

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2024-2-130-145>

УДК 556.06

Краткосрочное и среднесрочное прогнозирование уровней воды на реках бассейна Тобола

А.В. Христофоров

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

В целях обеспечения необходимой гидрологической информацией оперативных решений по использованию водных ресурсов и защите населения от опасных наводнений для рек бассейна Тобола разработана методика ежедневного прогнозирования среднесуточных уровней воды с заблаговременностью от 1 до 10 суток. Использован метод экстраполяции гидрографа, в котором учитываются уровни воды за дату составления прогноза и за 5 предыдущих суток. Методика разработана для 64 створов, расположенных на реке Тобол и его притоках различных порядков. Для оценки параметров схемы получения прогнозов и их верификации использованы данные гидрологических наблюдений за период с 1985 по 2022 год. Для большинства рек бассейна методика дает удовлетворительные результаты. В целом точность прогнозов и их заблаговременность возрастают с увеличением площади водосбора. Методика может быть использована в рамках автоматизированной системы подготовки и выпуска прогнозов.

Ключевые слова: экстраполяция гидрографа, уровни воды, прогноз, заблаговременность, верификация, погрешность и оправдываемость прогнозов

Short- and medium-term forecasting of water levels of the Tobol basin rivers

A. V. Khristorov

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation,
Moscow, Russia
khristorov_a@mail.ru*

In order to provide the necessary hydrological information for operational decisions on the use of water resources and protecting the population from dangerous floods for the rivers of the Tobol river basin, a methodology for daily forecasting of average daily water levels with a lead time of 1 to 10 days has been developed. The hydrograph extrapolation method was used, which takes into account water levels for the date of the forecast and for the 5 previous days. The methodology was developed for 64 sections located on the Tobol River and its tributaries of various orders. To estimate the parameters of the scheme for obtaining forecasts and their verification, hydrological observation data for the period from 1985 to 2022 were used. For most rivers in the basin, the methodology provides satisfactory results. In general, the accuracy of forecasts and their lead time increase with increasing catchment area. The methodology can be used within an automated system for preparing and issuing forecasts.

Keywords: hydrograph extrapolation, water levels, forecast, lead time; verification, error and accuracy of forecasts

Введение

Краткосрочные с заблаговременностью до 5–6 суток и среднесрочные с заблаговременностью от 6–7 до 10–15 суток прогнозы речного стока дают гидрологическую информацию, необходимую для научно обоснованного планирования и эффективного проведения мероприятий по использованию водных ресурсов и защите населения от неблагоприятных и опасных явлений, связанных с водным режимом рек [9, 11–13].

Для рек бассейна Тобола прогнозы уровней воды необходимы для предупреждения о резких изменениях их водного режима (наводнениях, маловодьях), которые учитываются при проведении противопаводочных мероприятий, организации судоходства и лесосплава, использования водных ресурсов многочисленных прудов и водохранилищ сезонного регулирования [6, 8].

При выборе методики прогнозирования помимо заблаговременности и точности выпускаемых с ее помощью прогнозов необходимо учитывать трудоемкость их получения, а также возможность использования этой методики в рамках автоматизированной системы подготовки и выпуска прогнозов и своевременного доведения прогностической информации до всех заинтересованных потребителей в удобном для них виде. Таким образом, при прочих равных условиях предпочтение следует отдавать более простым методикам прогнозирования [5].

Именно требованиям достаточно высокого качества прогнозов и простоты их получения отвечает предлагаемая методика краткосрочного и среднесрочного прогнозирования уровней воды на реках бассейна Тобола, разработанная в ФГБУ «Гидрометцентр России». В ее основе лежит разработанный там же метод экстраполяции гидрографа, а при ее разработке использованы данные гидрологических наблюдений за последние десятилетия, предоставленные ФГБУ «Уральское УГМС».

Общие сведения о бассейне реки Тобол

Река Тобол является левым и самым многоводным притоком Иртыша. Длина реки 1591 км, площадь водосбора 426 000 км², средний расход воды 805 м³/с. Берет начало в Оренбургской области на границе восточных отрогов Южного Урала и Тургайской Столовой страны, далее течет по территории Республики Казахстан. Среднее и нижнее течение реки в пределах Западно-Сибирской равнины. Крупнейшие притоки слева – Уй, Исеть, Тура, Тавда, справа – Убаган.

Питание в основном снеговое, вниз по течению возрастает доля дождевого питания. Половодье с 1-й половины апреля до середины июня в верховьях и до начала августа в низовьях. Замерзает в низовьях в конце октября – ноябре, в верховьях в ноябре, вскрывается во 2-й половине апреля – 1-й половине мая [8].

