

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2022-4-47-63>

УДК 556.06

Прогнозирование притока воды в Цимлянское водохранилище

*С.В. Борщ, Ю.А. Симонов,
А.В. Христофоров, Н.М. Юмина*

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

Разработаны методики краткосрочного, среднесрочного и долгосрочного прогнозирования притока воды в Цимлянское водохранилище. Методики учитывают климатические и антропогенные изменения условий формирования притока за последние десятилетия. Их проверка показала удовлетворительные и хорошие результаты.

Среднесуточные расходы притока воды прогнозируются в течение всего года с заблаговременностью от 1 до 10 суток на основе метода экстраполяции гидрографа и используются для прогноза объема притока воды за 5 и 10 суток. Месячный приток за маловодный период года с июня по февраль следующего года зависит от величины притока за предыдущий месяц. При долгосрочном прогнозировании объема притока воды в водохранилище за второй квартал учитывается получаемый по методике В.Д. Комарова прогноз слоя притока за период весеннего половодья и осредненный по территории водосбора слой осадков за март.

Предлагаемая система методик обеспечивает обеспокоенное использование водных ресурсов Цимлянского водохранилища в современных условиях.

Ключевые слова: водохранилище; приток, расход воды; объем; прогноз, заблаговременность; погрешность; оправдываемость

Forecasting of water inflow into the Tsimlyansk Reservoir

*S.V. Borsch, Yu.A. Simonov,
A.V. Khristoforov, N.M. Yumina*

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

Methods for short-, medium-, and long-term forecasting of water inflow into the Tsimlyansk Reservoir have been developed. The methods are based on climatic and anthropogenic changes in the conditions for the inflow formation over the past decades. Their verification showed satisfactory and good results.

Average daily water inflow discharges are predicted throughout the year with a lead time of 1 to 10 days based on the hydrograph extrapolation method. The resulting forecasts are used to predict the volume of water inflow for 5 and 10 days. The monthly inflow for

the low-water period of the year from June to February of the next year is predicted according to its dependence on the inflow for the previous month.

In long-term forecasting of the volume of the water inflow into the reservoir for the second quarter, the forecast of the inflow layer for the spring flood period and the precipitation layer averaged over the catchment area for March obtained by V. D. Komarov's method is taken into account.

The proposed system of methods provides the reasonable use of water resources of the Tsimlyansk Reservoir in modern conditions.

Keywords: reservoir, inflow, water discharge, volume, forecast, lead time, error, accuracy
Keywords: water reservoir, inflow, water discharge, volume, forecast, lead time, error, justifiability

Введение

Цимлянское водохранилище на реке Дон заполнено в 1953 году, имеет полезный объем 11,5 км³ и осуществляет многолетнее регулирование в интересах судоходства, ирригации и гидроэнергетики. Площадь водосбора в створе Цимлянского гидроузла составляет 255 тыс. км² [15].

Приток воды в водохранилище определяется по данным наблюдений на гидрологических постах и уточняется расчетами водного баланса. Река Дон дает около 94 % притока воды в Цимлянское водохранилище. В течение всего года, за исключением пика весеннего половодья, ежедневные данные о расходах этого притока рассчитываются по данным гидрологического поста р. Дон – г. Калач-на-Дону, имеющего водосборную площадь 222 тыс. км². В весенний период, когда данный пост находится в зоне подпора, ежедневные данные о расходах притока р. Дон в водохранилище рассчитываются по данным гидрологического поста р. Дон – ст. Новогригорьевская, который расположен в 52 км выше и имеет водосборную площадь 208 тыс. км². Боковой приток дает около 6 % притока. Боковая водосборная площадь Цимлянского водохранилища от плотины до г. Калач-на-Дону составляет 28048 км². Для вычисления ежедневного бокового притока используются данные гидрометрических постов на реках Чир, Аксенец и Цимла, впадающих с правого берега водохранилища, и рек Иловля, Аксай Есауловский, Аксай Курмоярский, Тишанка и Панышинка, впадающих с левого берега [13].

Краткосрочные с заблаговременностью 1–5 суток, среднесрочные с заблаговременностью 6–12 суток и долгосрочные прогнозы притока воды в Цимлянское водохранилище за различные интервалы времени от суток до квартала необходимы для обеспечения обоснованного режима его наполнения и сработки. Они позволяют снизить вероятность нежелательного повышения уровня воды в водохранилище и возникновения дефицита воды в его нижнем бьефе [1].

В связи с имевшими в последние десятилетия значительными климатическими и антропогенными изменениями условий формирования притока воды в Цимлянское водохранилище разработанные ранее методики

его прогнозирования стали устаревшими и уже не имеют требуемой точности. В связи с этим в настоящей статье предлагаются новые методики, основанные на предоставленной ФГБУ «Северо-Кавказское УГМС» гидрометеорологической информации за последние десятилетия.

Климатические и антропогенные изменения водного режима притока в Цимлянское водохранилище

До начала 1930-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 [8, 15].

