

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2022-3-127-143>

УДК 556.06:504.064.36

## Методики краткосрочного прогнозирования стока рек бассейна Камы

*С.В. Борщ, Н.К. Семенова,  
Ю.А. Симонов, А.В. Христофоров*

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр  
Российской Федерации, г. Москва, Россия  
borsch@mecom.ru, simonov@mecom.ru, khristoforov\_a@mail.ru*

Для рек бассейна Камы разработаны две методики ежедневного краткосрочного прогнозирования среднесуточных расходов воды с заблаговременностью 1, 2, 3 суток. В первой методике используется концептуальная модель формирования речного стока HBV-96 с последующей коррекцией получаемых с ее помощью прогнозов. Вторая методика использует метод экстраполяции гидрографа и ограничивается известными к дате составления прогноза данными гидрологических наблюдений. В первой методике для периода заблаговременности гидрологического прогноза используются ожидаемые значения температуры и осадков, полученные с помощью метеорологической модели COSMO-Ru. Выполнен анализ влияния ошибок метеорологических прогнозов на точность прогнозов речного стока.

Результаты проверки на независимом материале показали, что в целом обе методики дают удовлетворительные прогнозы. Методика, использующая модель формирования стока и метеорологическую информацию, дает более точные результаты, чем метод экстраполяции гидрографа, причем ее преимущество возрастает с увеличением заблаговременности прогнозов.

*Ключевые слова:* бассейн Камы, расход воды, гидрологическая модель, коррекция, экстраполяция, верификация, качество прогнозов

## Short-term streamflow forecast techniques for the Kama River basin

*S.V. Borshch, N.K. Semenova,  
Yu.A. Simonov, A.V. Khristoforov*

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia  
borsch@mecom.ru, simonov@mecom.ru, khristoforov\_a@mail.ru*

For the rivers of the Kama basin, two methods have been developed for daily short-term forecasting of average daily water discharges with a lead time of 1, 2, and 3 days.

The first technique uses the HBV-96 river runoff formation conceptual model and the subsequent correction of forecasts outputs. The second technique is based on the hydrograph extrapolation method and is limited to the data of hydrological observations available by the date of the forecast. For the first technique, the expected values of the COSMO-Ru meteorological model temperature and precipitation forecasts are used for the lead-time period of the hydrological forecast. The influence of meteorological forecast errors on the accuracy of river streamflow forecasts was analyzed.

The results of the verification based on an independent sample showed that, in general, both methods give a satisfactory forecast quality. The technique that uses the runoff formation model and meteorological information is slightly more accurate than the hydrograph extrapolation method, and its advantage increases with increasing forecast lead time.

*Keywords:* Kama basin, water discharge, hydrological model, correction, extrapolation, verification, forecast quality

## Введение

В современной отечественной и зарубежной практике оперативного прогнозирования речного стока все активнее внедряются различные модели его формирования. В качестве входной информации эти модели используют известные к дате составления прогноза данные гидрометеорологических наблюдений, а в период его заблаговременности учитывают данные об ожидаемом ходе метеорологических элементов, получаемые с помощью различных метеорологических моделей [7, 12, 22, 23].

Прогнозы метеорологических элементов неизбежно отклоняются от их истинных значений. Размеры ошибок метеорологических прогнозов могут быть весьма значительными, варьируют для различных элементов и систематически возрастают с увеличением их заблаговременности [25]. Неопределенность используемых в моделях формирования речного стока метеорологических прогнозов оказывает негативное воздействие на качество гидрологического прогнозирования. Это воздействие тем значительнее, чем больше погрешность прогноза учитываемых в модели метеорологических элементов и выше их влияние на результаты гидрологического моделирования и последующего прогнозирования. С увеличением заблаговременности гидрологического прогноза это воздействие достигает размеров, которые лимитируют максимальные значения этой заблаговременности [1, 4, 12, 22]. В связи с этим возникает проблема количественной оценки влияния неопределенности метеорологических прогнозов, используемых моделями формирования речного стока, на точность его прогнозирования.

Для решения этой проблемы в предлагаемой статье производится сравнение погрешности прогнозов речного стока различной заблаговременности с погрешностью его расчета, который использует не прогнозируемые, а фактические значения метеорологических элементов и может рассматриваться как прогноз нулевой заблаговременности.

Реализация такого сравнения выполнена на примере прогнозирования среднесуточных расходов воды на реках бассейна Камы на основе широко используемой концептуальной модели формирования речного стока HBV-96 [13, 15, 17, 19, 21, 24]. Для периода заблаговременности прогноза использованы ожидаемые значения приземной температуры воздуха и осадков, полученные с помощью метеорологической модели COSMO-Ru [11, 13].

Внедрение моделей формирования речного стока создает конкуренцию более простым методам, в которых используются физико-статистические зависимости прогнозируемой величины от известных к дате составления прогноза характеристик влияющих на нее факторов [1]. В связи с этим возникает проблема оценки преимущества более физически и информационно обоснованных, но и требующих значительно больших временных и трудовых затрат методов прогнозирования речного стока на основе моделей его формирования.

В предлагаемой статье в целях решения поставленной проблемы для тех же рек бассейна Камы качество прогнозов среднесуточных расходов воды по методике, использующей модель формирования речного стока HBV-96, сравнивается с качеством прогнозов, получаемых методом экстраполяции гидрографа. Этот метод основан на статистической зависимости прогнозируемого расхода или уровня воды от аналогичных характеристик, известных к дате составления прогноза. Он разработан в отделе речных гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» и используется в рамках автоматизированной системы подготовки и ежедневного выпуска краткосрочных и среднесрочных прогнозов расходов и уровней воды на реках России в течение всего года или его отдельных сезонов [2, 5, 6, 13, 16].

