

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-2-77-94>

УДК 556.06

Прогнозирование стока рек России методом экстраполяции гидрографа

***С.В. Борщ, В.М. Колий, 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*

На основе метода экстраполяции гидрографа разработана автоматизированная система, которая позволяет ежедневно в течение всего года прогнозировать характеристики стока рек России с заблаговременностью от 1 до 10 суток. Прогноз расходов или уровней воды выражается линейной формулой в зависимости от их значений за дату выпуска прогноза и за пять предыдущих суток. Прогноз ограничивается снизу и сверху минимальным и максимальным значениями расхода или уровня воды за период наблюдений. Схемы прогнозирования получены для 2776 речных створов. Использован единый для всех створов период ежедневных наблюдений за расходами и уровнями воды с 2010 по 2019 год. Верификация прогнозов показала, что данный метод может успешно применяться для достаточно крупных рек с плавным очертанием гидрографов.

Ключевые слова: среднесуточные расходы и уровни воды, краткосрочные и среднесрочные прогнозы, метод экстраполяции гидрографа, верификация прогнозов, максимальная заблаговременность удовлетворительных прогнозов, самообучение автоматизированной системы подготовки и выпуска прогнозов

Forecasting the flow of Russian rivers by hydrograph extrapolation

***S.V. Borsch, V.M. Koliy, 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*

An automated system has been developed based on the hydrograph extrapolation method, which allows the year-round daily forecasting of water level and streamflow for the Russian rivers with up to 10-day lead time. The forecast of discharges or water levels is expressed by a linear formula depending on their values on the date of the forecast issue and five previous days. The forecasting scheme limits the possible minimum and maximum values of the discharge or water level based on historical data. Forecast schemes were obtained for 2776 river gauges. The time period from 2010 to 2019 with daily observations of discharge and water level was used. The forecast verification shows that this method can be successfully applied to large rivers with smooth hydrographs.

Keywords: daily discharge and water levels, short- and medium-term forecasts, hydrograph extrapolation method, forecast verification, maximum lead time of satisfactory forecasts, self-learning of an automated system for preparing and issuing forecasts

Введение

Увеличение точности и заблаговременности гидрологических прогнозов и расширение сферы их применения необходимо в целях повышения эффективности использования и охраны водных ресурсов и защиты населения и хозяйственных объектов от участвовавших в последние годы наводнений, вызванных интенсивным снеготаянием, дождевыми паводками, заторами и зазорами льда.

Важная роль при этом отводится ежедневно выпускаемым краткосрочным и среднесрочным прогнозам расходов и уровней воды в речных створах с заблаговременностью от 1 до 5 суток и от 6 до 10 суток соответственно [1, 7, 8, 13].

Изменение климата и усиление антропогенного воздействия на речные бассейны приводит к изменению условий формирования речного стока и его режима во многих регионах России. Это требует постоянного пересчета параметров схемы получения прогноза по мере поступления новой гидрометеорологической информации. Таким образом, возникает необходимость в использовании методов искусственного интеллекта и, в частности, машинного обучения в системе оперативного гидрологического прогнозирования.

Применение методов машинного обучения может быть максимально эффективным в рамках систем автоматизированной подготовки и выпуска прогнозов для крупных речных бассейнов. Разработка систем автоматизированной подготовки и выпуска прогнозов является одним из важнейших направлений деятельности Гидрометцентра России. Эти системы включают подсистемы информационного обеспечения, составления и выпуска прогнозов, доведения прогностической и информационно-аналитической продукции до пользователей в режиме реального времени.

Подсистема информационного обеспечения в автоматизированном режиме обеспечивает наличие обширной гидрометеорологической информационной основы для прогнозирования в режиме реального времени. Она основана на использовании современной системы управления базами данных (СУБД), которая функционирует в рамках автоматизированной системы обработки оперативной информации АСООИ Гидрометцентра России [9].

Подсистема составления и выпуска гидрологических прогнозов основана на использовании специально разработанных автоматизированных программных средств, реализующих разнообразные методики подготовки и коррекции гидрологических прогнозов.

Для оперативного обеспечения потребителей фактической и прогностической информацией реализована подсистема доведения выходной прогностической и информационно-аналитической продукции до пользователей. Подсистема реализована на основе Веб и ГИС-технологий, что позволяет интегрировать и визуализировать в единой информационной среде (сети Интернет) всю выходную продукцию. Взаимодействие с пользователями осуществляется с помощью ВЕБ приложения, функционал которого разрабатывается с учетом требований пользователей системы [11].

В настоящее время существует весьма обширный набор методов краткосрочного и среднесрочного прогнозирования речного стока. Эти методы в той или иной степени учитывают закономерности формирования стока на водосборе и движения воды в русловой сети. Они реализуются в виде физико-математических и концептуальных моделей или в виде статистических зависимостей прогнозируемой величины от известных к дате составления прогноза гидрологических и метеорологических характеристик [5, 6, 8, 10, 12, 14, 15].

Для разработки автоматизированной системы подготовки и выпуска прогнозов целесообразно использование максимально простого и универсального метода, который позволял бы устойчиво получать с достаточной точностью ежедневные прогнозы среднесуточных расходов и уровней воды в течение всего года. В связи с этим предлагается метод экстраполяции гидрографа, реализации которого для рек России посвящена настоящая статья.