В течение последних десятилетий 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 сорок лет устойчивый переход к отрицательным температурам воздуха стал происходить позже в среднем на 10 суток. Средние даты начала пятидневного безморозного периода сместились в сторону более ранних чисел на 12 суток. Таким образом, зима стала короче: позже начинается и раньше заканчивается. За этот же период годовая сумма осадков возросла на 3 %, при этом сумма осадков за холодный период возросла на 11 %. Благодаря участвовавшим оттепелям, статистически достоверного увеличения запасов воды в снежном покрове на конец февраля пока не обнаружено [7, 9, 11].

Антропогенная нагрузка в бассейне Дона оценивается как очень высокая. До начала 1990-х годов она имела тенденцию к увеличению, в последующие десять лет она снизилась, для последних двадцати лет характерна стабилизация [2, 3, 10, 11].

Прямое воздействие на речной сток оказывают безвозвратный забор воды на орошение, промышленное и коммунально-бытовое водоснабжение, а также строительство прудов, водохранилищ и каналов. Безвозвратный забор воды превышал 5 млн м³/год, за последние тридцать лет он снизился до 3 млн м³/год [7, 9, 11].

Регулирование речного стока в бассейне Дона осуществляется 48 крупными водохранилищами, включая Цимлянское, и около 12 тысячами прудов и малых водохранилищ. Переброска стока происходит благодаря Волго-Донскому каналу, расположенному выше Цимлянского водохранилища [3, 9, 11].

К косвенным 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.

Под влиянием климатических и антропогенных факторов произошло снижение годового стока Дона и изменчивости его многолетних колебаний. Сравнение первой (1911–1966 гг.) и второй (1967–2021 гг.) половин этого периода показало, что среднее значение расхода воды снизилось с 664 до 563 м³/с, а коэффициент вариации годового стока снизился с 0,40 до 0,29. Согласно стандартным критериям однородности, изложенным в [5], приведенные изменения являются статистически достоверными.

Более значительным оказалось выравнивание внутригодового распределения стока Дона и его притоков [8, 9, 10]. Это наглядно демонстрируют данные табл. 1, в которой приведены относительные значения месячного притока воды к створу Цимлянской ГЭС, осредненные для десятилетних периодов с 1911 по 1920 г. и с 2012 по 2021 год.

Таблица 1. Относительные значения месячного притока воды к створу Цимлянской ГЭС, %

Table 1. Relative values of monthly water inflow to the Tsimlyanskaya HPP, %

Период	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1911–1920	2,5	3,3	9,4	41,6	24,4	4,5	2,9	2,6	2,1	2,2	2,3	2,3
2012–2021	5,6	5,6	9,4	19,8	19,3	9,3	5,8	4,8	4,4	4,7	5,7	5,7

Приведенные данные показывают, что доля стока половодья с марта по май снизилась более чем в полтора раза с 75,4 до 48,5 %, в то время как доля меженного стока возросла более чем в два раза с 24,6 до 51,5 %.

Начиная с 1970-х годов благодаря участвовавшим оттепелям и зяблевой вспашке объем стока половодья снизился на 30–40 %, а его максимальные расходы снизились на 40–60 %. Практически на всех реках бассейна начало половодья и дата прохождения его максимума в среднем сместились на 7–12 дней в сторону более ранних значений. В то же время окончание половодья стало запаздывать в среднем на 5–10 дней. Таким образом, продолжительность более низкого половодья увеличилась на 10–20 дней. Сравнение первой и второй половин периода наблюдений показало, что среднее значение апрельского расхода воды снизилось с 2613 до 1595 м³/с, а коэффициент вариации апрельского стока снизился с 0,61 до 0,46. Произошло также существенное увеличение подземного питания рек бассейна Дона и, как результат, значительное увеличение летне-осеннего и зимнего стока на 40–70 %. Среднее значение сентябрьского расхода воды возросло

с 204 до 273 м³/с [9]. Отмеченные изменения также являются статистически достоверными [7, 9, 11].

Анализ климатических и антропогенных изменений водного режима рек бассейна Дона приводит к следующим выводам.

1. Методики прогнозирования характеристик притока воды в Цимлянское водохранилище, разработанные при проектировании и в первые десятилетия его работы, следует признать устаревшими и не соответствующими современным условиям.

2. Уточнение этих методик и разработка новых должны опираться на данные гидрометеорологических наблюдений только за последние десятилетия.

Краткосрочное и среднесрочное прогнозирование суточного притока воды в Цимлянское водохранилище

Для получения ежедневных прогнозов среднесуточных расходов притока воды в Цимлянское водохранилище в течение всего года использован разработанный в отделе речных гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» метод экстраполяции гидрографа [6, 17]. Метод основан на том, что характерный для достаточно крупных равнинных рек плавный ход среднесуточных расходов воды дает основание для их прогнозирования путем экстраполяции гидрографа. Такая экстраполяция может определять прогноз среднесуточного расхода воды с заблаговременностью Δt суток в виде обобщенного полинома. Оценка $k+1$ его параметров по известным к дате составления прогноза $t - \Delta t$ среднесуточным расходам воды $Q(t - \Delta t)$, $Q(t - \Delta t - 1)$, ..., $Q(t - \Delta t - k)$ приводит к тому, что получаемый путем такой экстраполяции прогноз выражается в виде:

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

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.

