

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2024-1-118-134>

УДК 556.06

Краткосрочное и среднесрочное прогнозирование стока рек бассейна Дона

А.В. Христофоров

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

Для рек бассейна Дона в ФГБУ «Гидрометцентр России» разработана методика ежедневного краткосрочного и среднесрочного прогнозирования расходов и уровней воды. Среднесуточные расходы и уровни воды прогнозируются в течение всего года с заблаговременностью от 1 до 10 суток на основе метода экстраполяции гидрографа, в котором учитываются их значения за дату составления прогноза и за 5 предыдущих суток. Для оценки параметров схемы получения прогноза используются данные гидрологических наблюдений для каждого речного створа.

Методика дает удовлетворительные результаты и 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 Дона и защите населения от опасных наводнений.

Ключевые слова: расходы воды, уровни воды, прогноз, заблаговременность, верификация, погрешность; оправдываемость прогнозов

Short- and medium-range streamflow forecasting of the Don basin rivers

A.V. Khristorov

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

For the rivers of the Don basin, the Hydrometcentre of Russia has developed a methodology for daily short- and medium-range forecasting of streamflow and water levels. Average daily discharges and water levels are predicted throughout the year with a lead time of 1 to 10 days based on the hydrograph extrapolation method, which takes into account their values for the date of the forecast and for the previous 5 days. To estimate the parameters of the forecasting scheme, hydrological observation data for each river section are used.

The technique gives satisfactory results and can be used within the framework of an automated system for preparing and issuing forecasts in order to provide necessary forecast information for making operational decisions on the use of water resources of the Don basin rivers and protecting the population from dangerous floods.

Keywords: Water discharge, water levels, forecast, lead time, verification, error, forecast accuracy

Введение

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, важную гидрологическую информацию дают краткосрочные (с заблаговременностью до 5–6 суток) и среднесрочные (с заблаговременностью от 6–7 до 10–15 суток) прогнозы речного стока [10, 12–14].

Высокая населенность и хозяйственная освоенность бассейна Дона предъявляет особые требования к информации о текущем и ожидаемом состоянии водных объектов. Для рек этого региона прогнозы расходов и уровней воды необходимы для предупреждения о резких изменениях их водного режима (наводнениях, маловодьях), которые учитываются при проведении противопаводочных мероприятий, организации водоснабжения и судоходства, эксплуатации многочисленных гидротехнических сооружений, и прежде всего Цимлянской ГЭС [1, 6, 7].

Выбор методики прогнозирования должен осуществляться с учетом не только заблаговременности и точности выпускаемых с ее помощью прогнозов, но и с учетом трудоемкости их получения. Кроме того, целесообразно учитывать 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].

Требованиям достаточно высокого качества прогнозов, простоты их получения и возможностям автоматизации подготовки и выпуска прогнозов отвечает предлагаемая методика краткосрочного и среднесрочного прогнозирования расходов и уровней воды на реках бассейна Дона, 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 «Северо-Кавказское УГМС».

Общие сведения о бассейне реки Дон

Бассейн реки Дон практически полностью расположен в пределах степной и лесостепной зоны. Большая часть его территории занята сельскохозяйственными угодьями. Леса сохранились только на севере. Средняя за последние 100 лет температура июля варьирует от 20 °С на севере до 25 °С на юге, января – от -12 °С на севере до -4 °С на юге бассейна Дона. Оттепели могут наблюдаться даже в январе. Снежный покров появляется в середине ноября на севере и в конце ноября – начале декабря на юге бассейна. Максимальная высота снежного покрова варьирует от 20–35 см на севере до 15–20 см на юге. Весна наступает в начале апреля на севере и в начале марта на юге. Лето продолжительное жаркое и сухое. Годовое

количество осадков превышает 400 мм. Преобладают летние дожди, которые не оказывают заметного влияния на речной сток [9].

До начала 30-х годов условия формирования стока р. Дон и его притоков незначительно отличались от естественных. Доля снегового питания составляла 70 %, дождевого – менее 10 %, подземного – около 20 %. Было характерно высокое половодье и низкая межень в остальное время года. Осенние паводки были выражены слабо, летние – крайне редки [9].

