

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-1-131-148>

УДК 556.06

Прогнозирование притока воды в Ириклинское водохранилище

*О.Н. Арефьева¹, Н.Е. Голоднюк², Ю.А. Симонов¹,
А.В. Христофоров¹, Н.М. Юмина¹*

*¹ Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия;*

*² Приволжское управление по гидрометеорологии и мониторингу
окружающей среды, г. Самара, Россия
simonov@mecom.ru, khristoforov_a@mail.ru, yuminanm@mail.ru*

Предложена система методик прогнозирования притока воды в Ириклинское водохранилище на реке Урал. Система включает методики получения ежегодно выпускаемого 5 марта долгосрочного прогноза объема притока за период весеннего половодья и за второй квартал, а также методики получения ежегодно выпускаемого в январе и феврале предварительного долгосрочного прогноза этих величин. В этих методиках используются линейные зависимости притока воды в водохранилище от максимального запаса воды в снеге и от показателя предзимнего увлажнения водосбора. На основе метода экстраполяции гидрографа разработаны схемы ежедневного краткосрочного и среднесрочного прогнозирования притока в водохранилище за 1, 3, 5, 7 и 10 суток. Проверка по данным за период с 2003 по 2024 год показала удовлетворительное качество предлагаемых методик, что позволяет рекомендовать их к применению в целях повышения эффективности использования водных ресурсов Ириклинского водохранилища.

Ключевые слова: водохранилище, объем притока, методика, линейные зависимости, экстраполяция гидрографа, проверка, качество прогнозов

Forecasting water inflow into the Iriklinskoe Reservoir

*O.N. Arefyeva¹, N.E. Golodnyuk², Yu.A. Simonov¹,
A.V. Khristoforov¹, N.M. Yumina¹*

*¹ Hydrometeorological Research Center of Russian Federation,
Moscow, Russia;*

*² Privolzhskoe Administration for Hydrometeorology and Environmental
Monitoring, Samara, Russia
simonov@mecom.ru, khristoforov_a@mail.ru, yuminanm@mail.ru*

A system of methods for forecasting the water inflow into the Iriklinskoe Reservoir on the Ural River are proposed. The system includes the long-term forecast of the inflow volume over the spring flood period and the second quarter, which is annually released on March 5, as well as methods for the preliminary long-term forecast of these quantities, which is annually released in January and February. These methods are based on linear dependences of the forecasted water inflow on the maximum snow water equivalent and on the pre-winter moisture index of the reservoir's catchment area. Based on the hydrograph

extrapolation method, techniques for daily short- and medium-term forecasting of the inflow to the reservoir for 1, 3, 5, 7 and 10 days have been developed. A verification using the data for the period from 2003 to 2024 showed satisfactory quality of all proposed methods, which allows recommending them for application in order to improve the efficiency of using water resources of the Iriklienskoe Reservoir.

Keywords: reservoir, inflow volume, methodology, linear dependences, hydrograph extrapolation, verification, forecast quality

Введение

Заполненное в 1966 году Ириклинское водохранилище на реке Урал предназначено для борьбы с наводнениями в нижнем бьефе и обеспечения нужд водоснабжения, судоходства и энергетики. Плотины водохранилища расположена в 83 км выше г. Орска. Длина водохранилища 73 км, наибольшая ширина 10 км, наибольшая глубина у плотины 36 м, площадь зеркала 260 км², объем 3,3 км³. Площадь водосбора 36900 км². Полезная емкость 2,7 км³ вдвое превышает средний объем годового притока, что позволяет осуществлять глубокое многолетнее регулирование стока реки Урал. Расчет притока воды в Ириклинское водохранилище выполняется в ФГБУ «Приволжское УГМС» с учетом расходов воды реки Урал выше водохранилища и боковых притоков согласно указаниям, содержащимся в Правилах использования водных ресурсов Ириклинского водохранилища на реке Урал [9].

Благодаря своим малым объемам, расположенные выше по течению Магнитогорское и Верхнеуральское водохранилища оказывают незначительное влияние на водный режим притока в Ириклинское водохранилище. Для многолетних колебаний годового притока характерны значительные периоды его относительно низких (до 8 лет) и высоких (до 4 лет) значений. Внутригодовое распределение притока крайне неравномерно. Для большей части года характерны низкие расходы притока до 4 м³/с. Вызванное таянием снежного покрова весеннее половодье составляет 70–85 % годового притока. Во второй половине марта – начале апреля оно начинается резким увеличением расходов воды. Пик половодья, как правило, наблюдается в апреле и достигает 2500 м³/с. Спад основной волны половодья происходит в мае – первой половине июня. В отдельные годы в летне-осенний период могут наблюдаться дождевые паводки, высота которых значительно ниже весеннего половодья [9, 10].

Специфика водного режима притока в Ириклинское водохранилище вынуждает осуществлять крайне неравномерное многолетнее и внутригодовое регулирование стока реки Урал. В этих условиях эффективный режим наполнения и опорожнения водохранилища особенно нуждается в научном обосновании и, прежде всего, в достаточно надежных и своевременных прогнозах различных гидрологических характеристик.

Гидрометеорологическое обслуживание водохранилища осуществляет ФГБУ «Приволжское УГМС». Как будет показано ниже, некоторые

используемые там методики нуждаются в совершенствовании. Кроме того, в целях повышения эффективности использования водных ресурсов Ириклинского водохранилища перечень прогнозируемых характеристик нуждается в расширении. Это определяет цели настоящей работы, ее актуальность и практическую значимость.

