

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2026-2-128-142>

УДК 556.06

Эффективность использования метеорологических прогнозов в методиках прогнозирования речного стока

С.В. Борщ, Р.М. Вильфанд, Ю.А. Симонов, А.В. Христоворов

Гидрометеорологический научно-исследовательский центр

Российской Федерации, г. Москва, Россия

borsch@mecom.ru, romanvilfand@mail.ru, simonov@mecom.ru, khristoforov_a@mail.ru

Предложена количественная оценка эффективности использования метеорологических прогнозов в методиках прогнозирования речного стока. Даны примеры такой оценки для долгосрочных и краткосрочных прогнозов различных характеристик притока воды в Чебоксарское водохранилище и стока рек бассейнов Оки, Камы и Черноморского побережья Кавказа, при получении которых использованы модели формирования речного стока ECOMAG, DWAT, HBV, ансамблевый подход и оперативная система COSMO-Ru.

Показано, каким образом эффективность использования метеорологических прогнозов зависит от надежности и репрезентативности располагаемой гидрометеорологической информации, адекватности используемой модели формирования речного стока, степени влияния на получаемый прогноз погодных условий в период его заблаговременности и точности их предсказания. Продемонстрирована возможность заметного снижения ошибок гидрологического прогнозирования даже при использовании метеорологических прогнозов невысокой точности.

Ключевые слова: речной сток, прогноз, заблаговременность, погрешность, метеорологические элементы, неопределенность, эффективность

Efficiency of using meteorological forecasts in river runoff forecasting methods

S. V. Borsch, R. M. Vilfand, Yu. A. Simonov, A. V. Khristoforov

Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia

borsch@mecom.ru, romanvilfand@mail.ru, simonov@mecom.ru, khristoforov_a@mail.ru

A quantitative assessment of the efficiency of using meteorological forecasts in river runoff forecasting methods is proposed. Examples of such assessment are provided for long- and short-term forecasts of various water inflow characteristics for the Cheboksary Reservoir and river runoff of the Oka and Kama basins and the Black Sea coast of the Caucasus. These forecasts were generated using the ECOMAG, DWAT, and HBV hydrological models, an ensemble approach, and the COSMO-Ru operational system.

It is shown how the efficiency of using meteorological forecasts depends on the reliability and representativeness of available hydrometeorological information, the adequacy of the river runoff formation model, the degree of influence of weather conditions and the accuracy of their prediction on the resulting forecast during the lead time period. A possibility of significantly reducing hydrological forecasting errors even when using low-accuracy meteorological forecasts is demonstrated.

Keywords: river flow, forecast, lead time, error, meteorological elements, uncertainty, efficiency

Введение

По мере увеличения технических возможностей получения надежной гидрометеорологической информации и внедрения все более совершенных моделей формирования речного стока неопределенность хода метеорологических элементов в течение заблаговременности гидрологического прогноза становится ведущим фактором, определяющим его погрешность [5, 6, 13, 16, 24]. Частично снизить роль этого фактора и тем самым повысить точность гидрологического прогнозирования позволяет использование метеорологических прогнозов на период заблаговременности, когда, используя идею динамико-стохастического моделирования, эти прогнозы подставляются в качестве входной информации в модель формирования речного стока [4, 9, 20, 22, 23].

В качестве прогностических моделей формирования речного стока следует отметить британскую физико-математическую модель IHDM, южнокорейскую концептуальную модель DWAT, шведскую концептуальную модель HBV-96 и разработанную в Институте водных проблем РАН физико-математическую модель формирования речного стока ECOMAG [11, 13, 14, 17].

Для краткосрочного и среднесрочного прогнозирования хода метеорологических элементов используются американская модель прогнозирования погоды GFS, модель ECMWF Европейского центра среднесрочного прогнозирования и разработанная в ФГБУ «Гидрометцентр России» оперативная система COSMO-Ru [15, 18, 19, 21]. При составлении месячного и сезонного прогноза основных метеорологических полей используется разработанная в ФГБУ «Гидрометцентр России» глобальная конечно-разностная модель общей циркуляции атмосферы ПЛАВ [8].

Для получения сверхдолгосрочных метеорологических прогнозов в Институте вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН разработана модель климата INM-CM5 [10]. Попытка использования данной модели для прогнозирования месячного и годового стока рек России с заблаговременностью один год и более пока не дала удовлетворительных результатов [12].

Представляется достаточно очевидным следующее утверждение: чем больше вклад неопределенности хода метеорологических элементов в течение заблаговременности гидрологического прогноза в его погрешность и чем точнее предсказание этих метеорологических элементов, тем выше эффект от использования метеорологических прогнозов в методиках прогнозирования речного стока. Однако данная простая закономерность усложняется разнонаправленным влиянием заблаговременности гидрологического прогноза. С ее увеличением вклад неопределенности хода метеорологических элементов возрастает, а точность их прогнозирования снижается [5, 13, 19].