Основная часть бассейна расположена в таежной зоне. Верховья левых притоков Тобола расположены в горно-таежной зоне, южная часть бассейна реки Миасс расположена в лесостепной зоне. Годовая сумма осадков составляет 800–900 мм на Среднем Урале, 1200–1500 мм на Южном Урале, на равнинной части осадки снижаются до 500–600 мм в таежной зоне и до 350–400 мм в лесостепной. Средняя годовая сумма осадков от -2°C до $+1,5^{\circ}\text{C}$. В горных районах температура снижается с высотой на $0,5\text{--}0,7^{\circ}\text{C}$ на 100 метров подъема. В холодный период градиент температуры меньше, чем в теплый. Заболоченность достигает 50 % на севере и к югу резко снижается. Озерность в среднем оставляет 5–6 % [1].

Сток малых рек зарегулирован прудами и водохранилищами сезонного регулирования. Наиболее крупными являются Аргазинское водохранилище на р. Миасс, Белоярское на р. Пышма и Исетское на р. Исеть. На территории Казахстана сток Верхнего Тобола зарегулирован каскадом водохранилищ – Желкуарским, Верхнетобольским, Каратамарским, Сергеевским и Амангельдинским [6].

Метод экстраполяции гидрографа

Метод экстраполяции гидрографа разработан в отделе речных гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» и предназначен для реализации в рамках автоматизированной системы подготовки и ежедневного выпуска прогнозов расходов и уровней воды в течение всего года [3, 5].

Метод основан на том, что характерный для достаточно крупных равнинных рек плавный ход ежедневных уровней воды дает возможность его экстраполяции на несколько суток вперед и определения прогноза с заблаговременностью Δt суток в виде обобщенного полинома. Оценка $k+1$ параметров этого полинома по известным к дате составления прогноза t среднесуточным уровням воды $H(t)$, $H(t-1)$, ..., $H(t-k)$ приводит к тому, что получаемый путем такой экстраполяции прогноз определяется формулой:

$$\hat{H}(t + \Delta t) = \sum_{i=0}^k a_i(\Delta t) H(t-i) + b(\Delta t). \quad (1)$$

Параметры $a_0(\Delta t)$, $a_1(\Delta t)$, ..., $a_k(\Delta t)$, $b(\Delta t)$ и оптимальное значение k зависят от заблаговременности прогноза Δt и подлежат оценке по данным гидрологических наблюдений.

Определяемые формулой (1) величины $\hat{H}(t + \Delta t)$ могут принимать недопустимо высокие и низкие значения. Недопустимо высокие значения $\hat{H}(t + \Delta t)$ могут возникать при прогнозировании уровней воды на крутом

подъеме половодья или паводка. Недопустимо низкие и даже отрицательные значения $\hat{H}(t + \Delta t)$ могут возникать при прогнозировании уровней воды на крутом спаде половодья или паводка.

Во избежание необоснованно низких и высоких значений прогноза результаты применения формулы (1) корректируются путем замены экстремальных значений $\hat{H}(t + \Delta t)$ допустимым минимумом $\min H$ или максимумом $\max H$. Окончательный прогноз уровня воды выражается формулой:

$$\tilde{H}(t + \Delta t) = \begin{cases} \min H, & \text{если } \hat{H}(t + \Delta t) < \min H; \\ \hat{H}(t + \Delta t), & \text{если } \min H \leq \hat{H}(t + \Delta t) \leq \max H; \\ \max H, & \text{если } \hat{H}(t + \Delta t) > \max H. \end{cases} \quad (2)$$

Входящие в формулу (2) допустимые минимум $\min H$ и максимум $\max H$ значений уровня воды подлежат определению по всему имеющемуся для каждого речного створа ряду гидрологических наблюдений с использованием трехпараметрического гамма-распределения вероятностей и методов статистического оценивания, изложенных в работе [9]. Допустимый для прогноза минимум $\min H$ определяется как значение годового минимума среднесуточного уровня воды H_{\min} (99%), соответствующее вероятности превышения (обеспеченности) 99 % и округленное до целой величины в меньшую сторону. Допустимый для прогноза максимум $\max H$ определяется как значение годового максимума среднесуточного уровня воды H_{\max} (1%), соответствующее обеспеченности 1 % и округленное до целой величины в большую сторону. Подобная оценка величин $\min H$ и $\max H$ гарантирует, что в течение десяти последующих лет использования предлагаемой методики прогнозирования более низкие или более высокие значения расходов воды могут появиться с вероятностью, не превышающей 10 %.

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. Она 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 [5].