Современная гидрология располагает достаточно широким арсеналом средств получения методик прогнозирования. Наибольшие надежды возлагаются на использование различных моделей формирования речного стока или притока воды в водохранилища [6, 15–17]. Однако использование этих моделей часто затруднено недостаточной гидрометеорологической изученностью водосборов и пока еще недостаточной точностью метеорологических прогнозов на период заблаговременности гидрологических прогнозов [4, 5]. С учетом данного обстоятельства и в целях экономии времени на составление прогнозов в настоящей работе предлагаются достаточно простые методики прогнозирования притока воды в Ириклинское водохранилище.

1. Долгосрочное прогнозирование весеннего притока в Ириклинское водохранилище

Оценка действующей методики

В настоящее время в отделе речных гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» для долгосрочного прогнозирования объема притока в Ириклинское водохранилище за период весеннего половодья $W_{пол.}$ км³ с ежегодным выпуском основного прогноза 5 марта используется методика В.Н. Паршина, разработанная в 1960 году [8]. При разработке методики были использованы данные за период с 1932 по 1960 год.

В качестве предикторов в методике используются две переменные, осредненные по территории водосбора водохранилища: максимальный запас воды в снеге к 1 марта S_{max} мм и показатель предзимней увлажненности водосбора U_{120} мм, равный разности между слоем осадков и рассчитанным по методике Б.В. Полякова слоем испарения за 120 дней до установления снежного покрова в предыдущем году. На водосборе Ириклинского водохранилища максимальные запасы воды в снежном покрове могут наблюдаться в середине – конце марта, однако необходимость подготовки водохранилища к весеннему половодью определяет дату выпуска его основного прогноза 5 марта. Это вынуждает ограничиваться сведениями о запасах воды в снежном покрове, известных к 1 марта.

Осредненная по территории водосбора глубина промерзания почвы L см влияет на потери стока весеннего половодья только в случае, если она не превышает некоторое критическое значение $L_{кр}$ [11]. Водосбор Ириклинского водохранилища практически целиком расположен в степной зоне с невысокой толщиной снежного покрова и, как правило,

достаточно суровыми зимами [10]. Практически во все годы величина L превышает критическое значение $L_{кр}$, поэтому не используется в качестве предиктора при прогнозировании весеннего притока воды в водохранилище.

В основе методики В.Н. Паршина лежит традиционное для отечественной практики долгосрочного прогнозирования стока весеннего половодья графическое построение [8, 11]. Для различных значений U_{120} от 20 до 120 мм с шагом 10 мм был построен график зависимости $W_{пол.}$ от суммы $S_{max} + X$ мм максимальных запасов воды в снеге и слое осадков X мм с 1 марта до схода снега. При получении прогноза вместо величины $S_{max} + X$ мм используется сумма $S_{max} + \bar{X}$ максимальных запасов воды в снеге и нормы \bar{X} слоя осадков с 1 марта до схода снега. При этом норма слоя осадков постоянно пересчитывается по мере поступления новых данных.

В настоящее время имеется ряд проверочных прогнозов за период с 1932 по 2024 год. В соответствии с Наставлением по службе прогнозов [7] качество методики характеризуется отношением S/σ среднеквадратической погрешности прогнозов S км³ к стандартному отклонению прогнозируемой величины σ км³, а также оправдываемостью прогнозов. Алгоритм получения этих характеристик изложен ниже.

Ряд проверочных прогнозов за весь период с 1932 по 2024 год характеризуют следующие показатели:

- показатель эффективности прогноза $S/\sigma = 0,54$;
- оправдываемость прогнозов $P = 81$ %.

Таким образом, в целом методика выглядит вполне удовлетворительной с точки зрения требования Наставления по службе прогнозов [7]. Однако начиная с 1990-х годов погрешность прогнозов явно возросла. Это наглядно демонстрирует рис. 1, на котором представлен график многолетних колебаний ошибок прогноза.

В частности, ряд проверочных прогнозов по методике В.Н. Паршина за период с 2003 по 2024 год характеризуют следующие показатели:

- показатель эффективности прогноза $S/\sigma = 0,93$;
- оправдываемость прогнозов $P = 68$ %.

Таким образом, для этого ряда выполняется условие $S/\sigma > 0,80$, при котором, согласно Наставлению по службе прогнозов [7], методика относится к категории неудовлетворительных.

В связи с этим в отделе речных гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» разработаны новые методики получения прогнозов весеннего притока в Ириклинское водохранилище на основе данных за период с 2003 по 2024 год.

Дополнительным аргументом в пользу этого периода является следующее обстоятельство.

Оценка коэффициента корреляции $r(W_{пол.}, S_{max})$ между объемом притока в Ириклинское водохранилище за период весеннего половодья

$W_{пол.}$ км³ и такой важнейшей характеристикой условий формирования весеннего половодья, как максимальный запас воды в снеге S_{max} мм, для различных периодов варьирует следующим образом:

- для периода с 1932 по 1960 год $r(W_{пол.}, S_{max}) = 0,58$;
- для периода с 1985 по 2002 год $r(W_{пол.}, S_{max}) = 0,09$;
- для периода с 2003 по 2024 год $r(W_{пол.}, S_{max}) = 0,41$.

