

УДК 556.06

## Экстраполяция гидрографов как метод краткосрочного прогнозирования речного стока

**С.В. Борщ<sup>1</sup>, Ю.А. Симонов<sup>1</sup>, А.В. Христофоров<sup>1,2</sup>,  
И.В. Чупин<sup>1,2</sup>, Н.М. Юмина<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Гидрометеорологический научно-исследовательский центр  
Российской Федерации, г. Москва, Россия;

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия  
*borsch@mecom.ru, simonov@mecom.ru*

В качестве альтернативы, используемой при оценке применимости методик краткосрочного прогнозирования стока относительно крупных рек с плавными очертаниями гидрографов, вместо традиционного метода инерционного прогноза предлагается экстраполяция гидрографов в виде линейной зависимости от наблюдавшихся расходов воды предшествующего периода. В качестве примера успешной реализации предлагаемого подхода приводятся результаты использования предлагаемого метода для прогнозирования расходов воды основных притоков Камского водохранилища с заблаговременностью 1–5 суток в течение летне-осеннего периода.

*Ключевые слова:* краткосрочное прогнозирование речного стока, применимость методики, альтернативный прогноз, экстраполяция гидрографов

## Extrapolation of hydrographs as a method of short-range runoff forecasting

**S.V. Borsch<sup>1</sup>, Yu.A. Simonov<sup>1</sup>, A.V. Khristoforov<sup>1,2</sup>,  
I.V. Chupin<sup>1,2</sup>, N.M. Yumina<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia;

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia  
*borsch@mecom.ru, simonov@mecom.ru*

Considering the applicability assessment of short-range runoff forecasting techniques for relatively large rivers with smooth runoff hydrographs, a forecast method is proposed instead of traditional climatological forecast, namely, the extrapolation of hydrographs (a linear relationship between the forecast and observed runoff over the preceding period). The paper presents the runoff forecasts for the main tributaries of the Kama Reservoir during summer and autumn which demonstrate the efficiency of the proposed alternative method.

*Keywords:* short-range runoff forecasting, applicability of the technique, alternative forecast, extrapolation of hydrographs

### Введение

Методы прогнозирования речного стока основаны на описании процессов его формирования с помощью различных физико-математических или концептуальных моделей, а также с помощью физико-статистических

зависимостей прогнозируемой величины от ее предикторов. При получении прогноза учитывается известная к дате составления прогноза гидрометеорологическая информация, включая прогноз ожидаемого хода метеорологических элементов в течение периода заблаговременности [5, 6, 8, 9]. В современной отечественной практике гидрологического прогнозирования практическое применение конкретной методики может считаться оправданным, если она явно точнее безусловного альтернативного прогноза. В зависимости от заблаговременности прогноза в качестве такой безусловной альтернативы рассматриваются климатический или инерционный прогноз, для получения которых используются только известные данные многолетних гидрометрических наблюдений [3, 4]. В настоящей статье в качестве безусловной альтернативы для методики краткосрочного прогнозирования речного стока предлагается более сложный метод, основанный на экстраполяции гидрографов.

### Альтернативные методы краткосрочного прогнозирования речного стока

Согласно действующим в нашей стране правилам, к категории краткосрочных относятся гидрологические прогнозы с заблаговременностью не более 5–6 суток. Для таких прогнозов в качестве безусловной альтернативы используется инерционный прогноз, в котором используется известное значение прогнозируемой характеристики для даты их составления [3, 4]. В частности, при заблаговременности  $\Delta t$  суток инерционный прогноз  $\tilde{Q}_I(t + \Delta t)$  расхода воды использует известное на дату его составления значение  $Q(t)$  и определяется формулой:

$$\tilde{Q}_I(t + \Delta t) = Q(t) + \bar{\Delta}, \quad (1)$$

где величина  $\bar{\Delta}$  равна среднему арифметическому всех  $n$  известных значений  $\Delta_1, \dots, \Delta_n$  разности  $Q(t + \Delta t) - Q(t)$ , полученных по данным исходных гидрологических наблюдений. Оценка среднеквадратической погрешности инерционного прогноза определяется формулой:

$$\sigma_{\Delta} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta_i - \bar{\Delta})^2}. \quad (2)$$

Вывод об эффективности применения методики краткосрочного прогнозирования делается на основании отношения  $\sqrt{V} / \sigma_{\Delta}$  среднеквадратической погрешности получаемых с ее помощью прогнозов к величине  $\sigma_{\Delta}$  [4].