Таким образом, анализ эффективности использования метеорологических прогнозов в методиках прогнозирования речного стока в зависимости

от вклада неопределенности хода метеорологических элементов и от точности их предсказания, а также количественное выражение этой зависимости представляет достаточно интересную и важную теоретическую и практическую задачу, решению которой посвящена настоящая статья.

Оценка эффективности использования метеорологических прогнозов в методиках прогнозирования речного стока в общем случае

Рассматривается ситуация, когда для долгосрочного прогнозирования характеристики речного стока Y используется модель его формирования. Как правило, модель описывает процессы формирования речного стока с шагом в одни сутки и на входе усваивает ежедневные гидрометеорологические данные. На первом этапе выходом модели являются среднесуточные расходы воды в замыкающем створе речного бассейна, а на втором этапе по этим расходам рассчитывается прогнозируемая характеристика речного стока Y .

Модель усваивает образующие вектор X известные к дате составления прогноза гидрометеорологические характеристики и образующие вектор Z метеорологические характеристики погодных условий в течение периода заблаговременности прогноза. Получаемое с помощью модели значение прогнозируемой характеристики речного стока определяется функцией $F(X, Z)$, которая, как правило, выражается в неявном виде, но полностью задана после калибровки модели.

Прогноз характеристики речного стока Y может определяться некоторой функцией $F(X, Z)$ и при условии использования физико-статистического метода, при котором прогноз величины Y определяется ее эмпирической зависимостью от компонентов вектора X и образующих вектор Z метеорологических характеристик периода заблаговременности гидрологического прогноза. В частности, при долгосрочном прогнозировании месячного стока в летне-осенний период в качестве X и Z (в данном случае скалярных величин) могут выступать сток предыдущего месяца и слой осадков прогнозируемого месяца. При долгосрочном прогнозировании максимального уровня воды весеннего половодья вектор X может быть образован средними по водосбору максимальными запасами воды в снеге, характеристиками влажности почвы и степени ее промерзания, а вектор Z – слоем осадков и средней температурой воздуха за период снеготаяния [6, 16, 24].

Возможны три варианта использования определяемой моделью формирования речного стока или эмпирической зависимостью функции $F(X, Z)$.

1. Расчет характеристики речного стока в виде $Y_0 = F(X, Z)$ при заданных значениях векторов X и Z . Такой расчет можно рассматривать как прогноз с нулевой заблаговременностью. Его точность характеризует

надежность, репрезентативность и полноту используемой гидрометеорологической информации, а также адекватность описания зависимости величины Y от векторов X и Z с помощью функции $F(X, Z)$.

2. Прогноз характеристики речного стока в виде $Y_M = F(X, \tilde{Z})$, в котором используется прогноз \tilde{Z} метеорологических условий периода заблаговременности, получаемый с помощью одной из моделей прогнозирования погоды.

3. Прогноз, для получения которого в условиях отсутствия или недостаточной точности метеорологических прогнозов применяется ансамблевый подход, который предусматривает усвоение моделью наблюдавшихся в прошлом значений вектора Z (сценариев хода метеорологических элементов в течение периода заблаговременности гидрологического прогноза) и усреднение полученных результатов [2, 4, 6, 11, 13]. В этом случае прогноз характеристики речного стока выражается в виде $Y_A = \bar{F}(X)$, где функция $\bar{F}(X)$ получена путем осреднения функции $F(X, Z)$ по всем наблюдавшимся значениям вектора Z .

В дальнейшем предполагается, что ко всем рассматриваемым расчетам и прогнозам предварительно применена процедура их линейной коррекции, которая разработана и нашла широкое применение в ФГБУ «Гидрометцентр России». Данная процедура позволяет существенно повысить точность расчетов и прогнозов за счет устранения их систематических ошибок и сокращения диапазона их возможных значений. Точность скорректированных расчетов и прогнозов определяется коэффициентом корреляции между их значениями и фактическими значениями величины Y [6].

Методы статистической оценки среднеквадратических погрешностей S_0 , S_M и S_A расчета Y_0 , прогноза Y_M и прогноза Y_A подробно изложены в работе [2]. В дальнейшем более удобным представляется рассматривать квадраты этих величин S_0^2 , S_M^2 и S_A^2 , которые равны среднему значению квадрата ошибки расчета и соответствующего прогноза.

