

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2022-4-64-78>

УДК 556.06

Долгосрочное прогнозирование характеристик весеннего стока рек бассейна Тобола

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

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

Впервые разработаны методики, которые позволяют 25 марта каждого года получать долгосрочный прогноз слоя стока за второй квартал и прогноз максимального уровня воды за период весеннего половодья для семи рек бассейна Тобола. В обеих методиках используются линейные эмпирические зависимости прогнозируемой величины от осредненного по территории водосбора максимального запаса воды в снежном покрове, логарифма среднего расхода воды за ноябрь предыдущего года и среднего расхода воды за месяц, предшествующий дате выпуска прогноза.

Для оценки параметров этих зависимостей и проверки получаемых с их помощью прогнозов использованы данные многолетних гидрометеорологических наблюдений за период с 1968 по 2021 год. Анализ рядов проверочных прогнозов показал, что для всех семи речных бассейнов обе методики дают вполне удовлетворительные результаты. Они могут быть рекомендованы для использования в системе оперативного гидрологического прогнозирования в целях научного обоснования мероприятий по использованию водных ресурсов рек бассейна Тобола и защите населения и хозяйственных объектов от наводнений в период весеннего половодья.

Ключевые слова: половодье, слой стока, максимальный уровень воды, прогноз, запасы воды в снеге, расход воды, эмпирическая зависимость, проверка

Long-term forecasting of spring runoff characteristics of the Tobol basin rivers

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

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

For the first time, methods have been developed that allow obtaining a long-term forecast of the runoff layer for the second quarter and a forecast of the maximum water level for the spring flood period for seven rivers of the Tobol basin on March 25 every year. Both methods use linear empirical dependences of the predicted value on the maximum snow water equivalent averaged over the catchment area, the logarithm of the average water discharge for November of the previous year, and the average water discharge for the month preceding the forecast release date.

To estimate the parameters of these dependencies and verify the forecasts obtained with their help, data of long-term hydrometeorological observations for the period from 1968 to 2021 were used. The analysis of the series of test forecasts showed that both methods give quite satisfactory results for all seven river basins. The methods can be recommended for use in the system for operational hydrological forecasting in order to scientifically substantiate measures on using water resources of the Tobol basin rivers and protecting the population and economic facilities from inundations during the spring flood.

Keywords: flood, runoff layer, maximum water level, forecast, snow water equivalent, water discharge, empirical dependence, verification

Введение

Вызванное таянием снежного покрова весеннее половодье является характерной фазой водного режима большинства рек России, включая реки бассейна Тобола. Объем, или слой стока за период весеннего половодья или за какой-либо жестко обозначенный интервал времени, например за второй квартал, является практически очень важной гидрологической характеристикой. Ее прогноз с достаточными заблаговременностью и точностью позволяет определить эффективный режим сработки и наполнения водохранилищ в предвесенний и весенний периоды, а также использование водных ресурсов в последующие месяцы. Не менее важной характеристикой является максимальный уровень воды за период весеннего половодья в заданном речном створе, прогноз которого определяет вероятные зоны затопления прилегающих к этому створу территорий и необходим для организации мероприятий по защите населения и хозяйственных объектов [2, 17].

В течение многих лет исследование процессов формирования весеннего половодья находится в центре внимания мировой, и прежде всего отечественной гидрологии [6–8, 11–14, 17]. В настоящее время эти процессы можно считать достаточно хорошо изученными, поэтому точность долгосрочных прогнозов характеристик весеннего половодья определяется уровнем гидrometeorологической изученности конкретного речного бассейна и лимитируется неопределенностью хода метеорологических элементов в течение заблаговременности прогноза, который составляется перед началом весеннего половодья [2, 16].

Методы, применяемые в отечественной оперативной практике долгосрочного прогнозирования стока весеннего половодья, отражены в Выпуске 1 Руководства по гидрологическим прогнозам, изданном в 1989 году. В основном такие прогнозы реализуются с помощью физико-статистических зависимостей прогнозируемой величины от известных к дате составления прогноза характеристик факторов весеннего половодья [2, 11, 16].

Эти зависимости должны уточняться по мере накопления данных гидrometeorологических наблюдений и происходящих климатических и антропогенных изменений условий формирования стока весеннего половодья. Причем могут уточняться не только параметры этих зависимостей,

но их вид и состав используемых в них предикторов. Одновременно должна расширяться сфера применения подобных зависимостей для прогнозирования стока весеннего половодья все большего количества рек. В связи с этим в настоящей статье для рек бассейна Тобола предлагаются методики долгосрочного прогнозирования характеристик их весеннего стока.