Данное правило выгодно отличает отечественный подход к оценке эффективности краткосрочных гидрологических прогнозов от использования для этой цели в ряде стран показателя Нэша – Сатклиффа [7, 8, 10, 11]. Этот показатель представляет заниженную оценку квадрата отношения

погрешности прогнозов  $\sqrt{V}$  по проверяемой методике к погрешности  $\sigma$  климатического прогноза, при котором используется многолетняя норма прогнозируемой величины. Следовательно, он может применяться для оценки эффективности только долгосрочных или некоторых среднесрочных прогнозов, и то после устранения систематического занижения оценки погрешности  $\sqrt{V}$  [1].

Гидрографы небольших горных рек имеют резкие пилообразные очертания, что отражает быструю реакцию расходов и уровней воды в замыкающем створе на процессы формирования стока на водосборе. Для методик краткосрочного прогнозирования стока таких рек использование в качестве альтернативы инерционного прогноза представляется полностью оправданным.

Сток относительно крупных равнинных и полугорных рек с небольшими уклонами значительно медленнее реагирует на процессы его формирования, поэтому гидрографы таких рек имеют плавные очертания. В этих условиях экстраполяция гидрографов на период заблаговременности прогноза может оказаться точнее инерционного прогноза и, следовательно, может рассматриваться в качестве иной альтернативы при оценке эффективности применения проверяемой методики краткосрочного прогнозирования.

В данном случае речь идет о методе обобщенной линейной экстраполяции гидрографа, когда прогнозируемый на сутки  $t + \Delta t$  расход воды в замыкающем створе выражается в виде линейной комбинации известного на дату составления прогноза  $t$  расход  $Q(t)$  и расходов  $Q(t-1), \dots, Q(t-m)$  за  $m$  предыдущих суток:

$$\tilde{Q}_A(t + \Delta t) = \sum_{i=0}^m a_i Q(t-i) + b. \quad (3)$$

При значении  $m = 2$  формула получения такого альтернативного прогноза выражает обычную линейную экстраполяцию гидрографа. При достаточно большом значении параметра  $m$  формула (3) позволяет частично учесть истощение русловых и пойменных запасов воды, а также трансформацию волны половодья или паводка. Использование расходов воды за предыдущий период позволяет косвенно учесть и другие процессы формирования стока, оказывающие влияние на изменение водности реки за период заблаговременности прогноза  $\Delta t$ . Параметры формулы (3) должны оцениваться методом наименьших квадратов для отдельного месяца, фазы водного режима или для всего года в целом по данным многолетних гидрологических наблюдений.

Условие, при котором данный вариант альтернативного прогноза можно использовать при оценке эффективности проверяемой методики краткосрочного прогнозирования речного стока состоит в том, что формула (3) должна давать более точные прогнозы, чем инерционный прогноз

по формуле (1). Это означает, что для среднеквадратической погрешности  $\sqrt{V_A}$  экстраполяции гидрографа по формуле (3) неравенство  $\sqrt{V_A} < \sigma_\Delta$  должно быть статистически достоверным, т. е. разница между сравниваемыми величинами должна превышать вероятные ошибки определения каждой из них. Ниже приводится пример ситуации, когда данное условие выполняется и предлагаемая линейная экстраполяция гидрографа может использоваться в качестве альтернативного метода краткосрочного прогнозирования.

### Пример краткосрочного прогнозирования речного стока методом экстраполяции гидрографов

Рассматривается задача ежедневного краткосрочного прогнозирования среднесуточных расходов воды на основных притоках Камского водохранилища с заблаговременностью от 1 до 5 суток. Прогнозируется дождевой сток, который накладывается на продолжительный спад весеннего половодья. Как правило, в рассматриваемом регионе в первой половине мая еще идет таяние снежного покрова, а с середины октября наблюдаются отрицательные температуры приземного слоя воздуха [2]. В связи с этим в качестве периода составления прогнозов рассматриваются даты с 1 июня по 30 сентября. Прогнозируются среднесуточные расходы воды в восьми створах на основных притоках Камского водохранилища. Для этих створов в табл. 1 помещены значения площади водосбора  $A$  км<sup>2</sup>, длины реки  $L$  км, среднего уклона реки  $I$  ‰ и среднего расхода воды за период с июня по сентябрь  $\bar{Q}$  м<sup>3</sup>/с.