В течение последних 100 лет в бассейне р. Дон отмечается потепление климата и увеличение его влажности. В наибольшей степени потепление климата повлияло на среднюю температуру воздуха холодного периода с ноября по март, которая возросла более чем на 2 °С. Повышение температуры холодного периода сопровождается увеличением суммы положительных температур за холодный период, частоты и продолжительности оттепелей. За последние 40 лет средние даты устойчивого перехода к отрицательным температурам воздуха и средние даты начала безморозного периода сместились в сторону более ранних чисел на 10–12 суток. За этот же период годовая сумма осадков возросла на 3 %, при этом сумма осадков за холодный период возросла на 11 %. При этом, благодаря участвующимся оттепелям, статистически достоверного увеличения запасов воды в снежном покрове на конец февраля пока не обнаружено [7].

Прямое антропогенное воздействие на речной сток оказывают безвозвратный забор воды на орошение, промышленное и коммунально-бытовое водоснабжение, а также строительство прудов, водохранилищ и каналов. К косвенным антропогенным факторам хозяйственной деятельности, оказывающим влияние на условия формирования стока рек бассейна Дона, относятся агротехнические мероприятия, которые в целом приводят к его снижению, и урбанизация территории, приводящая к его незначительному увеличению. В целом, антропогенная нагрузка в бассейне Дона оценивается как очень высокая. До начала 90-х годов она имела тенденцию к увеличению, в последующие десять лет она снизилась, для последних 20 лет характерна стабилизация [4, 5].

Начиная с 70-х годов под влиянием климатических и антропогенных факторов произошло снижение стока и выравнивание внутригодового распределения. В последние 20 лет произошла относительная стабилизация климатических и антропогенных факторов формирования стока рек бассейна Дона, поэтому заметное изменение водного режима рек бассейна Дона пока не отмечается [1, 4, 6, 7].

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 среднесуточных расходов и уровней воды в течение всего года [3, 5].

Метод основан на том, что характерный для достаточно крупных равнинных рек плавный ход ежедневных расходов воды дает возможность его экстраполяции на несколько суток вперед и определению 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 расходам воды $Q(t)$, $Q(t-1)$, ..., $Q(t-k)$ приводит к тому, что получаемый путем такой экстраполяции прогноз определяется формулой:

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

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 $\hat{Q}(t+\Delta t)$ 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 воды на крутом спаде половодья или паводка.

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

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

Входящие в формулу (2) допустимые минимум $\min Q$ и максимум $\max Q$ значений расхода 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 [11]. Допустимый для прогноза минимум $\min Q$ определяется как значение годового минимума среднесуточного расхода воды $Q_{\min}(99\%)$, соответствующее вероятности превышения (обеспеченности) 99 % и округленное до целой величины в меньшую сторону. Допустимый для прогноза максимум $\max Q$ определяется как значение годового максимума среднесуточного

расхода воды Q_{\max} (1%), соответствующее обеспеченности 1% и округленное до целой величины в большую сторону. Подобная оценка величин $\min Q$ и $\max Q$ 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%.

Для ежедневного краткосрочного и среднесрочного прогнозирования среднесуточных уровней воды метод экстраполяции гидрографа применяется аналогичным образом. При заблаговременности прогноза Δt суток учитываются известные к дате составления прогноза t среднесуточные уровни воды $H(t)$, $H(t-1)$, ..., $H(t-k)$ и предварительный прогноз определяется формулой:

$$\hat{H}(t + \Delta t) = \sum_{i=0}^k c_i(\Delta t)H(t-i) + d(\Delta t). \quad (3)$$

Параметры $c_0(\Delta t)$, $c_1(\Delta t)$, ..., $c_k(\Delta t)$, $d(\Delta t)$ и оптимальное значение k зависят от заблаговременности прогноза Δt и подлежат оценке по данным гидрологических наблюдений.

Во избежание необоснованно низких и высоких значений прогноза $\hat{H}(t + \Delta t)$ результаты применения формулы (3) корректируются путем замены экстремальных значений $\hat{H}(t + \Delta t)$ допустимым минимумом $\min H$ или максимумом $\max H$. Окончательный прогноз уровня воды выражается формулой:

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

Допустимый для прогноза минимум $\min H$ определяется по данным многолетних гидрологических наблюдений, как значение годового минимума среднесуточного уровня воды H_{\min} (99%), соответствующее вероятности превышения (обеспеченности) 99%. Допустимый для прогноза максимум $\max H$ определяется по данным многолетних гидрологических наблюдений, как значение годового максимума среднесуточного уровня воды H_{\max} (1%), соответствующее обеспеченности 1%.