Общие сведения о рассматриваемых водосборах

Река Тобол является левым и самым многоводным притоком Иртыша. Длина реки 1591 км, площадь водосбора 426 000 км², средний расход воды в устьевом створе 805 м³/с. Берет начало в Оренбургской области на границе восточных отрогов Южного Урала и Тургайской Столовой страны, далее течет по территории Республики Казахстан. Среднее и нижнее течение реки расположено в пределах Западно-Сибирской равнины. Крупнейшие притоки слева – Уй, Исеть, Тура, Тавда, справа – Убаган [10].

Южная часть водосбора расположена на территории Республики Казахстан в степной зоне, северная часть расположена на территории России в лесостепной и таежной зоне. Годовая сумма осадков составляет 800–900 мм на Среднем Урале, 1200–1500 мм на Южном Урале, на равнинной части осадки снижаются до 500–600 мм в таежной зоне и до 250–400 мм в степной и лесостепной зонах. Среднегодовая температура воздуха варьирует от -2 °С до +1,5 °С. В горных районах температура снижается с высотой на 0,5–0,7 °С на 100 м подъема. Заболоченность достигает 50 % на севере и к югу резко снижается. Озерность в среднем составляет 5–6 % [1, 10].

Сток малых рек зарегулирован прудами и водохранилищами сезонного регулирования. Наиболее крупными являются Аргазинское водохранилище на р. Миасс, Белоярское на р. Пышма и Исетское на р. Исеть. На территории Казахстана сток Верхнего Тобола зарегулирован каскадом водохранилищ – Желкуарским, Верхнетобольским, Каратамарским, Сергеевским и Амангельдинским [3].

Питание рек бассейна Тобола в основном снеговое, вниз по течению возрастает доля дождевого питания. Половодье длится с первой половины апреля до середины июня в верховьях и до начала августа в низовьях. Замерзает в низовьях в конце октября – ноябре, в верховьях в ноябре, вскрывается во второй половине апреля – первой половине мая. Основной сток (от 50 до 75 %) приходится на весеннее половодье. Именно в этот период наблюдаются максимальные уровни воды [3, 10]. Характерными особенностями формирования половодья на реках бассейна Тобола являются достаточно глубокое промерзание почвы за счет низких зимних температур и наличие относительно больших постоянно бессточных площадей, обусловленных плоским рельефом [11].

В настоящей статье предлагается решение задачи долгосрочного прогнозирования слоя стока за второй квартал и максимального уровня воды

для семи рек бассейна Тобола на основе данных многолетних гидрометеорологических наблюдений за период с 1968 по 2021 год. В табл. 1 для этих створов помещены номера соответствующих гидрологических постов, название реки и пункта, площадь водосбора в км², норма слоя стока за второй квартал \bar{Y}_{II} мм и его коэффициент вариации C_V .

Таблица 1. Основные характеристики исследуемых водосборов
Table 1. Main characteristics of the studied catchments

Индекс	Река	Пункт	Площадь км ²	\bar{Y}_{II} мм	C_V
12014	Тобол	г. Курган	159000	6,22	0,96
12043	Уй	п. Плодовый	7660	28,4	0,68
12127	Исеть	с. Мехонское	52300	27,5	0,69
12239	Тура	г. Туринск	29000	99,2	0,39
12315	Ница	г. Ирбит	17300	67,9	0,46
12412	Тавда	с. Таборы	74200	98,3	0,32
12611	Сосьва	с. Морозково	11500	123,7	0,25

Заниженное значение слоя стока за второй квартал в створе р. Тобол – г. Курган вызвано заполнением водохранилищ на территории Казахстана в весенний период.

Выбор водосборов обусловлен запросами ФГБУ «Уральское УГМС» на разработку методики долгосрочного прогнозирования весеннего стока и стремлением учесть сам Тобол и его основные притоки.

Расположение рассматриваемых гидрологических постов и соответствующих им речных створов показано на рис. 1.

В табл. 2 для рассматриваемых водосборов представлено осредненное за многолетний период распределение стока по месяцам в процентах от объема годового стока.

Приведенные данные показывают, что на второй квартал, в течение которого проходит весеннее половодье, приходится от 50 до 75 % годового стока.