**Таблица 1.** Основные характеристики исследуемых водосборов  
**Table 1.** Main characteristics of the studied river basins

Река	Пост	$A$ , км <sup>2</sup>	$L$ , км	$I$ , ‰	$\bar{Q}$ , м <sup>3</sup> /с
Кама	с. Бондюг	46300	760	0,2	290
Иньва	д. Слудка	5210	224	0,2	23,0
Обва	с. Карагай	4310	166	0,5	17,6
Вишера	пос. Рябинино	30900	386	0,2	547
Яйва	с. Усть-Игум	5700	206	1,0	86,9
Косьва	с. Перемское	6220	269	1,0	85,8
Чусовая	пгт. Лямино	21500	565	0,4	180
Сылва	с. Сылвенск	17600	470	0,3	106

Использовались данные ежедневных гидрометрических наблюдений в указанных речных створах в течение периода с 1998 по 2015 год.

Плавное очертание гидрографов рассматриваемых рек выражается в высокой корреляции между среднесуточными расходами воды  $Q(t)$

и  $Q(t + \tau)$ . В табл. 2 для некоторых значений  $\tau$  приведены значения коэффициента автокорреляции  $r(\tau)$ . Там же для каждой реки помещены значения показателя  $\sqrt{A}/\sqrt{I}$ , равного квадратному корню отношения площади водосбора  $A$  к среднему уклону реки  $I$ . Этот показатель косвенно учитывает линейные размеры водосбора и среднюю скорость течения реки, и характеризует время реакции расходов воды в замыкающем створе на процессы, происходящие в ее русле и на водосборе. Он принимает максимальное значение для самой крупной р. Кама, а минимальное для р. Яйва, которая имеет один из самых маленьких водосборов и один из самых больших уклонов (см. табл. 1).

**Таблица 2.** Значения коэффициента автокорреляции  $r(\tau)$  среднесуточных расходов воды  
**Table 2.** Autocorrelation coefficient of mean daily water discharges

Река	$\tau = 2$	$\tau = 4$	$\tau = 6$	$\tau = 8$	$\tau = 10$	$\tau = 12$	$\tau = 14$	$\sqrt{A}/\sqrt{I}$
Кама	0,98	0,94	0,88	0,82	0,78	0,74	0,71	556
Иньва	0,93	0,78	0,65	0,58	0,54	0,53	0,50	161
Обва	0,87	0,69	0,59	0,56	0,55	0,53	0,49	93
Вишера	0,95	0,89	0,84	0,80	0,74	0,69	0,63	393
Яйва	0,79	0,66	0,57	0,53	0,49	0,45	0,43	75
Косьва	0,76	0,65	0,58	0,55	0,53	0,52	0,49	79
Чусовая	0,81	0,66	0,59	0,55	0,52	0,48	0,43	232
Сылва	0,95	0,88	0,82	0,77	0,74	0,70	0,66	242

Данные табл. 2 демонстрируют достаточно тесную положительную связь между коэффициентами автокорреляции  $r(\tau)$  и показателем времени реакции  $\sqrt{A}/\sqrt{I}$ . В частности, коэффициент корреляции между величинами  $r(6)$  и  $\sqrt{A}/\sqrt{I}$  равен 0,88.

Для каждого речного створа и при каждой заблаговременности  $\Delta t$  применение формулы получения прогноза (3) допускает множество вариантов, соответствующих числу  $m$  учитываемых расходов воды за период, предшествующий дате составления прогноза, а также выбранному промежутку времени, в течение которого эта формула применяется с одними и теми же значениями параметров. При использовании формулы (3) для каждого месяца в отдельности продолжительность ряда ежедневных гидрологических наблюдений за 18 лет периода с 1998 по 2015 г. составляет  $n = 540$  для июня и сентября и  $n = 558$  для июля и августа. При использовании формулы (3) для всего летне-осеннего периода в целом продолжительность такого ряда составляет  $n = 2196$ .