В целях автоматизации процедуры получения прогнозов и оценки их качества для любого набора речных створов и соответствующих гидрологических постов, в отделе речных гидрологических прогнозов Гидрометцентра 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].

Возможности использования метода экстраполяции гидрографа подтверждены достаточно успешным его применением для получения краткосрочных и среднесрочных прогнозов притока воды в Цимлянское водохранилище [4].

Получение методики

Предлагаемая схема получения прогнозов среднесуточных расходов и уровней воды с заблаговременностью $\Delta t = 1, \dots, 10$ суток основана на методе экстраполяции гидрографа и разработана для 18 створов, расположенных на реке Дон и его притоках различных порядков. В табл. 1 для этих створов помещены номера гидрологических постов, значения площади водосбора A (км^2), длины реки L (км) и среднего уклона реки I (‰).

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

Индекс	Река	Пост	A , км^2	L , км	I , ‰
78004	Дон	г. Задонск	31100	302	0,05
78011	Дон	г. Лиски	69500	588	0,08
78016	Дон	х. Хованский	169000	1066	0,16
78017	Дон	г. Серафимович	204000	1086	0,17
78021	Дон	ст. Новогригорьевская	208000	1212	0,22
78054	Сосна	г. Елец	16300	259	0,24
78082	Воронеж	г. Липецк 2	15300	156	0,41
78087	Воронеж	с. Чертовицкое	21000	301	2,07
78111	Битюг	г. Бобров	7340	290	0,29
78138	Хопер	г. Балашов	14300	384	0,13
78141	Хопер	г. Поворино	19100	542	0,21
78142	Хопер	г. Новохоперск	34800	656	0,32
78146	Хопер	х. Барминский	57300	847	0,90
78164	Ворона	г. Уварово	9890	319	0,56
78202	Медведица	ст. Арчединская	33700	679	0,18
78334	Сев. Донец	г. Белая Калитва	80900	934	1,81
78504	Калитва	х. Погорелое	10500	288	0,28
78623	Сал	х. Балабинка	21000	730	3,48