Погрешность S_A^2 полученного с помощью ансамблевого подхода прогноза Y_A превосходит погрешность S_0^2 расчета Y_0 , так как прогноз Y_A не учитывает ожидаемый ход метеорологических элементов в период заблаговременности. Возникающее в результате этой неопределенности дополнительное слагаемое среднего квадрата ошибки прогноза равно

$$S_H^2 = S_A^2 - S_0^2. \quad (1)$$

Влияние неопределенности хода метеорологических характеристик в период заблаговременности прогноза речного стока характеризуется показателем

$$f = \frac{S_A^2 - S_0^2}{S_A^2} = \frac{S_H^2}{S_A^2}. \quad (2)$$

Показатель f может варьировать от 0 до 1. Он приближается к нулю при неудачном определении функции получения прогноза $F(X, Z)$ и ее аргументов и, в частности, компонентов вектора Z , которые практически не дают информации о метеорологических условиях формирования речного стока в период заблаговременности его прогноза. Показатель f приближается к единице при удачном определении функции получения прогноза $F(X, Z)$ и ее аргументов, обеспечивающем очень малую погрешность S_0^2 расчета Y_0 . Таким образом, степень влияния неопределенности хода метеорологических характеристик в период заблаговременности гидрологического прогноза на его погрешность зависит не только от климатических условий речного бассейна, но и от особенностей применяемой методики [5, 6]. Примеры расчета показателя f приводятся ниже.

Пример 1

В Институте водных проблем РАН совместно с ФГБУ «Гидрометцентр России» на базе физико-математической модели формирования речного стока ЕСОМАГ разработаны методики долгосрочного прогнозирования объема незарегулированного притока воды в Чебоксарское водохранилище за второй квартал W_{II} км³ и максимального расхода этого притока Q_{\max} м³/с [16]. Использован ансамбль сценариев хода метеорологических элементов в период заблаговременности прогноза, который получен по данным наблюдений с 1967 по 2014 год. В табл. 1 приведены показатели качества расчетов и прогнозов весеннего притока воды в Чебоксарское водохранилище.

Таблица 1. Показатели качества расчетов и прогнозов весеннего притока воды в Чебоксарское водохранилище

Table 1. Quality indicators of calculations and forecasts of spring water inflow into the Cheboksary Reservoir

Характеристика	S_A	S_0	S_H	f
W_{II}	5,32	2,81	4,52	0,72
Q_{\max}	2539	1163	2257	0,79

Приведенные в табл. 1 данные демонстрируют значительный вклад неопределенности хода метеорологических элементов в течение периода заблаговременности прогноза, что в том числе свидетельствует и о высоком качестве используемой модели формирования притока воды в Чебоксарское водохранилище [5, 6].

Пример 2

В ФГБУ «Гидрометцентр России» для рек бассейна Оки разработана методика долгосрочного прогнозирования среднемесячных расходов воды в течение маловодного периода года. Использована южнокорейская

концептуальная модель DWAT и ансамблевый подход со сценариями хода метеорологических элементов в период заблаговременности прогноза за 2005–2021 гг. [6]. В табл. 2 приведены показатели качества расчетов и прогнозов среднемесячных расходов воды в створе р. Ока – г. Калуга в течение маловодного периода с июля по март следующего года, а также отдельно для осени и зимы.

Таблица 2. Показатели качества расчетов и прогнозов среднемесячных расходов воды в створе р. Ока – г. Калуга

Table 2. Indicators of the quality of calculations and forecasts of average monthly water flow in the Oka River – Kaluga section

Период	S_A	S_0	S_H	f
Маловодный	45,8	38,0	25,6	0,31
Осень	35,0	28,5	20,3	0,34
Зима	46,5	40,2	23,4	0,25

Показатель f значительно ниже, чем в предыдущем случае. Это объясняется достаточно устойчивым спадом расходов воды в результате истощения запасов воды в речном бассейне, накопленных в период половодья [6].

Из-за неизбежных ошибок метеорологических прогнозов погрешность S_M^2 прогноза Y_M превосходит погрешность S_0^2 расчета Y_0 . При очень высокой точности этих прогнозов разность $S_M^2 - S_0^2$ приближается к нулю. С ростом заблаговременности гидрологического прогноза точность метеорологических прогнозов неизбежно снижается, поэтому разность $S_M^2 - S_0^2$ возрастает. Снижение точности прогнозов с ростом их заблаговременности демонстрирует следующий пример.

Пример 3

В ФГБУ «Гидрометцентр России» на основе концептуальной модели формирования речного стока HBV-96 и метеорологической модели COSMO-Ru для рек бассейна Камы разработана методика ежедневного в течение всего года краткосрочного прогнозирования среднесуточных расходов воды с заблаговременностью $\Delta t = 1, 2, 3$ суток [1, 7]. В табл. 3 для различных значений заблаговременности прогноза приведено отношение $S_M(\Delta t)/S_0$ его среднеквадратической погрешности к погрешности расчета.

Данные табл. 3. показывают, что для всех рассматриваемых речных бассейнов отношение $S_M(\Delta t)/S_0$ увеличивается с ростом заблаговременности прогноза Δt 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.

Негативная роль ошибок метеорологических прогнозов при их заблаговременности одни 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.