Выбор оптимального варианта применения формулы (3) основывался на оценке соответствующей ему среднеквадратической погрешности прогноза. Во избежание систематического занижения погрешности методики прогнозирования при ее проверке на зависимом материале использовалась теоретическая оценка, которая учитывает соотношение между числом оцениваемых параметров и продолжительностью используемого ряда наблюдений. Эта оценка определяется формулой:

$$\sqrt{V} = \frac{(n-1)}{\sqrt{(n-k)(n-k-1)}} \sigma \sqrt{1-R^2}. \quad (4)$$

В этой формуле  $k$  – число оцениваемых параметров, равное  $m+2$ ;  $\sigma$  – стандартная оценка среднеквадратического отклонения прогнозируемой величины  $Q(t+\Delta t)$ , полученная по ряду  $n$  ее значений;  $R$  – оценка множественного коэффициента корреляции между прогнозируемой величиной и ее предикторами [1].

Для каждого речного створа и при каждой заблаговременности прогноза  $\Delta t$  оптимальным считался вариант с минимальным значением погрешности прогноза  $\sqrt{V}$ .

Подобный анализ привел к следующим выводам.

1. Наиболее точные прогнозы с минимальными значениями  $\sqrt{V}$  дает использование единой формулы получения прогноза в течение всего летне-осеннего периода. Данное обстоятельство существенно упрощает методику прогнозирования и повышает надежность всех оценок, определяемых по ряду  $n = 2196$  наблюдений.

2. Для самых крупных рек Кама и Вишера с наименьшими уклонами и, следовательно, с минимальной скоростью реакции расходов воды в замыкающем створе на процессы, происходящие в русле и на водосборе, оптимальное значение параметра  $m$  оказалось равным 5. Для других рек оптимальные значения параметра  $m$  оказались меньше, однако их увеличение до 5 не приводит к ощутимому увеличению погрешности прогноза.

Полученные результаты позволяют для каждого речного створа использовать формулу (3) при значении  $m = 5$  для ежедневного прогнозирования среднесуточных расходов воды в период с июня по сентябрь. Для каждого речного створа и значения заблаговременности прогноза  $\Delta t$  параметры формулы (3) приведены в табл. 3.

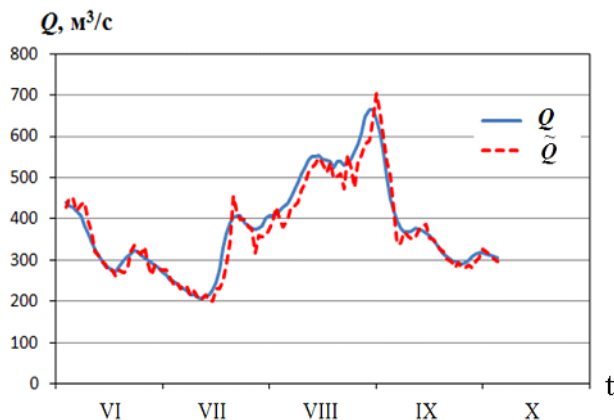
Возможности применения формулы получения прогноза (3) демонстрирует рис. 1, на котором приведены фактический и спрогнозированный графики колебаний среднесуточного расхода воды в створе р. Кама – с. Бондюг за 2015 год при заблаговременности прогноза  $\Delta t = 3$  суток.

**Таблица 3.** Параметры формулы (3) экстраполяции среднесуточных расходов воды  $a_0$ **Table 3.** Mean daily discharge extrapolation parameters