Метод экстраполяции гидрографа

Характерный для достаточно крупных равнинных рек плавный ход среднесуточных расходов и уровней воды в течение года дает основание для простейшего варианта их прогнозирования путем экстраполяции гидрографа текущего года. Такая экстраполяция может определять прогноз среднесуточного расхода воды с заблаговременностью Δt суток в виде обобщенного полинома:

$$\hat{Q}(t + \Delta t) = c_0(t) + c_1(t)\varphi_1(\Delta t) + \dots + c_k(t)\varphi_k(\Delta t), \quad (1)$$

где $\varphi_1(\Delta t), \dots, \varphi_k(\Delta t)$ – некоторые заданные функции. Например, при $\varphi_1(\Delta t) = \Delta t, \dots, \varphi_k(\Delta t) = (\Delta t)^k$ формула (1) означает экстраполяцию гидрографа на Δt суток с помощью многочлена степени k . В частности, при значении $k = 1$ производится линейная экстраполяция, а при значении $k = 2$ – параболическая. В зависимости от даты составления прогноза t входящие в формулу (1) коэффициенты $c_0(t), c_1(t), \dots, c_k(t)$ определяются исходя из предположения о том, что последовательность наблюдавшихся расходов $Q(t), Q(t-1), \dots, Q(t-k)$ для даты составления

прогноза и для k предыдущих суток описывается тем же обобщенным полиномом. Данное предположение выражается в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} Q(t-i) = c_0(t) + c_1(t)\varphi_1(-i) + \dots + c_k(t)\varphi_k(-i), \\ i = 0, 1, \dots, k. \end{cases} \quad (2)$$

Решение системы (2) приводит к тому, что коэффициенты $c_0(t)$, $c_1(t)$, ..., $c_k(t)$ линейно выражаются через расходы $Q(t)$, $Q(t-1)$, ..., $Q(t-k)$. После подстановки этих выражений в формулу (1) она приобретает вид:

$$\hat{Q}(t + \Delta t) = \sum_{i=0}^k a_i(\Delta t)Q(t-i) + b(\Delta t), \quad (3)$$

где $a_0(\Delta t)$, $a_1(\Delta t)$, ..., $a_k(\Delta t)$ и $b(\Delta t)$ – параметры линейной формулы, зависящие от заблаговременности прогноза Δt и подлежащие оценке по данным гидрологических наблюдений.

Таким образом, экстраполяция гидрографа с помощью любого полинома вида (1) приводит к тому, что прогноз $\hat{Q}(t + \Delta t)$ выражается в виде линейной комбинации соответствующего дате составления прогноза расхода воды $Q(t)$ и k предыдущих расходов $Q(t-1)$, ..., $Q(t-k)$.

Определяемые формулой (3) величины $\hat{Q}(t + \Delta t)$ 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 $\hat{Q}(t + \Delta t)$ 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 (3) необходимо корректировать, заменяя такие экстремальные значения $\hat{Q}(t + \Delta t)$ допустимым минимумом $\min Q$ или максимумом $\max Q$ [4]. Окончательный прогноз расхода воды выражается формулой:

$$\tilde{Q}(t + \Delta t) = \begin{cases} \min Q, & \text{если } \hat{Q}(t + \Delta t) < \min Q; \\ \hat{Q}(t + \Delta t), & \text{если } \min Q \leq \hat{Q}(t + \Delta t) \leq \max Q; \\ \max Q, & \text{если } \hat{Q}(t + \Delta t) > \max Q. \end{cases} \quad (4)$$

Обобщенная экстраполяция хода среднесуточных уровней воды приводит к аналогичной формуле, которая выражает прогноз уровня воды

$\hat{H}(t + \Delta t)$ в виде линейной комбинации известного к дате составления прогноза среднесуточного уровня $H(t)$ и k уровней $H(t-1)$, ..., $H(t-k)$ за предшествующие сутки:

$$\hat{H}(t + \Delta t) = \sum_{i=0}^k a_i(\Delta t)H(t-i) + b(\Delta t). \quad (5)$$

Результаты применения формулы (5) корректируются аналогичным образом путем замены экстремальных значений $\hat{H}(t + \Delta t)$ допустимым минимумом $\min H$ или максимумом $\max H$. Окончательный прогноз расхода воды выражается формулой:

$$\tilde{H}(t + \Delta t) = \begin{cases} \min H, & \text{если } \hat{H}(t + \Delta t) < \min H; \\ \hat{H}(t + \Delta t), & \text{если } \min H \leq \hat{H}(t + \Delta t) \leq \max H; \\ \max H, & \text{если } \hat{H}(t + \Delta t) > \max H. \end{cases} \quad (6)$$

Данный метод может применяться для краткосрочного или среднесрочного прогнозирования речного стока в течение определенной фазы водного режима или в течение всего года. Он не является чисто формальным, так учитываемые в формулах (3) и (5) расходы и уровни воды за $k+1$ суток косвенно характеризуют поступление талых или дождевых вод, пополнение или истощение почвенной влаги и запасов подземных вод, изменение русловых и пойменных запасов воды и трансформацию волны половодья или паводка в течение предшествующего периода. Возможности использования данного метода подтверждены достаточно успешным его применением для получения краткосрочных прогнозов стока рек бассейна Камского водохранилища [3].