Получение методики

Предлагаемая схема получения прогнозов среднесуточных уровней воды с заблаговременностью $\Delta t = 1, \dots, 10$ суток основана на методе экстраполяции гидрографа и разработана для 64 створов, расположенных на реке Тобол и его притоках различных порядков. В табл. 1 для этих створов помещены номера гидрологических постов, название реки, пункта и площадь водосбора A км².

Таблица 1. Основные характеристики рассматриваемых речных створов
Table 1. Main characteristics of the river sections under consideration

Номер	Река	Пункт	A км ²
12010	Тобол	Звериноголовское	143000
12014	Тобол	Курган	159000
12017	Тобол	Упорово	177000
12018	Тобол	Ялуторовск	241000
12022	Тобол	Иевлево	333000
12040	Уй	Степное	3600
12043	Уй	Троицкий свх	7660
12059	Увелька	Красосельское	3620
12061	Увелька	Карсинский зсх	5100
12092	Юргамыш	Пертовское	1950
12098	Емуртла	Емуртла	3250
12101	Ук	Заводоуковск	917
12115	Исеть	Колюткино	3500
12123	Исеть	Катайск	12800
12125	Исеть	Шадринск	23400
12127	Исеть	Мехонское	52300
12129	Исеть	исетское	56000
12136	Решетка	Новоалексеевское	32
12155	Синара	Верхнеключевское	5000
12189	Миасс	Новоандреевка	1830
12202	Миасс	Каргополье	21400
12222	Ирюм	Бобылево	778
12238	Тура	Санкино	23000
12239	Тура	Туринск	29000
12240	Тура	туринская сл.	31500
12244	Тура	Тюмень ЦГМС	58500
12248	Тура	Покровское	80200
12279	Тагил	Трошкова	7920
12305	Мугай	Топоркова	1400
12315	Ница	Ирбит	17300
12316	Ница	Краснослободское	22000
12320	Нейва	Черемшанка	1860

Номер	Река	Пункт	А км ²
12346	Реж	Ключи	4400
12354	Бобровка	Липовское	101
12383	Пышма	Богандинское	18600
12401	Юрмыч	Пышма	935
12402	Беляковка	Потаскуева	1700
12407	Иска	Велижаны	895
12412	Тавда	Таборы	74200
12413	Тавда	Тавда	81000
12415	Тавда	Н. Тавда	86100
12417	Лозьва	Першино	6530
12422	Ивдель	Ивдель	2250
12430	Сосьва	Денежкино	4390
12434	Сосьва	Сосьва	22100
12435	Сосьва	Гари	23600
12476	Вагран	Североуральск	1430
12498	Турья	Карпинск	480
12511	Сотрина	Сотрино	403
12517	Лобва	Лобва	2940
12528	Карабашка	Карабашка	648
12554	Тобол	Кокино	172000
12606	Бочанка	Заводопетровское	678
12611	Сосьва	Морозково	11500
12613	Караталаят	Карталы	659
12614	Кунара	Быкова	380
12615	Исеть	Долматово	13100
12617	Н. Алабуга	Плотниково	456
12620	Суерь	Волосниково	10300
12631	Уй	Усть-Уйское	34400
12632	Ирбит	Зайково	3320
12646	Каква	Каквинское	716
12651	Пышма	Талица	11200
12652	Нейва	Кировское	5240

Все необходимые данные гидрологических наблюдений в указанных створах были предоставлены ФГБУ «Уральское УГМС». Расположение рассматриваемых гидрологических постов и соответствующих им речных створов показано на рис. 1.

Параметры формулы (1) оценивались методом наименьших квадратов по ряду ежедневных гидрологических наблюдений за период с 01.01.2010 по 31.12.2022. Оптимальные значения параметра k , при которых средне-квадратическая погрешность прогноза принимает минимальное значение,

не превышали 5. На этом основании все прогнозы определялись по формуле (1) при $k = 5$. Параметры $\min H = H_{\min}$ (99%) и $\max H = H_{\max}$ (1%) формулы (2) оценивались по рядам многолетних гидрологических наблюдений за период с 1985 по 2022 год.



Рис. 1. Расположение рассматриваемых гидрологических постов в бассейне реки Тобол.

Fig. 1. Location of the considered hydrological gauges in the Tobol River basin.

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

Значения коэффициентов $a_1(\Delta t)$, $a_3(\Delta t)$ и $a_4(\Delta t)$ оказались нулевыми вследствие их округления.