	$\Delta t = 1$	$\Delta t = 2$	$\Delta t = 3$	$\Delta t = 4$	$\Delta t = 5$
р. Кама – с. Бондюг					
$a_0$	1,95	2,93	3,74	4,28	4,69
$a_1$	-0,88	-1,96	-2,98	-3,65	-4,28
$a_2$	-0,26	-0,44	-0,43	-0,59	-0,58
$a_3$	0,07	0,38	0,49	0,67	0,86
$a_4$	0,13	0,04	0,06	0,07	-0,01
$a_5$	-0,03	0,02	0,07	0,10	0,16
$b$	2,30	6,75	13,32	21,74	31,54
р. Иньва – д. Слудка					
$a_0$	1,83	2,33	2,46	2,35	2,11
$a_1$	-1,03	-1,83	-2,17	-2,21	-2,06
$a_2$	0,10	0,29	0,39	0,42	0,37
$a_3$	0,08	0,11	0,13	0,12	0,17
$a_4$	-0,07	-0,15	-0,22	-0,17	-0,13
$a_5$	0,06	0,16	0,25	0,27	0,25
$b$	0,56	1,59	2,88	4,26	5,58
р. Обва – с. Карагай					
$a_0$	1,80	2,02	1,81	1,50	1,17
$a_1$	-1,24	-1,83	-1,76	-1,53	-1,21
$a_2$	0,40	0,74	0,70	0,63	0,54
$a_3$	0,01	-0,10	-0,05	0,02	0,03
$a_4$	-0,13	-0,14	-0,16	-0,20	-0,16
$a_5$	0,10	0,20	0,27	0,31	0,30
$b$	0,59	1,63	2,78	3,80	4,61
р. Вишера – пос. Рябиново					
$a_0$	1,43	1,56	1,45	1,32	1,22
$a_1$	-0,49	-0,78	-0,75	-0,66	-0,69
$a_2$	-0,05	0,01	0,06	-0,06	-0,01
$a_3$	0,08	0,14	0,01	0,06	0,11
$a_4$	-0,03	-0,14	-0,04	0,07	0,12
$a_5$	0,01	0,08	0,07	-0,01	-0,09
$b$	22,04	52,81	86,95	119,49	146,92

	$\Delta t = 1$	$\Delta t = 2$	$\Delta t = 3$	$\Delta t = 4$	$\Delta t = 5$
р. Яйва – с. Усть-Игум					
$a_0$	1,15	0,87	0,65	0,58	0,53
$a_1$	-0,46	-0,36	-0,19	-0,15	-0,19
$a_2$	0,17	0,22	0,16	0,10	0,15
$a_3$	0,03	0,01	-0,02	0,05	0,01
$a_4$	-0,04	-0,05	0,03	-0,02	0,00
$a_5$	0,04	0,08	0,05	0,08	0,09
$b$	7,61	16,14	22,25	25,89	29,27
р. Косьва – с. Перемское					
$a_0$	0,93	0,68	0,53	0,43	0,39
$a_1$	-0,17	-0,10	-0,06	-0,01	-0,05
$a_2$	0,05	0,07	0,09	0,04	0,06
$a_3$	0,03	0,06	0,03	0,04	0,05
$a_4$	0,02	-0,01	0,01	0,02	0,02
$a_5$	0,02	0,07	0,09	0,11	0,12
$b$	8,92	17,14	22,86	26,86	29,41
р. Чусовая – пгт Лямино					
$a_0$	1,49	1,26	0,96	0,75	0,65
$a_1$	-0,95	-0,91	-0,67	-0,46	-0,39
$a_2$	0,50	0,51	0,43	0,30	0,26
$a_3$	-0,20	-0,15	-0,12	-0,04	0,00
$a_4$	0,09	0,05	0,05	0,02	-0,01
$a_5$	0,01	0,07	0,10	0,12	0,14
$b$	10,60	25,82	38,10	46,76	52,61
р. Сылта – пос. Сылвенск					
$a_0$	1,77	2,13	2,06	1,87	1,69
$a_1$	-1,01	-1,71	-1,78	-1,61	-1,47
$a_2$	0,09	0,37	0,46	0,42	0,40
$a_3$	0,23	0,31	0,28	0,32	0,33
$a_4$	-0,14	-0,28	-0,30	-0,35	-0,40
$a_5$	0,04	0,11	0,15	0,20	0,25
$b$	2,17	5,92	10,31	14,36	17,70





**Рис. 1.** Фактический и спрогнозированный графики колебаний среднесуточного расхода воды в створе р. Кама – с. Бондюг за 2015 г. при заблаговременности прогноза  $\Delta t = 3$  суток.

**Fig. 1.** Three-day lead time forecast hydrograph for the Kama River at Bondyug (red dash line) against observed daily flow (blue solid line) during summer and autumn of 2015.