### **Анализируемые речные бассейны**

В качестве объекта исследования выбраны речные бассейны, находящиеся в пределах водосбора Камского водохранилища. Выпуск краткосрочных прогнозов среднесуточных расходов воды в течение всего года, в особенности в период формирования и прохождения весеннего половодья и дождевых паводков, необходим для предупреждения об опасных и нежелательных гидрологических явлениях в бассейне Камы и для научно обоснованного и эффективного управления работой Камского гидроузла.

Расположение данных речных бассейнов показано на рис. 1.

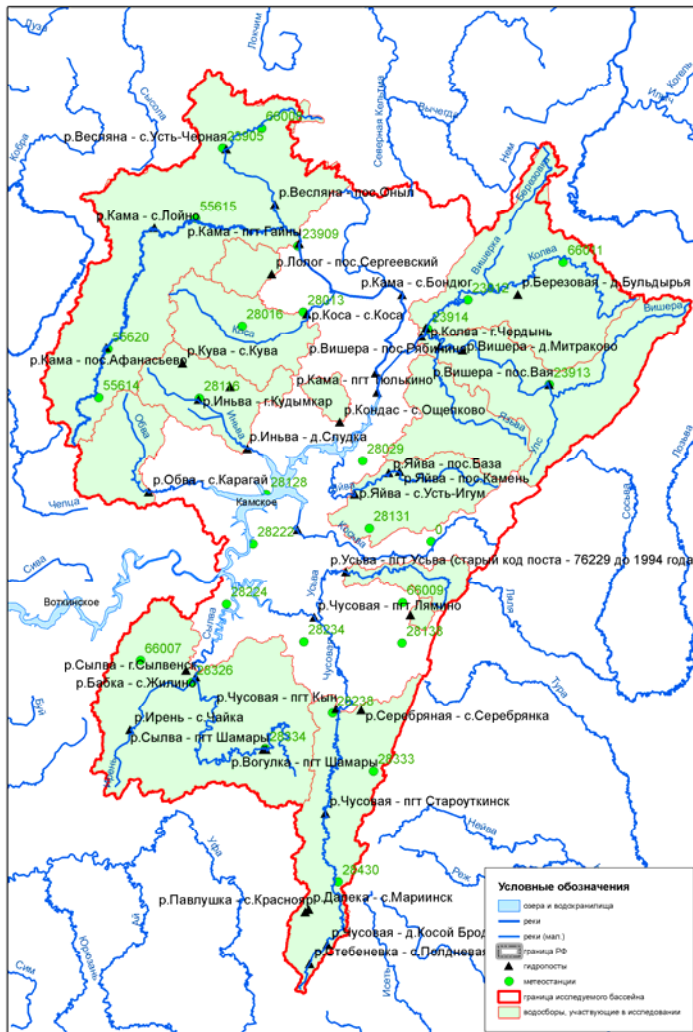
В табл. 1 для всех девяти речных бассейнов приведены индекс гидрологического поста, название реки, название пункта гидрологических наблюдений, площадь водосбора (км<sup>2</sup>).

Водосборы рассматриваемых рек расположены в пределах центральной части Верхнекамской возвышенности, в зоне умеренно континентального климата. Зима холодная, с устойчивым снежным покровом, однако возможны оттепели в любой месяц зимы. Среднегодовая температура воздуха выше нуля и составляет от 0 до 3 °С. Годовая амплитуда температуры составляет до 35–40 °С. Бассейн Камы относится к зоне достаточного увлажнения: годовая сумма осадков составляет до 800 мм.

Устойчивый снежный покров формируется в конце октября – первой половине ноября. Активное таяние снежного покрова в среднем начинается в середине апреля, а в северо-восточной части бассейна (верховья рек

Вишера и Колва) – в конце апреля. Окончательный сход снежного покрова происходит в течение 10 дней.

Рассматриваемые реки имеют восточноевропейский тип водного режима с преимущественно снеговым питанием. Характерный гидрограф представлен на рис. 2. Весеннее половодье проходит в марте–июне, за этот период проходит более 60 % годового стока. В течение лета и осени проходят дождевые паводки. В этот период может проходить до 30 % годового стока [10].



**Рис. 1.** Расположение анализируемых речных бассейнов.  
**Fig. 1.** Location of the analyzed river basins.

**Таблица 1.** Сведения об анализируемых речных бассейнах  
**Table 1.** Information about the analyzed river basins

Индекс	Река	Пункт	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>
76075	Коса	с. Коса	6340
76159	Обва	с. Карагай	4210
76141	Иньва	д. Слудка	5210
76139	Иньва	г. Кудымкар	2050
76700	Кама	с. Лойно	11500
76112	Колва	г. Чердынь	13400
76176	Чусовая	пгт Староуткинск	5450
76701	Сылва	с. Сылвенск	17600
76692	Сылва	пгт. Шамары	2140



**Рис. 2.** Фактические (1) и спрогнозированные (2) с заблаговременностью 1 сутки гидрографы 2017 г. в створе р. Сылва – пгт Шамары.

**Fig. 2.** Actual (1) and predicted (2) with 1 day lead-time hydrographs in 2017 in the river. Sylva at the village of Shamary.

### Исходные данные

В качестве исходной гидрометеорологической информации использованы ежедневные данные о среднесуточных расходах воды в замыкающих створах, о среднесуточной приземной температуре воздуха и суточной сумме осадков на сети гидрологических постов и метеорологических станций бассейна Камского водохранилища за период с 2008 по 2018 год.

При получении гидрологических прогнозов для периода их заблаговременности использованы выходные данные метеорологической модели COSMO-Ru [11]. Метеорологические прогнозы совмещались с данными наблюдений на метеостанциях путем билинейной интерполяции, после чего осуществлялся перевод данных в суточный интервал по времени

и осреднение метеорологических наблюдений и прогнозов по территории каждого речного бассейна.