Долгосрочное прогнозирование слоя речного стока за второй квартал

В современной гидрологии процессы формирования стока половодья достаточно хорошо изучены и описываются различными физико-математическими и концептуальными моделями [6, 8, 11–14]. Эти модели широко используются в краткосрочных прогнозах речного стока, однако при его долгосрочном прогнозировании возникают проблемы, связанные с неопределенностью хода метеорологических элементов в течение периода заблаговременности прогноза и отсутствием необходимых

гидрометеорологических наблюдений [7, 8, 11, 16]. В связи с этим для долгосрочного прогнозирования характеристик стока весеннего половодья применяются различные эмпирические формулы, реализующие физико-статистический подход [2, 11, 17].

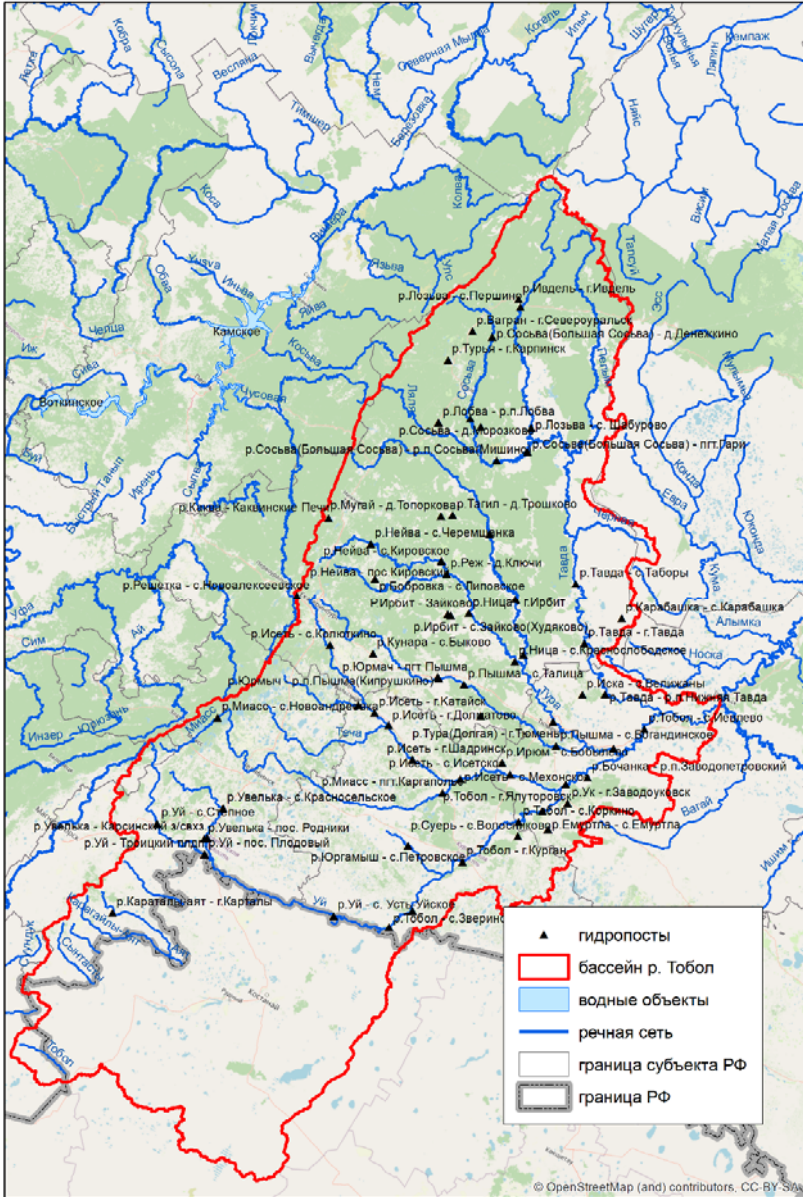


Рис. 1. Расположение гидрологических постов в бассейне реки Тобол [10].
Fig. 1. Location of hydrological posts in the Tobol river basin [10].

