

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2022-4-36-46>

УДК 556.06

Влияние неопределенности метеорологических условий периода заблаговременности на точность долгосрочных прогнозов речного стока

***С.В. Борщ, Р.М. Вильфанд,
Ю.А. Симонов, А.В. Христофоров***

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия
simonov@mecom.ru, khristoforov_a@mail.ru*

Предложена количественная оценка влияния неопределенности метеорологических условий периода заблаговременности долгосрочных прогнозов речного стока на их погрешность. Даны примеры такой оценки для долгосрочных прогнозов различных характеристик притока воды в Чебоксарское водохранилище и стока рек бассейнов Оки, Камы, Тобола и Дона, при получении которых использованы модели формирования речного стока ECOMAG, DWAT, HBV и ансамблевый подход.

Показано, что влияние неопределенности хода метеорологических условий зависит не только от климатических условий формирования речного стока, но и от точности его моделирования. По мере внедрения все более совершенных моделей формирования речного стока эта неопределенность будет становиться основным фактором, определяющим качество его прогнозирования.

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

Assessment of the influence of uncertainty in meteorological elements on the error of long-term river runoff forecasts

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

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia
simonov@mecom.ru, khristoforov_a@mail.ru*

A quantitative assessment of the influence of the uncertainty in meteorological elements during the period of the lead time of long-term river runoff forecasts on their error is proposed. Examples of such assessment are given for long-term forecasts of various characteristics of the water inflow into the Cheboksary Reservoir and the runoff of rivers in the Oka, Kama, Tobol and Don basins, which were obtained using the ECOMAG, DWAT, HBV river runoff formation models and the ensemble approach.

It is shown that the influence of the uncertainty in the course of meteorological characteristics depends not only on climatic conditions of the formation of river runoff, but also on the accuracy of its modeling. As increasingly advanced river runoff formation models are introduced, this uncertainty will become the main factor determining the quality of its forecasting.

Keywords: river runoff, forecast, lead time, error, meteorological elements, uncertainty, assessment

Введение

В современной отечественной практике к категории долгосрочных относятся гидрологические прогнозы с заблаговременностью более 12–15 суток [9, 11]. Такие прогнозы выпускаются в том числе для следующих характеристик водного режима:

- сезонный, кварталный и месячный приток воды в водохранилища;
- средний расход воды, объем или слой речного стока за квартал, сезон, месяц;
- максимальный расход и уровень воды в период половодья;
- дата прохождения максимального расхода и уровня воды;
- дата начала основной волны половодья;
- средние и минимальные месячные уровни воды в летне-осенний период года [11, 18].

При заданной заблаговременности гидрологических прогнозов их качество определяется погрешностью, которую принято вычислять как среднее значение $M[(Y - \tilde{Y})^2]$ квадрата разности между фактическим значением характеристики речного стока Y и ее прогнозом \tilde{Y} . Методы получения статистических оценок этой величины подробно рассмотрены в работе [1].

Большинство используемых в настоящее время методов долгосрочного прогнозирования речного стока пока основано на его физико-статистических зависимостях от известных к дате составления прогноза характеристик гидрологических и метеорологических факторов [11, 18]. В последние десятилетия все шире используются различные физико-математические модели формирования речного стока с распределенными, т. е. изменяющимися в пространстве параметрами, и концептуальные модели с сосредоточенными или частично распределенными параметрами [7, 8, 14, 15, 17, 19].

Погрешность долгосрочных прогнозов речного стока определяется:

- ошибками в исходных данных (погрешность в измерениях, анализе и расчете исходной информации);
- репрезентативностью и объемом исходных данных;
- адекватностью и полнотой описания процессов формирования речного стока;
- точностью определения параметров методики прогноза;
- ролью метеорологических элементов и неопределенностью их хода в течение заблаговременности прогноза [1, 7, 17, 18].

По мере увеличения технических возможностей получения гидрометеорологической информации и внедрения все более совершенных моделей формирования речного стока неопределенность хода метеорологических элементов в течение заблаговременности прогноза становится ведущим фактором, определяющим качество прогнозирования речного стока [1, 7, 12, 14].