Реализация метода

Метод экстраполяции гидрографа использован для прогнозирования в течение всего года среднесуточных расходов и уровней воды в оборудованных гидрологических постами речных створах, расположенных по всей территории России. Среднесуточные уровни воды прогнозировались для 2776 створов (рис 1). Среднесуточные расходы воды прогнозировались для 2098 створов.

При заданной заблаговременности прогноза $\Delta t = 1, \dots, 10$ параметры $a_0(\Delta t)$, $a_1(\Delta t)$, ..., $a_k(\Delta t)$ и $b(\Delta t)$ формул (3) или (5) оценивались методом наименьших квадратов по ряду ежедневных гидрологических наблюдений за период с 01.01.2010 по 31.12.2019. Входящие в формулы (4) и (6) минимальные и максимальные значения расходов и уровней воды определялись по тому же ряду и должны ежегодно пересчитываться по мере поступления новых данных наблюдений.

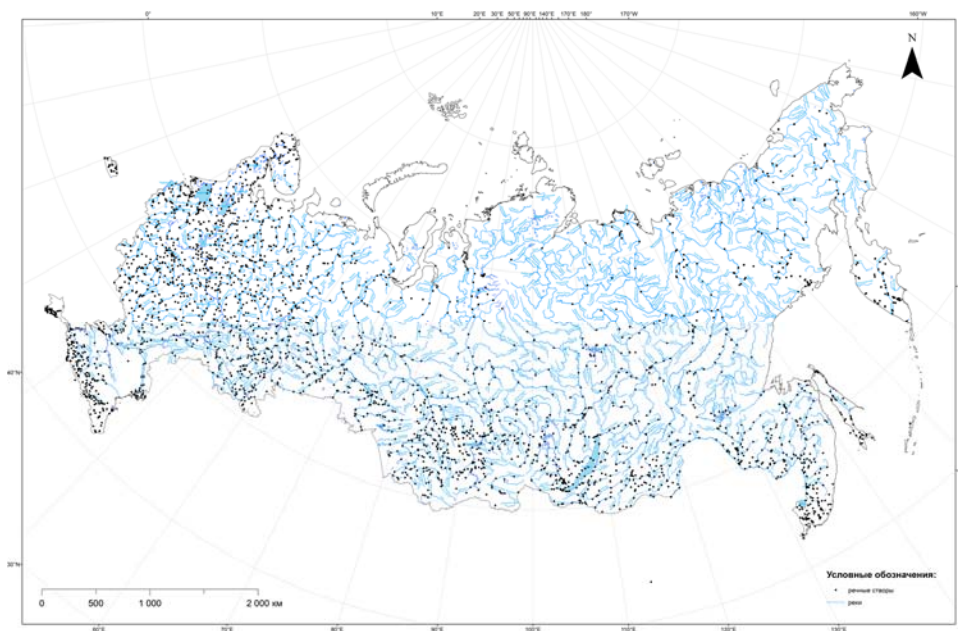


Рис. 1. Расположение анализируемых речных створов.
Fig. 1. Analyzed river gauges location.

При каждом значении заблаговременности Δt от 1 до 10 суток для формул (3) и (5) подбиралось оптимальное число k , при котором среднеквадратическая погрешность прогноза принимает минимальное значение. Анализ показал, что для всех значений заблаговременности прогноза $\Delta t = 1, \dots, 10$ суток такие оптимальные значения параметра k не превышали 5. На этом основании все прогнозы среднесуточных расходов и уровней воды определялись с помощью формул (3) и (5) при $k = 5$.

В качестве примера в табл. 1 приведены параметры формул (3) и (4) для получения прогнозов среднесуточных расходов воды в створе на реке Дон у города Серафимович с заблаговременностью $\Delta t = 1, \dots, 10$ суток.

В табл. 2 приведены параметры формул (5) и (6) для получения прогнозов среднесуточных уровней воды в створе на реке Тавда (приток Тобола) у города Тавда с заблаговременностью $\Delta t = 1, \dots, 10$ суток.

Значения коэффициентов a_1 , a_3 и a_4 оказались нулевыми вследствие их округления.

В целях автоматизации процедуры получения прогнозов и оценки их качества для любого набора речных створов и соответствующих гидрологических постов в отделе речных гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» на языке Python разработана компьютерная программа.

Таблица 1. Параметры формул (3) и (4) получения прогноза ежедневных расходов воды в створе р. Дон – г. Серафимович**Table 1.** Formula parameters (3) and (4) for obtaining a forecast of daily water discharge in the section of the river Don – Serafimovich

Δt	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	b	$minQ$	$maxQ$
1	1,435	-0,309	-0,082	0,053	-0,048	-0,054	2,21	148	5531
2	1,746	-0,522	-0,068	0,015	-0,065	-0,118	5,48	148	5531
3	1,981	-0,605	-0,129	0,02	-0,169	-0,117	9,41	148	5531
4	2,236	-0,740	-0,143	-0,068	-0,199	-0,116	13,84	148	5531
5	2,462	-0,829	-0,255	-0,099	-0,141	-0,178	18,90	148	5531
6	2,689	-1,007	-0,309	-0,048	-0,128	-0,249	24,57	148	5531
7	2,829	-1,126	-0,282	-0,046	-0,105	-0,335	30,87	148	5531
8	2,898	-1,136	-0,299	-0,044	-0,064	-0,435	37,65	148	5531
9	2,977	-1,168	-0,309	-0,025	-0,050	-0,52	44,75	148	5531
10	3,116	-1,208	-0,315	-0,037	-0,027	-0,658	60,09	148	5531