Таблица 3. Отношение $S_M(\Delta t)/S_0$ для прогнозов различной заблаговременности

Table 3. Ratio $S_M(\Delta t)/S_0$ for forecasts of different lead times

Река	Пункт	$\Delta t = 1$	$\Delta t = 2$	$\Delta t = 3$
Коса	с. Коса	1,17	2,35	3,52
Обва	с. Карагай	1,13	1,85	3,00
Иньва	д. Слудка	1,02	2,16	3,19
Иньва	г. Кудымкар	1,03	2,13	2,83
Кама	с. Лойно	1,73	3,46	5,00
Колва	г. Чердынь	1,18	2,77	4,18
Чусовая	пгт Староуткинск	1,07	1,93	2,42
Сылва	с. Сылвенск	1,19	2,65	3,75
Сылва	пгт Самары	1,03	1,99	1,51

Погрешность S_A^2 полученного с помощью ансамблевого подхода прогноза Y_A превосходит погрешность S_M^2 прогноза Y_M , в котором используется прогноз \tilde{Z} метеорологических условий периода заблаговременности, получаемый с помощью одной из рассмотренных выше моделей прогнозирования погоды. При этом разность $S_A^2 - S_M^2$ приближается к нулю при крайне низкой точности метеорологических прогнозов и возрастает с ее увеличением. Соотношение между погрешностями гидрологического прогноза, при получении которого метеорологические прогнозы на период его заблаговременности используются или не используются, характеризуют эффективность использования метеорологических прогнозов в методике прогнозирования речного стока. Показатель этой эффективности целесообразно определить следующим образом:

$$h = \frac{S_A^2 - S_M^2}{S_A^2}. \quad (3)$$

Показатель эффективности использования метеорологических прогнозов h всегда меньше показателя f неопределенности хода метеорологических характеристик в период заблаговременности прогноза речного стока и приближается к нему по мере ухудшения качества метеорологических прогнозов. Более содержательный анализ между этими показателями и точностью метеорологических прогнозов возможен в упрощенной ситуации, которая рассматривается в следующем разделе.

Оценка эффективности использования метеорологических прогнозов в методиках прогнозирования речного стока в линейном случае

В целях получения максимально наглядной оценки эффективности использования метеорологических прогнозов в методиках прогнозирования речного стока рассматривается далеко не всегда встречающийся случай, когда образующие вектор $Z = (Z_1, \dots, Z_k)$ характеристики погодных условий периода заблаговременности гидрологического прогноза входят в функцию $F(X, Z)$ линейно. В этом случае эта функция может быть представлена в виде:

$$F(X, Z) = \bar{F}(X) + \sum_{i=1}^k a_i Z_i + b. \quad (4)$$

Дополнительно требуется, чтобы все компоненты вектора Z не зависели друг от друга и не зависели от значений $\bar{F}(X)$.

Если обозначить через r_i коэффициент корреляции между прогнозируемой характеристикой речного стока Y и метеорологическим элементом Z_i , через R коэффициент корреляции между величинами $\bar{F}(X)$ и Y , а через $\sigma(Y)$ стандартное отклонение прогнозируемой величины, то погрешность S_0^2 расчета Y_0 выражается формулой:

$$S_0^2 = \sigma^2(Y) [1 - R^2 - \sum_{i=1}^k r_i^2]. \quad (5)$$

Погрешность S_A^2 прогноза, при получении которого метеорологические прогнозы на период его заблаговременности не используются, выражается формулой:

$$S_A^2 = \sigma^2(Y)(1 - R^2). \quad (6)$$

Характеризующий влияние неопределенности хода метеорологических характеристик в период заблаговременности прогноза речного стока показатель f приобретает вид:

$$f = \frac{\sum_{i=1}^k r_i^2}{1 - R^2}. \quad (7)$$

Формула (7) наглядно демонстрирует зависимость показателя f от степени влияния погодных условий в период заблаговременности прогноза на прогнозируемую величину и от качества схемы получения прогноза в целом.

После коррекции метеорологических прогнозов точность каждого из них определяется коэффициентом корреляции ρ_i между величиной Z_i и ее прогнозом \tilde{Z}_i . Погрешность S_M^2 методики прогнозирования

характеристики речного стока, в которой эти метеорологические прогнозы используются, выражается формулой:

$$S_M^2 = \sigma^2(Y)[1 - R^2 - \sum_{i=1}^k \rho_i^2 r_i^2]. \quad (8)$$

С учетом формул (3), (6) и (8) показатель h эффективности использования метеорологических прогнозов в методике прогнозирования речного стока может быть выражен следующим образом:

$$h = \frac{\sum_{i=1}^k \rho_i^2 r_i^2}{1 - R^2}. \quad (9)$$

Качество прогнозирования образующих вектор Z метеорологических элементов Z_1, \dots, Z_k в целом характеризует средневзвешенное значение величин $\rho_1^2, \dots, \rho_k^2$:

$$\rho^2 = \frac{\sum_{i=1}^k \rho_i^2 r_i^2}{\sum_{i=1}^k r_i^2}. \quad (10)$$

С учетом формул (7), (9) и (10) показатель h эффективности использования метеорологических прогнозов приобретает вид:

$$h = f\rho^2. \quad (11)$$

Формула (11) наглядно показывает, как эффективность использования метеорологических прогнозов в методиках прогнозирования речного стока зависит от неопределенности хода метеорологических характеристик в период заблаговременности и от точности предсказания этих характеристик. Возможности использования данной формулы демонстрирует следующий пример.