При заданной заблаговременности прогноза $\Delta t = 1, \dots, 10$ суток параметры формулы (1) оценивались методом наименьших квадратов по данным о расходах притока воды за период с 01.01.2005 по 31.12.2017. Число k подбиралось таким образом, чтобы его последующее увеличение не приводило к заметному снижению среднеквадратической погрешности прогноза. Для всех значений заблаговременности прогноза Δt такие оптимальные значения параметра k не превышали 5. На этом основании все предварительные прогнозы среднесуточных расходов воды с заблаговременностью Δt суток определялись по формуле (1) при $k = 5$. Для всех

значений заблаговременности прогноза $\Delta t = 1, \dots, 10$ суток эти параметры помещены в табл. 2.

Таблица 2. Параметры формулы (1) получения прогноза ежедневных расходов притока воды в Цимлянское водохранилище

Table 2. Parameters of formula (1) for obtaining a forecast of daily water inflow discharges in the Tsimlyansk Reservoir

Δt	$a_0(\Delta t)$	$a_1(\Delta t)$	$a_2(\Delta t)$	$a_3(\Delta t)$	$a_4(\Delta t)$	$a_5(\Delta t)$	$b(\Delta t)$
1	1,663	-0,425	-0,309	0,058	0,018	-0,007	1,28
2	2,342	-1,013	-0,470	0,095	0,096	-0,057	3,47
3	2,882	-1,464	-0,635	0,225	0,013	-0,035	6,51
4	3,331	-1,855	-0,693	0,147	0,151	-0,103	10,32
5	3,687	-2,096	-0,945	0,262	0,282	-0,221	14,86
6	4,039	-2,492	-0,978	0,362	0,372	-0,345	20,01
7	4,229	-2,666	-1,028	0,417	0,476	-0,481	25,80
8	4,372	-2,793	-1,052	0,505	0,447	-0,545	31,90
9	4,483	-2,871	-1,039	0,448	0,542	-0,641	38,34
10	4,590	-2,899	-1,167	0,501	0,639	-0,757	45,08

Определяемые формулой (1) величины $\hat{Q}(t)$ 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 значения $\hat{Q}(t)$ могут возникать при прогнозировании расходов воды на крутом спаде половодья или паводка. Во избежание необоснованно низких и высоких значений прогноза результаты применения формулы (1) необходимо корректировать, заменяя такие экстремальные значения $\hat{Q}(t)$ допустимым минимумом $\min Q$ или максимумом $\max Q$ [6, 17]. Окончательный прогноз расхода воды выражается формулой:

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

В целях определения допустимых пределов для получаемых прогнозов анализировались ряды годовых минимумов и годовых максимумов среднесуточного притока воды в водохранилище за период с 1985 по 2021 год. После успешной проверки статистической однородности и отсутствия

автокорреляции для каждого ряда методом наибольшего правдоподобия были получены оценки параметров трехпараметрического гамма-распределения [5]. В качестве значения $\min Q$ принят минимальный расход воды $Q_{\min}(99\%) = 200 \text{ м}^3/\text{с}$, соответствующий вероятности превышения 99 %. В качестве значения $\max Q$ принят максимальный расход воды $Q_{\max}(1\%) = 2820 \text{ м}^3/\text{с}$, соответствующий вероятности превышения 1 %.

В целях проверки методики на независимом материале использованы данные о среднесуточных расходах притока воды в водохранилище за период с 01.01.2018 по 31.12.2021. В табл. 3 для всех значений заблаговременности прогноза приведена среднеквадратическая погрешность прогноза S и ее отношение S/σ_{Δ} к погрешности инерционного прогноза. Инерционный прогноз расхода воды на дату $t + \Delta t$ определяется известной к дате составления прогноза величиной $Q(t)$. Там же помещены значения оправдываемости прогнозов P , равной частоте случаев, когда абсолютные значения ошибок прогноза не превышали значение допустимой ошибки $0,674\sigma_{\Delta}$.

Таблица 3. Показатели качества прогнозов ежедневного притока воды в Цимлянское водохранилище

Table 3. Quality indicators of daily water inflow forecasts to the Tsimlyansk Reservoir

Δt	$\Delta t=1$	$\Delta t=2$	$\Delta t=3$	$\Delta t=4$	$\Delta t=5$	$\Delta t=6$	$\Delta t=7$	$\Delta t=8$	$\Delta t=9$	$\Delta t=10$
$S \text{ м}^3/\text{с}$	18,6	38,3	70,7	97,3	115	143	167	192	215	236
S/σ_{Δ}	0,48	0,54	0,60	0,64	0,67	0,69	0,71	0,73	0,74	0,75
$P, \%$	91	89	86	87	86	84	85	84	83	82

Все значения S/σ_{Δ} не превышают 0,80, а оправдываемость P превышает 60 %. Следовательно, согласно Наставлению по службе прогнозов [14] данная методика может быть признана удовлетворительной.