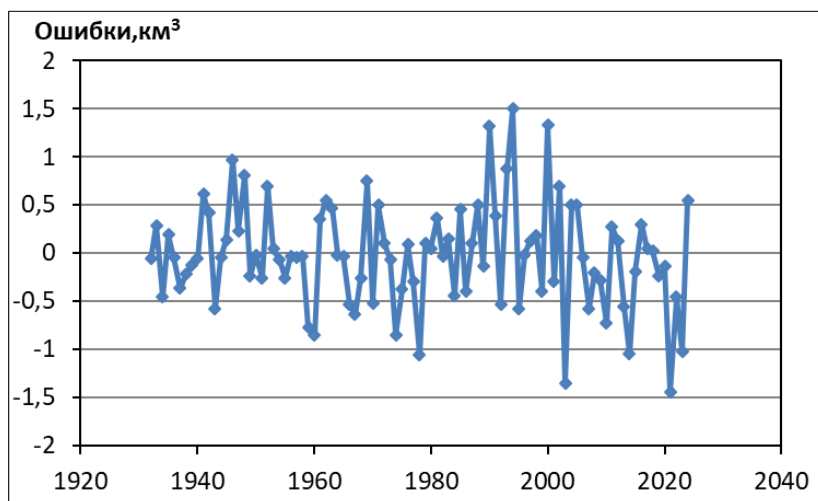


Рис. 1. Многолетние колебания ошибок прогноза объема притока в Ириклинское водохранилище за весеннее половодье по методике В.Н. Паршина.

Fig. 1. Long-term fluctuations in errors of forecasting the inflow volume into the Iriklin'skoye Reservoir for the spring flood according to the methodology of V.N. Parshin.

Вероятной причиной низкого значения коэффициента корреляции $r(W_{пол.}, S_{max})$ для периода с 1985 по 2002 год является характерное для многих регионов страны существенное сокращение сети снегомерных маршрутов [4]. На водосборе Ириклинского водохранилища с 2003 года сеть снегомерных маршрутов частично восстановлена и действует по настоящее время. Таким образом, практически утраченная в предшествующие десятилетия зависимость объема весеннего притока $W_{пол.}$ от максимального запаса воды в снеге S_{max} в период с 2003 по 2024 год вновь восстановилась.

Предлагаемые методики

При разработке методик долгосрочного прогнозирования весеннего притока в Ириклинское водохранилище использован подготовленный

в ФГБУ «Приволжское УГМС» ряд значений весеннего притока и характеристик условий его формирования за период с 2003 по 2024 год продолжительностью $n = 22$ года. В качестве предикторов использовались осредненные по территории водосбора водохранилища:

- максимальный запас воды в снеге к 1 марта S_{\max} мм;
- оказавшийся более эффективным показатель предзимней увлажненности водосбора U_{90} мм, равный разности между слоем осадков и рассчитанным по методике Б.В. Полякова слоем испарения за 90 дней до установления снежного покрова в предыдущем году.

Несмотря на происходящие климатические изменения, использование в качестве дополнительного предиктора осредненной по территории водосбора глубины промерзания почвы L см пока не дало повышения точности прогнозов.

В процессе поиска оптимального варианта зависимости $W_{\text{пол.}}$ от S_{\max} и U_{90} были учтены следующие обстоятельства.

В целях повышения эффективности подготовки и выпуска прогнозов и повышения их точности желательно, чтобы используемая формула их получения обладала следующими дополнительными свойствами:

- 1) она должна адекватно описывать зависимость прогнозируемой величины от используемых предикторов в реально наблюдаемом диапазоне их вероятных значений;
- 2) эта зависимость должна быть достаточно тесной;
- 3) содержащиеся в ней параметры должны максимально просто оцениваться по многолетнему ряду гидрометеорологических наблюдений [4, 5].

С учетом данного обстоятельства на основе статистического анализа располагаемых данных была выбрана следующая формула получения прогноза:

$$\tilde{W}_{\text{пол.}} = 0,0117 \cdot S_{\max} + 0,0231 \cdot U_{90} - 0,976. \quad (1)$$

Параметры этой формулы получены методом наименьших квадратов по ряду значений $W_{\text{пол.}}$, S_{\max} и U_{90} за период с 2003 по 2024 год. Как будет показано ниже, формула (1) позволяет получать прогнозы с достаточно низким отношением S/σ и с их достаточно высокой оправдываемостью P .

Вторая из предлагаемых методик основана на том, что между объемом притока за период весеннего половодья $W_{\text{пол.}}$ км³ и объемом притока за второй квартал $W_{2\text{кв.}}$ км³ имеет место весьма высокая корреляция. Несмотря на это, сроки поступления в водохранилище этих объемов не совпадают. Половодье может начинаться в конце марта, его пик, как правило, проходит в апреле, а заканчиваться оно может в конце мая – начале июня [10]. В частности, полученная для периода с 2003 по 2024 год оценка коэффициента корреляции $r(W_{\text{пол.}}, W_{2\text{кв.}})$ между этими величинами равна 0,94.

С учетом данного обстоятельства для получения долгосрочного прогноза объема притока в Ириклинское водохранилище за второй квартал предлагается формула:

$$\tilde{W}_{2кв.} = 0,0086 \cdot S_{\max} + 0,020 \cdot U_{90} - 0,568. \quad (2)$$

Параметры этой формулы получены методом наименьших квадратов по ряду значений $W_{2кв.}$, S_{\max} , и U_{90} за период с 2003 по 2024 год. Как будет показано ниже, формула (2) также позволяет получать прогнозы с удовлетворительным отношением S/σ и оправдываемостью P .

В преддверии весеннего половодья от гидрологов-прогнозистов требуется выпускать предварительный прогноз весеннего стока или притока в водохранилище в феврале и даже в январе. В общем случае прогнозирование весеннего стока или притока до того, как снежный покров в целом сформирован, невозможно. Однако река Урал представляет приятное исключение.