Пример 4

В ФГБУ «Гидрометцентр России» для рек Черноморского побережья Кавказа разработана методика ежедневного краткосрочного прогнозирования среднесуточных расходов воды с заблаговременностью 1 сутки. Методика основана на концептуальной модели формирования талого и дождевого стока горных рек. Вектор Z образован $k = 2$ компонентами: $Z_1 = P$ – осредненный по территории водосбора слой осадков за прогнозируемые сутки; $Z_2 = T$ – осредненная по территории водосбора средняя температура воздуха за прогнозируемые сутки.

Слой осадков и температуры воздуха на ближайшие сутки прогнозировались с помощью метеорологической модели COSMO-Ru [3]. Применялся также ансамблевый подход с использованием фактических значений суточного слоя осадков и среднесуточной температуры воздуха, наблюдавшихся в период с 1984 по 2005 год.

Для реки Мзымта у п. Красная Поляна среднеквадратические погрешности расчета и двух вариантов прогноза равны:

- при расчете с известными значениями Z_1 и Z_2 $S_0 = 8,6 \text{ м}^3/\text{с}$;
- при прогнозировании Z_1 и Z_2 с помощью модели COSMO-Ru $S_M = 9,8 \text{ м}^3/\text{с}$;
- при использовании ансамблевого подхода $S_A = 12,4 \text{ м}^3/\text{с}$.

Рассчитанный для данного створа по формуле (2) показатель влияния неопределенности хода метеорологических характеристик в период заблаговременности прогноза равен $f = 0,52$. Рассчитанный для данного створа по формуле (3) показатель эффективности использования метеорологических прогнозов равен $h = 0,38$.

Специфика данной модели состоит в том, что величины Z_1 и Z_2 входят в формулу получения прогноза линейно, то есть условие (4) выполняется. Статистически достоверная корреляция между величинами Z_1 и Z_2 и между ними и другими предикторами отсутствует. Таким образом, выполняются все требования, при которых справедливы формулы (5) – (11). Для створа р. Мзымта – п. Красная Поляна все необходимые для расчетов по этим формулам коэффициенты корреляции приведены в табл. 4.

Таблица 4. Необходимые коэффициенты корреляции для створа р. Мзымта – п. Красная Поляна

Table 4. Required correlation coefficients for the Mzymta River – Krasnaya Polyana settlement section

R	r_1	r_2	ρ_1	ρ_2
0,81	0,41	0,16	0,77	0,98

Рассчитанный по формуле (7) показатель влияния неопределенности хода метеорологических характеристик в период заблаговременности прогноза равен $f = 0,55$. Рассчитанный по формулам (7) и (11) показатель эффективности использования метеорологических прогнозов равен $h = 0,36$. Таким образом, полученные для линейного случая оценки показателей f и h достаточно близки к их фактическим значениям $f = 0,52$ и $h = 0,38$.

В гидрологических прогнозах в качестве показателя их качества принято использовать не средние значения квадрата ошибок прогнозов, а их среднеквадратические ошибки, и выражать преимущество одного из сравниваемых вариантов процентами снижения этого показателя [2]. Таким образом, при оценке эффективности использования метеорологических прогнозов в методиках прогнозирования речного стока удобнее использовать показатель:

$$g = \left(1 - \frac{S_M}{S_A}\right) 100\% . \quad (12)$$

Предложенный выше показатель h выражается через показатель g следующим образом:

$$h = 1 - \left(1 - \frac{g}{100\%}\right)^2. \quad (13)$$

Показатели g и h приближаются к нулю при крайне незначительном вкладе в погрешность гидрологического прогноза неопределенности хода метеорологических элементов в период его заблаговременности или при крайне низкой точности прогноза этих элементов. Показатели g и h приближаются к 100 % и, соответственно, к единице при практически идеальной схеме получения прогноза, очень высоком вкладе неопределенности хода метеорологических элементов в его погрешность и исключительно высокой точности прогнозирования этих элементов.

В общем случае соотношение между показателями g и h демонстрирует табл. 5.

Таблица 5. Значения показателя h при различных значениях показателя g
Table 5. Values of the h index for different values of the g index

g	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %
h	0,19	0,36	0,51	0,64	0,75	0,84	0,91	0,96	0,99

Как следует из табл. 5, использование метеорологических прогнозов повышает точность гидрологического прогноза более чем на 10 %, если показатель h превышает значение 0,19. Как показывает анализ качества прогнозов речного стока, даже повышение точности всего на 10 % имеет существенное значение, так как переводит многие методики прогнозирования из категории неудовлетворительных в категорию удовлетворительных или из категории удовлетворительных в категорию хороших [2].