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

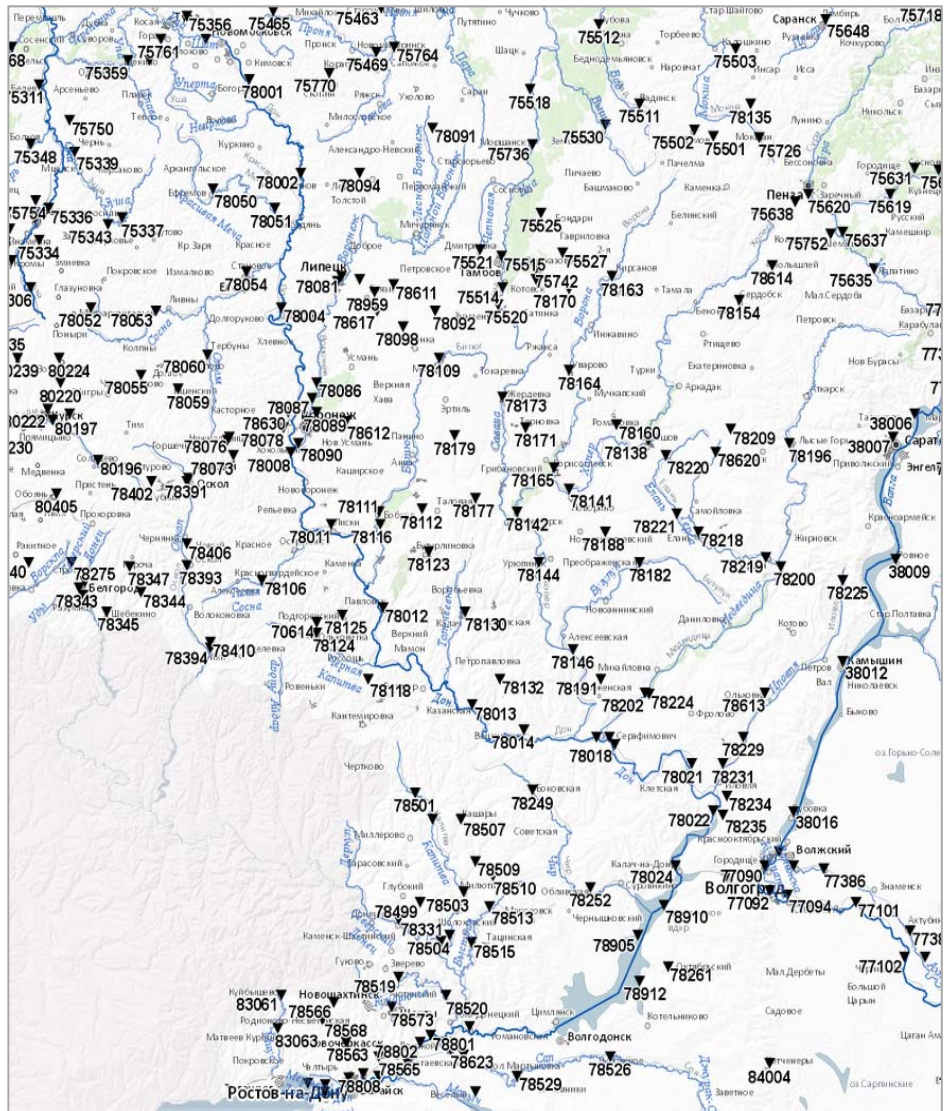


Рис. 1. Расположение рассматриваемых гидрологических постов в бассейне р. Дон.

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

Параметры формулы (1) получения прогнозов расходов воды и формулы (3) получения прогнозов уровней воды оценивались методом наименьших квадратов по ряду ежедневных гидрологических наблюдений за период с 01.01.2011 по 31.12.2022. Оптимальные значения параметра k , при которых среднеквадратическая погрешность прогноза расходов и уровней воды принимает минимальное значение, не превышали 5. На этом основании все прогнозы определялись по формулам (1) и (3) при $k = 5$.

Параметры $\min Q = Q_{\min}(99\%)$ и $\max Q = Q_{\max}(1\%)$ в формуле (2) оценивались по рядам многолетних гидрологических наблюдений за период с 1985 по 2022 г. с использованием трехпараметрического гамма-распределения.

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

Таблица 2. Параметры формул (1) и (2) получения прогноза среднесуточных расходов воды в створе р. Дон – г. Серафимович
Table 2. Parameters of formulas (1) and (2) for obtaining a forecast of average daily water flows at the river Don near Serafimovich

Δt	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	b	$\min Q$	$\max Q$
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

Распределение вероятностей среднесуточных уровней воды оказалось отличным от трехпараметрического гамма-распределения. Для некоторых речных створов часто наблюдаются отрицательные значения уровней. В связи с этим за оценку параметра $\min H$ формулы (4) принимался наименьший член ряда годовых минимумов среднесуточного уровня воды за период с 1985 по 2022 год, что соответствует их обеспеченности 97 %. За оценку параметра $\max H$ формулы (4) принимался наибольший член ряда годовых максимумов среднесуточного уровня воды за период с 1985 по 2022 год, что соответствует их обеспеченности 3 %.

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 [2].

1. Из 12-летнего периода наблюдений исключался первый год.
2. Данные за оставшиеся 11 лет использовались для оценки параметров схемы получения прогноза.
3. Полученные оценки подставлялись в формулы (1) и (2) для прогнозирования расходов или в формулы (3) и (4) 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 366 суток для високосного года.
5. Данные за исключенный первый год возвращались, и исключался следующий год.
6. После повторения описанной процедуры для всех 12 лет формировался ряд ошибок прогноза длиной $N = 4383$, полученный на независимом материале.