Таблица 2. Параметры формул (1) и (2) получения прогноза среднесуточных уровней воды в створе р. Тавда – г. Тавда

Table 2. Parameters of formulas (1) and (2) for obtaining a forecast of average daily water levels at the river Tavda near Tavda

Δt	$a_0(\Delta t)$	$a_1(\Delta t)$	$a_2(\Delta t)$	$a_3(\Delta t)$	$a_4(\Delta t)$	$a_5(\Delta t)$	$b(\Delta t)$	min H	max H
1	1,531	0,000	-0,578	0,000	0,000	0,045	0,5	93	883
2	2,010	0,000	-1,091	0,000	0,000	0,076	1,6	93	883
3	2,450	0,000	-1,556	0,000	0,000	0,097	3,0	93	883
4	2,870	0,000	-2,007	0,000	0,000	0,123	4,9	93	883
5	3,274	0,000	-2,450	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

Верификация прогнозов

Качество краткосрочных и среднесрочных прогнозов среднесуточных 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 [2].

1. Из 13-летнего периода наблюдений исключался первый год.
2. Данные за оставшиеся 12 лет использовались для оценки параметров схемы получения прогноза.
3. Полученные оценки подставлялись в формулы (1) и (2) для прогнозирования уровней воды в течение исключенного года.
4. В результате для исключенного года формировался полученный на независимом материале ряд ошибок прогноза за 365 или за 366 суток для високосного года.
5. Данные за исключенный первый год возвращались, и исключался следующий год.

6. После повторения описанной процедуры для всех 13 лет формировался ряд ошибок прогноза длиной $N = 4748$, полученный на независимом материале.

Если обозначить через $H(t)$ значение уровня воды за сутки t , а через $\tilde{H}(t)$ ее прогноз, то для периода с 01.01.2010 по 31.12.2022 среднеквадратическая погрешность прогноза определяется формулой:

$$S = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N [H(t) - \tilde{H}(t)]^2}. \quad (3)$$

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

$$\tilde{H}_I(t) = H(t - \Delta t) + \bar{\Delta}, \quad (4)$$

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:

$$\sigma_{\Delta} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\Delta_i - \bar{\Delta})^2}. \quad (5)$$

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 $S/\sigma_{\Delta} > 0,80$ [7].

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

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

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

коэффициент корреляции между фактическими расходами и их прогнозами; S – среднеквадратическая погрешность прогнозов, см; σ_{Δ} – среднеквадратическая погрешность инерционных прогнозов, см; S/σ_{Δ} – показатель эффективности прогнозов; P – оправдываемость прогнозов.

Приведенные в табл. 3 данные свидетельствуют о том, что для данного речного створа все краткосрочные прогнозы с заблаговременностью 1–5 суток относятся к категории хороших, а среднесрочные прогнозы с заблаговременностью 6–10 суток относятся к категории удовлетворительных.

Таблица 3. Показатели качества прогнозов среднесуточных уровней воды в створе р. Тавда – г. Тавда

Table 3. Quality indicators for forecasts of average daily water levels at the river Tavda near 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	88%
9	0,982	37,4	64,4	0,58	86%
10	0,977	42,6	70,9	0,60	85%

На рис. 2 для этого створа приведены совмещенные графики хода фактических и спрогнозированных с заблаговременностью $\Delta t = 7$ суток среднесуточных уровней воды в 2018 году.

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

Анализ результатов верификации прогнозов

Для всех случаев, когда соотношение S/σ_{Δ} не превышало 0,80, оправдываемость таких прогнозов P превышала 65 %. Следовательно, соотношение S/σ_{Δ} в достаточной степени характеризует удовлетворительность прогнозов уровней воды.