По данным В.Н. Паршина, для водосбора Ириклинского водохранилища в зависимости от его предзимнего увлажнения коэффициент стока весеннего половодья может варьировать от 0,05 до 0,85 [8, 10]. В таких условиях показатель предзимней увлажненности водосбора становится более важным предиктором, чем еще неизвестный до начала марта максимальный запас воды в снежном покрове. Это хорошо демонстрируют полученные для периода с 2003 по 2024 год оценки коэффициентов корреляции:

$$r(W_{пол.}, U_{90}) = 0,74; \quad r(W_{пол.}, S_{\max}) = 0,41;$$

$$r(W_{2кв.}, U_{90}) = 0,68; \quad r(W_{2кв.}, S_{\max}) = 0,32.$$

В связи с такой особенностью формирования весеннего притока в Ириклинское водохранилище возникает возможность использования в предварительных прогнозах только одного предиктора – показателя U_{90} мм предзимней увлажненности водосбора за 90 дней до установления снежного покрова в предыдущем году.

Для получения предварительных прогнозов объема притока в Ириклинское водохранилище за период весеннего половодья и за второй квартал предлагаются формулы:

$$\tilde{W}_{пол.} = 0,0231 \cdot U_{90} - 0,032, \quad (3)$$

$$\tilde{W}_{2кв.} = 0,020 \cdot U_{90} + 0,127. \quad (4)$$

Параметры этих формул получены методом наименьших квадратов по ряду значений $W_{пол.}$, $W_{2кв.}$, и U_{90} за период с 2003 по 2024 год. Как будет показано ниже, формулы (3) и (4) позволяют получать прогнозы с удовлетворительным отношением S/σ и оправдываемостью P . Таким образом, удовлетворительные прогнозы весеннего притока в Ириклинское водохранилище можно выпускать уже в декабре предыдущего года.

Верификация предлагаемых методик

В целях верификации предлагаемых методик фактические значения прогнозируемой величины Z , т. е. объема притока за период половодья $W_{пол.}$ или объема притока за второй квартал $W_{2кв.}$, сравнивались с их прогнозами \tilde{Z} – прогнозом $\tilde{W}_{пол.}$ по формулам (1) и (3) или $\tilde{W}_{2кв.}$ по формулам (2) и (4). Анализировался ряд ошибок проверочных прогнозов $Z_1 - \tilde{Z}_1, \dots, Z_n - \tilde{Z}_n$ за период с 2003 по 2024 год продолжительностью $n = 22$ года. Для всех предлагаемых методик средние значения ошибок проверочных прогнозов по предлагаемым методикам оказались равными нулю, то есть методики не дают систематических ошибок прогноза.

Согласно Наставлению по службе прогнозов [7], для среднеквадратической погрешности прогноза использована оценка:

$$\hat{S} = \sqrt{\frac{1}{(n-m)} \sum_{j=1}^n (Z_j - \tilde{Z}_j)^2}, \quad (5)$$

где m – число оцениваемых параметров, равное 3 для формул (1) и (2) и равное 2 для формул (3) и (4).

Полученная на зависимом материале, оценка \hat{S} систематически занижает погрешность прогноза. В соответствие с рекомендациями [1], данный недостаток устраняется путем перехода к несмещенной оценке:

$$S = \hat{S} \sqrt{\frac{n-1}{n-m-1}}. \quad (6)$$

В целях оценки эффективности предлагаемых методик для каждой из них в качестве альтернативы использован климатический прогноз, который выражается нормой \bar{Z} прогнозируемой величины, рассчитанной по ряду Z_1, \dots, Z_n . Погрешность климатического прогноза определяется стандартным отклонением этого ряда:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Z_j - \bar{Z})^2}. \quad (7)$$

Вывод о применимости методики прогнозирования основан на соотношении S/σ : методика считается удовлетворительной при $S/\sigma \leq 0,80$ и неудовлетворительной при $S/\sigma > 0,80$ [7].

В качестве другого не менее важного показателя качества прогнозирования используется оправдываемость прогнозов P – частота случаев, когда абсолютные значения ошибок прогноза не превышают допустимую ошибку, равную $0,674\sigma$. Для удовлетворительных прогнозов должно выполняться неравенство $P \geq 60\%$ [1, 7].

В зарубежной практике прогнозирования речного стока качество прогнозов принято характеризовать показателем Нэша – Сатклиффа, который

для предлагаемых методик равен квадрату коэффициента корреляции R между фактическими объемами весеннего притока и их прогнозами [1, 16–18].

Для предлагаемых методик рассмотренные показатели качества получаемых прогнозов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Показатели качества прогнозов по предлагаемым методикам прогнозирования объемов весеннего притока в Ириклинское водохранилище
Table 1. Quality indicators of forecasts of the volumes of spring inflow into the Iriklinskoye Reservoir

Методика	R	S	S/σ	P
По формуле (1)	0,86	0,39	0,58	81 %
По формуле (2)	0,76	0,45	0,69	70 %
По формуле (3)	0,74	0,48	0,71	64 %
По формуле (4)	0,68	0,49	0,76	62 %

Помещенные в табл. 1 показатели свидетельствуют о том, что согласно Наставлению по службе прогнозов [7] все предлагаемые методики являются удовлетворительными.