В табл. 4 для всех восьми речных створов и значений заблаговременности прогноза  $\Delta t = 1, \dots, 5$  приведены результаты верификации прогнозов по формуле (3) – значения множественного коэффициента корреляции  $R$ , отношения  $\sqrt{V_A} / \sigma_A$  и оправдываемости  $P$ , равной частоте случаев, когда абсолютное значение ошибки прогноза  $\tilde{Q}_A(t + \Delta t) - Q(t + \Delta t)$  не превышает величину  $0,674 \sigma_A$ .

В приведенной таблице обращают на себя внимание довольно высокие значения множественного коэффициента корреляции  $R$  и оправдываемости  $P$ , что свидетельствует о довольно высокой точности получаемых прогнозов. В то же время для некоторых створов и значений заблаговременности прогноза  $\Delta t$  отношение  $\sqrt{V_A} / \sigma_A$  превышает 0,8. Данное обстоятельство обусловлено тем, что при плавном очертании гидрографов рассматриваемых рек изменение расходов воды даже в течение 5 суток невелико. В результате погрешность инерционного прогноза  $\sigma_A$  мала, что может приводить к большим значениям  $\sqrt{V_A} / \sigma_A$  даже при высоких значениях  $R$ .

Согласно Наставлению [4] 1962 г. при числе проверочных прогнозов  $n \geq 25$  эффективность методики считается неудовлетворительной, если выполняется неравенство  $\sqrt{V} / \sigma_A > 0,8$  [4]. Это пока еще действующее правило означает, что при столь высоком значении  $\sqrt{V} / \sigma_A$  преимущество проверяемой методики перед инерционным прогнозом считается сомнительным.

**Таблица 4.** Показатели качества предлагаемой методики  
**Table 4.** Quality measures of the proposed technique

<b>Кама</b>	$\Delta t = 1$	$\Delta t = 2$	$\Delta t = 3$	$\Delta t = 4$	$\Delta t = 5$
$R$	0,999	0,999	0,99	0,98	0,96
$\sqrt{V} / \sigma_{\Delta}$	0,36	0,41	0,47	0,52	0,56
$P$	95%	92%	90%	88%	87%
<b>Иньва</b>	$\Delta t = 1$	$\Delta t = 2$	$\Delta t = 3$	$\Delta t = 4$	$\Delta t = 5$
$R$	0,99	0,96	0,91	0,85	0,78
$\sqrt{V} / \sigma_{\Delta}$	0,58	0,64	0,70	0,73	0,75
$P$	91%	90%	89%	90%	89%
<b>Обва</b>	$\Delta t = 1$	$\Delta t = 2$	$\Delta t = 3$	$\Delta t = 4$	$\Delta t = 5$
$R$	0,98	0,92	0,82	0,74	0,67
$\sqrt{V} / \sigma_{\Delta}$	0,69	0,79	0,84	0,84	0,83
$P$	92%	91%	91%	90%	90%
<b>Вишера</b>	$\Delta t = 1$	$\Delta t = 2$	$\Delta t = 3$	$\Delta t = 4$	$\Delta t = 5$
$R$	0,99	0,97	0,94	0,91	0,87
$\sqrt{V} / \sigma_{\Delta}$	0,76	0,75	0,74	0,71	0,69
$P$	86%	84%	84%	84%	85%
<b>Яйва</b>	$\Delta t = 1$	$\Delta t = 2$	$\Delta t = 3$	$\Delta t = 4$	$\Delta t = 5$
$R$	0,92	0,80	0,72	0,677	0,63
$\sqrt{V} / \sigma_{\Delta}$	0,90	0,90	0,88	0,86	0,84
$P$	88%	88%	86%	84%	84%
<b>Косьва</b>	$\Delta t = 1$	$\Delta t = 2$	$\Delta t = 3$	$\Delta t = 4$	$\Delta t = 5$
$R$	0,90	0,79	0,72	0,68	0,65
$\sqrt{V} / \sigma_{\Delta}$	0,94	0,89	0,85	0,83	0,80
$P$	83%	85%	82%	84%	84%
<b>Чусовая</b>	$\Delta t = 1$	$\Delta t = 2$	$\Delta t = 3$	$\Delta t = 4$	$\Delta t = 5$
$R$	0,96	0,85	0,77	0,72	0,69
$\sqrt{V} / \sigma_{\Delta}$	0,70	0,76	0,78	0,78	0,78
$P$	91%	91%	89%	87%	86%
<b>Сылва</b>	$\Delta t = 1$	$\Delta t = 2$	$\Delta t = 3$	$\Delta t = 4$	$\Delta t = 5$
$R$	0,99	0,97	0,93	0,89	0,86
$\sqrt{V} / \sigma_{\Delta}$	0,72	0,81	0,87	0,89	0,89
$P$	89%	88%	87%	86%	85%

В связи с этим следует обратить внимание на следующие два обстоятельства.