Таблица 2. Внутригодовое распределение месячного стока, %
Table 2. Intra-annual distribution of monthly runoff, %

Река	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Тобол	2	2	2	25	40	9	5	4	3	3	3	2
Уй	1	1	3	55	14	6	5	5	3	3	2	1
Исеть	3	3	3	30	20	10	7	6	5	5	5	3
Тура	2	1	2	12	34	16	8	7	6	6	4	2
Ница	2	2	3	28	23	10	7	6	5	6	4	3
Тавда	2	1	1	5	22	24	15	8	7	7	5	3
Сосьва	2	2	2	9	28	17	10	8	8	7	4	3

Для рассматриваемого региона слой талого и дождевого стока за период половодья Y мм рекомендуется выражать формулой:

$$Y = \alpha [X - E(U)] th[X / E(U)], \quad (1)$$

где α – параметр, учитывающий долю бессточных площадей в бассейне; X – слой поступившей на поверхность бассейна воды за счет таяния снега и выпадения осадков за период половодья, мм; th – знак гиперболического тангенса; $E(U)$ – свободная емкость бассейна, мм, которая определяет потери весеннего стока и является функцией от показателя предшествующего увлажнения водосбора U . При отсутствии непосредственно измеренных данных о влажности почвы накануне начала половодья используются различные варианты определения показателя U и функции $E(U)$ [11].

В частности, в качестве показателя предшествующего увлажнения U Д.А. Бураковым предложено использовать слой стока за период с сентября по ноябрь предшествующего года за вычетом его минимального наблюдавшегося значения, а для расчета свободной емкости бассейна была предложена формула:

$$E(U) = E_{\max} - A \lg(U + 1). \quad (2)$$

Параметры α , E_{\max} и A подлежат оценке по данным многолетних гидрометеорологических наблюдений для каждого конкретного речного бассейна [4, 5].

Суммарный слой стока половодья Y_n определяется путем прибавления к величине Y слоя базисного стока, определяемого по минимальным расходам воды предвесеннего периода. Слой стока за второй квартал Y_{II} определяется по его линейной и, как правило, весьма тесной зависимости от величины Y_n [11].

Формулы (1), (2) и подобные им являются физически обоснованными и в целом хорошо зарекомендовавшими себя на практике, однако они не исчерпывают возможности получения прогноза характеристик весеннего

стока. В целях повышения эффективности подготовки и выпуска прогнозов желательно, чтобы используемая эмпирическая формула 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.

С учетом данного обстоятельства на основе статистического анализа располагаемых для рассматриваемых речных бассейнов данных многолетних гидрометеорологических наблюдений и оценки применимости различных формул прогнозирования слоя стока за второй квартал Y_{II} мм был выбран вариант, в котором используются следующие предикторы:

S_{\max} мм – полученный по результатам снегомерных маршрутов и осредненный по территории водосбора максимальный запас воды в снежном покрове, известный к дате составления прогноза 25 марта и характеризующий поступление талых вод на поверхность водосбора;

$\ln(Q_{XI})$ – логарифм среднего расхода воды за ноябрь предыдущего года, характеризующий предзимнее увлажнение водосбора;

Q_{III} м³/с – средний расход воды за месяц, предшествующий дате выпуска прогноза, фактически – мартовский сток, и характеризующий базисный сток перед началом половодья.

В реально наблюдаемом диапазоне вероятных значений слоя стока за второй квартал и используемых предикторов зависимость Y_{II} от S_{\max} , $\ln(Q_{XI})$ и Q_{III} носит линейный характер, поэтому предлагаемая формула получения долгосрочного прогноза \tilde{Y}_{II} слоя стока за второй квартал имеет вид:

$$\tilde{Y}_{II} = a_0 + a_1 S_{\max} + a_2 \ln(Q_{XI}) + a_3 Q_{III}. \quad (3)$$

Параметры формулы (3) оценивались методом наименьших квадратов по ряду фигурирующих в ней переменных за период с 1968 по 2021 год продолжительностью $n = 54$ года. В течение этого периода в бассейне Тобола не произошло значительных климатических изменений условий формирования половодья, а антропогенная нагрузка стабилизировалась [3]. Для всех рассматриваемых речных створов значения этих параметров приведены в табл. 3.

При использовании формулы (3) необходимо иметь в виду, что в редких случаях, когда прогнозируемое значение \tilde{Y}_{II} оказывается отрицательным, его следует заменять нулем.

Таблица 3. Значения параметров формулы (3)**Table 3.** Values of the parameters of formula (3)

Река	a_0	a_1	a_2	a_3
Тобол	-4,80	-0,04	3,61	0,07
Уй	-0,65	0,16	17,34	0,18
Исеть	-76,0	0,18	22,05	0,21
Тура	-76,0	0,8	16,57	0,70
Ница	-74,4	0,52	28,17	0,16
Тавда	-83,4	0,77	17,25	-0,05
Сосьва	-35,8	0,38	26,59	0,61

Долгосрочное прогнозирование максимального уровня воды за период половодья

Для получения прогноза максимального уровня воды H_{\max} см за период весеннего половодья используется его зависимость от слоя стока половодья Y_n мм или слоя стока за второй квартал Y_{II} мм [11, 15]. Эта зависимость часто бывает нелинейной, что затрудняет ее применение [11, 15]. Пример такой зависимости представлен на рис. 2.