Краткосрочное и среднесрочное прогнозирование притока воды в Цимлянское водохранилище за 5 и за 10 суток

С точки зрения оптимизации работы Цимлянского гидроузла более важным является ежедневное прогнозирование притока воды за 5 суток, и тем более за 10 суток с соответствующей заблаговременностью 5 и 10 суток [1].

Краткосрочный прогноз объема притока в водохранилище за пять суток предлагается выпускать ежедневно одновременно с получением

по формулам (1) и (2) прогнозов среднесуточных расходов притока $\tilde{Q}(t+1), \dots, \tilde{Q}(t+5)$.

С учетом числа секунд в сутки измеряемый в млн м³ прогноз $\tilde{W}_5(t)$ объема притока воды в Цимлянское водохранилище за последующие 5 суток после даты t его выпуска определяется формулой:

$$\tilde{W}_5(t) = 0,0864 \sum_{i=1}^5 \tilde{Q}(t+i). \quad (3)$$

Проверка прогнозов притока воды в водохранилище за 5 суток по формулам (1), (2) и (3) на независимом материале за период с 01.01.2018 по 31.12.2021 показала, что среднеквадратическая погрешность прогноза составляет $S = 26,1$ млн м³, отношение S/σ_Δ равно 0,38, а оправдываемость прогнозов P равна 94 %. Согласно Наставлению по службе прогнозов [14] методика с такими показателями качества может быть признана хорошей.

Среднесрочный прогноз объема притока в водохранилище за 10 суток предлагается выпускать ежедневно одновременно с получением по формулам (1) и (2) прогнозов среднесуточных расходов притока $\tilde{Q}(t+1), \dots, \tilde{Q}(t+10)$. Измеряемый также в млн м³ прогноз $\tilde{W}_{10}(t)$ объема притока воды в Цимлянское водохранилище за последующие 10 суток после даты t его выпуска определяется формулой:

$$\tilde{W}_{10}(t) = 0,0864 \sum_{i=1}^{10} \tilde{Q}(t+i). \quad (4)$$

Проверка прогнозов притока воды в водохранилище за 10 суток по формулам (1), (2) и (4) на том же независимом материале показала, что среднеквадратическая погрешность прогноза составляет $S = 102$ млн м³, отношение S/σ_Δ равно 0,42, а оправдываемость прогнозов P равна 92 %. Согласно Наставлению по службе прогнозов [14] методика с такими показателями качества также может быть признана хорошей.

Долгосрочное прогнозирование месячного притока воды в Цимлянское водохранилище в маловодный период года

С учетом климатических особенностей и водного режима рек водосбора Цимлянского водохранилища маловодный период года может начинаться и заканчиваться раньше или позже в зависимости от погодных условий конкретного года, но в среднем он длится с июня по февраль следующего года. По окончании основной волны весеннего половодья происходит спад притока воды в Цимлянское водохранилище в течение летних месяцев, вызванный истощением запасов подземных вод. В осенние и зимние месяцы, как правило, наблюдается повышение притока за счет

выпадения жидких осадков и частых зимних оттепелей [9, 15]. В табл. 4 приведены характеристики притока воды в водохранилище в течение маловодного периода: среднемесячный расход воды \bar{Q} м³/с, коэффициент вариации среднемесячных расходов воды C_v и коэффициент корреляции R между средним расходом каждого месяца и средним расходом предыдущего месяца. При этом для января учитывался средний расход декабря предшествующего года.

Таблица 4. Характеристики притока воды в течение маловодного периода
Table 4. Characteristics of water inflow during a low-water period

Месяцы	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II
\bar{Q} м ³ /с	558	369	309	294	332	372	358	383	397
C_v	0,41	0,25	0,23	0,20	0,19	0,23	0,29	0,30	0,25
R	0,81	0,77	0,92	0,90	0,82	0,86	0,90	0,79	0,75

Современная теория прогнозирования речного стока в меженный период опирается на достаточно хорошо изученные факторы его формирования и пространственно-временной изменчивости. Как правило, возможности долгосрочного прогнозирования меженного стока ограничиваются уровнем гидрометеорологической изученности водосбора. Эти ограничения возникают при недостаточно развитой сети гидрометрических наблюдений для оценки русловых запасов воды, сети гидрогеологических наблюдений для оценки состояния подземных вод и сети метеорологических наблюдений для оценки возможного талого и дождевого стока в начале и в конце меженного периода [16, 18].