Из формулы (11) и табл. 5 следует, что повышение точности гидрологического прогнозирования за счет использования метеорологических прогнозов более чем на 10 % достижимо, если величина $f\rho^2$ превышает значение 0,19.

Среди приведенных примеров максимальное значение показателя $f = 0,79$ было получено для долгосрочного прогноза максимального расхода притока в Чебоксарское водохранилище, получаемого с помощью модели ЕСОМАГ. Повысить точность этой методики за счет использования метеорологических прогнозов более чем на 10 % возможно, если показатель качества этих прогнозов ρ^2 превышает значение 0,24. Следовательно, коэффициенты корреляции ρ_i между фактическими значениями метеорологических элементов и их прогнозами в среднем должны быть не менее 0,49. Прогнозы с таким невысоким показателем точности относятся к категории неудовлетворительных [2]. Таким образом, при использовании достаточно совершенной методики прогнозирования речного стока и значительном влиянии на получаемый прогноз погодных условий в период его заблаговременности использование метеорологических прогнозов даже невысокой точности может давать существенный эффект.

Заключение

Исследованы факторы, определяющие эффективность использования метеорологических прогнозов в методиках прогнозирования речного стока и предложена ее количественная оценка.

Для получения такой оценки рекомендуется выполнять следующие процедуры.

1. Оценить погрешность расчета прогнозируемой характеристики речного стока, при котором в модели формирования речного стока или в формуле выпуска прогноза в качестве входной информации используется фактический ход метеорологических элементов в течение периода заблаговременности гидрологического прогноза.

2. Оценить погрешность прогноза характеристики речного стока, при котором используется ансамблевый подход, который предусматривает усвоение моделью наблюдавшихся в прошлом сценариев хода метеорологических элементов в течение периода заблаговременности гидрологического прогноза и усреднение полученных результатов.

3. Оценить погрешность прогноза характеристики речного стока, при котором ход метеорологических элементов в течение периода заблаговременности гидрологического прогноза предсказывается с помощью модели прогнозирования погоды.

4. Оценить степень влияния метеорологических элементов периода заблаговременности гидрологического прогноза на прогнозируемую характеристику речного стока и оценить точность предсказания этих элементов.

Показано, каким образом эффективность использования метеорологических прогнозов зависит от надежности и репрезентативности располагаемой гидрометеорологической информации, адекватности используемой модели формирования речного стока, степени влияния на получаемый прогноз погодных условий в период его заблаговременности и точности их предсказания.

Теоретические положения проиллюстрированы примерами анализа качества долгосрочных и краткосрочных прогнозов различных характеристик притока воды в Чебоксарское водохранилище и стока рек бассейнов Оки, Камы и Черноморского побережья Кавказа, при получении которых использованы модели формирования речного стока ECOMAG, DWAT, HBV, ансамблевый подход и оперативная система COSMO-Ru.

Продемонстрирована возможность заметного снижения ошибок гидрологического прогнозирования даже при использовании метеорологических прогнозов невысокой точности.

Список литературы

1. Блинов Д.В., Борщ С.В., Вильфанд Р.М., Колий В.М., Ривин Г.С., Семенова Н.К., Симонов Ю.А., Христофоров А.В., Юмина Н.М. Возможности использования системы COSMO-RU при краткосрочном прогнозировании стока рек России // Метеорология и гидрология. 2023. № 2. С. 5-14.