Архив гидрометеорологической информации был разделен на обучающую и контрольную выборку. Обучающая выборка, образованная данными за семилетний период с 01.01.2008 г. по 31.12.2014 г., использована для построения сравниваемых методик прогнозирования стока рассматриваемых рек. Контрольная выборка, образованная данными за четырехлетний период с 01.01.2015 г. по 31.12.2018 г., использована для оценки качества этих прогнозов на независимом материале.

### **Модель формирования речного стока HBV-96 и ее коррекция**

Концептуальная водно-балансовая модель формирования речного стока HBV-96 разработана в Гидрометеорологическом институте Швеции [14, 15, 21]. Модель способна описывать процессы формирования и таяния снежного покрова, поэтому она успешно применяется в расчетах и прогнозах расходов воды в странах с умеренным климатом [13, 19, 24].

В качестве входной информации модель использует осредненные по территории водосбора ежедневные значения среднесуточной температуры приземного слоя воздуха и суточного слоя осадков. На выходе получаются ежедневные значения среднесуточных расходов воды в замыкающем речном створе.

Модель состоит из пяти блоков, которые описывают основные процессы формирования речного стока:

- динамику снежного покрова;
- транспирацию и испарение с поверхности водосбора;
- динамику почвенной влаги;
- формирование поверхностного, почвенного и грунтового склонового стока;
- трансформацию стока с различных частей водосбора в русловой сети [14, 22].

В качестве входной информации модель использует осредненные по территории водосбора ежедневные значения среднесуточной температуры приземного слоя воздуха и суточного слоя осадков. На период заблаговременности гидрологического прогноза ожидаемые значения температуры и осадков определяются по данным метеорологической модели COSMO-Ru [11]. На выходе получаются ежедневные прогнозы среднесуточных расходов воды в замыкающем речном створе.

В модели фигурируют 12 параметров, подлежащих оптимизации по данным гидрометеорологических наблюдений. Оптимальные значения параметров модели находились исходя из минимума суммы квадратов ошибок модельных расчетов по обучающей выборке, образованной данными гидрологических и метеорологических наблюдений за период с 01.01.2008 г. по 31.12.2014 г. Калибровка модели выполнена с помощью

алгоритма перемешивания и эволюции комплексов (выборок) значений параметров SCE-UA [20]. Использовано программное обеспечение PEST, которое позволяет производить оптимизацию параметров широкого круга моделей, в том числе при помощи рассматриваемого алгоритма оптимизации [18].

В целях повышения точности модельных расчетов применен метод коррекции, который учитывает автокорреляцию их ошибок, широко используемый в мировой практике гидрологических прогнозов [3, 12, 17, 22]. Идея метода состоит в том, что если к дате  $t - \Delta t$  составления прогноза с заблаговременностью  $\Delta t$  суток уже известные результаты прогнозирования демонстрируют завышение или, наоборот, занижение фактических значений, то составляемый прогноз целесообразно уменьшить или соответственно увеличить. Обоснованность такого приема возрастает, если ошибки предшествующих прогнозов образуют серию отрицательных или положительных значений, что и было отмечено для рассматриваемых рек бассейна Камы [13]. Коррекция получаемого с помощью гидрологической модели HBV и метеорологической модели COSMO-Ru прогноза среднесуточного расхода воды  $\hat{Q}(t)$  выполняется по формуле:

$$\tilde{Q}(t) = \hat{Q}(t) + \sum_{i=0}^l a_i(\Delta t)[Q(t - \Delta t - i) - \hat{Q}(t - \Delta t - i)] + b(\Delta t). \quad (1)$$

При каждом значении  $l$  и заблаговременности прогноза  $\Delta t = 1, 2, 3$  суток оптимальные значения параметров формулы (1) оценивались методом наименьших квадратов по данным за предназначенный для калибровки период.

Оптимальное число  $l$  определялось с помощью критерия Акаике [3]. Сравнение таких оптимальных значений для рассматриваемых рек бассейна Камы позволило в целях упрощения методики принять для них единое значение  $l = 4$  [13].

Реализация методики прогнозирования среднесуточных расходов воды, основанной на модели HBV с ее последующей коррекцией, выполнена на языке программирования Python (версия 3.4) с привлечением программных модулей, таких как Numpy, Pandas, Arcgisscripting, SciPy, Matplotlib. Программное обеспечение включает ряд программ, реализующих подготовку исходной гидрометеорологической информации; оптимизацию параметров модели; оценку параметров формулы (1); коррекцию выпускаемых прогнозов.

### Метод экстраполяции гидрографа

Метод экстраполяции гидрографа разработан в отделе речных гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» и используется в рамках автоматизированной системы подготовки и ежедневного выпуска краткосрочных и среднесрочных прогнозов расходов и уровней воды

на реках России в течение всего года или его отдельных сезонов [2, 5, 6, 13, 16].

Метод отличается простотой и не требует учета метеорологических данных и прогнозов. Он основан на том, что характерный для достаточно крупных равнинных рек плавный ход среднесуточных расходов воды дает основание для их прогнозирования путем экстраполяции гидрографа. Такая экстраполяция может определять прогноз среднесуточного расхода воды с заблаговременностью  $\Delta t$  суток в виде обобщенного полинома. Оценка  $k+1$  его параметров по известным к дате составления прогноза  $t-\Delta t$  среднесуточным расходам воды  $Q(t-\Delta t)$ ,  $Q(t-\Delta t-1)$ , ...,  $Q(t-\Delta t-k)$  приводит к тому, что получаемый путем такой экстраполяции прогноз выражается в виде:

$$\hat{Q}(t) = \sum_{i=0}^k c_i(\Delta t) Q(t-\Delta t-i) + d(\Delta t), \quad (2)$$

где  $c_0(\Delta t)$ ,  $c_1(\Delta t)$ , ...,  $c_k(\Delta t)$  и  $d(\Delta t)$  – параметры линейной формулы, зависящие от заблаговременности прогноза  $\Delta t$  и подлежащие оценке по данным гидрологических наблюдений. По существу, данный метод использует идею фильтра Н. Винера, широко используемого для экстраполяции случайных процессов [26].