Для получения долгосрочного прогноза среднемесячного расхода притока воды в Цимлянское водохранилище в маловодный период года используется традиционный метод, основанный на достаточно высокой корреляции между средними расходами воды смежных месяцев [3]. В зависимости от среднемесячного расхода воды предыдущего месяца Q_{i-1} прогноз среднего за последующий месяц расхода воды определяется по формуле:

$$\tilde{Q}_i = a_i Q_{i-1} + b_i. \quad (5)$$

Для каждого месяца маловодного периода параметры формулы получения прогноза оценивались методом наименьших квадратов на основе рядов среднемесячных расходов притока воды в водохранилище за период с 1985 по 2021 год. Для прогноза январского стока 1985 г. использовался средний расход декабря 1984 г. Параметры формулы (5) для каждого месяца маловодного периода года помещены в табл. 5.

Таблица 5. Параметры формулы (5) получения прогноза среднемесячных расходов притока в Цимлянское водохранилище в маловодный период года
Table 5. Parameters of the formula (5) for obtaining a forecast of the average monthly inflow discharges to the Tsimlyansk Reservoir in the low-water period of the year

Месяцы	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II
a_i	0,248	0,300	0,727	0,745	0,883	1,147	1,084	0,862	0,657
b_i	226	201	40,7	64,2	72,3	-8,77	-45,6	75,2	145,4

Для каждого месяца маловодного периода с номером i проверка предлагаемой методики выполнена по ряду $Q_{i,1} - \tilde{Q}_{i,1}, \dots, Q_{i,n} - \tilde{Q}_{i,n}$ ошибок проверочных прогнозов продолжительностью $n = 36$ для января и $n = 37$ для остальных месяцев маловодного периода. Предварительная оценка среднеквадратической погрешности прогноза рассчитывалась по формуле:

$$\hat{S}_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (Q_{i,j} - \tilde{Q}_{i,j})^2}. \quad (6)$$

Полученная на зависимом материале данная оценка систематически занижает погрешность прогноза. В соответствии с рекомендациями работы [4] данный недостаток устраняется путем перехода к несмещенной оценке

$$S_i = \hat{S}_i \left(\frac{n}{n-m} \right), \quad (7)$$

где m – число оцениваемых параметров, в данном случае равно $m=2$.

В целях оценки эффективности предлагаемой методики в качестве альтернативы использован климатический прогноз, который для месяца с номером i выражается нормой \bar{Q}_i прогнозируемой величины, рассчитанной по ряду $Q_{i,1}, \dots, Q_{i,n}$. Погрешность климатического прогноза принято характеризовать стандартным отклонением этого ряда:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^N (Q_{i,j} - \bar{Q}_i)^2}. \quad (8)$$

Для каждого месяца вывод о применимости методики прогнозирования основан на соотношении S_i / σ_i : методика считается хорошей при $S_i / \sigma_i \leq 0,50$, удовлетворительной при $0,50 < S_i / \sigma_i \leq 0,80$ и неудовлетворительной при $S_i / \sigma_i > 0,80$ [14].

В табл. 6 для каждого месяца с номером i маловодного периода помещены следующие показатели качества прогнозов: среднеквадратическая

погрешность прогноза S_i м³/с; показатель эффективности прогноза S_i / σ_i ; оправдываемость прогноза P_i , равная частоте случаев, когда абсолютные значения ошибок прогноза не превышали значение допустимой ошибки $0,674 \sigma_i$.

Таблица 6. Показатели качества предлагаемой методики прогнозирования среднемесячных расходов притока в Цимлянское водохранилище в маловодный период года

Table 6. Quality indicators of the proposed methodology for forecasting the average monthly inflow discharges to the Tsimlyansk Reservoir in the low-water period of the year

Месяцы	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II
S_i	137	58,7	27,4	26,3	37,5	43,4	46,4	70,5	67,6
S_i / σ_i	0,59	0,65	0,39	0,45	0,59	0,51	0,45	0,62	0,68
P_i	82%	82%	91%	85%	85%	91%	88%	76%	68%

Приведенные показатели свидетельствуют о том, что предлагаемая методика позволяет получать хорошие и удовлетворительные долгосрочные прогнозы месячного притока воды в Цимлянское водохранилище в маловодный период года.

Долгосрочное прогнозирование весеннего притока воды в Цимлянское водохранилище

Вызванное таянием снежного покрова весеннее половодье в бассейне реки Дон является основной фазой водного режима, в течение которой проходит от 40 до 70 % годового стока. Основная волна половодья наблюдается в апреле и мае, а в июне идет ее спад. Половодье часто происходит в виде двух волн. Первая возникает за счет поступления в русло талых вод из нижней части бассейна, а вторая образуется водами, поступающими с верхнего Дона. Иногда, при запаздывании снеготаяния в нижней части бассейна, обе волны сливаются и половодье становится более высоким, но менее продолжительным [15].

Ежегодное долгосрочное прогнозирование слоя весеннего половодья для рек бассейна Дона выполняется в конце февраля каждого года ФГБУ «Северо-Кавказское УГМС» и ФГБУ «Гидрометцентр России» по методике В.Д. Комарова, разработанной в 60-е годы прошлого века. В качестве предикторов используются осредненные по территории водосбора максимальный запас воды в снежном покрове, запас воды в ледяной корке, запас влаги в метровом слое почвы за четыре предзимних месяца, максимальная глубина промерзания почвы [12, 16].

