с.

СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. М.: Госстрой, 2004. 74 с.

Специализированные массивы для климатических исследований // ВНИИГМИ МЦД. 2011. URL: [www.meteo.ru](http://www.meteo.ru) [дата обращения 21.06.2011].

*Шевнина Е.В.* Анализ стационарности многолетних рядов слоя стока весеннего половодья на водосборах Российской Арктики // Проблемы Арктики и Антарктики. 2011. № 1 (87). С. 56–64.

*Klein T.* Daily dataset of 20th-century surface air temperature and precipitation series for the European Climate Assessment // *Int. J. of Climatology*. 2002. Vol. 22. P. 1441–1453.

*Razuvayev V.N., Apasova E.G., Martuganov R.A., Steurer P., Vose R.* Daily Temperature and Precipitation Data for 223 U.S.S.R. Stations. Numerical data package – 040. Tennessee: Oak Ridge National laboratory, 1993. URL: <http://meteo.ru/english/climate/descrip11.htm> [дата обращения 30.08.2012]

*E.V.SHEVNINA*

**ASSESSMENT OF THE LONG-TERM FORECASTING METHODOLOGY  
FOR PROBABILISTIC CHARACTERISTICS OF THE SPRING FLOOD  
FLOWS WITH RETROSPECTIVE DATA**

*The historical hydro-meteorological data within the water resource boundary of the Russian Arctic has been collected and analyzed. The parameterization of stochastic model has been conducted. The forecast norm, variation and skewness coefficients for maximum spring flood have been estimated. The retrospective probability forecast has been obtained using Kolmogorov criteria.*

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