При заданной заблаговременности прогноза  $\Delta t = 1, 2, 3$  суток параметры формулы (2) оценивались методом наименьших квадратов по ряду ежедневных гидрологических наблюдений за период с 01.01.2008 г. по 31.12.2014 года.

При каждом значении заблаговременности  $\Delta t = 1, 2, 3$  суток подбиралось оптимальное число  $k$ , при котором рассчитанная по обучающей выборке среднеквадратическая погрешность прогноза принимает минимальное значение. Эта погрешность определялась на зависимом материале, однако с целью устранения ее систематической отрицательной ошибки учитывалось соотношение между длиной семилетнего ряда ежедневных наблюдений за 2557 суток и числом оцениваемых параметров  $k+1$  в соответствии с рекомендациями работы [1]. Анализ показал, что для всех рассматриваемых рек бассейна Камы оптимальные значения параметра  $k$  не превышали 5. На этом основании все прогнозы среднесуточных расходов воды определялись с помощью формул (2) и (3) при  $k = 5$ .

Определяемые формулой (2) величины  $\hat{Q}(t)$  могут принимать недопустимо высокие и низкие значения. Недопустимо высокие значения  $\hat{Q}(t + \Delta t)$  могут возникать при прогнозировании расходов воды на крутом подъеме половодья или паводка. Недопустимо низкие и даже отрицательные значения  $\hat{Q}(t)$  могут возникать при прогнозировании расходов и уровней воды на крутом спаде половодья или паводка.



Во избежание необоснованно низких и высоких значений прогноза результаты применения формулы (2) необходимо корректировать, заменяя такие экстремальные значения  $\hat{Q}(t)$  допустимым минимумом  $\min Q$  или максимумом  $\max Q$  [5, 16]. Окончательный прогноз расхода воды выражается формулой:

$$\tilde{Q}(t) = \begin{cases} \min Q, & \text{если } \hat{Q}(t) < \min Q; \\ \hat{Q}(t + \Delta t), & \text{если } \min Q \leq \hat{Q}(t) \leq \max Q; \\ \max Q, & \text{если } \hat{Q}(t) > \max Q. \end{cases} \quad (3)$$

Входящие в формулу (3) минимальные  $\min Q$  и максимальные  $\max Q$  допустимые значения расходов воды определялись по имеющемуся для каждого речного бассейна многолетнему ряду наблюдений в соответствии с принятыми в гидрологических расчетах правилами [9]. В качестве значения  $\min Q$  использована оценка минимального расхода воды ежегодной вероятностью превышения (обеспеченностью) 99 %. В качестве значения  $\max Q$  использована оценка максимального расхода воды ежегодной вероятностью превышения 1 %.

### Верификация методик прогнозирования

Для проверки описанных выше методик прогнозирования на независимом материале в качестве контрольной выборки использованы данные за период с 01.01.2015 г. по 31.12.2018 г. продолжительностью  $n = 1461$  суток. Для каждого значения заблаговременности прогноза расхождение между фактическими значениями расходов воды  $Q(t)$  и получаемыми по каждой из методик прогнозами  $\tilde{Q}(t)$  характеризуется среднеквадратической погрешностью прогнозов

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n [Q(t) - \tilde{Q}(t)]^2}. \quad (4)$$

В соответствие с Наставлением по службе прогнозов для оценки эффективности прогнозов величина  $S$  сравнивалась со среднеквадратической погрешностью инерционного прогноза, при котором прогноз расхода воды на дату  $t$  с заблаговременностью  $\Delta t$  суток определяется известной к дате составления прогноза величиной  $Q(t - \Delta t)$ . Погрешность инерционного прогноза определяется формулой:

$$\sigma_{\Delta} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{t=1}^n (\Delta_t - \bar{\Delta})^2} \quad (5)$$

где значение  $\bar{\Delta}$  – среднее арифметическое ряда  $\Delta_1, \dots, \Delta_n$  наблюдавшихся изменений расхода воды за период заблаговременности прогноза [8].

Кроме того, рассчитывался менее подходящий для оценки эффективности краткосрочных прогнозов, но широко используемый в мировой гидрологии показатель эффективности Нэша – Сатклиффа:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n [Q(t) - \tilde{Q}(t)]^2}{\sum_{t=1}^n [Q(t) - \bar{Q}]^2}, \quad (6)$$

где  $\bar{Q}$  – среднее арифметическое ряда  $Q(1), \dots, Q(n)$  фактических значений расхода воды [4, 23].

Из формулы (4) следует, что при большом значении длины ряда проверочных прогнозов  $n$  их среднеквадратическая погрешность достаточно точно выражается формулой:

$$S = \sigma \sqrt{1 - NSE}, \quad (7)$$

где  $\sigma$  – стандартное отклонение прогнозируемых расходов воды, полученное по ряду  $Q(1), \dots, Q(n)$ .

Помимо используемых в следующих разделах показателей качества прогнозов  $S/\sigma_{\Delta}$  и  $NSE$  анализировались совмещенные графики хода фактических и спрогнозированных среднесуточных расходов воды с заблаговременностью  $\Delta t = 1, 2, 3$  суток. Хорошее совпадение этих графиков для всех рассматриваемых речных бассейнов демонстрирует достаточно высокое качество прогнозов, получаемых с помощью обеих методик. В качестве примера совмещенные графики хода фактических среднесуточных расходов воды в створе р. Сылва – пгт Шамары в 2017 г. и хода их скорректированных прогнозов с заблаговременностью  $\Delta t = 1$  сутки, полученных с помощью гидрологической модели HBV-96 и метеорологической модели COSMO-Ru, приведены на рис. 2.