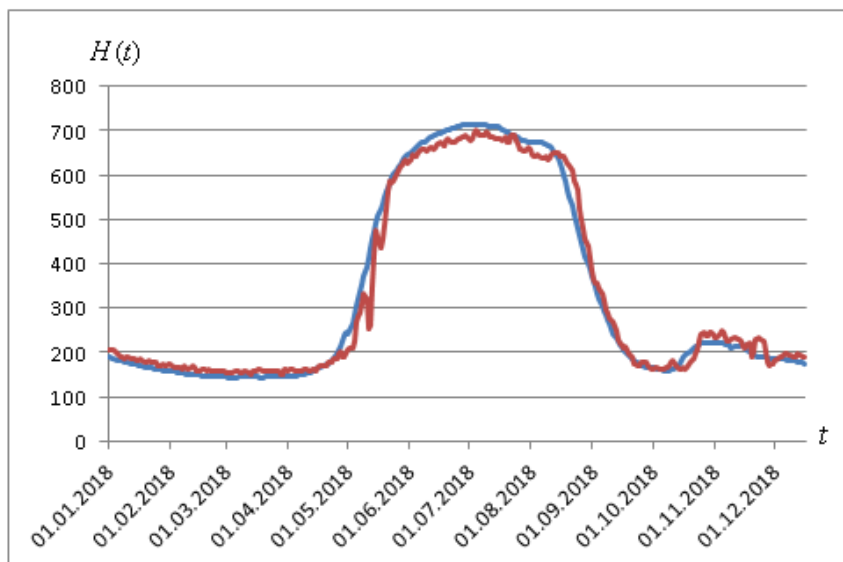


Рис. 2. Фактический (синим) и спрогнозированный с заблаговременностью $\Delta t = 10$ суток (красным) ход среднесуточных уровней воды в створе р. Тавда – г. Тавда в 2018 году.

Fig. 2. Observed (blue) and forecasted with a lead time of 10 days (red) course of average daily water levels at the river Tavda near Tavda in 2018.

В табл. 4 помещены значения показателя S/σ_{Δ} прогнозов среднесуточных уровней воды для всех рассматриваемых речных створов бассейна Тобола.

В табл. 5 для всех значений заблаговременности Δt от 1 до 10 суток приведено число речных створов M , для которых получены удовлетворительные прогнозы среднесуточных уровней воды с показателями $S/\sigma_{\Delta} \leq 0,80$ и $P > 60\%$.

Таким образом, удовлетворительные прогнозы среднесуточных уровней воды с заблаговременностью 1 сутки получаются для 65,6 %, а с максимальной заблаговременностью 10 суток – для 23,4 % рассматриваемых речных створов бассейна Тобола.

Как и следовало ожидать, метод экстраполяции гидрографа оказался неприменимым для рек с малой площадью водосбора, сток которых быстро реагирует на таяние снега или на выпадение жидких осадков. В результате водный режим определяется серией кратковременных паводков, за пределами зимней межени ход среднесуточных уровней имеет пилообразный характер и его невозможно предсказать методом экстраполяции даже на сутки [5, 10–13].

Таблица 4. Значения показателя S/σ_{Δ} прогнозов среднесуточных уровней воды при заблаговременности $\Delta t = 1, \dots, 10$ суток

Table 4. Values of the indicator for forecasting average daily water levels with lead time 1, ..., 10 days

Номер	Река	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
12010	Тобол	0,63	0,68	0,69	0,70	0,70	0,70	0,71	0,73	0,74	0,76
12014	Тобол	0,62	0,66	0,68	0,70	0,72	0,73	0,75	0,76	0,77	0,78
12017	Тобол	0,49	0,58	0,65	0,72	0,76	0,80	0,82	0,84	0,85	0,86
12018	Тобол	0,47	0,54	0,60	0,65	0,69	0,72	0,75	0,77	0,78	0,79
12022	Тобол	0,42	0,44	0,46	0,49	0,51	0,53	0,55	0,57	0,58	0,60
12040	Уй	0,74	0,78	0,82	0,86	0,90	0,91	0,92	0,92	0,92	0,92
12043	Уй	0,83	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,90	0,90
12059	Увелька	0,73	0,78	0,81	0,83	0,85	0,85	0,85	0,84	0,84	0,83
12061	Увелька	0,91	0,93	0,93	0,92	0,91	0,90	0,89	0,88	0,87	0,86
12092	Юргамыш	0,81	0,85	0,87	0,89	0,90	0,91	0,90	0,90	0,90	0,89
12098	Емуртла	0,62	0,74	0,82	0,86	0,88	0,89	0,89	0,88	0,88	0,87
12101	Ук	0,84	0,88	0,88	0,87	0,86	0,85	0,84	0,84	0,83	0,83
12115	Исеть	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,93	0,92	0,92	0,91	0,90
12123	Исеть	0,82	0,89	0,93	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,93	0,92
12125	Исеть	0,74	0,81	0,83	0,85	0,86	0,87	0,88	0,89	0,90	0,90
12127	Исеть	0,53	0,60	0,65	0,70	0,74	0,76	0,78	0,80	0,81	0,82
12129	Исеть	0,57	0,63	0,67	0,71	0,73	0,76	0,77	0,79	0,80	0,81
12136	Решетка	0,96	0,96	0,95	0,94	0,94	0,94	0,93	0,92	0,91	0,90
12155	Синара	0,80	0,85	0,91	0,93	0,94	0,93	0,92	0,92	0,91	0,90
12189	Миасс	0,92	0,95	0,96	0,96	0,95	0,95	0,94	0,93	0,93	0,92
12202	Миасс	0,66	0,73	0,78	0,81	0,83	0,84	0,86	0,87	0,88	0,88
12222	Ирюм	0,74	0,87	0,91	0,91	0,91	0,91	0,90	0,90	0,89	0,88
12238	Тура	0,63	0,72	0,77	0,81	0,83	0,85	0,86	0,87	0,87	0,88
12239	Тура	0,35	0,44	0,52	0,58	0,63	0,67	0,70	0,72	0,74	0,76
12240	Тура	0,30	0,37	0,44	0,50	0,54	0,58	0,61	0,64	0,66	0,67
12244	Тура	0,37	0,42	0,46	0,50	0,53	0,56	0,59	0,62	0,64	0,66
12248	Тура	0,42	0,45	0,48	0,51	0,53	0,55	0,57	0,59	0,61	0,63
12279	Тагил	0,81	0,86	0,89	0,90	0,91	0,91	0,91	0,90	0,89	0,89
12305	Мугай	0,71	0,81	0,86	0,88	0,89	0,90	0,90	0,89	0,89	0,88
12315	Ница	0,61	0,70	0,77	0,81	0,84	0,87	0,88	0,88	0,89	0,89
12316	Ница	0,43	0,48	0,54	0,58	0,62	0,64	0,67	0,68	0,70	0,71
12320	Нейва	0,96	0,97	0,97	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,93	0,92
12346	Реж	0,84	0,89	0,92	0,93	0,94	0,93	0,93	0,93	0,92	0,92
12354	Бобровка	0,91	0,94	0,95	0,95	0,94	0,93	0,93	0,92	0,91	0,90
12383	Пышма	0,33	0,37	0,42	0,46	0,49	0,52	0,55	0,57	0,59	0,61