1. Во времена подготовки Наставления [4] отсутствие компьютерной техники не позволяло даже предполагать проверку методики на основе ряда  $n = 2196$  проверочных прогнозов.

2. Проверку статистической достоверности преимущества проверяемой методики перед инерционным прогнозом необходимо выполнять современными методами математической статистики.

В [1] рекомендуется критерий, согласно которому при стандартном уровне значимости 5 % преимущество проверяемой методики перед инерционным прогнозом должно быть признано статистически достоверным, а саму методику – достаточно эффективной, если выполняется неравенство:

$$B = n \ln \left[ 1 + \frac{(V - \sigma_{\Delta}^2)^2}{4V\sigma_{\Delta}^2(1 - r^2)} \right] > 3,84, \quad (5)$$

где  $r$  – стандартная оценка коэффициента корреляции между ошибками прогноза  $\tilde{Q}(t + \Delta t) - Q(t + \Delta t)$  по проверяемой методике и ошибками  $\tilde{Q}_I(t + \Delta t) - Q(t + \Delta t)$  инерционного прогноза.

Неравенство (5) выполняется для всех восьми речных створов и значений заблаговременности прогноза  $\Delta t = 1, \dots, 5$ . В качестве примера в табл. 5 приведены значения статистики критерия  $B$  для р. Косьва, сток которой зарегулирован Широковским водохранилищем и для которой были получены самые высокие значения  $\sqrt{V_A} / \sigma_{\Delta}$ .

**Таблица 5.** Проверка эффективности прогнозов для р. Косьва – с. Перемское  
**Table 5.** Forecast efficiency test for the Kos'va River at Peremskoe

	$\Delta t = 1$	$\Delta t = 2$	$\Delta t = 3$	$\Delta t = 4$	$\Delta t = 5$
$\sqrt{V} / \sigma_{\Delta}$	0,94	0,89	0,85	0,83	0,80
$r$	0,92	0,87	0,83	0,79	0,76
$B$	54	120	180	196	249

Все значения статистики используемого критерия  $B$  многократно превышают критическое значение 3,84. Следовательно, даже для данного речного створа эффективность применения формулы (3) для получения ежедневных прогнозов расхода воды в течение летне-осеннего периода с заблаговременностью  $\Delta t = 1, \dots, 5$ . не вызывает сомнений.

Таким образом, для основных притоков воды в Камское водохранилище линейная экстраполяция гидрографов по формуле (3) может использоваться в качестве простой, но достаточно эффективной методики ежедневного прогнозирования среднесуточных расходов на 1–5 суток в течение летне-осеннего периода.

## Заключение

При оценке применимости методик краткосрочного прогнозирования стока относительно крупных рек с плавными очертаниями гидрографов их экстраполяция может использоваться в качестве безусловной альтернативы вместо метода инерционного прогноза. Экстраполяция выражается линейной формулой, в которой в качестве аргументов используются наблюдавшиеся расходы воды предшествующего периода. Такая замена целесообразна, если предлагаемый метод альтернативного прогноза является точнее инерционного прогноза.

В качестве примера успешной реализации предлагаемого подхода приводятся результаты линейной экстраполяции гидрографов восьми основных притоков Камского водохранилища. При экстраполяции учитываются наблюдавшиеся расходы воды за сутки составления прогноза и за пять предыдущих суток. Данный метод основан на данных гидрологических наблюдений за период с 1998 по 2015 г. и позволяет получать ежедневные прогнозы среднесуточных расходов воды с заблаговременностью от 1 до 5 суток в течение периода с 1 июня по 30 сентября.

Верификация прогнозов показала их удовлетворительное качество, что позволяет рекомендовать схему их получения к применению в оперативной практике гидрологического прогнозирования в целях обеспечения безопасности и эффективности использования водных ресурсов Камского водохранилища.