### Оценка влияния неопределенности метеорологических прогнозов

Негативное влияние ошибок прогнозирования метеорологических элементов на качество прогнозов речного стока, основанных на различных моделях его формирования, является хорошо известным фактом [1, 7, 22]. С увеличением заблаговременности прогноза это влияние усиливается, так как неизбежные ошибки метеорологических прогнозов при этом возрастают и могут быть весьма значительными [25]. Увеличение погрешности прогнозов речного стока будет тем значительнее, чем больше погрешность прогноза учитываемых в модели метеорологических характеристик и выше их влияние на результаты гидрологического моделирования и последующего прогнозирования [1, 4].

Указанная закономерность справедлива и для методики прогнозирования среднесуточных расходов воды на реках бассейна Камы, использующей модель формирования речного стока HBV-96, так как в этой

методике для периода заблаговременности гидрологического прогноза используются полученные с помощью метеорологической модели COSMO-Ru ожидаемые значения среднесуточной приземной температуры и суточного слоя осадков, осредненные по территории водосбора. Эти значения содержат вероятные ошибки, которые не только увеличиваются с ростом заблаговременности прогноза, но и накапливаются. В частности, при заблаговременности прогноза расходов воды 2 суток используемая моделью входная информация содержит метеорологические прогнозы с заблаговременностью 1 и 2 суток, а при заблаговременности прогноза расходов воды 3 суток входная информация содержит метеорологические прогнозы с заблаговременностью 1, 2 и 3 суток.

В целях оценки влияния ошибок метеорологических прогнозов для методики прогнозирования среднесуточных расходов воды на реках бассейна Камы на основе моделей HBV-96 и COSMO-Ru предлагается следующий прием.

В дополнение к получаемым с помощью данной методики прогнозам с заблаговременностью  $\Delta t = 1, 2, 3$  суток, был выполнен расчет среднесуточных расходов при использовании не прогнозируемых, а фактических значений среднесуточной приземной температуры и суточного слоя осадков. Получение подобных модельных расчетов можно интерпретировать как прогноз нулевой заблаговременности ( $\Delta t = 0$ ). В табл. 2 для рассматриваемых речных бассейнов приведены значения показателя  $NSE(\Delta t)$  Нэша – Саттклифа для прогнозов среднесуточных расходов воды различной заблаговременности  $\Delta t$ , включая значение  $\Delta t = 0$ , что соответствует их расчету.

Близкие к единице значения показателя  $NSE(\Delta t)$  свидетельствуют о высоком качестве моделирования с помощью HBV-96 и коррекции среднесуточных расходов воды. Снижение этих показателей с увеличением заблаговременности прогноза  $\Delta t$  отражает влияние ошибок метеорологического прогноза с помощью модели COSMO-Ru.

Ухудшение качества прогнозирования с ростом его заблаговременности характеризуется отношением  $U(\Delta t)$  среднеквадратической погрешности  $S(\Delta t)$  прогнозов среднесуточных расходов воды с заблаговременностью  $\Delta t$  к среднеквадратической погрешности их расчета  $S(0)$ . С учетом равенства (5) это отношение определяется формулой:

$$U(\Delta t) = \frac{S(\Delta t)}{S(0)} = \sqrt{\frac{1 - NSE(\Delta t)}{1 - NSE(0)}}. \quad (8)$$

Значения данного отношения приведены в табл. 2.

Данные табл. 2 показывают, что для всех рассматриваемых речных бассейнов отношение  $U(\Delta t)$  увеличивается с ростом заблаговременности прогноза  $\Delta t$  от 1 до 3 суток. В среднем отношение равно 1,17 для

прогнозов с заблаговременностью 1 сутки, 2,25 для прогнозов с заблаговременностью 2 суток и 3,27 для прогнозов с заблаговременностью 3 суток.

**Таблица 2.** Значения показателя  $NSE(\Delta t)$  и отношения  $U(\Delta t)$  для прогнозов различной заблаговременности  $\Delta t$

**Table 2.** Values of the  $NSE(\Delta t)$  and the ratio  $U(\Delta t)$  for forecasts of various lead times

		$NSE(\Delta t)$				$U(\Delta t)$		
Река	Пункт	$\Delta t = 0$	$\Delta t = 1$	$\Delta t = 2$	$\Delta t = 3$	$\Delta t = 1$	$\Delta t = 2$	$\Delta t = 3$
Коса	с. Коса	0,998	0,997	0,988	0,973	1,17	2,35	3,52
Обва	с. Карагай	0,993	0,991	0,996	0,937	1,13	0,76	3,00
Иньва	д. Слудка	0,994	0,994	0,973	0,941	1,02	2,16	3,19
Иньва	г. Кудымкар	0,984	0,983	0,928	0,873	1,03	2,13	2,83
Кама	с. Лойно	0,999	0,997	0,988	0,975	1,73	3,46	5,00
Колва	г. Чердынь	0,997	0,996	0,978	0,95	1,18	2,77	4,18
Чусовая	пгт Староуткинск	0,976	0,973	0,912	0,862	1,07	1,93	2,42
Сылва	с. Сылвенск	0,994	0,992	0,96	0,92	1,19	2,65	3,75
Сылва	пгт. Шамары	0,980	0,979	0,921	0,955	1,03	1,99	1,51

Таким образом, негативная роль ошибок метеорологических прогнозов при их заблаговременности 1 сутки относительно невелика. Погрешность прогнозов расхода воды с заблаговременностью 2 суток превышает погрешность прогнозов с суточной заблаговременностью в среднем в 1,9 раза, а с заблаговременностью 3 суток – почти в 2,8 раза. Как будет показано в следующем разделе, столь стремительный рост среднеквадратической погрешности прогнозов с увеличением их заблаговременности не обязательно приводит к снижению их эффективности по сравнению с инерционным прогнозом, так как его погрешность также растет.