Современные достижения в области сверхдолгосрочного прогнозирования метеорологических характеристик пока не дают оснований для их регулярного использования в долгосрочных прогнозах речного стока [16, 20]. В связи с этим использование моделей формирования речного стока в долгосрочных прогнозах его характеристик сопровождается применением ансамблевого подхода, одним из вариантов реализации которого является учет наблюдавшихся в прошлом сценариев хода метеорологических элементов в течение периода заблаговременности гидрологического прогноза [4, 7, 8, 17]. Данный подход представляется вполне оправданным, однако он может вносить весомый вклад в погрешность долгосрочных прогнозов речного стока. Оценке вклада этой метеорологической составляющей в погрешность прогноза речного стока и посвящена настоящая статья.

Оценка влияния неопределенности хода метеорологических характеристик

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 [7, 8, 14, 17]. Модель усваивает образующие вектор Z известные к дате составления прогноза гидрометеорологические характеристики и образующие вектор X метеорологические характеристики, которые описывают погодные условия в течение периода заблаговременности прогноза, например ход осадков и температуры воздуха. Получаемое с помощью модели значение прогнозируемой характеристики речного стока определяется функцией $M(Z, X)$, которая выражается в неявном виде, но известна после калибровки модели. По результатам наблюдений за n лет для каждого года с номером i известны значения прогнозируемой характеристики Y_i и компоненты векторов Z_i и X_i при $i = 1, \dots, n$.

Чтобы исключить влияние неопределенности хода метеорологических элементов в течение периода заблаговременности прогноза для каждого года с номером i , необходимо получить модельный расчет $M(Z_i, X_i)$ при известных для этого года значениях векторов Z_i и X_i . Качество самой модели характеризует среднеквадратическая погрешность модельных расчетов:

$$S_M = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Y_i - M(Z_i, X_i)]^2} . \quad (1)$$

Прогноз \tilde{Y}_i для года с номером i получается с применением ансамблевого подхода. Из возможно более продолжительного ряда X_1, \dots, X_N , берутся все значения, кроме X_i , подставляются в модель, и полученные результаты усредняются:

$$\tilde{Y}_i = \frac{1}{N-1} \left[\sum_{j=1}^N M(Z_i, X_j) - M(Z_i, X_i) \right]. \quad (2)$$

Замечание 1

Необходимость в применении ансамблевого подхода возникает в случае, когда зависимость выхода модели, то есть величины $M(Z, X)$ от компонент вектора X , носит нелинейный характер. В противном случае процедура получения прогноза существенно упрощается и прогноз определяется формулой:

$$\tilde{Y}_i = M(Z_i, \bar{X}_i), \quad (3)$$

где \bar{X}_i – среднее арифметическое всех векторов X_1, \dots, X_N , за исключением вектора X_i .

Среднеквадратическая погрешность прогноза определяется по формуле:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \tilde{Y}_i)^2}. \quad (4)$$

Погрешность прогноза S всегда превосходит погрешность расчета S_M , и обусловлено это именно неопределенностью хода метеорологических элементов в течение периода заблаговременности. Возникающее в результате этой неопределенности дополнительное слагаемое среднего квадрата ошибки прогноза равно

$$S_{met}^2 = S^2 - S_M^2. \quad (5)$$

Замечание 2

Если модельный расчет линейно зависит от компонент вектора X и отсутствует корреляция между ошибкой модельного расчета и этими компонентами, то отношение S_{met} / σ равно множественному коэффициенту корреляции прогнозируемой величины от компонент вектора X при заданном значении вектора Z . Таким образом, дополнительное увеличение погрешности прогноза зависит от степени влияния на прогнозируемую величину характеристик погодных условий в период его заблаговременности

Влияние неопределенности хода метеорологических характеристик в период заблаговременности прогноза речного стока предлагается характеризовать величиной:

$$f = (S_{met}^2 / S^2) \cdot 100\%, \quad (6)$$

которая может варьировать от 0 % до 100 %.