2. *Борщ С.В., Христофоров А.В.* Оценка качества прогнозов речного стока // Труды Гидрометцентра России. 2015. Специальный выпуск 355. 198 с.
3. *Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В.* Система прогнозирования паводков и раннего оповещения о наводнениях на реках Черноморского побережья Кавказа и бассейна Кубани // Труды Гидрометцентра России. 2015. Специальный выпуск 356. 247 с.
4. *Борщ С.В., Гельфан А.Н., Морейдо В.М., Мотовилов Ю.Г., Симонов Ю.А.* Долгосрочный ансамблевый прогноз весеннего притока воды в Чебоксарское водохранилище на основе гидрологической модели: результаты проверочных и оперативных испытаний // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 366. С. 68-86.
5. *Борщ С.В., Вильфанд Р.М., Симонов Ю.А., Христофоров А.В.* Влияние неопределенности метеорологических условий периода заблаговременности на точность долгосрочных прогнозов речного стока // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2022. № 4 (386). С. 36-46.
6. *Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В.* Прогнозирование стока рек России. М.: Гидрометцентр России, 2023. 200 с.
7. *Борщ С.В., Колий В.М., Рысева Е.А., Семенова Н.К., Симонов Ю.А., Христофоров А.В.* Методика расчета среднесуточных расходов воды на реках России с использованием модели формирования стока HBV-96 // Метеорология и гидрология. 2023. № 3. С. 47-56.
8. *Вильфанд Р.М., Зарипов Р.Б., Киктев Д.Б., Круглова Е.Н., Крыжов В.Н., Куликова И.А., Тищенко В.А., Толстых М.А., Хан В.М.* Долгосрочные метеорологические прогнозы в Гидрометцентре России // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4 (374). С. 12-36.
9. *Гельфан А.Н.* Динамико-стохастическое моделирование формирования талого стока. М.: Наука, 2007. 276 с.
10. *Гришун А.С., Семенова Н.К., Симонов Ю.А., Хан В.М., Христофоров А.В.* Анализ сверхдолгосрочных прогнозов метеорологических характеристик речных бассейнов России с помощью модели климата INM-CM5 // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2024. № 4 (394). С. 39-57.
11. *Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н.* Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М.: Институт водных проблем РАН, 2019. 300с.
12. *Семенова Н.К., Симонов Ю.А., Христофоров А.В.* Сверхдолгосрочный прогноз стока рек России // Метеорология и гидрология. 2023. № 12. С. 47-56.
13. *Adams T.E., Pagano T.C.* Flood Forecasting: A Global Perspective. Academic Press, 2016. 480 p.
14. *Bergstrom S.* The HBV-Model – Its Structure and Applications // SMHI Reports. 1992. RH No. 4. Norrköping. 35 p.
15. *Forecast Verification in Atmospheric Science. A Practitioner's Guide / I. Jolliffe, D. Stephenson (Eds.).* John Wiley & Sons Ltd, 2003. 240 p.
16. *Greco M., Cravetta A., Della Morte R.* River flow. London: Taylor and Francis Group, 2004. 1024 p.
17. *Kim S., Jang Ch., Kim H., JO Hs., Kim Hr.* DWAT – User's Manual V1.0. Han River Flood Control Office, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT), 2018. 111 p.
18. *Kristine C. Harper.* Weather by the Numbers: The Genesis of Modern Meteorology. MIT Press, 2008. 320 p.
19. *Predictability of Weather and Climate / T. Palmer, R. Hagedorn (Eds.).* Cambridge University Press, 2006. 635 p.
20. *Prudhomme C.; Hannaford J.; Harrigan S. et al.* Hydrological Outlook UK: An Operational Streamflow and Groundwater Level Forecasting System at Monthly to Seasonal Time Scales // Hydrological Sciences Journal. 2017. Vol. 62 (16). P. 2753-2768.
21. *Rivin G., Rozinkina I., Astakhova E., Montani A., Alferov D., Arpagaus M., Helmert J., Kazakova E., Kirsanov A., Kopeikin V., Kukanova E., Majewski D., Marsigli C., de Morsier G., Muravev A., Paccagnella T., Schattler U., Schra C., Shatunova M., Shcherbakov A., Steiner P., Zaichenko M.* The COSMO Priority Project CORSO Final Report // COSMO Technical Report. 2018. No. 35. 65 p.

22. Shukla S., Lettenmaier D.P. Seasonal Hydrologic Prediction in the United States: Understanding the Role of Initial Hydrologic Conditions and Seasonal Climate Forecast Skill // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2011. Vol. 15 (11). P. 3529-3538.

23. Tuteja N.K., Shin D., Laugesen R., Khan U., Shao Q., Wang E., Li M., Zheng H., Kuczera G., Kavetski D., Evin G., Thyer M., MacDonald A., Chia T., Le B. Experimental evaluation of the dynamic seasonal streamflow forecasting approach. Melbourne: Australian Government Bureau of Meteorology, 2011. 108 c.

24. WMO-No. 1286. Assessment Guidelines for End-to-End Flood Forecasting and Early Warning Systems. World Meteorological Organization, 2022. 27 p.

References

1. Blinov D.V., Borshch S.V., Vil'fand R.M., Kolii V. M., Rivin G. S., Semenova N. K., Simonov Yu. A., Khristoforov A. V., Yumina N. M. Possibilities of Using the COSMO-Ru System for Short-term Forecasting of Runoff of Russian Rivers. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2023, vol. 48, no. 2, pp. 89-96. DOI: 10.3103/S1068373923020012.

2. 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.].

3. Borsch S.V., Simonov Y.A., Khristoforov A.V. Flood forecasting and early warning system for rivers of the Black sea shore of Caucasian region and the Kuban river basin. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2015, vol. 356, 247 p. [in Russ.].

4. Borsch S.V., Gelfan A.N., Moreydo V.M., Motovilov Yu.G., Siminov Yu.A. Long-term ensemble forecasting of spring inflow into the Cheboksary reservoir based on the hydrological model: results of operational testing. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2017, vol. 366, pp. 68-86 [in Russ.].