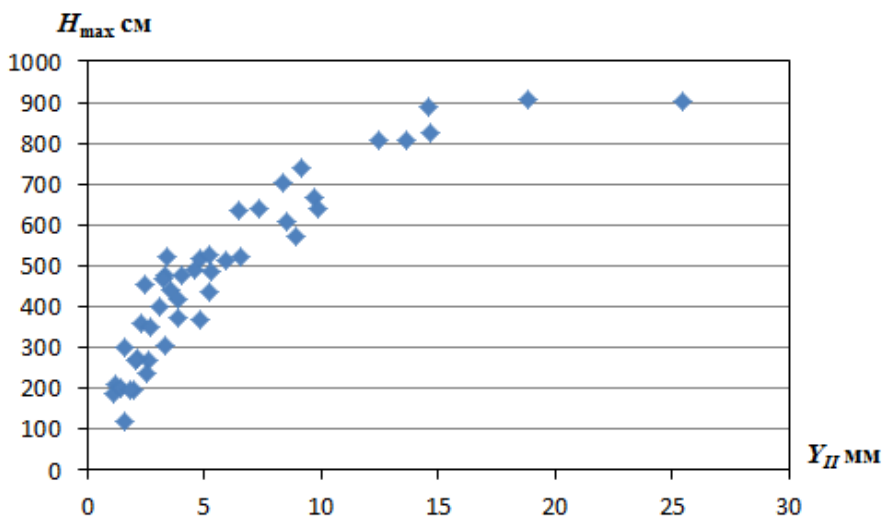


Рис. 2. Зависимость максимального уровня воды H_{\max} от слоя стока за второй квартал Y_{II} в створе р. Тобол – г. Курган.

Fig. 2. Dependence of the maximum water level on the runoff layer for the second quarter of the Tobol river – the Kurgan city.

Следует, однако, заметить, что при прогнозировании максимальных уровней воды используются не фактические значения слоя стока за половодье или за второй квартал, а их прогнозы. Содержащиеся в этих прогнозах ошибки увеличивают разброс точек на графике. Этот разброс маскирует особенности этого графика и, в частности, его нелинейность. В результате зависимость максимального уровня воды от прогноза слоя стока выравнивается. Пример такого эффекта представлен на рис. 3.

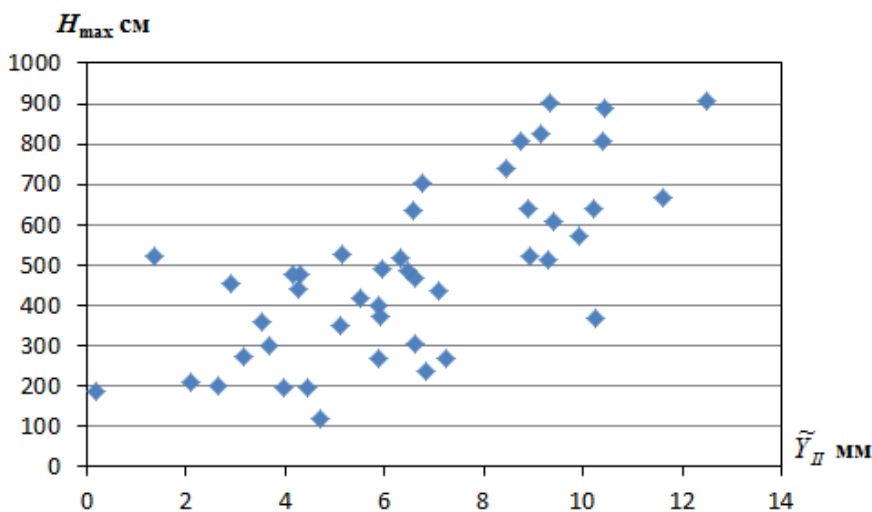


Рис. 3. Зависимость максимального уровня воды H_{max} от прогноза по формуле (3) слоя стока за второй квартал \tilde{Y}_{II} в створе р. Тобол – г. Курган.