### Сравнение методик прогнозирования

Для получения краткосрочных прогнозов среднесуточных расходов воды на реках бассейна Камы в настоящей работе рассматриваются две методики.

Первая методика использует концептуальную модель формирования речного стока HBV-96, метеорологическую модель COSMO-Ru и последующую коррекцию получаемых с помощью этих моделей прогнозов.

Вторая методика использует метод экстраполяции гидрографа, ограничивается известными к дате составления прогноза данными гидрологических наблюдений и прогнозирует расходы воды по формулам (2) и (3).

В целях сравнения обеих методик используется главный показатель качества краткосрочных прогнозов речного стока – отношение  $S/\sigma_{\Delta}$  среднеквадратической погрешности получаемых с их помощью прогнозов к среднеквадратической погрешности инерционного прогноза. Согласно Наставлению по службе прогнозов [8] методика считается хорошей при соотношении  $S/\sigma_{\Delta} \leq 0,50$ , удовлетворительной при  $0,50 < S/\sigma_{\Delta} \leq 0,80$  и неудовлетворительной при  $S/\sigma_{\Delta} > 0,80$ .

Для сравниваемых методик значения показателя  $S/\sigma_{\Delta}$  при заблаговременности прогнозов  $\Delta t = 1, 2, 3$  суток приведены в табл. 3.

**Таблица 3.** Значения показателя  $S/\sigma_{\Delta}$  для двух методик

**Table 3.** Indicator values  $S/\sigma_{\Delta}$  for two methods

Река	Пункт	Первая методика			Вторая методика		
		$\Delta t = 1$	$\Delta t = 2$	$\Delta t = 3$	$\Delta t = 1$	$\Delta t = 2$	$\Delta t = 3$
Коса	с. Коса	0,54	0,54	0,56	0,47	0,49	0,54
Обва	с. Карагай	0,65	0,67	0,65	0,80	<b>0,81</b>	<b>0,85</b>
Иньва	д. Слудка	0,57	0,65	0,64	0,63	0,72	0,77
Иньва	г. Кудымкар	0,61	0,67	0,65	0,62	0,77	<b>0,85</b>
Кама	с. Лойно	0,43	0,46	0,32	0,56	0,63	0,67
Колва	г. Чердынь	0,56	0,68	0,73	0,49	0,65	0,76
Чусовая	пгт Староуткинск	0,75	0,78	0,72	0,78	<b>0,89</b>	<b>0,92</b>
Сылва	с. Сылвенск	0,79	<b>0,83</b>	<b>0,82</b>	0,80	<b>0,86</b>	<b>0,88</b>
Сылва	пгт. Шамары	0,63	0,72	0,74	0,53	0,69	0,77

*Примечание.* Красным цветом выделены неудовлетворительные значения  $S/\sigma_{\Delta}$

Приведенные в таблице показатели качества свидетельствуют о том, что сравниваемые методики дают в основном удовлетворительные и в ряде случаев хорошие результаты.

Для первой методики неудовлетворительными оказались 2 варианта прогноза, то есть из 27 вариантов прогноза удовлетворительными и хорошими оказались 25 вариантов – 92,6 %.

Для второй методики неудовлетворительными оказались 7 вариантов прогноза, то есть из 27 вариантов прогноза удовлетворительными и хорошими оказались 20 вариантов – 74,1 %.

Преимущество первой методики выражается и другим показателем – она оказалась точнее для 6 речных бассейнов при заблаговременности 1 сутки, для тех же 6 речных бассейнов при заблаговременности 2 суток и для 8 речных бассейнов при заблаговременности 3 суток. В целом

из 27 прогнозов первая методика оказалась точнее второй в 20 случаях – 74 %.

Возрастающее преимущество первой методики по мере увеличения заблаговременности прогноза проявляется и в том, что ее погрешность в среднем оказалась меньше в 1,03 раза при заблаговременности 1 сутки, в 1,09 раза при заблаговременности 3 суток и в 1,26 раза при заблаговременности 3 суток.

Таким образом, для краткосрочного прогнозирования стока рек бассейна Камы использование модели его формирования HBV в сочетании с метеорологической моделью COSMO-Ru и последующей коррекцией получаемых прогнозов в целом дает более точные результаты, чем метод экстраполяции гидрографа. Однако следует иметь в виду, что реализация этого метода требует несопоставимо меньших затрат времени и труда, что обеспечивает его конкурентоспособность.

### Заключение

В отделе речных гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» для 9 речных бассейнов, находящихся в пределах водосбора Камского водохранилища, разработаны две методики ежедневного краткосрочного прогнозирования среднесуточных расходов воды с заблаговременностью 1, 2, 3 суток.

Первая методика использует концептуальную модель формирования речного стока HBV-96 и последующую коррекцию получаемых ее с помощью прогнозов.

Вторая методика использует метод экстраполяции гидрографа и ограничивается известными к дате составления прогноза данными гидрологических наблюдений.

Проверка методик на независимом материале показала, что они дают удовлетворительные результаты и, следовательно, могут быть использованы в целях предупреждения об опасных и нежелательных гидрологических явлениях в бассейне Камы и для научно обоснованного и эффективного управления работой Камского гидроузла.

Для первой методики, в которой для периода заблаговременности гидрологического прогноза используются полученные с помощью метеорологической модели COSMO-Ru ожидаемые значения температуры и осадков, выполнен анализ влияния неопределенности метеорологических прогнозов на точность прогнозов речного стока. С этой целью погрешности прогнозов различной заблаговременности сравнивались с погрешностью расчета среднесуточных расходов воды, который использует фактические значения метеорологических характеристик и может рассматриваться как прогноз нулевой заблаговременности. Как и следовало ожидать, негативное влияние ошибок метеорологических прогнозов возрастает с увеличением заблаговременности гидрологических прогнозов. В среднем для 9 речных створов это влияние на качество прогнозов

суточной заблаговременности незначительно, а для прогнозов с заблаговременностью 3 суток погрешность прогнозов расходов воды по сравнению с их расчетом увеличивается более чем три раза.