Таблица 2. Параметры формул (5) и (6) получения прогноза ежедневных уровней воды в створе р. Тавда – г. Тавда**Table 2.** Formula parameters (5) and (6) for obtaining a forecast of daily water levels in the river section of the river Tavda – Tavda

Δt	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	b	$minH$	$maxH$
1	1,531	0,000	-0,578	0,000	0,000	0,045	0,5	93	883
2	2,01	0,000	-1,091	0,000	0,000	0,076	1,6	93	883
3	2,45	0,000	-1,556	0,000	0,000	0,097	3,0	93	883
4	2,87	0,000	-2,007	0,000	0,000	0,123	4,9	93	883
5	3,274	0,000	-2,45	0,000	0,000	0,154	7,0	93	883
6	3,666	0,000	-2,891	0,000	0,000	0,196	9,5	93	883
7	4,046	0,000	-3,331	0,000	0,000	0,246	12,3	93	883
8	4,401	0,000	-3,745	0,000	0,000	0,296	15,3	93	883
9	4,715	0,000	-4,108	0,000	0,000	0,334	18,7	93	883
10	4,985	0,000	-4,414	0,000	0,000	0,359	22,3	93	883

Компьютерная программа включает следующие этапы:

- считывание и обработка данных, которые могут храниться в одном или в нескольких файлах;
- оценку параметров схемы получения прогноза для каждого речного створа;

- оценку показателей качества получаемых прогнозов;
- создание для каждого створа отдельной директории, в которой сохраняются параметры схемы получения прогноза и показатели его качества;
- создание сводной таблицы с результатами прогнозирования.

Верификация прогнозов

Качество краткосрочных и среднесрочных прогнозов среднесуточных расходов и уровней воды оценивалось на независимом материале, то есть по данным, которые не учитывались при определении параметров формул получения прогноза. С этой целью использована следующая процедура скользящего контроля [1].

1. Из 10-летнего периода наблюдений исключался первый год.
2. Данные за оставшиеся 9 лет использовались для оценки параметров схемы получения прогноза.
3. Полученные оценки подставлялись в формулы (3) и (4) или (5) и (6) для прогнозирования расходов или уровней воды в течение исключенного года.
4. В результате для исключенного года формировался полученный на независимом материале ряд ошибок прогноза за 365 или (для високосного года) за 366 суток.
5. Данные за исключенный первый год возвращались и исключался следующий год.
6. После повторения описанной процедуры для всех 10 лет формировался ряд ошибок прогноза длиной $N = 3652$, полученный на независимом материале.

Если обозначить через $Y(t)$ значение прогнозируемой величины (расхода или уровня воды) за сутки t , а через $\tilde{Y}(t)$ ее прогноз, то для периода с 01.01.2010 по 31.12.2019 г. среднеквадратическая погрешность прогноза определяется формулой:

$$S = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N [Y(t) - \tilde{Y}(t)]^2} . \quad (7)$$

В соответствии с Наставлением [7] для оценки эффективности методики прогнозирования в качестве альтернативы использовался инерционный прогноз. При заблаговременности прогноза Δt суток инерционный прогноз $\tilde{Y}_I(t + \Delta t)$ использует известное на дату его составления значение $Y(t)$ и определяется формулой:

$$\tilde{Y}_I(t + \Delta t) = Y(t) + \bar{\Delta} , \quad (8)$$

где $\bar{\Delta}$ вычисляется, как среднее арифметическое ряда $\Delta_1, \dots, \Delta_N$, образованного N наблюдавшимися изменениями рассматриваемой характеристики за период заблаговременности прогноза. Оценка погрешности инерционного прогноза определяется формулой:

$$\sigma_{\Delta} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\Delta_i - \bar{\Delta})^2}. \quad (9)$$

Вывод о применимости методики прогнозирования делается на основании отношения S/σ_{Δ} : при достаточно большом числе N проверочных прогнозов методика считается хорошей при $S/\sigma_{\Delta} \leq 0,50$, удовлетворительной при $0,50 < S/\sigma_{\Delta} \leq 0,80$ и неудовлетворительной при $S/\sigma_{\Delta} > 0,80$ [1, 7].

В качестве другого показателя качества прогнозирования используется оправдываемость прогноза P , то есть частота случаев, когда абсолютные значения ошибок прогноза не превышали допустимую ошибку, равную $0,674 \sigma_{\Delta}$.

В Наставлении [7] критическим значениям 0,50 и 0,80 показателя S/σ_{Δ} соответствуют значения оправдываемости $P = 82,5\%$ и $P = 60\%$ соответственно [7].

В качестве примера в табл. 3 для прогнозов среднесуточных расходов воды в створе р. Дон – г. Серафимович с заблаговременностью $\Delta t = 1, \dots, 10$ суток приведены следующие показатели качества прогнозирования:

В табл. 3:

R – коэффициент корреляции между фактическими расходами и их прогнозами;

S – среднеквадратическая погрешность прогнозов, $\text{м}^3/\text{с}$;

σ_{Δ} – среднеквадратическая погрешность инерционных прогнозов, $\text{м}^3/\text{с}$;

S/σ_{Δ} – показатель эффективности прогнозов;

P – оправдываемость прогнозов.