Fig. 3. Dependence of the maximum water level on the forecast according to formula (3) of the runoff layer for the second quarter of the Tobol river – the Kurgan city.

Приблизительно линейный характер зависимости максимального уровня воды H_{max} от прогноза по формуле (3) слоя стока за второй квартал \tilde{Y}_{II} приводит к линейному виду зависимости максимального уровня воды за период половодья H_{max} от предикторов S_{max} , $\ln(Q_{XI})$ и Q_{III} . Это позволяет предложить следующую формулу получения долгосрочного прогноза \tilde{H}_{max} :

$$\tilde{H}_{max} = b_0 + b_1 S_{max} + b_2 \ln(Q_{XI}) + b_3 Q_{III}. \quad (4)$$

Максимальные уровни весеннего половодья на реках бассейна Тобола наблюдаются в апреле и мае [3, 10]. Следовательно, прогноз \tilde{H}_{max} по формуле (4) может быть получен 25 марта, когда значения всех предикторов уже известны. Параметры формулы (4) также оценивались методом

наименьших квадратов по ряду фигурирующих в ней переменных за период с 1968 по 2021 год. Для всех рассматриваемых речных створов значения этих параметров приведены в табл. 4.

Таблица 4. Значения параметров формулы (4)

Table 4. Values of formula parameters (4)

Река	b_0	b_1	b_2	b_3
Тобол	-62	-0,93	172,36	0,49
Уй	247,9	0,10	133,62	-6,97
Исеть	246,3	-0,08	7,95	4,74
Тура	-213	3,58	109,74	0,95
Ница	178,8	1,47	110,46	-1,78
Тавда	75,3	2,56	86,39	-0,50
Сосьва	283,0	1,08	54,50	4,95

Верификация методик долгосрочного прогнозирования характеристик весеннего стока рек бассейна Тобола

В целях верификации предлагаемых методик фактические значения прогнозируемой величины Z (слоя стока за второй квартал Y_{II} или максимального уровня воды H_{\max}) сравнивались с их прогнозами \tilde{Z} (прогнозом \tilde{Y}_2 или \tilde{H}_{\max}). Анализировался ряд ошибок проверочных прогнозов $Z_1 - \tilde{Z}_1, \dots, Z_n - \tilde{Z}_n$ за период с 1968 по 2021 год продолжительностью $n = 54$. Для всех рассматриваемых речных бассейнов средние значения ошибок проверочных прогнозов по предлагаемым методикам оказались равными нулю, то есть методики не дают систематических ошибок прогноза.

Согласно Наставлению по службе прогнозов [9] для среднеквадратической погрешности прогноза использована оценка:

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

где $k = 4$ – число оцениваемых параметров формул (3) или (4).

Полученная на зависимом материале, данная оценка систематически занижает погрешность прогноза. В соответствии с рекомендациями [2], данный недостаток устраняется путем перехода к несмещенной оценке

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

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 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 хорошей при $S/\sigma \leq 0,50$, удовлетворительной при $0,50 < S/\sigma \leq 0,80$ и неудовлетворительной при $S/\sigma > 0,80$ [9].

В табл. 5 приведены следующие показатели качества прогнозов слоя стока за второй квартал:

- коэффициент корреляции R между фактическими значениями и их прогнозами;
- среднеквадратическая погрешность прогноза S мм;
- показатель эффективности прогноза S/σ ;
- оправдываемость прогноза P , равная частоте случаев, когда абсолютные значения ошибок прогноза не превышали значение допустимой ошибки $0,674 \sigma$.

Таблица 5. Показатели качества прогнозов слоя стока за второй квартал по формуле (3)

Table 5. Quality indicators of forecasts of the runoff layer for the second quarter according to the formula (3)

Река	R	S	S/σ	$P, \%$
Тобол	0,73	2,4	0,43	83
Уй	0,69	14,6	0,71	67
Исеть	0,77	14,0	0,72	77
Тура	0,82	22,3	0,57	75
Ница	0,83	17,3	0,56	71
Тавда	0,75	21,3	0,67	86
Сосьва	0,68	24,1	0,73	68

Приведенные в табл. 5 показатели свидетельствуют о том, что для всех рассматриваемых бассейнов прогнозы слоя стока за второй квартал по предлагаемой методике могут быть отнесены к категории удовлетворительных или хороших (Тобол).

В табл. 6 приведены аналогичные показатели качества прогнозов максимального уровня воды за период половодья.