2. Краткосрочное и среднесрочное прогнозирование притока в Ириклинское водохранилище

Постановка задачи и метод ее решения

Решалась задача разработать схемы ежедневного получения краткосрочных с заблаговременностью от 1 до 5 суток и среднесрочных с заблаговременностью от 6 до 10 суток прогнозов притока воды в Ириклинское водохранилище за 1, 3, 5, 7 и 10 суток. В качестве исходной информации использован подготовленный ФГБУ «Приволжское УГМС» ряд значений среднесуточных расходов притока за период с 01.01.2012 по 31.12.2024 продолжительностью $n = 4749$ суток.

Для решения поставленной задачи применен разработанный в отделе речных гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» метод экстраполяции гидрографа, использование которого уже дало положительные результаты для сотен рек практически во всех регионах России [2, 4, 13].

Метод основан на том, что характерный для достаточно крупных равнинных рек плавный ход ежедневных расходов воды дает возможность экстраполировать его на несколько суток вперед и определять прогноз с заблаговременностью Δt суток в виде обобщенного полинома. Оценка $k+1$ параметров этого полинома по известным к дате составления прогноза t среднесуточным расходам воды $Q(t)$, $Q(t-1)$, ..., $Q(t-k)$ приводит

к тому, что получаемый путем такой экстраполяции прогноз определяется формулой:

$$\hat{Q}(t + \Delta t) = \sum_{i=0}^k a_i(\Delta t)Q(t - i) + b(\Delta t). \quad (8)$$

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 (8) 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 (8) корректируются путем замены экстремальных значений $\hat{Q}(t + \Delta t)$ допустимым минимумом $\min Q$ или максимумом $\max Q$. Окончательный прогноз расхода воды выражается формулой:

$$\tilde{Q}(t + \Delta t) = \begin{cases} \min Q, & \text{если } \hat{Q}(t + \Delta t) < \min Q; \\ \hat{Q}(t + \Delta t), & \text{если } \min Q \leq \hat{Q}(t + \Delta t) \leq \max Q; \\ \max Q, & \text{если } \hat{Q}(t + \Delta t) > \max Q. \end{cases} \quad (9)$$

Параметры формулы (8) получения прогнозов расходов воды оценивались методом наименьших квадратов по ряду ежедневных значений среднесуточных расходов притока за период с 01.01.2012 по 31.12.2024. Оптимальные значения параметра k , при которых среднеквадратическая погрешность прогноза расходов воды принимает минимальное значение, не превышали 5. На этом основании все прогнозы определялись по формуле (8) при $k = 5$.

В качестве оценки минимально допустимого расхода воды в формуле (9) принято округленное в меньшую сторону наименьшее значение члена используемого ряда, равное $\min Q = 4 \text{ м}^3/\text{с}$. В качестве оценки максимально допустимого расхода воды в формуле (9) принято округленное в большую сторону наибольшее значение члена используемого ряда, равное $\max Q = 2500 \text{ м}^3/\text{с}$.

Формулы (8) и (9) использованы для ежедневного в течение всего года прогнозирования среднесуточных расходов притока в Ириклинское водохранилище с заблаговременностью $\Delta t = 1, \dots, 10$ суток. Параметры формулы (8) приведены в табл. 2.

Таблица 2. Параметры формулы (8) получения прогноза суточного притока в Ириклинское водохранилище с заблаговременностью $\Delta t = 1, \dots, 10$ суток
Table 2. Parameters of formula (8) for obtaining a forecast of the daily inflow into the Iriklikskoye Reservoir with a lead time of $= 1, \dots, 10$ days

Δt	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	b
1	1,434	-0,499	0,195	-0,1982	-0,030	0,053	2,94
2	1,555	-0,511	0,0719	-0,290	-0,0573	0,122	7,02
3	1,7177	-0,700	0,009	-0,3561	0,049	0,100	11,5
4	1,76	-0,835	-0,033	-0,2611	-0,0367	0,149	16,4
5	1,683	-0,887	0,059	-0,327	-0,067	0,206	21,3
6	1,524	-0,768	-0,012	-0,369	0,067	0,150	26,0
7	1,412	-0,747	-0,095	-0,177	-0,061	0,195	30,2
8	1,272	-0,774	0,075	-0,281	-0,015	0,191	34,0
9	1,045	-0,532	-0,059	-0,202	-0,029	0,193	37,3
10	0,961	-0,555	-0,022	-0,177	-0,004	0,170	40,1

Верификация прогнозов суточного притока в водохранилище

В соответствии с Наставлением по службе прогнозов [7] точность методики прогнозирования определяется среднеквадратической погрешностью прогноза S м³/с, которая рассчитывается для всего ряда ошибок проверочных прогнозов, то есть разностей между фактическими значениями расходов $Q(t)$ и их прогнозами $\tilde{Q}(t)$ за $N = 4749$ суток. Величина определяется формулами (5) и (6) с числом оцениваемых параметров $m = 9$ при использовании формул (8) и (9) и заменой $n = 22$ на $N = 4749$.

Для оценки эффективности методики прогнозирования в качестве альтернативы использовался инерционный прогноз [1, 7]. При заблаговременности прогноза Δt суток инерционный прогноз $\tilde{Q}_I(t)$ использует известное на дату его составления $t - \Delta t$ значение $Q(t - \Delta t)$ и определяется формулой:

$$\tilde{Q}_I(t) = Q(t - \Delta t) + \bar{\Delta}, \quad (10)$$

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:

$$\sigma_{\Delta} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\Delta_i - \bar{\Delta})^2}. \quad (11)$$

Согласно Наставлению по службе прогнозов, методика считается удовлетворительной при $S/\sigma_{\Delta} \leq 0,80$ [7].