При прогнозировании слоя весеннего притока в Цимлянское водохранилище используется долгосрочный прогноз $\hat{Y}_{нов}$ поверхностной составляющей слоя весеннего половодья в створе р. Дон – г. Серафимович. Долгосрочный прогноз подземной составляющей слоя весеннего половодья в этом же створе $\hat{Y}_{подз}$ определяется по минимальному расходу воды за предшествующую зиму. Тесная зависимость между объемом притока воды в Цимлянское водохранилище за второй квартал и слоем стока весеннего половодья в створе р. Дон – г. Серафимович с коэффициентом корреляции 0,98 позволяет прогнозировать объем притока воды в водохранилище за второй квартал по формуле:

$$\hat{W}_{II} = 0,24(\hat{Y}_{нов} + \hat{Y}_{подз}). \quad (9)$$

С учетом рассмотренных выше климатических и антропогенных изменений условий формирования стока рек бассейна Дона предлагается методика долгосрочного прогнозирования объема притока в Цимлянское водохранилище за второй квартал. Методика основана на данных гидрометеорологических наблюдений за период с 1985 по 2021 год. При составлении прогноза в конце марта осредненный по территории водосбора слой осадков за этот месяц X_{III} уже практически известен и может быть учтен в качестве дополнительного предиктора. Формула получения прогноза имеет вид:

$$\tilde{W}_{II} = 0,78\hat{W}_{II} + 0,08X_{III} - 0,24. \quad (10)$$

Рассмотренные в предыдущем разделе показатели качества прежней (прогноз \hat{W}_{II}) и предлагаемой (прогноз \tilde{W}_{II}) методик для периода с 1985 по 2018 год приведены в табл. 7.

Таблица 7. Показатели качества прогнозов притока воды в Цимлянское водохранилище за второй квартал
Table 7. Quality indicators of water inflow forecasts to the Tsimlyansk Reservoir for the second quarter

Прогноз	S	S / σ	P
\hat{W}_{II}	2,74	0,77	73%
\tilde{W}_{II}	2,17	0,64	83%

Приведенные в табл. 7 данные свидетельствуют о том, что обе методики дают удовлетворительные прогнозы, но предлагаемая методика точнее прежней на 20 %.

Прогнозирование месячного притока в Цимлянское водохранилище за второй квартал

Для получения долгосрочного прогноза объема W_i км³ притока воды в Цимлянское водохранилище за отдельные месяцы второго квартала, то есть за апрель, май, июнь с соответствующими номерами $i = 4, 5, 6$, в качестве предикторов могут быть использованы предварительно полученный по формуле (10) прогноз \tilde{W}_{II} притока за весь второй квартал и объем притока W_{i-1} за предыдущий месяц [12]. С учетом данного обстоятельства долгосрочный прогноз \tilde{W}_i объема притока за месяц с номером i предлагается определять с помощью простейшей линейной формулы:

$$\tilde{W}_i = a\tilde{W}_{II} + bW_{i-1} + c. \quad (11)$$

Для каждого месяца с номерами $i = 4, 5, 6$ параметры формулы (11), полученные методом наименьших квадратов по рядам значений W_i , \tilde{W}_{II} и W_{i-1} при $i = 4, 5, 6$ за период с 1985 по 2018 год, помещены в табл. 8.

Таблица 8. Параметры формулы (11) получения долгосрочного прогноза месячного притока в Цимлянское водохранилище
Table 8. Parameters of formula (11) for obtaining a long-term forecast of monthly inflow to the Tsimlyansk Reservoir

Месяц	i	a	b	c
Апрель	4	0,35	0,13	0,54
Май	5	0,36	0,25	-0,36
Июнь	6	-0,05	0,30	0,79

В табл. 9 для каждого месяца второго квартала помещены значения среднеквадратической погрешности прогноза S км³; показателя эффективности прогнозов S/σ и оправдываемости прогнозов P .

Таблица 9. Показатели качества прогнозов месячного объема притока воды в Цимлянское водохранилище
Table 9. Quality indicators of forecasts of the monthly volume of water inflow to the Tsimlyansk Reservoir

Месяц	S	S/σ	P
Апрель	1,25	0,74	79%
Май	1,45	0,72	68%
Июнь	0,35	0,59	81%

Приведенные в табл. 9 показатели качества прогнозов свидетельствуют о том, что предлагаемая методика долгосрочного прогнозирования объема месячного притока в Цимлянское водохранилище для всех месяцев второго квартала может быть отнесена к категории удовлетворительных.

Заключение

В отделе речных гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» разработана система методик краткосрочного, среднесрочного и долгосрочного прогнозирования притока воды в Цимлянское водохранилище. Методики основаны на данных гидрологических и метеорологических наблюдений за период с 1985 по 2021 год и учитывают значительные климатические и антропогенные изменения условий формирования речного стока в бассейне Дона и притока в Цимлянское водохранилище за последние десятилетия.