На рис. 2 для этого створа приведены совмещенные графики хода фактических и спрогнозированных с заблаговременностью $\Delta t = 5$ суток расходов воды в 2016 году.

Появившиеся на спрогнозированном гидрографе незначительные всплески обусловлены интенсивным ростом расходов воды перед датой составления прогноза.

Показатели качества ежедневных прогнозов уровней воды в створе р. Тавда – г. Тавда приведены в табл. 4.

На рис. 3 для этого створа приведены совмещенные графики хода фактических и спрогнозированных с заблаговременностью $\Delta t = 7$ суток уровней воды в 2018 году.

Таблица 3. Показатели качества ежедневных прогнозов расходов воды в створе р. Дон – г. Серафимович

Table 3. Quality indicators of daily forecasts of water discharge of the river Don – Serafimovich

Δt	R	S	σ_{Δ}	S / σ_{Δ}	$P, \%$
1	0,9995	22,3	38,3	0,58	91
2	0,998	41,8	72,7	0,58	86
3	0,996	63,0	106	0,59	85
4	0,993	84,1	139	0,61	84
5	0,989	109	171	0,64	84
6	0,983	134	202	0,66	85
7	0,975	160	232	0,69	83
8	0,967	185	260	0,71	84
9	0,957	209	288	0,72	83
10	0,937	253	341	0,74	83

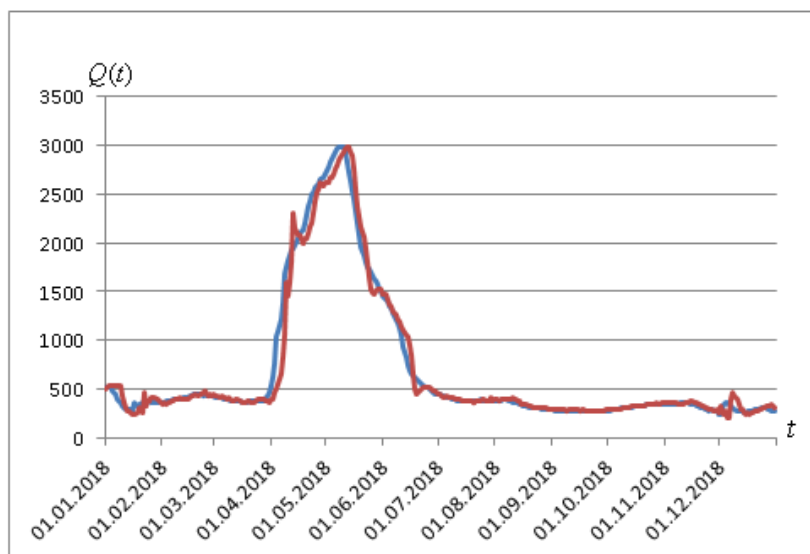
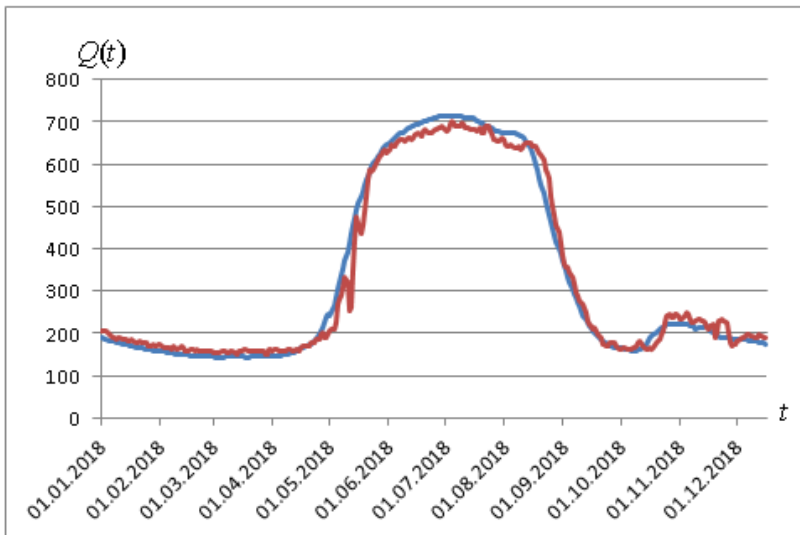


Рис. 2. Фактические (синим) и спрогнозированные с заблаговременностью $\Delta t = 5$ суток (красным) гидрографы в створе р. Дон – г. Серафимович в 2016 г.

Fig. 2. Observed (blue) and predicted with a lead time = 5 days (red) hydrographs in the section of the river Don - Serafimovich in 2016.

Таблица 4. Показатели качества ежедневных прогнозов расходов воды в створе р. Тавда – г. Тавда**Table 4.** Quality indicators of daily forecasts of water levels of the river Tavda - Tavda

Δt	R	S	σ_{Δ}	S / σ_{Δ}	$P, \%$
1	1,000	2,8	7,8	0,36	96
2	1,000	6,1	15,4	0,40	95
3	0,999	10,0	22,8	0,44	94
4	0,998	14,0	30,1	0,47	93
5	0,996	18,4	37,3	0,49	91
6	0,993	22,9	44,3	0,52	90
7	0,990	27,5	51,1	0,54	88
8	0,987	32,4	57,9	0,56	86
9	0,982	37,4	64,4	0,58	85
10	0,977	42,6	70,9	0,60	85

**Рис. 3.** Фактический (синим) и спрогнозированный с заблаговременностью $\Delta t = 10$ суток (красным) ход уровней воды в створе р. Тавда – г. Тавда в 2018 году.**Fig. 3.** Observed (blue) and predicted with a lead time = 10 days (red) stage curve in the section of the river Tavda – Tavda in 2018.