Замечание 3

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. В частности, если используемая в методике прогноза модель формирования стока позволяет настолько точно рассчитывать его прогнозируемую характеристику, что погрешность модельных расчетов S_M практически равна нулю, то определяемый формулами (5) и (6) показатель f будет практически равным 100 % при любых климатических условиях речного бассейна.

Примеры оценки влияния неопределенности хода метеорологических характеристик

Ниже приводятся примеры оценки метеорологической составляющей погрешности долгосрочных прогнозов речного стока, основанных на различных моделях формирования речного стока и использующих ансамблевый подход. Для каждой методики приводятся следующие показатели:

- рассчитанная по формуле (4) среднеквадратическая погрешность прогноза S ;
- рассчитанная по формуле (1) среднеквадратическая погрешность модельных расчетов S_M ;
- рассчитанный по формуле (5) показатель S_{met} ;
- рассчитанный по формуле (6) показатель влияния неопределенности хода метеорологических характеристик в течение периода заблаговременности прогноза f .

Пример 1

В ИВП РАН совместно с ФГБУ «Гидрометцентр России» на базе физико-математической модели формирования речного стока ECOMAG 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 [3]. Использован ансамбль сценариев хода метеорологических элементов в период заблаговременности прогноза, который получен по данным наблюдений с 1967 по 2014 год, то есть $N = 48$. Проверочные прогнозы выполнены по данным наблюдений с 1982 по 2014 год, то есть $n = 33$ [2]. 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 estimations and forecasts of spring water inflow to Cheboksary Reservoir

Характеристика	S	S_M	S_{met}	f
W_{II}	5,32	2,81	4,52	72%
Q_{max}	2539	1163	2257	79%

Приведенные в табл. 1 данные свидетельствуют о значительном вкладе неопределенности хода метеорологических элементов в течение периода заблаговременности прогноза на погрешность прогнозирования объема притока и о еще большем вкладе в погрешность прогнозирования максимального расхода незарегулированного притока воды за второй квартал. Значительный вклад неопределенности хода метеорологических элементов обусловлен характерными для водосбора Чебоксарского водохранилища оттепелями и снегопадами в начале и дождями в конце второго квартала [6].

Пример 2

В ФГБУ «Гидрометцентр России» разработана методика долгосрочного прогнозирования среднемесячных расходов воды на реках бассейна Оки в течение маловодного периода года. В основе методики лежит южнокорейская концептуальная модель DWAT [19]. При разработке и проверке методики учитывались ежедневные данные гидрометеорологических наблюдений за период с 2005 по 2021 год. Ансамбль сценариев хода метеорологических элементов в течение периода заблаговременности прогноза брался за те же годы, то есть $n = N = 17$. 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. В целях повышения надежности этих показателей приводятся их осредненные значения для всего маловодного периода, 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.** Quality indicators of estimations and forecasts of average monthly water discharges in the Oka river gauge – the Kaluga city

Период	S	S_M	S_{met}	f
Маловодный	45,8	38,0	25,5	31%
Осень	35,0	28,5	20,3	34%
Зима	46,5	40,2	20,5	26%

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. В период заблаговременности прогноза (один месяц) устойчивость спада нарушается выпадением осадков в виде дождя и быстро тающего снега, а также температурным режимом, определяющим начало и конец зимы, а также возможными оттепелями [7]. Значения показателя f указывают на то, что для бассейна Оки неопределенность выпадения осадков осенью оказывает большее влияние на погрешность прогнозов, чем неопределенность температурного режима зимой.

Пример 3

По заказу ФГБУ «Уральское УГМС» в ФГБУ «Гидрометцентр России» разработана методика долгосрочного прогнозирования среднемесячных расходов воды на реках бассейна Камы в течение зимнего периода. В основе методики лежит шведская концептуальная модель HBV-96 [13, 15]. При разработке и проверке методики учитывались ежедневные данные гидрометеорологических наблюдений за период с 2002 по 2020 год. Ансамбль сценариев хода метеорологических элементов в течение периода заблаговременности прогноза брался за те же годы, то есть $n = N = 19$. В табл. 3 приведены показатели качества расчетов и прогнозов среднемесячных расходов воды в створе р. Вишера у пос. Рябиново с декабря (XII) по февраль (II) следующего года.