Номер	Река	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
12401	Юрмыч	0,74	0,85	0,90	0,92	0,92	0,91	0,91	0,90	0,90	0,89
12402	Беляковка	0,71	0,78	0,83	0,86	0,87	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88
12407	Иска	0,75	0,81	0,83	0,84	0,85	0,85	0,86	0,87	0,87	0,87
12412	Тавда	0,48	0,49	0,50	0,52	0,54	0,57	0,59	0,62	0,64	0,66
12413	Тавда	0,36	0,40	0,44	0,47	0,49	0,52	0,54	0,56	0,58	0,60
12415	Тавда	0,42	0,44	0,47	0,50	0,53	0,55	0,57	0,59	0,61	0,62
12417	Лозьва	0,73	0,84	0,89	0,91	0,92	0,91	0,91	0,91	0,90	0,90
12422	Ивдель	0,86	0,93	0,94	0,94	0,94	0,94	0,93	0,92	0,91	0,91
12430	Сосьва	0,77	0,85	0,89	0,90	0,90	0,90	0,90	0,89	0,88	0,87
12434	Сосьва	0,35	0,44	0,53	0,60	0,66	0,71	0,74	0,77	0,80	0,81
12435	Сосьва	0,37	0,43	0,49	0,55	0,60	0,64	0,68	0,70	0,72	0,74
12476	Вагран	0,90	0,94	0,95	0,95	0,96	0,95	0,95	0,94	0,94	0,93
12498	Турья	0,91	0,94	0,95	0,94	0,93	0,92	0,91	0,91	0,90	0,89
12511	Сотрина	0,66	0,74	0,79	0,83	0,86	0,88	0,88	0,89	0,89	0,89
12517	Лобва	0,79	0,87	0,90	0,91	0,92	0,91	0,91	0,90	0,90	0,89
12528	Карабашка	0,84	0,89	0,91	0,92	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,92
12554	Тобол	0,55	0,60	0,64	0,67	0,70	0,73	0,74	0,75	0,76	0,77
12606	Бочанка	0,68	0,78	0,84	0,87	0,90	0,91	0,92	0,93	0,93	0,93
12611	Сосьва	0,50	0,61	0,69	0,75	0,79	0,83	0,85	0,87	0,88	0,89
12613	Караталаят	0,91	0,90	0,89	0,88	0,88	0,88	0,87	0,87	0,86	0,85
12614	Кунара	0,87	0,91	0,92	0,93	0,93	0,93	0,92	0,91	0,91	0,90
12615	Исеть	0,87	0,90	0,92	0,94	0,95	0,95	0,94	0,94	0,93	0,93
12617	Н. Алабуга	0,92	0,95	0,95	0,95	0,94	0,93	0,93	0,92	0,91	0,91
12620	Суерь	0,71	0,84	0,88	0,89	0,89	0,89	0,88	0,87	0,87	0,86
12631	Уй	0,67	0,72	0,75	0,77	0,79	0,81	0,82	0,83	0,84	0,85
12632	Ирбит	0,72	0,81	0,87	0,91	0,92	0,92	0,92	0,91	0,90	0,90
12646	Каква	0,91	0,95	0,95	0,94	0,93	0,92	0,92	0,91	0,90	0,90
12651	Пышма	0,72	0,76	0,80	0,83	0,86	0,87	0,88	0,88	0,89	0,89
12652	Нейва	0,95	0,96	0,96	0,96	0,95	0,94	0,93	0,93	0,92	0,91