Анализ результатов

Анализ результатов верификации прогнозов расходов и уровней воды в речных створах России позволяет оценить возможности используемого метода экстраполяции гидрографа и внедряемой системы автоматизированной подготовки и выпуска прогнозов.

Эти возможности демонстрирует табл. 5, в которой для всех значений заблаговременности Δt от 1 до 10 суток приведено число речных створов, для которых получены удовлетворительные прогнозы расходов Q м³/с и уровней воды H см с показателем $S/\sigma_{\Delta} < 0,80$ и оправдываемостью $P > 60\%$.

Таблица 5. Число речных створов с удовлетворительными прогнозами различной заблаговременности.

Table 5. The number of river sections with satisfactory forecasts of various lead times

Δt	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Q	1000	723	545	456	382	328	301	277	258	240
H	1262	909	704	558	461	384	337	294	252	223

Приведенные в таблице данные показывают, что с заблаговременностью $\Delta t = 1$ сутки удовлетворительные прогнозы расходов воды могут быть получены для 1000 створов, а уровней воды – для 1262 створов; с заблаговременностью $\Delta t = 2$ суток для 723 створов (расходы Q) и для 909 створов (уровни H) и т. д. При этом в число створов с удовлетворительными прогнозами при заблаговременности Δt входят и створы, для которых получены удовлетворительные прогнозы с большей заблаговременностью.

Обращает на себя внимание, что с максимальной для среднесрочных прогнозов заблаговременностью $\Delta t = 10$ суток расходы воды удовлетворительно прогнозируются для 240 створов, а уровни воды для 223 створов.

Как и следовало ожидать, метод экстраполяции гидрографов оказался неприменимым для рек с малой площадью и большим уклоном водосбора, в частности для малых горных рек. Расположенные на таких реках створы дали приблизительно половину случаев, когда прогнозы расходов и уровней воды оказались неудовлетворительными даже при минимальной заблаговременности $\Delta t = 1$ сутки. Это объясняется тем, что при малых размерах и больших уклонах водосбора речной сток очень быстро, часто за несколько часов реагирует на таяние снега или на выпадение жидких осадков [2]. В результате водный режим определяется серией

кратковременных паводков, за пределами зимней межени ход среднесуточных расходов и уровней имеет пилообразный характер и его невозможно предсказать методом экстраполяции даже на сутки. Для таких рек необходимо использование методов, применяемых для прогнозирования быстроразвивающихся паводков, к примеру, методов, которые основаны на моделировании процессов формирования речного стока.

Для рек с большой площадью и малым уклоном водосбора ход среднесуточных расходов и уровней имеет, как правило, плавный характер, как на рис. 2 и 3, поэтому метод экстраполяции гидрографа позволяет давать удовлетворительные прогнозы с достаточно большой заблаговременностью. Для таких крупнейших российских рек, как Амур, Лена, Енисей, Обь, Иртыш, Тобол, Кама, Дон, Северная Двина и Печора, это метод дает не только удовлетворительные, но и хорошие прогнозы с заблаговременностью до 10 суток.

С увеличением заблаговременности прогноза Δt его среднеквадратическая погрешность S всегда возрастает. Растет и погрешность σ_{Δ} инерционного прогноза. В то же время изменение показателя эффективности прогноза S/σ_{Δ} и его оправдываемости P может иметь более сложный характер. Для крупных рек с очень плавным очертанием гидрографов при прогнозировании расходов или уровней воды с небольшой заблаговременностью $\Delta t = 1-3$ суток малая величина S может сочетаться с настолько малой величиной σ_{Δ} , что показатель S/σ_{Δ} может превысить критическое значение 0,80. В то же время при дальнейшем росте заблаговременности Δt прогнозы становятся удовлетворительными. Пример такой ситуации демонстрирует табл. 6 с аномальным характером изменения показателя эффективности прогнозов уровней воды в реке Иртыш у города Ханты-Мансийск (площадь водосбора 1 650 000 км²) с ростом их заблаговременности.

Таблица 6. Значения показателя эффективности прогноза уровней воды в створе р. Иртыш – г. Ханты-Мансийск.

Table 6. Indicator values forecasting water levels effectiveness in the section Irtysh river – Khanty-Mansiysk

Δt	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
S/σ_{Δ}	0,83	0,78	0,78	0,77	0,76	0,75	0,75	0,75	0,75	0,74

Следует, однако, заметить, что описанные случаи являются единичными, и в целом с увеличением заблаговременности прогноза показатель S/σ_{Δ} растет, а показатель P снижается. Это позволяет определить максимальную заблаговременность удовлетворительных прогнозов

$max(\Delta t)$ таким образом, что прогнозы с показателями $S/\sigma_{\Delta} < 0,80$ и $P > 60\%$ могут быть получены при всех значениях Δt , не превышающих величину $max(\Delta t)$.