Таблица 3. Показатели качества прогнозов среднемесячных расходов воды в створе р. Вишера у пос. Рябиново

Table 3. Quality indicators of forecasts of average monthly water discharges in the Vishera river gauge near the village Ryabinino

Месяц	S	S_M	S_{met}	f
XII	38,4	22,7	31,0	65%
I	22,3	16,4	15,1	46%
II	17,8	11,7	13,4	57%

Показатель f незначительно изменяется от месяца к месяцу. Он существенно выше аналогичного показателя для бассейна Оки в зимний период ($f = 0,26$) при отсутствии явных причин климатического характера. Так, в бассейне Камы зима более суровая и оттепели практически отсутствуют [14]. В данном случае причина кроется в относительно меньшей погрешности модельных расчетов (см. Замечание 4).

Пример 4

В ФГБУ «Гидрометцентр России» на основе модели HBV-96 разработана система методик долгосрочного прогнозирования среднемесячных

расходов воды на реках бассейна Тобола в течение маловодного периода с июля (VII) по март (III) следующего года и среднего расхода стока половодья за второй квартал. При разработке и проверке методик использованы данные ежедневных гидрометеорологических наблюдений за период с 2000 по 2021 год. Ансамбль сценариев хода метеорологических элементов в течение периода заблаговременности прогнозов брался за те же годы, то есть $n = N = 22$. В табл. 4 приведены показатели качества расчетов и прогнозов указанных характеристик в створе р. Тобол – г. Курган.

Таблица 4. Показатели качества расчетов и прогнозов среднемесячных и среднеквартальных расходов воды в створе р. Тобол – г. Курган

Table 4. Quality indicators of estimations and forecasts of average monthly and average quarterly water discharges in the Tobol river gauge – the Kurgan city

Показатели качества	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III	2 квартал
S	2,93	3,60	7,07	1,37	1,04	0,82	0,73	0,60	0,59	48,6
S_M	2,03	1,98	3,02	1,02	0,89	0,64	0,64	0,47	0,47	32,9
S_{met}	2,12	3,01	6,39	0,92	0,54	0,51	0,35	0,37	0,35	35,8
f	52%	70%	82%	45%	27%	38%	22%	38%	35%	54%

Показатель f принимает наиболее высокие значения для прогнозов стока за август и сентябрь, когда спад водности реки может прерываться дождевыми паводками. Минимальные значения он принимает в холодный период года с ноября по март, когда река Тобол покрыта льдом [10].

Пример 5

В ФГБУ «Гидрометцентр России» для бассейна Дона разработана аналогичная система методик долгосрочного прогнозирования среднемесячных расходов воды в течение маловодного периода и среднего расхода стока за второй квартал. Данные ежедневных гидрометеорологических наблюдений за период с 2000 по 2021 год использовались для разработки и проверки методик, а также для получения ансамбля сценариев хода метеорологических элементов в течение периода заблаговременности прогнозов. В табл. 5 приведены показатели качества расчетов и прогнозов указанных характеристик в створе р. Дон – г. Серафимович.

На реке Дон половодье начинается в марте, поэтому этот месяц не включен в маловодный период. В последние десятилетия в зимние месяцы все чаще наблюдаются оттепели, которые приводят к тому, что спад водности реки прерывается поступлением талых вод в русловую сеть [5]. Неопределенность хода влияющих на речной сток метеорологических элементов в эти месяцы максимальна и возрастает от декабря к февралю.

Паводки в летне-осенние месяцы незначительны, поэтому неопределенность хода метеорологических элементов в эти месяцы минимальна. Помеченные в табл. 5 значения показателя f достаточно хорошо отражают отмеченные особенности формирования стока реки Дон.