5. Borsch S.V., Vil'fand R.M., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V. Assessment of the influence of uncertainty in meteorological elements on the error of long-term river runoff forecasts. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2022, vol. 386, no. 4, pp. 36-46 [in Russ.].

6. Borsch S.V., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V. Prognozirovaniye stoka rek Rossii [Streamflow forecasting in Russia]. Moscow, Izd-vo FGBU «Gidrometcentr Rossii», 2023, 200 p. [in Russ.].

7. Borshch, S.V., Kolii, V.M., Ryseva, E.A. Semenova N. K., Simonov Yu. A., Khristoforov A. V. Methodology for Calculating Daily Streamflow of Russian Rivers Using the HBV-96 Runoff Formation Model. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2023, vol. 48, no. 3, pp. 221-228. DOI: 10.3103/S1068373923030044

8. Vil'fand R.M., Zaripov R.B., Kiktev D.B., Kruglova E.N., Kryjov V.N., Kulikova I.A., Tischenko V.A., Tolstych M.A., Khan V.M. Long-range forecasting at Hydrometeorological Center of Russia. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2019, vol. 374, no. 4, pp. 12-36 [in Russ.].

9. Gel'fan A.N. Dinamiko-stohasticheskoe modelirovaniye formirovaniya talogo stoka. Moscow, Nauka publ., 2007. 276 p. [in Russ.].

10. Gritsun A.S., Semenova N.K., Simonov Yu.A., Khan V.M., Khristoforov A.V. Analysis of ultra-long-term forecasts of meteorological characteristics of Russian river basins using the INM-CM5 climate model outputs. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2024, vol. 394, no. 4, pp. 39-57 [in Russ.].

11. Motovilov Yu.G., Gel'fan A.N. Modeli formirovaniya stoka v zadachah gidrologii rechnyh basseynov. Moscow, Izd-vo RAN, 2018, 300 p. [in Russ.].

12. Semenova, N.K., Simonov, Y.A. & Khristoforov, A.V. Extended Streamflow Prediction for Russian Rivers. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2023, vol. 48, no. 12, pp. 1019-1028. DOI: 10.3103/S1068373923120026

13. Adams T.E., Pagano T.C. Flood Forecasting: A Global Perspective. Academic Press publ., 2016, 480 p.

14. Bergstrom S. The HBV-Model – Its Structure and Applications. *SMHI Reports*, 1992, RH No. 4, Norrkoping, 35 p.
15. Forecast Verification in Atmospheric Science. A Practitioner's Guide. I. Jolliffe, D. Stephenson (Eds.). John Wiley & Sons Ltd, 2003, 240 p.
16. Greco M., Cravetta A., Della Morte R. River flow. London: Taylor and Francis Group, 2004, 1024 p.
17. Kim S., Jang Ch., Kim H., JO Hs., Kim Hr. DWAT – User's Manual V1.0. Han River Flood Control Office, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT), 2018, 111 p.
18. Kristine C. Harper. Weather by the Numbers: The Genesis of Modern Meteorology. MIT Press publ., 2008, 320 p.
19. Predictability of Weather and Climate. T. Palmer, R. Hagedorn (Eds.). Cambridge University Press publ., 2006, 635 p.
20. Prudhomme C.; Hannaford J.; Harrigan S. et al. Hydrological Outlook UK: An Operational Streamflow and Groundwater Level Forecasting System at Monthly to Seasonal Time Scales. *Hydrological Sciences Journal*, 2017, vol. 62 (16), pp. 2753-2768.
21. Rivin G., Rozinkina I., Astakhova E., Montani A., Alferov D., Arpagaus M., Helmert J., Kazakova E., Kirsanov A., Kopeikin V., Kukanova E., Majewski D., Marsigli C., de Morsier G., Muravev A., Paccagnella T., Schattler U., Schra C., Shatunova M., Shcherbakov A., Steiner P., Zaichenko M. The COSMO Priority Project CORSO Final Report. *COSMO Technical Report*, 2018, no. 35, 65 p.
22. Shukla S., Lettenmaier D.P. Seasonal Hydrologic Prediction in the United States: Understanding the Role of Initial Hydrologic Conditions and Seasonal Climate Forecast Skill. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, vol. 15 (11), pp. 3529-3538.
23. Tuteja N.K., Shin D., Laugesen R., Khan U., Shao Q., Wang E., Li M., Zheng H., Kuczera G., Kavetski D., Evin G., Thyer M., MacDonald A., Chia T., Le B. Experimental evaluation of the dynamic seasonal streamflow forecasting approach. Melbourne: Australian Government Bureau of Meteorology, 2011, 108 c.
24. WMO-No. 1286. Assessment Guidelines for End-to-End Flood Forecasting and Early Warning Systems. World Meteorological Organization, 2022, 27 p.

*Поступила 30.03.2026; принята в печать 26.05.2026.
Submitted 30.03.2026; accepted for publication 26.05.2026.*