Если обозначить через $Y(t)$ фактическое значение расхода или уровня воды за сутки t , а через $\tilde{Y}(t)$ его прогноз, то для периода с 01.01.2011 по 31.12.2022 среднеквадратическая погрешность прогноза определяется формулой:

$$S = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N [Y(t) - \tilde{Y}(t)]^2} . \quad (5)$$

В соответствии с Наставлением [8], для оценки эффективности методики прогнозирования в качестве альтернативы использовался инерционный прогноз. При заблаговременности прогноза Δt суток инерционный прогноз $\tilde{Y}_I(t)$ использует известное на дату его составления $t - \Delta t$ значение $Y(t - \Delta t)$ и определяется формулой:

$$\tilde{Y}_I(t) = Y(t - \Delta t) + \bar{\Delta} , \quad (6)$$

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:

$$\sigma_{\Delta} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\Delta_i - \bar{\Delta})^2} . \quad (7)$$

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 $S/\sigma_{\Delta} > 0,80$ [8].

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 [8] критическим значениям 0,50 и 0,80 показателя S/σ_{Δ} соответствуют значения оправдываемости $P = 82,5\%$ и $P = 60\%$ [2].

В качестве примера в табл. 3 для прогнозов среднесуточных уровней воды в створе р. Дон – г. Серафимович 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, м³/с; σ_{Δ} – среднеквадратическая погрешность инерционных прогнозов, м³/с; S/σ_{Δ} – показатель эффективности прогнозов; P – оправдываемость прогнозов.

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

Table 3. Quality indicators for forecasts of average daily water levels at the river Don near 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%

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.

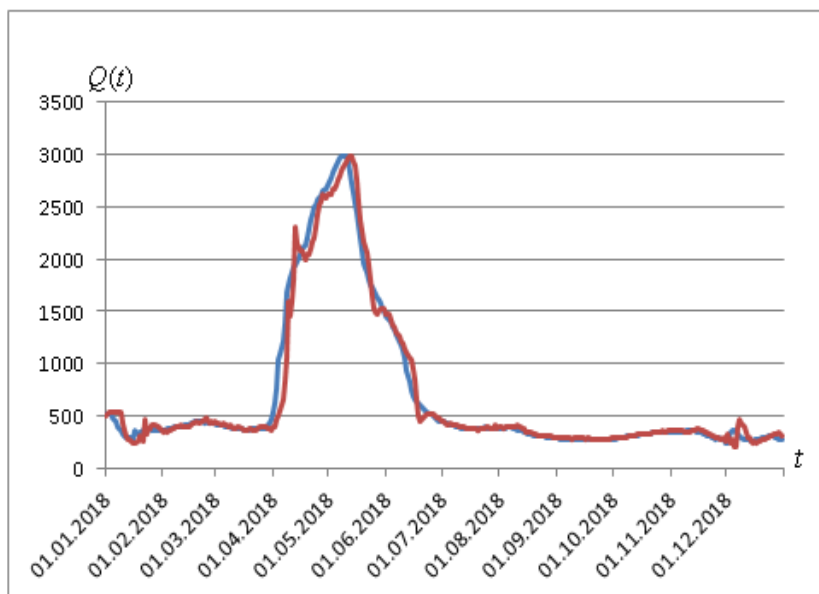


Рис. 2. Фактический (синим) и спрогнозированный с заблаговременностью $\Delta t = 5$ суток (красным) ход среднесуточных расходов воды в створе р. Дон – г. Серафимович в 2016 г.

Fig. 2. Actual (in blue) and forecasted with a lead time of 5 days (in red) the course of average daily water flows at the river Don near Serafimovich in 2016.

Анализ результатов верификации прогнозов

Для всех случаев, когда соотношение S/σ_{Δ} не превышало 0,80, оправдываемость таких прогнозов P превышала 75 %. Следовательно, соотношение S/σ_{Δ} в достаточной степени характеризует удовлетворительность прогнозов расходов и уровней воды.

В табл. 4 помещены значения показателя S/σ_{Δ} прогнозов среднесуточных расходов воды для всех рассматриваемых речных створов бассейна Дона. Для неудовлетворительных прогнозов с показателем $S/\sigma_{\Delta} > 0,80$ поставлен прочерк.

Верификация прогнозов расходов воды по предлагаемой методике показала следующие результаты.

1. Оправдываемость P всех прогнозов достаточно высокая, закономерно снижается с ростом заблаговременности прогноза и при $S/\sigma_{\Delta} \leq 0,80$ варьирует в пределах от 83 % до 98 %.