Таблица 5. Показатели качества расчетов и прогнозов среднемесячных и среднеквартальных расходов воды в створе р. Дон – г. Серафимович
Table 5. Quality indicators of estimations and forecasts of average monthly and average quarterly water discharges in the Don river gauge – the Serafimovich city

Показатели качества	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	2 квартал
S	48,2	31,8	29,4	29,8	44,7	57,8	87,9	62,6	177
S_M	35,4	25,9	22,9	26,4	29,9	31,9	47,2	33,1	105
S_{met}	32,6	18,5	18,4	13,8	33,3	48,1	74,1	53,1	142
f	46%	34%	39%	21%	55%	69%	71%	72%	65%

Заключение

Рассматривается метеорологическая составляющая погрешности долгосрочных прогнозов речного стока, которая обусловлена неопределенностью хода метеорологических элементов в течение периода их заблаговременности. Предложена количественная оценка влияния этой неопределенности на качество прогнозов, основанных на использовании моделей формирования речного стока и ансамблевого подхода.

Даны примеры получения такой оценки для долгосрочных прогнозов различных характеристик притока воды в Чебоксарское водохранилище и стока рек бассейнов Оки, Камы, Тобола и Дона. Прогнозы основаны на использовании трех моделей – ECOMAG, DWAT и HBV.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Предлагаемая оценка f влияния неопределенности хода метеорологических элементов в период заблаговременности гидрологического прогноза на его погрешность в достаточной степени согласуется с условиями формирования стока рассматриваемых рек.

2. Эта оценка зависит не только от климатических условий формирования речного стока, но и от точности его моделирования. При снижении погрешности модельных расчетов она возрастает и может приближаться к 100 %.

3. По мере увеличения возможностей получения гидрометеорологической информации и внедрения все более совершенных моделей формирования речного стока неопределенность хода метеорологических элементов в течение заблаговременности прогноза будет основным фактором, определяющим качество его прогнозирования.

Работа выполнена в ФГБУ «Гидрометцентр России» в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения "Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ".

Список литературы

1. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть 1. Прогнозы режима вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 193 с.
2. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 1. Долгосрочные прогнозы элементов водного режима рек и водохранилищ. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 356 с.
3. Guide to Hydrological Practices. Volume I. Hydrology – From Measurement to Hydrological Information // WMO-No. 168. 2009. 738 p.
4. Бориц С.В., Христофоров А.В. Оценка качества прогнозов речного стока // Труды Гидрометцентра России. 2015. Специальный выпуск 355. 198 с.
5. Кучмент Л.С. Речной сток (генезис, моделирование, предвычисление). М.: Изд-во ИВП РАН, 2008. 394 с.
6. Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н. Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М.: Изд-во РАН, 2019. 300 с.
7. Adams T.E., Pagano T.C. Flood Forecasting: A Global Perspective. Academic Press, 2016. 480 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2014-0-01361-5>
8. Bergstrom S. The HBV model – its structure and applications // SMHI Reports Hydrology. 1992. RH No. 4, Norrköping. 35 p.
9. Greco M., Cravetta A., Della Morte R. River flow. London: Taylor and Francis Group, 2004. 1024 p.
10. Kim S., Jang Ch., Kim H., JO Hs., Kim Hr. DWAT – User’s Manual V1.0. Han River Flood Control Office. Seoul: Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT), 2018. 111 pp.
11. Руководство по гидрологической практике. Сбор и обработка данных, анализ, прогнозирование и другие применения // ВМО-№ 168. 1994. 808 с.
12. Forecast Verification in Atmospheric Science. A Practitioner’s Guide / Eds. I. Jolliffe and D. Stephenson. John Wiley & Sons Ltd, 2003. 240 p.
13. Predictability of Weather and Climate / Ed. By T. Palmer and R. Hagedorn. Cambridge University Press, 2006. 635 p.
14. Гельфан А.Н. Динамико-стохастическое моделирование формирования талого стока. М.: Наука, 2007. 276 с.
15. Бориц 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.
16. Бориц С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Эффективность моделирования и прогнозирования речного стока // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 1 (375). С. 176-189.
17. Змиева Е.С., Комаров В.Д., Сапожников В.И. Методы прогнозов весеннего притока воды в водохранилища Волжско-Камского каскада // Труды Гидрометцентра СССР. 1967. Вып. 8. С. 25-49.
18. 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.
19. Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Т. 11. Средний Урал и Приуралье. Вып. 2. Тобол / Под ред. В.В. Николаенко. Л.: Гидрометеиздат, 1965. 240 с.
20. Джамалов Р.Г., Киреева М.Б., Косолапов А.Е., Фролова Н.Л. Водные ресурсы бассейна Дона и их экологическое состояние. М.: ГЕОС, 2017. 204 с.