В основе методики краткосрочного и среднесрочного прогнозирования среднесуточных расходов притока с заблаговременностью 1–10 сток в течение всего года лежит метод экстраполяции гидрографа, который используется в автоматизированной системе подготовки и выпуска прогнозов стока рек России. Прогнозируемое значение расхода воды определяется в зависимости от его значений за дату составления прогноза и за пять предыдущих суток. Проверка получаемых прогнозов показала вполне удовлетворительные результаты. Относительная погрешность получаемых прогнозов в долях от погрешности инерционного прогноза S/σ_{Δ} не превышает 0,75, а оправдываемость прогнозов не ниже 82 %.

Суммирование получаемых прогнозов за 5 и 10 суток позволило в течение всего года прогнозировать пентадный и декадный приток воды в водохранилище. Проверка показала хорошие результаты с соотношением S/σ_{Δ} , соответственно, равным 0,38 и 0,42 и оправдываемостью 94 и 92 %.

В методике долгосрочного прогнозирования месячного притока воды в течение маловодного периода года с июня по февраль следующего года используется его линейная зависимость от аналогичной характеристики предшествующего месяца. Проверка получаемых прогнозов показала хорошие и удовлетворительные результаты. Их относительная погрешность в долях от погрешности климатического прогноза S/σ варьирует от 0,39 до 0,68, а оправдываемость – от 68 до 91 %.

В методике долгосрочного прогнозирования объема притока воды в водохранилище за второй квартал учитывается получаемый по методике В.Д. Комарова прогноз слоя притока за период весеннего половодья и осредненный по территории водосбора слой осадков за март. Проверка получаемых прогнозов показала удовлетворительные результаты с соотношением S/σ , равным 0,64, и оправдываемостью 83 %.

При долгосрочном прогнозировании объема притока за отдельные месяцы второго квартала учитываются прогноз притока за весь второй квартал и объем притока за предшествующий месяц. Проверка получаемых прогнозов также показала удовлетворительные результаты. Соотношение S/σ варьирует от 0,59 до 0,74, а оправдываемость – от 68 до 81 %.

Таким образом, разработана система методик, обеспечивающих всей необходимой прогностической информацией для обоснованного режима наполнения и сработки Цимлянского водохранилища в современных условиях.

Список литературы

1. Асарин А.Е., Бестужева К.Н., Христофоров А.В., Чалов С.Р. Водохозяйственные расчеты. М.: Изд-во МГУ, 2012. 142 с.
2. Барабанов А.Т., Долгов С.В., Коронкевич Н.И., Панов В.И., Петелько А.И. Поверхностный сток и инфильтрация талых вод на пашне в лесостепной и степной зонах Восточно-Европейской равнины // Почвоведение. 2018. № 1. С. 62-69.
3. Болгов М.В., Мишон В.М., Сенцова Н.И. Современные проблемы оценки водных ресурсов и водообеспечения. М.: Наука, 2005. 317 с.
4. Борщ С.В., Христофоров А.В. Оценка качества прогнозов речного стока // Труды Гидрометцентра России. 2015. Специальный выпуск 355. 198 с.
5. Борщ С.В., Христофоров А.В., Юмина Н.М. Статистический анализ в гидрологических прогнозах. М.: Гидрометцентр России, 2018. 160 с.
6. Борщ С.В., Колий В.М., Семенова Н.К., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Прогнозирование стока рек России методом экстраполяции гидрографа // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. № 2 (380). С. 77-94.
7. Варенцова Н.А., Гречушников М.Г., Повалишников Е.С., Киреева М.Б., Харламов М.А., Фролова Н.Л. Влияние климатических и антропогенных факторов на весенний сток в бассейне Дона // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2021. № 5. С. 91-100.
8. Гельфан А.Н., Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Григорьев В.Ю., Мотовилов Ю.Г., Гусев Е.М. Влияние изменения климата на годовой и максимальный сток рек России: оценка и прогноз // Фундаментальная и прикладная климатология. 2021. Т. 7. № 1. С. 36-79.
9. 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.
10. Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Милюкова И.П., Капшутин Е.А., Барабанова Е.А., Вишневецкая И.А., Бородин 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.
11. Киреева М.Б., Фролова Н.Л. Современные особенности весеннего половодья рек бассейна Дона // Водное хозяйство России. 2013. № 1. С. 60-76.
12. Комаров В.Д. Весенний сток равнинных рек европейской части СССР, условия его формирования и методы прогнозов. М.: Гидрометеиздат, 1959. 259 с.
13. Методика расчета ежедневного притока воды в Цимлянское водохранилище. Ростов-на-Дону: Северо-Кавказское УГМС, 1989. 62 с.
14. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть 1. Прогнозы режима вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 193 с.
15. Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Т. 7. Донской район / Под ред. Д.Д. Мордухай-Болтовского. Л.: Гидрометеиздат, 1964. 267 с.
16. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 1. Долгосрочные прогнозы элементов водного режима рек и водохранилищ. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 356 с.