2. Максимальная заблаговременность прогнозов, удовлетворительных по показателю S/σ_{Δ} , варьирует от 2 до 10 суток и в среднем превышает 6 суток.

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

Table 4. Values of the indicator of forecasts of average daily water flows with lead time = 1, ..., 10 days

Индекс	Река	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
78004	Дон	0,61	0,75	0,80	–	–	–	–	–	–	–
78011	Дон	0,53	0,65	0,72	0,76	0,79	–	–	–	–	–
78016	Дон	0,74	0,72	0,74	0,77	0,79	0,8	–	–	–	–
78017	Дон	0,58	0,58	0,59	0,61	0,64	0,66	0,69	0,71	0,72	0,74
78021	Дон	0,72	0,74	0,75	0,75	0,76	0,77	0,78	0,79	0,79	0,79
78054	Сосна	0,66	0,79	–	–	–	–	–	–	–	–
78082	Воронеж	0,58	0,67	0,73	0,79	0,80	–	–	–	–	–
78087	Воронеж	0,47	0,61	0,67	0,74	0,78	0,80	–	–	–	–
78111	Битюг	0,46	0,55	0,64	0,74	0,79	–	–	–	–	–
78138	Хопер	0,49	0,55	0,62	0,67	0,71	0,73	0,75	0,76	0,77	0,78
78141	Хопер	0,43	0,48	0,56	0,63	0,68	0,71	0,74	0,76	0,77	0,79
78142	Хопер	0,57	0,58	0,59	0,6	0,62	0,64	0,66	0,67	0,69	0,70
78146	Хопер	0,48	0,55	0,61	0,67	0,72	0,74	0,76	0,78	0,79	0,80
78164	Ворона	0,38	0,51	0,60	0,66	0,71	0,74	0,76	0,79	–	–
78202	Медведица	0,53	0,61	0,67	0,72	0,76	0,79	–	–	–	–
78334	Сев. Донец	0,75	0,79	–	–	–	–	–	–	–	–
78504	Калитва	0,61	0,68	0,74	0,78	–	–	–	–	–	–
78623	Сал	0,46	0,55	0,64	0,71	0,76	0,79	0,80	–	–	–

В табл. 5 помещены значения показателя S/σ_{Δ} прогнозов среднесуточных уровней воды для всех рассматриваемых речных створов бассейна Дона. Для неудовлетворительных прогнозов с показателем $S/\sigma_{\Delta} > 0,80$ также поставлен прочерк.

Верификация прогнозов уровней воды по предлагаемой методике показала следующие результаты.

1. Оправдываемость P всех прогнозов достаточно высокая, закономерно снижается с ростом заблаговременности прогноза и при $S/\sigma_{\Delta} \leq 0,80$ варьирует в пределах от 75 % до 96 %.

2. Максимальная заблаговременность прогнозов, удовлетворительных по показателю S/σ_{Δ} , варьирует от 1 до 10 суток и в среднем превышает 5 суток.

Таблица 5. Значения показателя S/σ_{Δ} прогнозов среднесуточных уровней воды при заблаговременности $\Delta t = 1, \dots, 10$ суток

Table 5. Values of the indicator for forecasting average daily water levels with lead time = 1, ..., 10 days

Индекс	Река	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
78004	Дон	0,59	0,71	0,76	–	–	–	–	–	–	–
78011	Дон	0,7	0,76	0,80	0,80	0,80	–	–	–	–	–
78016	Дон	0,73	0,72	0,74	0,75	0,76	0,77	–	–	–	–
78017	Дон	0,75	0,73	0,74	0,75	0,77	0,78	0,79	0,80	0,80	–
78021	Дон	0,77	0,78	0,75	0,78	0,77	0,77	0,76	0,75	0,75	0,76
78054	Сосна	0,6	0,7	–	–	–	–	–	–	–	–
78082	Воронеж	0,63	0,71	0,76	0,80	–	–	–	–	–	–
78087	Воронеж	0,73	0,76	0,79	0,80	–	–	–	–	–	–
78111	Битюг	0,57	0,69	0,75	0,8	–	–	–	–	–	–
78138	Хопер	0,41	0,52	0,62	0,69	0,73	0,76	0,78	0,79	0,81	0,81
78141	Хопер	0,50	0,57	0,59	0,6	0,62	0,65	0,66	0,67	0,68	0,68
78142	Хопер	0,50	0,53	0,57	0,6	0,62	0,65	0,66	0,67	0,68	0,69
78146	Хопер	0,54	0,65	0,71	0,74	0,75	0,75	0,75	0,76	0,78	0,79
78164	Ворона	0,47	0,59	0,66	0,71	0,74	0,75	0,75	0,75	–	–
78202	Медведица	0,64	0,71	0,73	0,77	0,80	–	–	–	–	–
78334	Сев. Донец	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
78504	Калитва	0,64	0,72	0,77	0,80	–	–	–	–	–	–
78623	Сал	0,51	0,59	0,66	0,72	0,76	0,78	0,80	–	–	–