Таблица 5. Число M речных створов с удовлетворительными прогнозами среднесуточных уровней воды различной заблаговременности Δt

Table 5. Number M of river cross-sections with satisfactory forecasts of average daily water levels at various lead times

Δt	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
M	42	31	25	21	21	19	18	17	17	15

Для рек с большой площадью водосбора ход среднесуточных уровней имеет плавный характер, как на рис. 2, поэтому метод экстраполяции гидрографа позволяет давать удовлетворительные прогнозы с достаточно большой заблаговременностью.

На рис. 3 представлена зависимость максимальной заблаговременности удовлетворительных прогнозов $\max(\Delta t)$ от логарифма площади водосбора $\ln A$. При этом величина $\max(\Delta t)$ определяется таким образом, что прогнозы с показателями $S/\sigma_{\Delta} \leq 0,80$ и $P > 60\%$ могут быть получены при всех значениях Δt , не превышающих величину $\max(\Delta t)$. Равенство $\max(\Delta t)$ нулю означает, что для данного речного створа прогнозы уровней воды оказались неудовлетворительными даже при заблаговременности 1 сутки [4, 5].

Данная зависимость показывает, что с ростом площади водосбора максимальная заблаговременность удовлетворительных прогнозов в целом возрастает. Как правило, метод экстраполяции гидрографа не позволяет удовлетворительно прогнозировать среднесуточные уровни воды в речных створах с площадью водосбора менее 5 000 км². Для речных створов бассейна Тобола с площадью водосбора более 50 000 км² данный метод дает удовлетворительные прогнозы с заблаговременностью не менее 5 суток.

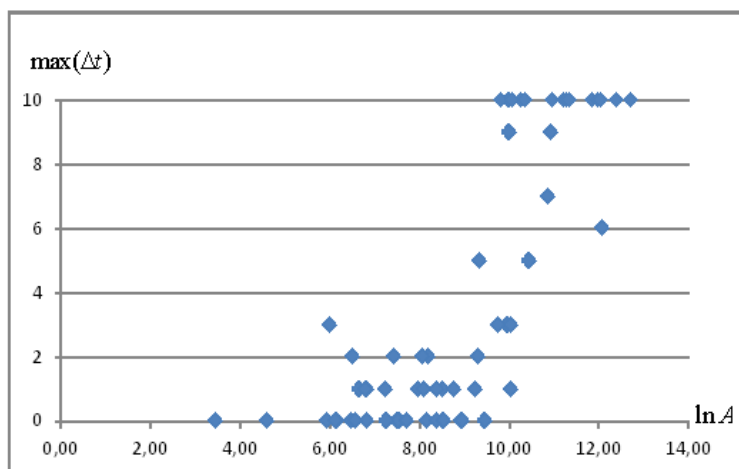


Рис. 3. Зависимость максимальной заблаговременности удовлетворительных прогнозов среднесуточных уровней воды $\max(\Delta t)$ от логарифма площади водосбора $\ln A$ для бассейна реки Тобол.

Fig. 3. Dependence of the maximum lead time of satisfactory forecasts of water levels $\max(\Delta t)$ on the logarithm $\ln A$ of the catchment area for the Tobol River basin.

Заключение

В отделе речных гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» для рек бассейна Тобола разработана методика ежедневного прогнозирования среднесуточных уровней воды с заблаговременностью 1–10 суток в течение всего года. Методика основана на данных гидрологических наблюдений за период с 1985 по 2022 год.

В основе методики лежит метод экстраполяции гидрографа, в котором учитываются уровни воды за дату составления прогноза и за 5 предыдущих суток. Оценка параметров методики выполняется с помощью статистического анализа данных гидрологических наблюдений для каждого речного створа. В целях автоматизации процедуры получения прогнозов и оценки их качества разработана компьютерная программа на языке Python.