17. Borsch S., Simonov Y., Khristoforov A., Semenova N., Koliy V., Ryseva E., Krovotyntsev V., Derugina V. Russian Rivers Streamflow Forecasting Using Hydrograph Extrapolation Method // *Hydrology*. 2022. Vol. 9, no. 1. P. 1-14.

18. Guide to Hydrological Practices. Volume II. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices // WMO- No. 168. Geneva, 2009. 738 p.

References

1. Asarin A.E., Bestuzheva K.N., Khristoforov A.V., Chalov S.R. Vodohozyaystvennyye raschety. Moscow, MSU Publ., 2012, 142 p. [in Russ.].

2. Barabanov A.T., Dolgov S.V., Koronkevich N.I., Panov V.I., Petel'ko A.I. Surface Runoff and Snowmelt Infiltration into the Soil on Plowlands in the Forest-Steppe and Steppe Zones of the East European Plain. *Eurasian Soil Sc.*, 2018, vol. 51, no. 1, pp. 66-72. DOI: 10.1134/S1064229318010039.

3. Bolgov M.V., Mishon V.M., Sencova N.I. Sovremennyye problemy ocenki vodnykh resursov i vodoobespecheniya. Moscow, Nauka Publ, 2005, 317 p. [in Russ.].

4. Borsch S.V., Khristoforov A.V. Hydrologic flow forecast verification. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2015, vol. 355, 198 p. [in Russ.].

5. Borsch S.V., Khristoforov A.V., YUmina N.M. Statisticheskiy analiz v gidrologicheskikh prognozhah. Moscow, Gidrometcentr Rossii [Hydrometeorological Center of Russia], 2018, 160 p. [in Russ.].

6. Borsch S.V., Koliy V.M., Semenova N.K., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V. Forecasting the flow of Russian rivers by hydrograph extrapolation. *Gidrometeorologicheskoye issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2021, vol. 380, no. 2, pp. 77-94 [in Russ.].

7. Varentsova N.A., Grechushnikova M.G., Povalishnikova E.S., Kireeva M.B., Kharlamov M.A., Frolova N.L. Assessment of climatic and anthropogenic impact on spring runoff in the Don River basin. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5, Geografiya*. 2021, no. 5, pp. 91-108 [in Russ.].

8. Gelfan A. N., Frolova N. L., Magritsky D. V., Kireeva M. B., Grigoriev V. Yu., Motovilov Yu. G., Gusev E. M. Climate change impact on annual and maximum runoff of Russian rivers: diagnosis and projections. *Fundamental and Applied Climatology*, 2021, vol. 7, no. 1, pp. 36-79. DOI: 10.21513/2410-8758-2021-1-36-79 [in Russ.].

9. Dzhamalov R.G., Kireeva M.B., Kosolapov A.E., Frolova N.L. Vodnye resursy basseyna Dona i ih ekologicheskoye sostoyaniye. Moscow, GEOS, 2017, 204 p. [in Russ.].

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

11. Kireyeva M.B., Frolova N.L. Present-day special features of the Don river basin rivers spring tide. *Vodnoye hozyaystvo Rossii [Water sector of Russia: problems, technologies, management]*, 2013, no. 1, pp. 60-76 [in Russ.].

12. Komarov V.D. Vesenniy stok ravninnykh rek evropeyskoy chasti SSSR, usloviya ego formirovaniya i metody prognozov. Moscow, Gidrometeoizdat Publ, 1959, 259 p. [in Russ.].

13. Metodika rascheta ezhdnevnoy pritoka vody v Cimlyanskoye vodohranilishche. Rostov-na-Donu: Severo-Kavkazskoye UGMS, 1989, 62 p. [in Russ.].

14. Nastavlenie po sluzhbe prognozov. Razdel 3. Part 1. Prognozy rezhima vod sushi. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1962, 193 p. [in Russ.].

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

16. *Rukovodstvo po gidrologicheskim prognozam. Vyp. 1. Dolgosrochnye prognozy elementov vodnogo rezhima rek i vodohranilishch.* Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1989, 356 p. [in Russ.].

17. *Borsch S., Simonov Y., Khristoforov A., Semenova N., Koliy V., Ryseva E., Krovotyntsev V., Derugina V.* Russian Rivers Streamflow Forecasting Using Hydrograph Extrapolation Method. *Hydrology*, 2022, vol. 9, no. 1, pp. 1-14.

18. *WMO-No. 168. Guide to Hydrological Practices. Vol. II. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices.* WMO, Geneva, 2009, 738 p.

*Поступила 15.07.2022; одобрена после рецензирования 16.11.2022;
принята в печать 29.11.2022.*

*Submitted 15.07.2022; approved after reviewing 16.11.2022;
accepted for publication 29.11.2022.*