Сравнение качества прогнозов показало, что методика, использующая модель формирования стока и метеорологическую информацию, дает несколько более точные результаты, чем метод экстраполяции гидрографа. В целом первая методика дает более 92 % хороших и удовлетворительных прогнозов, а вторая – 74 %. С ростом заблаговременности прогнозов преимущество первой методики возрастает. Для прогнозов с заблаговременностью 1 и 2 суток оно еще незначительно, а для прогнозов с заблаговременностью 3 суток первая методика точнее второй в среднем в 1,26 раза.

Таким образом, анализ качества получаемых прогнозов, по крайней мере на региональном уровне, дает решение двух актуальных проблем современной теории гидрологического прогнозирования:

1. Оценка влияния ошибок метеорологических прогнозов, используемых моделями формирования речного стока, на точность его прогнозирования.

2. Сравнение возможностей методов прогнозирования речного стока, основанных на его моделировании, и методов, использующих физико-статистические зависимости.

#### Список литературы

1. Борщ С.В., Христофоров А.В. Оценка качества прогнозов речного стока // Труды Гидрометцентра России. 2015. Спец. вып. 355. 198 с.
2. Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В., Чупин И.В., Юмина Н.М. Экстраполяция гидрографов как метод краткосрочного прогнозирования речного стока // Гидрологические исследования и прогнозы. 2018. № 3 (369). С. 74-86.
3. Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Методы коррекции прогнозов речного стока // Гидрологические исследования и прогнозы. 2020. № 1 (375). С. 162-175.
4. Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Эффективность моделирования и прогнозирования речного стока // Гидрологические исследования и прогнозы. 2020. № 1 (375). С. 176-189.
5. Борщ С.В., Колий В.М., Семенова Н.К., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Прогнозирование стока рек России методом экстраполяции гидрографа // Гидрологические исследования и прогнозы. 2021. № 2 (380). С. 77-94.
6. Борщ С.В., Колий В.М., Семенова Н.К., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Возможность прогнозирования стока рек России методом экстраполяции гидрографа в зависимости от характеристик их водосборов // Гидрологические исследования и прогнозы. 2021. № 3 (381). С. 115-130.
7. Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н. Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М.: Изд-во Российской академии наук, 2019. 300 с.
8. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть 1. Прогнозы режима вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 193 с.
9. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. СП 33-101-2003. М.: Госстрой России, 2004. 72 с.
10. Основные гидрологические характеристики рек бассейна Камы / Под редакцией В.Ю. Георгиевского. СПб.: Гидрометеиздат, 2015. 135 с.
11. Ривин Г.С., Розинкина И.А., Блинов Д.В. Технологическая линия системы краткосрочных мезомасштабных оперативных прогнозов погоды COSMO-Ru с шагом сетки 7 км // Труды Гидрометцентра России. 2012. Вып. 347. С. 1-18.

12. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 2. Краткосрочный прогноз расхода и уровня воды на реках. Л.: Гидрометеониздат, 1989. 245 с.
13. Симонов Ю.А., Семенова Н.К., Христофоров А.В. Методика краткосрочных прогнозов расходов воды на реках бассейна Камы на основе использования модели HBV // *Метеорология и гидрология*. 2021. № 6. С. 55-65.
14. Bergström S. The HBV Model – its structure and applications // *SMHI Reports Hydrology*. 1992. RH No. 4, Norrköping. 35 p.
15. Bergström S. The HBV Model // *Computer models of Watershed Hydrology*, edited by Singh V.P. Water Resources Publications, Highland Ranch, CO, 1995. P. 443-476.
16. Borsch S., Simonov Y., Khristoforov A., Semenova N., Koliy V., Ryseva, E., Krovotyntsev V., Derugina V. Russian Rivers Streamflow Forecasting Using Hydrograph Extrapolation Method // *Hydrology*. 2022. Vol. 9, no. 1. P. 1-14.
17. Goswami M., Connor K.M., Dhatarai K.P., Shamseldin A.Y. Assessing and performance of eight real-time updating models and procedures for the Brosna River // *Hydrol. Earth Syst. Sci*. 2005. Vol. 9, no. 4. P. 394-411.
18. Doherty J. Calibration and uncertainty analysis for complex environmental models. Brisbane, Australia: Published by Watermark Numerical Computing, 2015. 227 p.
19. Driessen T.L.A., Hurkmans R.T.W.L., Terink W., Hazenberg P., Torfs P.J.J.F., Uijlenhoet R. The hydrological response of the Ourthe catchment to climate change as modeled by HBV model // *Hydrol. Earth Syst. Sci*. 2010. Vol. 14, no. 4. P. 651-665.
20. Duan Q.Y., Gupta V.K., Sorooshian S. Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization // *J. Optim. Theory Appl*. 1993. Vol. 76. P. 501-521
21. Lindström G., Johansson B., Persson M., Gardelin M., Bergström S. Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model // *Journal of Hydrology*. 1997. Vol. 201 (1-4). P. 272-288.
22. *Manual on Flood Forecasting and Warning* // WMO-No. 1072. 2011. 138 p.
23. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. Part 1 – A discussion of principles // *Journal of Hydrology*. 1970. Vol. 10. P. 282-290.
24. Osuch M., Romanowicz R.J., Booij M.J. The influence of parametric uncertainty on the relationships between HBV model parameters and climatic characteristics // *Hydrol. Sci. J*. 2015. Vol. 60 (7–8). P. 1299-1316.
25. *Predictability of Weather and Climate* / Ed. By T. Palmer and R. Hagedorn. Cambridge University Press, 2006. 635 p.
26. Wiener N. *The Extrapolation, Interpolation, and Smoothing of Stationary Time Series*; MIT Press: Cambridge, MA, USA; John Wiley: Hoboken, NJ, USA, 1964. 171 p.