На основе рядов из 2196 проверочных прогнозов для каждого из восьми речных створов при заблаговременности прогноза от 1 до 5 суток установлена статистическая достоверность преимущества метода экстраполяции гидрографов перед методом инерционного прогноза. Это позволяет использовать данный метод в качестве альтернативы при оценке эффективности применения более совершенных методов прогнозирования стока основных притоков Камского водохранилища, которые разрабатываются в отделе речных гидрологических прогнозов Гидрометцентра России.

## Список литературы

1. *Борщ С.В., Христофоров А.В.* Оценка качества прогнозов речного стока // Труды Гидрометцентра России. 2015. Вып. 355. Специальный выпуск. 198 с.
2. *Комлев А.М., Черных Е.А.* Реки Пермской области. Режим, ресурсы, прогнозы, проблемы. Пермь: Перм. кн. изд., 1984. 214 с.
3. Методические указания по проведению производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиофизических прогнозов. РД 52.27.284-91. СПб.: Гидрометеиздат, 1991. 150 с.
4. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть 1. Прогнозы режима вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 193 с.
5. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 2. Краткосрочный прогноз расхода и уровня воды на реках. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 245 с.

6. Guide to hydrological practices. Vol. II. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices // WMO-No. 168. 2009. 738 p.
7. Jolliffe I.T., Stephenson D.B. Forecast Verification. Wiley, 2003. 240 p.
8. Lambert A.O. Development and Use of the Management Overview of Flood Forecasting Systems (MOFFS) // Technical Reports in Hydrology and Water Resources No. 55. Geneva: HWR, 1994. 23 p
9. Manual on Flood Forecasting and Warning. // WMO-No. 1072. Geneva, 2011. 138 p.
10. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. Part 1 – A discussion of principles // J. Hydrol. 1970. Vol. 10. P. 282-290.
11. National Weather Service River Forecast Verification Plan. Report of the Hydrologic Verification System Requirements Team. U.S. Department of Commerce. National Oceanic and Atmospheric Administration. 2006. 44 p.

### References

1. Borsch S.V., Khristoforov A.V. Ocenka kachestva prognozov rechnogo stoka [Hydrologic flow forecast verification]. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2015, vol. 355, 198 p. [in Russ.].
2. Komlev A.M., Chernyh E.A. Reki Permskoy oblasti. Rezhim, resursy, prognozy, problemy. Perm: Permskoe knizhnoe izdatel'stvo publ., 1984, 214 c. [in Russ.].
3. Metodicheskie ukazaniya po provedeniyu proizvodstvennyh (operativnyh) ispytaniy novyh i usovershenstvovannyh metodov gidrometeorologicheskikh i geliofizicheskikh prognozov. RD 52.27.284-91. Saint Petersburg: Gidrometeoizdat publ., 1991, 150 p. [in Russ.].
4. *Nastavlenie po sluzhbe prognozov. Razdel 3. Part 1. Prognozy rezhima vod su-shi.* Leningrad: Gidrometeoizdat publ., 1962, 193 p. [in Russ.].
5. *Rukovodstvo po gidrologicheskim prognozam. Part 2. Kratkosrochnnyy prognoz raskhoda i urovnya vody na rekah.* Leningrad: Gidrometeoizdat publ., 1989, 245 p. [in Russ.].
6. Guide to Hydrological Practices. Vol. II. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices. *WMO-No 168*, 2009, 738 p.
7. Jolliffe I.T., Stephenson D.B. Forecast Verification. Wiley, 2003, 240 p.
8. Lambert A.O. Development and Use of the Management Overview of Flood Forecasting Systems (MOFFS). *Technical Reports in Hydrology and Water Resources No. 55.* Geneva, HWR, 1994, 23 p.
9. Manual on Flood Forecasting and Warning. WMO-No. 1072. Geneva, 2011, 138 p.
10. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. Part 1 – A discussion of principles. *J. Hydrol.*, 1970, vol. 10, pp. 282-290.
11. National Weather Service River Forecast Verification Plan. Report of the Hydrologic Verification System Requirements Team. U.S. Department of Commerce. National Oceanic and Atmospheric Administration, 2006, 44 p.

Поступила в редакцию 06.06.2018 г.

Received by the editor 06.06.2018.