Таблица 6. Показатели качества прогнозов слоя стока за второй квартал по формуле (4)
Table 6. Quality indicators of forecasts of the runoff layer for the second quarter according to the formula (4)

Река	R	S	S/σ	$P, \%$
Тобол	0,75	143	0,61	69
Уй	0,71	82,7	0,71	68
Исеть	0,68	73,8	0,73	71
Тура	0,86	86,1	0,51	88
Ница	0,81	55,5	0,55	80
Тавда	0,73	78,2	0,67	66
Сосьва	0,66	77,0	0,75	64

Приведенные в табл. 6 показатели свидетельствуют о том, что для всех рассматриваемых бассейнов прогнозы максимального уровня воды за период половодья по предлагаемой методике также могут быть отнесены к категории удовлетворительных.

В целях демонстрации эффективности предлагаемой методики долгосрочного прогнозирования максимального уровня воды показатели ее качества для бассейна р. Тобол у г. Курган сравниваются с аналогичными показателями методики, разработанной в ФГБУ «Уральское УГМС» на основе рекомендаций, содержащихся в Руководстве по гидрологическим прогнозам [11]. Методика включает предварительное получение прогноза слоя весеннего половодья в зависимости от осредненных по территории водосбора максимальных запасов воды в снеге, осадков и температуры воздуха с третьей декады июля по дату установления снежного покрова предыдущего года. Для получения прогноза максимальных уровней воды используется их эмпирическая зависимость от значений слоя весеннего половодья.

Статистический анализ ряда ошибок прогноза по методике ФГБУ «Уральское УГМС» дал следующие результаты:

- 1) среднее значение ошибки прогноза равно $-85,4$ см;
- 2) среднеквадратическая погрешность прогноза $S = 183$ см;
- 3) отношение среднеквадратической погрешности прогноза (S) к стандартному отклонению прогнозируемой величины (σ) $S/\sigma = 0,78$;
- 4) оправдываемость прогнозов $P = 61$ %.

Согласно Наставлению по службе прогнозов [9], исходная методика также может быть признана удовлетворительной, однако она завышает максимальные уровни воды на 85,4 см, погрешность ее прогнозов значительно больше, а оправдываемость меньше, чем у предлагаемой методики.

Заключение

В отделе речных гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» разработаны методики, которые позволяют 25 марта каждого года получать долгосрочный прогноз слоя стока за второй квартал и прогноз максимального уровня воды за период весеннего половодья для семи рек бассейна Тобола. При разработке и проверке методик использованы данные многолетних гидрологических и метеорологических наблюдений за период с 1968 по 2021 год.

При получении схемы прогнозирования слоя стока за второй квартал учитывалась разработанная ранее Д.А. Бураковым методика прогнозирования слоя весеннего стока, однако состав предикторов и вид формулы получения прогноза были изменены. В качестве предикторов в предлагаемой методике использованы известные к дате составления прогноза осредненный по территории водосбора максимальный запас воды в снежном покрове, логарифм среднего расхода воды за ноябрь предыдущего года и средний расход воды за месяц, предшествующий дате выпуска прогноза. Эти предикторы, соответственно, характеризуют поступление талых вод на поверхность водосбора, его предзимнее увлажнение и базисный сток перед началом половодья.

В реальном диапазоне наблюдаемых значений зависимость слоя стока за второй квартал от используемых предикторов носит линейный характер, что и определило предлагаемую формулу получения прогноза.

Для всех рассматриваемых рек зависимость максимального уровня воды за период половодья от слоя стока за второй квартал носит ожидаемо нелинейный характер. Однако зависимость максимального уровня от получаемого по предлагаемой методике прогноза этого слоя искажается за счет содержащихся в этом прогнозе ошибок и приобретает линейный характер. Это позволило предложить линейную формулу получения прогноза максимального уровня воды в зависимости от предикторов, используемых для прогнозирования слоя стока за второй квартал.

Для каждого речного бассейна параметры формул получения прогноза слоя стока за второй квартал и максимального уровня воды за весеннее половодье оценены методом наименьших квадратов по данным многолетних гидрометеорологических наблюдений за период с 1968 по 2021 год. Анализ рядов проверочных прогнозов за этот период позволили рассчитать оправдываемость прогнозов и получить несмещенную оценку соотношения между погрешностью прогноза по каждой из предлагаемых методик и погрешностью соответствующего климатического прогноза. Полученные

оценки показывают, что в соответствии с действующим в нашей стране Наставлением по службе прогнозов [9] предлагаемые методики относятся к категории удовлетворительных для всех семи речных бассейнов.