### References

1. Borsch S.V., Khristoforov A.V. Hydrologic flow forecast verification. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2015, vol. 355, 198 p. [in Russ.].
2. Borsch S.V., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V., Chupin I.V., Yumina N.M. Extrapolation of hydrographs as a method of short-range runoff forecasting. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2018, no. 3 (369), pp. 74-86 [in Russ.].
3. Borsch S.V., Khristoforov A.V., Simonov Y.A. Methods for the streamflow forecast correction. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2020, no. 1 (375), pp. 162-175 [in Russ.].
4. Borsch S.V., Khristoforov A.V., Simonov Y.A. Efficiency of streamflow modeling and forecasting. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2020, no. 1 vol. 375, pp. 176-189 [in Russ.].
5. Borsch S.V., Koliy V.M., Semenova N.K., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V. Forecasting the flow of Russian rivers by hydrograph extrapolation. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2021, no. 2 (380), pp. 77-94 [in Russ.].
6. Borsch S.V., Koliy V.M., Semenova N.K., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V. Assessment of runoff predictability for the Russian rivers depending on their catchment characteristics by the



hydrograph extrapolation method. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [Hydrometeorological Research and Forecasting], 2021, no. 3 (381), pp. 115-130 [in Russ.].

7. Motovilov Yu.G., Gel'fan A.N. Modeli formirovaniya stoka v zadachah gidrologii rechnykh basseynov. M.: Izd-vo Rossiyskoy akademii nauk publ., 2019, 300 p. [in Russ.].

8. Nastavlenie po sluzhbe prognozov. Razdel 3. Part 1. Prognozy rezhima vod sushi. Leningrad: Gidrometeoizdat publ., 1962, 193 p. [in Russ.].

9. Opredelenie osnovnykh raschetnykh gidrologicheskikh karakteristik. SP 33-101-2003. Moscow: Gosstroy Rossii publ., 2004, 72 p. [in Russ.].

10. Osnovnye gidrologicheskie karakteristiki rek basseyna Kamy / Pod redakciey V.YU. Georgievskogo. Saint Petersburg: Gidrometeoizdat publ., 2015, 135 p. [in Russ.].

11. Rivin G.S., Rozinkina I.A., Blinov D.V. The technological line of the short-term mesoscale operational weather forecast system COSMO-RU with 7 km grid step. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia], 2012, vol. 347, pp. 1-18 [in Russ.].

12. *Rukovodstvo po gidrologicheskim prognozam. Vyp. 2. Kratkosrochnyy prognoz rashkoda i urovnya vody na rekah.* Leningrad: Gidrometeoizdat publ., 1989, 245 p. [in Russ.].

13. Simonov, Y.A., Semenova, N.K., Khristoforov, A.V. Short-range Streamflow Forecasting of the Kama River Based on the HBV Model Application. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2021, vol. 46, no. 6, pp. 388-395. DOI: 10.3103/S1068373921060054.

14. Bergström S. The HBV Model – its structure and applications. SMHI Reports Hydrology, 1992, RH No. 4, Norrköping, 35 p.

15. Bergström S. The HBV Model. Computer models of Watershed Hydrology, edited by Singh V.P. Water Resources Publications, Highland Ranch, CO, 1995, pp. 443-476.

16. Borsch S., Simonov Y., Khristoforov A., Semenova N., Koliy V., Ryseva, E., Krovotyntsev V., Derugina V. Russian Rivers Streamflow Forecasting Using Hydrograph Extrapolation Method. *Hydrology*, 2022, vol. 9, no. 1, pp. 1-14.

17. Goswami M., Connor K.M., Dhatarai K.P., Shamseldin A.Y. Assessing and performance of eight real-time updating models and procedures for the Brosna River. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2005, vol. 9, no. 4, pp. 394-411.

18. Doherty J. Calibration and uncertainty analysis for complex environmental models. Brisbane, Australia: Published by Watermark Numerical Computing, 2015, 227 p.

19. Driessen T.L.A., Hurkmans R.T.W.L., Terink W., Hazenberg P., Torfs P.J.J.F., Uijlenhoet R. The hydrological response of the Ourthe catchment to climate change as modeled by HBV model. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2010, vol. 14, no. 4, pp. 651-665.

20. Duan Q.Y., Gupta V.K., Sorooshian S. Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization. *J. Optim. Theory Appl.*, 1993, vol. 76, pp. 501-521.

21. Lindström G., Johansson B., Persson M., Gardelin M., Bergström S. Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. *Journal of Hydrology*, 1997, vol. 201, no. 1-4, pp. 272-288.

22. WMO-No. 1072. Manual on Flood Forecasting and Warning. WMO, Geneva, 2011, 138 p.

23. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. Part 1 – A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 1970, vol. 10, pp. 282-290.

24. Osuch M., Romanowicz R.J., Booij M.J. The influence of parametric uncertainty on the relationships between HBV model parameters and climatic characteristics. *Hydrol. Sci. J.*, 2015, vol. 60, no. 7-8, pp. 1299-1316.

25. Predictability of Weather and Climate / Ed. By T. Palmer and R. Hagedorn. Cambridge University Press, 2006. 635 p.

26. Wiener N. The Extrapolation, Interpolation, and Smoothing of Stationary Time Series; MIT Press: Cambridge, MA, USA; John Wiley: Hoboken, NJ, USA, 1964, 171 p.

Поступила 07.06.2022; одобрена после рецензирования 07.09.2022;  
принята в печать 23.10.2022.

Submitted 07.06.2022; approved after reviewing 07.09.2022;  
accepted for publication 23.10.2022.