Будучи характеристикой водного режима реки, максимальная заблаговременность удовлетворительных прогнозов зависит не только от размера и уклона водосбора, но и от климата, рельефа, ландшафтной структуры, факторов хозяйственной деятельности и других условий формирования стока. Поэтому получить зависимость величины $max(\Delta t)$ от площади и уклона водосбора можно только для достаточно однородных в географическом отношении регионов. Как правило, для таких регионов имеет место достаточно высокая отрицательная корреляция между площадью водосбора и его средним уклоном. Это позволило в первом приближении ограничиться анализом соотношений между максимальной заблаговременностью удовлетворительных прогнозов $max(\Delta t)$ и площадью водосбора A для различных речных бассейнов. Эти зависимости носят логарифмический характер и достаточно однотипны. В качестве примера на рис. 4 и 5 представлены зависимости $max(\Delta t)$ от $\ln A$ для бассейнов Амура и Оби.

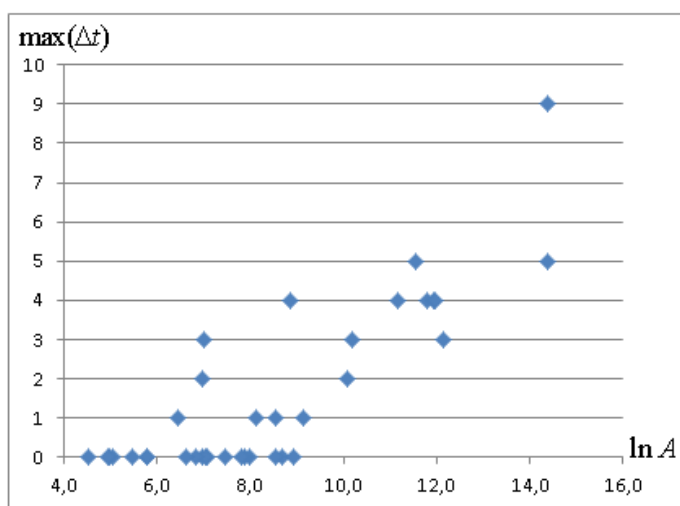


Рис. 4. Зависимость максимальной заблаговременности удовлетворительных прогнозов уровней воды $max(\Delta t)$ от логарифма площади водосбора $\ln A$ для бассейна реки Амур.

Fig. 4. Dependence of the maximum lead time of satisfactory forecasts of water levels on the logarithm of the catchment area for the Amur river basin.

Теснота представленной на рис. 4 зависимости характеризуется коэффициентом корреляции 0,83. Распределение точек на графике показывает, что удовлетворительные прогнозы уровней воды на реках бассейна Амура даже на одни сутки, как правило, невозможны при площади водосбора менее 5000 км², а удовлетворительные среднесрочные прогнозы с заблаговременностью более 5 суток возможны для речных створов с площадью водосбора более 500 000 км².

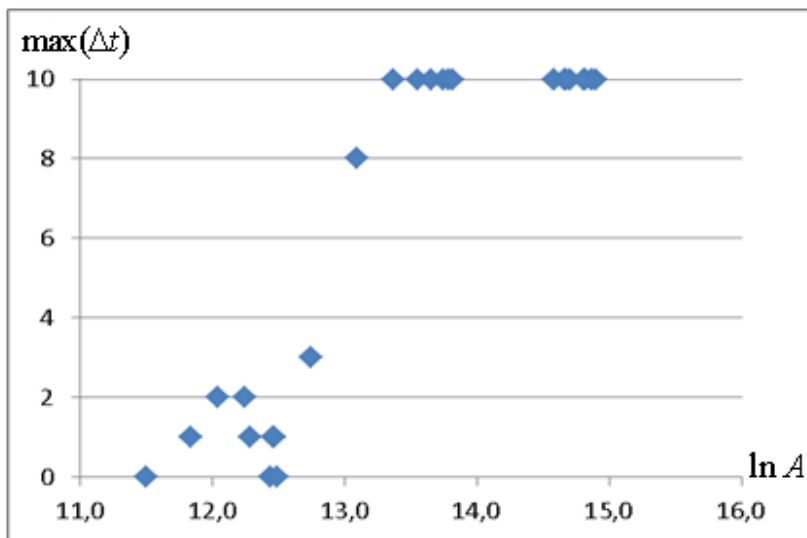


Рис. 5. Зависимость максимальной заблаговременности удовлетворительных прогнозов уровней воды $\max(\Delta t)$ от логарифма площади водосбора $\ln A$ для бассейна реки Обь.

Fig. 5. Dependence of the maximum lead time of satisfactory forecasts of water levels on the logarithm of the catchment area for the Ob river basin.

Теснота представленной на рис. 5 зависимости характеризуется коэффициентом корреляции 0,90. Распределение точек на графике показывает, что удовлетворительные прогнозы уровней воды на реках бассейна Оби даже на одни сутки, как правило, невозможны при площади водосбора менее 100 000 км², а удовлетворительные среднесрочные прогнозы с заблаговременностью более 5 суток возможны для речных створов с площадью водосбора более 500 000 км².

Получение подобных и более детальных зависимостей для различных регионов страны позволит заранее оценивать возможность применения метода экстраполяции гидрографа и является предметом дальнейших исследований.