Проверка прогнозов, выполненная на независимом материале методом скользящего контроля, показала, что предлагаемая методика в целом дает удовлетворительные результаты прогнозирования. Удовлетворительные прогнозы с показателем $S/\sigma_{\Delta} \leq 0,80$ и оправдываемостью $P > 65\%$ при заблаговременности 1 сутки получены для 42 речных створов, при заблаговременности 4 суток – для 21 створа, при заблаговременности 7 суток – для 18 створов и при заблаговременности 10 суток – для 15 речных створов. Анализ результатов верификации методики показал, что в целом качество прогнозов возрастает с увеличением площади водосбора соответствующего речного створа.

Методика может быть использована в рамках автоматизированной системы подготовки и выпуска прогнозов в целях обеспечения необходимой прогностической информацией оперативных решений по использованию водных ресурсов рек бассейна Тобола и защите населения от опасных наводнений.

Центральной методической комиссией по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета 25.12.2023 принято решение внедрить предлагаемую методику краткосрочного и среднесрочного прогноза уровней воды на реках бассейна Тобола в качестве основной методики прогнозирования.

Список литературы

1. Большой географический атлас России / Под ред. Г.В. Борисова. М.: АСТ, 2019. 224 с.
2. Борц С.В., Христофоров А.В. Оценка качества прогнозов речного стока // Труды Гидрометцентра России. 2015. Специальный выпуск 355. 198 с.
3. Борц С.В., Колий В.М., Семенова Н.К., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Прогнозирование стока рек России методом экстраполяции гидрографа // Гидрологические исследования и прогнозы. 2021. № 2 (380). С. 77-94.
4. Борц С.В., Колий В.М., Семенова Н.К., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Возможность прогнозирования стока рек России методом экстраполяции гидрографа в зависимости от характеристик их водосборов // Гидрологические исследования и прогнозы. 2021. № 3 (381). С. 115-130.
5. Борц С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Прогнозирование стока рек России. М.: Типография АМА-ПРЕСС, 2023. 200 с.

6. Бубин М.С., Рассказова Н.С. Ритмичность многолетних колебаний стока рек как интегральный показатель изменчивости климата (на примере Урала). Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. 278 с.
7. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть 1. Прогнозы режима вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 193 с.
8. Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Т. 11. Средний Урал и Приуралье. Вып. 2. Tobol / под ред. В. В. Николаенко. Л.: Гидрометеиздат, 1965. 240 с.
9. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 2. Краткосрочный прогноз расхода и уровня воды на реках. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 245 с.
10. Христофоров А.В., Юмина Н.М. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: АИП, 2017. 151 с.
11. Adams T.E., Pagano T.C. Flood Forecasting – A Global Perspective. Academic Press, 2016. 480 p.
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.

References

1. Bol'shoy geograficheskiy atlas Rossii. Pod red. G.V. Borisova. Moscow, AST publ., 2019. 224 p. [in Russ.].
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., Koliy V.M., Semenova N.K., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V. Forecasting the flow of Russian rivers by hydrograph extrapolation. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2021, vol. 380, no. 2, pp. 77-94 [in Russ.].
4. Borsch S.V., Koliy V.M., Semenova N.K., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V. Assessment of runoff predictability for the Russian rivers depending on their catchment characteristics by the hydrograph extrapolation method. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2021, vol. 381, no. 3, pp. 115-130 [in Russ.].
5. Borsch S.V., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V. Streamflow forecasting in Russia. Moscow, AMA-PRESS publ, 2023, 200 p. [in Russ.].
6. Бубин М.С., Рассказова Н.С. Ритмичность многолетних колебаний стока рек как интегральный показатель изменчивости климата (на примере Урала). Томск, Изд-во Томского политехнического университета, 2013, 278 p. [in Russ.].
7. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Part 1. Прогнозы режима вод суши. Ленинград, Гидрометеиздат publ., 1962, 193 p. [in Russ.].
8. Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Т. 11. Средний Урал и Приуралье. Вып. 2. Tobol / под ред. В. В. Николаенко. Ленинград, Гидрометеиздат publ., 1964, 267 p. [in Russ.].
9. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 2. Краткосрочный прогноз расхода и уровня воды на реках. Ленинград, Гидрометеиздат publ., 1989, 245 p. [in Russ.].
10. Христофоров А.В., Юмина Н.М. Теория вероятностей и математическая статистика: Учебное пособие. Moscow, APR publ., 2017, 151 p. [in Russ.].
11. Adams T.E., Pagano T.C. Flood Forecasting – A Global Perspective. Academic Press, 2016, 480 p.
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.

Поступила 17.02.2024; одобрена после рецензирования 06.06.2024;
принята в печать 12.06.2024.

Submitted 17.02.2024; approved after reviewing 06.06.2024;
accepted for publication 12.06.2024.