Качество прогнозов уровней воды в целом несколько ниже качества прогнозов расходов воды. Это обусловлено тем, что благодаря более плавному ходу среднесуточных уровней в течение каждого года они прогнозируются лучше, чем расходы воды [10, 12, 13]. Однако более плавный ход уровней приводит к малым значениям погрешности инерционного прогноза σ_{Δ} , в результате чего показатели S/σ_{Δ} становятся больше, а оправдываемость прогнозов P – меньше.

В связи с этим необходимо отметить, что неудовлетворительно высокое значение S/σ_{Δ} отнюдь не означает низкую точность прогноза.

В качестве примера можно привести прогноз уровней воды в створе р. Воронеж – г. Липецк 2. При заблаговременности $\Delta t = 5$ суток показатель S/σ_{Δ} равен 0,89, т. е. в соответствии с Наставлением [8] такие прогнозы оказались неудовлетворительными. В то же время связь между фактическими и прогнозируемыми с заблаговременностью 5 суток уровнями воды весьма тесная и характеризуется коэффициентом корреляции $R = 0,94$. Столь высокой корреляции соответствует хорошее совпадение фактического и спрогнозированного хода уровней воды, которое демонстрирует рис. 3.

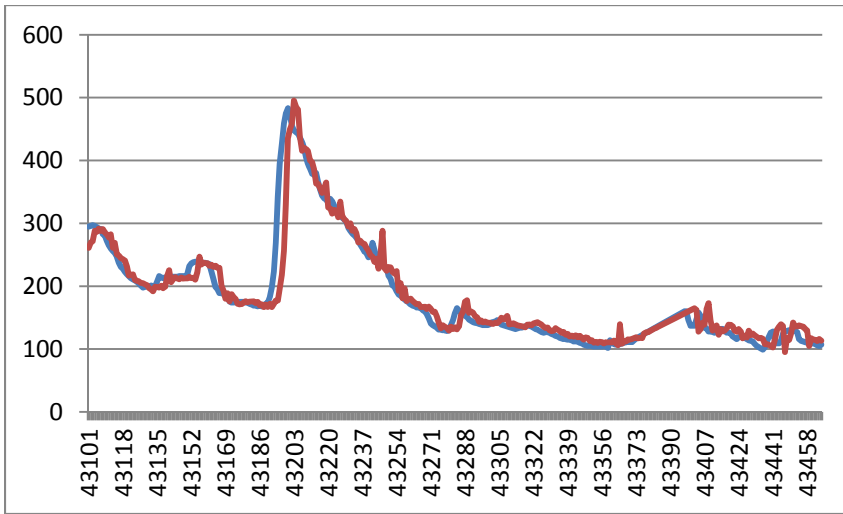


Рис. 3. Фактический (синим) и спрогнозированный с заблаговременностью $\Delta t = 5$ суток (красным) ход уровней воды в створе р. Воронеж – г. Липецк 2 в 2018 г.

Fig. 3. Actual (blue) and forecasted with a lead time 5 days (red) course of water levels in the river Voronezh near Lipetsk in 2018.

Заклучение

В отделе речных гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» для рек бассейна Дона разработана методика ежедневного прогнозирования среднесуточных расходов и 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 расходы и 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 среднесуточных расходов воды с показателем $S/\sigma_{\Delta} \leq 0,80$ и оправдываемостью $P > 75\%$ при заблаговременности 1 сутки получены для всех 18 речных створов, при заблаговременности 4 суток – для 15 створов, при заблаговременности 7 суток – для 8 створов и при заблаговременности 10 суток – для 6 речных створов. Удовлетворительные прогнозы среднесуточных уровней воды при заблаговременности 1 сутки получены для 17 речных створов, при заблаговременности 4 суток – для 15 створов, при заблаговременности 7 суток – для 8 створов и при заблаговременности 10 суток – для 5 речных створов.