В качестве другого не менее важного показателя качества прогнозирования используется оправдываемость прогнозов P – частота случаев, когда абсолютные значения ошибок прогноза не превышали допустимую ошибку, равную $0,674\sigma_{\Delta}$. Для удовлетворительных прогнозов должно выполняться неравенство $P \geq 60\%$ [1, 7].

Дополнительной характеристикой качества прогнозирования является коэффициент корреляции R между фактическими расходами и их прогнозами.

Для прогнозов среднесуточного расхода притока в Ириклинское водохранилище с различной заблаговременностью рассмотренные показатели их качества приведены в табл. 3.

Таблица 3. Показатели качества прогнозов суточного притока в Ириклинское водохранилище с заблаговременностью $\Delta t = 1, \dots, 10$ суток

Table 3. Quality indicators of forecasts of the daily inflow into the Irlinskoye Reservoir with a lead time of $= 1, \dots, 10$ days

Δt	R	S	S/σ_{Δ}	P
1	0,98	34,5	0,84	97 %
2	0,94	60,5	0,86	97 %
3	0,88	80,9	0,85	96 %
4	0,82	100	0,85	96 %
5	0,74	117	0,85	96%
6	0,66	131	0,85	96 %
7	0,58	141	0,84	96 %
8	0,51	149	0,83	96 %
9	0,45	155	0,83	96 %
10	0,39	159	0,81	96 %

Приведенные в табл. 3 показатели демонстрируют волне ожидаемое и закономерное снижение коэффициента корреляции R и рост среднеквадратической погрешности S прогнозов с увеличением их заблаговременности Δt . В то же время обращает на себя внимание несоответствие между неудовлетворительно большими значениями показателя S/σ_{Δ} и, наоборот, очень высокой оправдываемостью прогнозов P .

Причина такого несоответствия обусловлена тем, что для притока в Ириклинское водохранилище характерно очень резкое увеличение расходов воды в начале основной фазы весеннего половодья [10, 11]. В такой ситуации прогноз методом экстраполяции гидрографа дает весьма

большие ошибки. До и после этого кратковременного периода ошибки прогноза значительно меньше. В результате количество неоправдавшихся прогнозов с абсолютным значением их ошибки, превышающим допустимую ошибку прогноза $0,674\sigma_{\Delta}$, относительно невелико, но размер этих ошибок может быть весьма значительным. Ошибки прогноза начальной фазы весеннего половодья дают большой вклад в среднеквадратическую погрешность S и, следовательно, в показатель S/σ_{Δ} , но в масштабах всего года продолжительность этой фазы невелика, поэтому оправдываемость всех прогнозов P очень высокая.

Следует отметить, что неудовлетворительно большие значения показателя S/σ_{Δ} отнюдь не означают низкую точность прогноза. В качестве примера можно привести прогноз среднесуточных расходов притока воды в Ириклинское водохранилище с заблаговременностью $\Delta t = 3$ суток. Показатель S/σ_{Δ} равен 0,85, то есть в соответствии с Наставлением по службе прогнозов [7] такие прогнозы оказались неудовлетворительными. В то же время связь между фактическими и прогнозируемыми расходами притока весьма тесная и характеризуется коэффициентом корреляции $R = 0,88$. Такой достаточно высокой корреляции соответствует вполне неплохое совпадение фактического и спрогнозированного хода расхода воды, которое демонстрирует рис. 2.

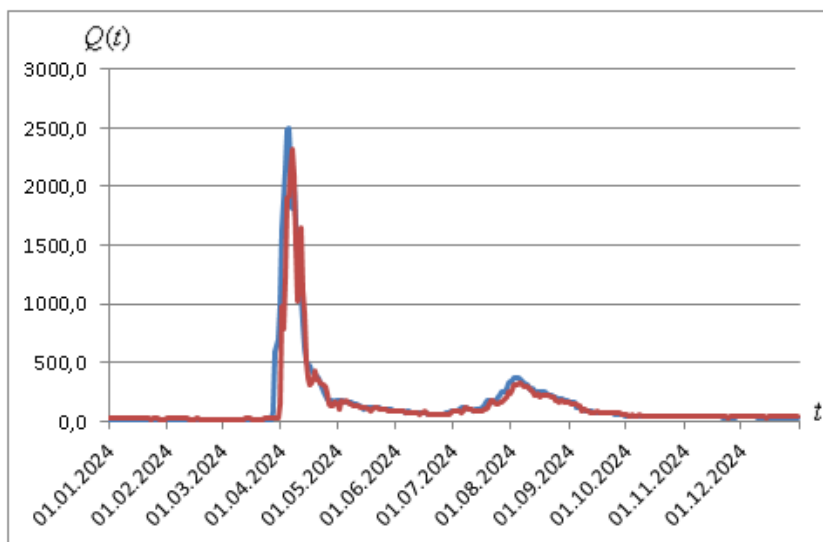


Рис. 2. Фактический (синим) и спрогнозированный с заблаговременностью $\Delta t = 3$ суток (красным) ход среднесуточных расходов притока воды в Ириклинское водохранилище в 2024 году.

Fig. 2. Observed (blue) and forecasted with a lead time of 3 days (red) of average daily water inflow into the Iriklienskoye Reservoir in 2024.