References

1. Nastavlenie po sluzhbe prognozov. Razdel 3. Part 1. Prognozy rezhima vod sushi. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1962, 193 p. [in Russ.].
2. *Rukovodstvo po gidrologicheskim prognozam*. Vyp. 1. Dolgosrochnye prognozy elementov vodnogo rezhima rek i vodohranilishch. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1989, 356 p. [in Russ.].
3. *WMO-No. 168. Guide to Hydrological Practices*. Vol. I. Hydrology – From Measurement to Hydrological Information. Geneva, WMO, 2009, 738 p.
4. *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.].
5. Kuchment L.S. Rechnoy stok (genezis, modelirovanie, predvychislenie). Moscow, Izd-vo IVP RAN, 2008, 394 p. [in Russ.].
6. *Motovilov Yu.G., Gelfan A.N.* Modeli formirovaniya stoka v zadachah gidrologii rechnyh basseynov. Moscow, Izd-vo Rossiyskoy akademii nauk, 2019, 300 p. [in Russ.].
7. *Adams T.E., Pagano T.C.* Flood Forecasting: A Global Perspective. Academic Press, 2016, 480 p. DOI: 10.1016/C2014-0-01361-5.
8. *Bergstrom S.* The HBV model – its structure and applications. *SMHI Reports Hydrology*, 1992, no. 4, Norrkoping, 35 p.
9. *Greco M., Cravetta A., Della Morte R.* River flow. London: Taylor and Francis Group, 2004, 1024 p.
10. *Kim S., Jang Ch., Kim H., JO Hs., Kim Hr.* DWAT – User’s Manual V1.0. Han River Flood Control Office. Seoul: Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT), 2018, 111 p.
11. *WMO-No. 168. Guide to hydrological practices*. Geneva: WMO, 1994, 808 p.
12. Forecast Verification in Atmospheric Science. A Practitioner’s Guide / Eds. I. Jolliffe and D. Stephenson. John Wiley & Sons Ltd, 2003, 240 p.
13. Predictability of Weather and Climate. Ed. By T. Palmer and R. Hagedorn. Cambridge University Press Publ., 2006, 635 p.
14. *Gelfan A.N.* Dinamiko-stohasticheskoe modelirovanie formirovaniya talogo stoka. Moscow, Nauka Publ., 2007. 276 p.
15. *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.].
16. *Borsch S.V., Khristoforov A.V., Simonov Y.A.* Efficiency of streamflow modeling and forecasting. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2020, vol. 375, no. 1, pp. 176-189 [in Russ.].
17. *Zmieva E.S., Komarov V.D., Sapozhnikov V.I.* Metody prognozov vesennego pritoka vody v vodohranilishcha Volzhsko-Kamskogo kaskada. *Trudy Gidromettsentra SSSR [Proceedings of the Hydrometcentre of the USSR]*, 1967, vol. 8, pp. 25-49 [in Russ.].
18. *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.
19. Resursy poverhnostnyh vod SSSR: Gidrologicheskaya izuchennost'. T. 11. Sredniy Ural i Priural'e. Vyp. 2. Tobol. Pod red. V. V. Nikolaenko. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1965, 240 p. [in Russ.].
20. *Dzhamalov R.G., Kireeva M.B., Kosolapov A.E., Frolova N.L.* Vodnye resursy basseyna Dona i ih ekologicheskoe sostoyanie. Moscow, GEOS, 2017, 204 p. [in Russ.].

Поступила 10.10.2022; одобрена после рецензирования 16.11.2022;
принята в печать 29.11.2022.

Submitted 10.10.2022; approved after reviewing 16.11.2022;
accepted for publication 29.11.2022.