Качество прогнозов уровней воды в целом несколько ниже качества прогнозов расходов воды. Это обусловлено более плавным ходом уровней воды, при котором более высокая точность их экстраполяции сочетается с меньшей погрешностью альтернативного инерционного прогноза. В результате показатель S/σ_{Δ} становится больше, а оправдываемость прогнозов P – меньше.

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 Дона и защите населения от опасных наводнений.

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

Список литературы

1. Болгов М.В., Мишон В.М., Сенцова Н.И. Современные проблемы оценки водных ресурсов и водообеспечения. М.: Наука, 2005. 317 с.
2. Борщ С.В., Христофоров А.В. Оценка качества прогнозов речного стока // Труды Гидрометцентра России. 2015. Специальный выпуск 355. 198 с.
3. Борщ С.В., 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. Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В., Юмина Н.М. Прогнозирование притока воды в Цимлянское водохранилище // Гидрологические исследования и прогнозы. 2022. № 4 (386). С. 47-63.
5. Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Прогнозирование стока рек России. М.: Изд-во ФГБУ «Гидрометцентр России», 2023. 200 с.

6. Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Милукова И.П., Капшутина Е.А., Барабанова Е.А., Вишневецкая И.А., Бородина О.О. Современные и сценарные изменения речного стока в бассейнах крупнейших рек России. Часть 2. Бассейны рек Волги и Дона. М.: МАКС Пресс, 2014. 214 с.

7. 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.

8. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть 1. Прогнозы режима вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 193 с.

9. Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Т. 7. Донской район. Л.: Гидрометеиздат, 1964. 267 с.

10. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 2. Краткосрочный прогноз расхода и уровня воды на реках. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 245 с.

11. Христофоров А.В., Юмина Н.М. Теория вероятностей и математическая статистика: Учебное пособие. М.: АПП, 2017. 151 с.

12. Adams T.E., Pagano T.C. Flood Forecasting – A Global Perspective. Academic Press, 2016. 480 p.

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

14. Guide to Hydrological Practices. Volume II. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices // WMO-No. 168. 2009. 302 p.

References

1. Bolgov M.V., Mishon V.M., Sencova N.I. Sovremennye problemy ocenki vodnyh resursov i vodoobespecheniya. Moscow, Nauka publ, 2005, 317 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., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V., Yumina N.M. Forecasting of water inflow into the Tsimlyansk Reservoir. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2022, vol. 386, no. 4, pp. 47-63 [in Russ.].

5. Borsch S.V., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V. Prognozirovaniye stoka rek Rossii. Moscow, Gidrometcentr Rossii, 2023, 200 p. [in Russ.].

6. Georgiadi A.G., Koronkevich N.I., Milyukova I.P., Kashutina E.A., Barabanova E.A., Vishnevskaya I.A., Borodina O.O. Sovremennye i scenarnye izmeneniya rechnogo stoka v basseynah krupneyshih rek Rossii. CHast' 2. Basseyny rek Volgi i Dona. Moscow, MAKS Press publ., 2014, 214 p. [in Russ.].

7. 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.].

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

9. Resursy poverhnostnyh vod SSSR: Gidrologicheskaya izuchennost'. T. 7. Donskoy rayon. Pod red. D.D. Morduhay-Boltovskogo. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1964, 267 p. [in Russ.].

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

11. *Khristorov A.V., Yumina N.M. Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika: Uchebnoe posobie.* Moscow, APR publ., 2017, 151 p. [in Russ.].

12. *Adams T.E., Pagano T.C. Flood Forecasting – A Global Perspective.* Academic Press, 2016, 480 p.

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

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

*Поступила 16.02.2024; одобрена после рецензирования 15.03.2024;
принята в печать 10.04.2024.*

*Submitted 16.02.2024; approved after reviewing 15.03.2024;
accepted for publication 10.04.2024.*