Прогноз притока в водохранилище за различные периоды

Метод экстраполяции гидрографа может быть также применен для получения прогноза притока воды в Ириклинское водохранилище за период продолжительностью $T = 3, 5, 7, 10$ суток. Этим методом подобная задача была уже успешно решена при прогнозировании притока в Цимлянское водохранилище [3].

В данном случае при дате составления прогноза t прогнозируемой величиной является $Q_T(t)$ – средний расход притока воды за T суток, равный среднему арифметическому расходов $Q(t+1), \dots, Q(t+T)$.

При использовании метода экстраполяции гидрографа в качестве предикторов фигурируют те же среднесуточные расходы притока воды $Q(t), Q(t-1), \dots, Q(t-k)$ за дату составления прогноза t и за 5 предыдущих суток. Ежедневно выпускаемый в течение всего года прогноз этой величины $\tilde{Q}_T(t)$, получаемый методом экстраполяции гидрографа, определяется формулами (8) и (9) при $k = 5$, $\min Q = 4 \text{ м}^3/\text{с}$ и $\max Q = 2500 \text{ м}^3/\text{с}$.

Заблаговременность такого прогноза Δt равна продолжительности периода осреднения T суток.

Соответствующие каждому значению продолжительности рассматриваемого периода $T = 3, 5, 7, 10$ суток параметры $a_0(T), a_1(T), \dots, a_5(T), b(T)$ формулы (8) получены методом наименьших квадратов по ряду ежедневных значений среднесуточных расходов притока за период с 01.01.2012 по 31.12.2024. Их значения помещены в табл. 4.

Таблица 4. Параметры формулы (8) получения прогноза притока в Ириклинское водохранилище за различные периоды

Table 4. Parameters of formula (8) for obtaining the forecast of inflow into the Irliklinskoye reservoir for different periods

Период	3 суток	5 суток	7 суток	10 суток
a_0	1,569	1,630	1,584	1,436
a_1	-0,570	-0,686	-0,707	-0,681
a_2	0,092	0,060	0,028	0,019
a_3	-0,282	-0,287	-0,283	-0,264
a_4	-0,013	-0,028	-0,019	-0,018
a_5	0,091	0,126	0,139	0,153
b	7,17	11,84	16,49	22,68
C_T	259,2	432,0	604,8	864,0

Для получения прогноза $\tilde{W}_T(t)$ объема притока за T суток в тысячах м^3 прогноз среднего расхода притока за этот период $\tilde{Q}_T(t)$ следует умножить на коэффициент C_T , приведенный в табл. 4.

Показатели качества прогнозов среднего расхода притока в Ириклинское водохранилище за различные периоды продолжительностью T суток приведены в табл. 5. Для получения среднеквадратической погрешности прогнозов объема притока за T суток величину S следует умножать на коэффициент C_T , помещенный в предыдущей таблице.

Таблица 5. Показатели качества прогнозов среднего расхода притока в Ириклинское водохранилище за различные периоды
Table 5. Indicators of the quality of forecasts of the average inflow into the Iriklinskoye reservoir for different periods

Период	R	S	S/σ_{Δ}	P
3 суток	0,95	55,1	0,63	97 %
5 суток	0,90	72,9	0,61	97 %
7 суток	0,85	86,7	0,62	96 %
10 суток	0,77	100	0,65	96 %

Приведенные в табл. 5 показатели также демонстрируют закономерное снижение коэффициента корреляции R и рост среднеквадратической погрешности S прогнозов с увеличением их заблаговременности $\Delta t = T$. Достаточно низкие значения показателя S/σ_{Δ} и высокая оправдываемость прогнозов P свидетельствуют о том, что эти прогнозы можно считать вполне удовлетворительными.

Заключение

В отделе речных гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» разработана система методик прогнозирования притока воды в Ириклинское водохранилище на реке Урал. Для получения и проверки предлагаемых методик использована гидрометеорологическая информация за период с 2003 по 2024 год, подготовленная в ФГБУ «Приволжское УГМС».

Для получения ежегодно выпускаемых 5 марта долгосрочных прогнозов объема притока за период весеннего половодья и за второй квартал предложены линейные зависимости этих величин от известного к дате составления прогноза максимального запаса воды в снеге S_{\max} мм и предложенного В.Н. Паршиным показателя предзимней увлажненности водосбора U_{90} мм в предыдущем году.

Для получения ежегодно выпускаемых в январе и в феврале предварительных долгосрочных прогнозов объема притока за период весеннего половодья и за второй квартал предложены линейные зависимости этих величин от показателя предзимней увлажненности водосбора U_{90} мм. Возможность использования этих зависимостей обусловлена тем, что объем весеннего притока в Ириклинское водохранилище в гораздо большей степени зависит от предзимней увлажненности его водосбора, чем от запасов воды в снежном покрове.

Схемы ежедневного получения краткосрочных и среднесрочных прогнозов притока в водохранилище за 1, 3, 5, 7 и 10 суток получены на основе уже хорошо зарекомендовавшего себя метода экстраполяции гидрографа. В качестве предикторов использованы среднесуточные расходы притока в водохранилище за дату составления прогноза и за 5 предыдущих суток. Заблаговременность таких прогнозов варьирует от 1 до 10 суток.

Предлагаемые схемы получения краткосрочных, среднесрочных и долгосрочных прогнозов притока воды в Ириклинское водохранилище являются достаточно простыми. Они могут без особых затрат времени использоваться в оперативной прогностической практике, а в перспективе – в рамках автоматизированной системы подготовки и выпуска прогнозов, а также своевременного их доведения до всех заинтересованных потребителей.