Заключение

В отделе речных гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» разработана самообучающаяся автоматизированная система подготовки и ежедневного выпуска краткосрочных и среднесрочных прогнозов расходов и уровней воды, которая применена для 2776 речных створов, расположенных практически по всей территории страны. В основу системы положен метод экстраполяции гидрографа.

Метод экстраполяции позволил в течение всего года прогнозировать с заблаговременностью от 1 до 10 суток ежедневные расходы и уровни воды с помощью всего двух простых формул, параметры которых определены по данным ежедневных гидрологических наблюдений за период с 2010 по 2019 год.

В целях автоматизации процедуры получения прогнозов и оценки их качества разработана компьютерная программа, которая позволяет производить пересчет всех параметров и характеристик по мере изменения состава речных створов и поступления новой гидрологической информации.

Анализ результатов верификации прогнозов показал, что метод экстраполяции гидрографа и реализующая его автоматизированная система позволяет получать удовлетворительные прогнозы расходов и уровней воды для достаточно крупных рек с плавным изменением этих характеристик. В частности, удовлетворительные прогнозы с заблаговременностью десять суток могут выпускаться более чем для 200 речных створов. Для ряда крупных речных бассейнов обнаружена достаточно тесная зависимость максимальной заблаговременности удовлетворительных прогнозов от логарифма площади водосбора.

Разработанная автоматизированная система подготовки и выпуска прогнозов способна к самообучению, которое выражается в обновлении параметров прогностических формул по мере поступления данных гидрологических наблюдений. Это позволяет учитывать происходящие во многих регионах России климатические и антропогенные изменения условий формирования стока и его режима.

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.* Система прогнозирования паводков и раннего оповещения о наводнениях на реках Черноморского побережья Кавказа и бассейна Кубани // Труды Гидрометцентра России. 2015. Спец. вып. 356. 247 с.
3. *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.
4. *Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В.* Методы коррекции прогнозов речного стока // Гидрологические исследования и прогнозы. 2020. № 1 (375). С. 162–175.

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 Российской академии наук, 2019. 300 с.
7. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть 1. Прогнозы режима вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 193 с.
8. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 2. Краткосрочный прогноз расхода и уровня воды на реках. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 245 с.
9. Степанов Ю.А., Жабина И.И., Пурина И.Э., Недачина А.Ю., Елисеев Г.В. Автоматизированная технология Гидрометцентра России для оперативной обработки информации в высокопроизводительной кластерной инфраструктуре // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4 (374). С. 257-285.
10. Adams T.E., Pagano T.C. Flood Forecasting: A Global Perspective. Amsterdam; Boston: Elsevier/AP, 2016. 478 p.
11. Borsch S., Khristoforov A., Krovotynzev V., Leontieva E., Simonov Y., Zatyagalova V. A Basin Approach to a Hydrological Service Delivery System in the Amur River Basin // Geosciences. 2018. Vol. 8, no. 93. P. 1-16.
12. Greco M., Cravetta A., Della Morte R. River flow. London: Taylor and Francis Group, 2004. 1024 p.
13. Guide to Hydrological Practices. Volume II. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices // WMO- No. 168. 2009. 302 p.
14. Management Overview of Flood forecasting Systems (MOFFS): Version 3. Geneva: HWR, 1995. 26 p.
15. Manual on Flood Forecasting and Warning // WMO-No. 1072. 2011. 138 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 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]*, Special issue, 2015, vol. 356, 247 p. [in Russ.].
3. 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, vol. 369, no. 3, pp. 74-86. [in Russ.].
4. Borsch S.V., Khristoforov A.V., Simonov Y.A. Methods for the streamflow forecast correction. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2020, vol. 375, no. 1, pp. 162-175. [in Russ.].
5. Kuchment L.S. Rechnoy stok (genezis, modelirovanie, predvychislenie). Moscow, IVP RAN publ., 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. Nastavlenie po sluzhbe prognozov. Razdel 3. CHast' 1. Prognozy rezhima vod sushi. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1962, 193 p. [in Russ.].

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

9. *Stepanov Yu.A., Zhabina I.I., Purina I.E., Nedachina A.Yu., Eliseev G.V.* Automated technology of the Hydrometeorological Center of Russia for operational information processing in a high-performance cluster infrastructure. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [Hydrometeorological Research and Forecasting], 2019, vol. 374, no. 4, pp. 257-285. [in Russ.].

10. *Adams T.E., Pagano T.C.* Flood Forecasting: A Global Perspective. Amsterdam; Boston, Elsevier/AP, 2016, 478 p.

11. *Borsch S.V., Khristoforov A.V., A.; Krovotynzev V.A., Leontieva, E.F., Simonov Y.A., Zatyagalova V.V.* A Basin Approach to a Hydrological Service Delivery System in the Amur River Basin. *Geosciences*, 2018, vol. 8, no. 93, pp. 1-16.

12. *Greco M., Cravetta A., Della Morte R.* River flow. London: Taylor and Francis Group, 2004, 1024 p.

13. *WMO-No. 168. Guide to Hydrological Practices. Vol. II. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices.* WMO, Geneva, 2009, 302 p.

14. Management Overview of Flood forecasting Systems (MOFFS): Version 3. Geneva, HWR, 1995, 26 pp.

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

*Поступила 21.01.2021; одобрена после рецензирования 25.05.2021;
принята в печать 21.06.2021.*

*Submitted 21.01.2021; approved after reviewing 25.05.2021;
accepted for publication 21.06.2021.*