Проверка этих методик показала, что согласно требованиям Наставления по службе прогнозов [7] получаемые с их помощью прогнозы относятся к категории удовлетворительных. Это позволяет рекомендовать их к применению в целях повышения эффективности использования водных ресурсов Ириклинского водохранилища и, в частности, повышения научной обоснованности режима его наполнения и опорожнения.

Список литературы

1. Борщ С.В., Христофоров А.В. Оценка качества прогнозов речного стока // Труды Гидрометцентра России. 2015. Специальный выпуск 355. 198 с.
2. 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.
3. 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.
4. Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Прогнозирование стока рек России. М.: Гидрометцентр России, 2023. 200 с.
5. Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Выбор методов прогнозирования речного стока // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2024. № 1 (391). С. 71-117.
6. Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н. Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М.: Изд-во Российской академии наук, 2019. 300 с.
7. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть 1. Прогнозы режима вод суши. Л.: Гидрометеоиздат, 1962. 193 с.
8. Попов Е.Г. Вопросы теории и практики прогнозов речного стока. – М.: Гидрометеоиздат, 1963. 394 с.

9. Правила использования водных ресурсов Ириклинского водохранилища на реке Урал. М.: Министерство мелиорации и водных ресурсов РСФСР, 1973. 19 с.
10. Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 12. Нижнее Поволжье и Западный Казахстан. Вып. 2. Урало-Эмбинский район. Л.: Гидрометеоиздат, 1970. 515 с.
11. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 1. Долгосрочные прогнозы элементов водного режима рек и водохранилищ. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 356 с.
12. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 2. Краткосрочный прогноз расхода и уровня воды на реках. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 245 с.
13. 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.
14. Flood forecasting: a global perspective / ed. by T.E. Adams, III, T.C. Pagano. Amsterdam; Boston: Elsevier/Academic Press, 2016. P. 421-433.
15. Guide to Hydrological Practices. Volume II. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices // WMO-No. 168. Geneva, Switzerland, 2009. 302 p.
16. Lambert A.O. Development and Use of the Management Overview of Flood Forecasting Systems (MOFFS) / Technical Reports in Hydrology and Water Resources, no. 55. Geneva: HWR, 1994. 23 p.
17. Manual on Flood Forecasting and Warning // WMO-No. 1072. Geneva, Switzerland, 2011. 138 p.
18. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. Part 1 – A discussion of principles // *Journal of Hydrology*. 1970. Vol. 10. P. 282-290.

References

1. Borsch S.V., Khristoforov A.V. Hydrologic flow forecast verification. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2015, vol. 355, 198 p. [in Russ.].
2. Borsch S.V., 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.].
3. 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.].
4. Borsch S.V., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V. Prognozirovanie stoka rek Rossii. Moscow, Gidrometcentr Rossii publ., 2023, 200 p. [in Russ.].
5. Borshch S.V., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V. Selection of methods for streamflow forecasting. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2024, vol. 391, no. 1, pp. 71-117 [in Russ.].
6. Motovilov Yu.G., Gel'fan A.N. Modeli formirovaniya stoka v zadachah gidrologii rechnyh basseynov. Moscow, Izd-vo RAN, 2018, 300 p. [in Russ.].
7. Nastavlenie po sluzhbe prognozov. Razdel 3. Part 1. Prognozy rezhima vod sushi. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1962, 193 p. [in Russ.].
8. Popov E.G. Voprosy teorii i praktiki prognozov rechnogo stoka. Moscow, Gidrometeoizdat publ., 1963. 394 p. [in Russ.].
9. Pravila ispol'zovaniya vodnyh resursov Iriklin'skogo vodohranilishcha na r. Urale. Moscow, Ministerstvo melioratsii i vodnyh resursov RSFSR, 1973, 19 p. [in Russ.].
10. Resursy poverhnostnyh vod SSSR. Tom 12. Nizhnee Povolzh'e i Zapadnyy Kazahstan, Vyp. 2, Uralo-Embinskiy rayon. Leningrad., Gidrometeoizdat publ., 1970, 515 p. [in Russ.].
11. Rukovodstvo po gidrologicheskim prognozam. Vyp. 1. Dolgosrochnye prognozy elementov vodnogo rezhima rek i vodohranilishch. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1989, 356 p. [in Russ.].

12. *Rukovodstvo po gidrologicheskim prognozam. Vyp. 2. Kratkosrochnyy prognoz raskhoda i urovnya vody na rekah.* Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1989, 245 p. [in Russ.].
13. *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.
14. Flood forecasting: a global perspective / ed. by T.E. Adams, III, T.C. Pagano. Amsterdam; Boston: Elsevier/Academic Press, 2016, pp. 421-433.
15. Guide to Hydrological Practices. Vol. II. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices. *WMO-No. 168*. WMO, Geneva, 2009, 302 p.
16. *Lambert A.O.* Development and Use of the Management Overview of Flood Forecasting Systems (MOFFS) / Technical Reports in Hydrology and Water Resources, no. 55. Geneva: HWR, 1994, 23 p.
17. Manual on Flood Forecasting and Warning. *WMO-No. 1072*. WMO, Geneva, Switzerland, 2011, 138 p.
18. *Nash J.E., Sutcliffe J.V.* River flow forecasting through conceptual models. Part 1 – A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 1970, vol. 10, pp. 282-290.

*Поступила 04.02.2025; одобрена после рецензирования 27.03.2025;
принята в печать 10.04.2025.*

*Submitted 04.02.2025; approved after reviewing 27.03.2025;
accepted for publication 10.04.2025.*