Таким образом, предлагаемые методики могут быть рекомендованы для использования в системе оперативного гидрологического прогнозирования в целях научного обоснования мероприятий по использованию водных ресурсов рек бассейна Тобола и защите населения и хозяйственных объектов от наводнений в период весеннего половодья.

Список литературы

1. Большой географический атлас России / Под ред. Г.В. Борисова. М.: Изд-во АСТ, 2019. 224 с.
2. Борщ С.В., Христофоров А.В. Оценка качества прогнозов речного стока // Труды Гидрометцентра России. 2015. Специальный выпуск 355. 198 с.
3. Бубин М.С., Рассказова Н.С. Ритмичность многолетних колебаний стока рек как интегральный показатель изменчивости климата (на примере Урала). Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. 278 с.
4. Бураков Д.А. Воднобалансовые зависимости для прогнозов стока талых вод в лесной зоне Западно-Сибирской равнины // Труды зсРНИИГМИ. 1977. Вып. 35. С. 24-32.
5. Бураков Д.А., Литвинова О.С. Водно-балансовые зависимости для прогноза стока талых вод на юге Западно-Сибирской равнины // География и природные ресурсы. 2010. Вып. 3. С. 111-120.
6. Корень В.И. Математические модели в прогнозах речного стока. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 199 с.
7. Кучмент Л.С. Речной сток (генезис, моделирование, предвычисление). – М.: Изд-во ИВП РАН, 2008. 394 с.
8. Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н. Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М.: Изд-во Российской академии наук, 2019. 300 с.
9. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть 1. Прогнозы режима вод суши. Л.: Гидрометеоздат, 1962. 193 с.
10. Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Т. 11. Средний Урал и Приуралье. Вып. 2. Тобол / Под ред. В. В. Николаенко. Л.: Гидрометеоздат, 1965. 240 с.
11. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 1. Долгосрочные прогнозы элементов водного режима рек и водохранилищ. Л.: Гидрометеоздат, 1989. 356 с.
12. Davie T. Fundamentals of hydrology. Second edition. London, New York: Taylor & Francis, 2008. 221 p.
13. Dingman S.L. Physical Hydrology. New York Macmillan Publishing Company, 1993. 575 p.
14. Greco M., Cravetta A., Della Morte R. River flow. London: Taylor and Francis Group, 2004. 1024 p.
15. Guide to Hydrological Practices. Volume I. Hydrology – From Measurement to Hydrological Information // WMO-№ 168. Geneva, 2009. 738 p.
16. Guide to Hydrological Practices. Volume II. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices // WMO-No. 168. Geneva, 2009. 738 p.
17. Manual on Flood Forecasting and Warning. // WMO-No. 1072. Geneva, 2011. 138 p.

References

1. Bol'shoy geograficheskiy atlas Rossii [The Great Geographical Atlas of Russia] / Pod red. G.V. Borisova. Moscow, AST publ., 2019. 224 p. [in Russ.].

2. Borsch S.V., Khristoforov A.V. Hydrologic flow forecast verification. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2015, vol. 355, 198 p. [in Russ.].
3. Bubin M.S., Rasskazova N.S. Ritmichnost' mnogoletnih kolebaniy stoka rek kak integral'nyy pokazatel' izmenchivosti klimata (na primere Urala). Tomsk, Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2013, 278 z. [in Russ.].
4. Burakov D.A. Vodnobilansovye zavisimosti dlya prognozov stoka talyh vod v lesnoy zone Zapadno-Sibirskoy ravniny. *Trudy zsrNIIGMI*, 1977, vol. 35, pp. 24-32. [in Russ.].
5. Burakov D.A., Litvinova O.S. Water-balance dependencies for forecasting the melt water runoff in the south of the West-Siberian plain. *Geography and Natural Resources*, 2010, vol. 31, no. 3, pp. 269-277.
6. Koren' V.I. Matematicheskie modeli v prognozhah rechnogo stoka. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1991, 199 p. [in Russ.].
7. Kuchment L.S. Rechnoy stok (genезis, modelirovanie, predvychislenie). Moscow, Izd-vo IVP RAN, 2008, 394 p. [in Russ.].
8. Motovilov Yu.G., Gel'fan A.N. Modeli formirovaniya stoka v zadachah gidrologii rechnyh basseynov. M.: Izd-vo Rossiyskoy akademii nauk, 2019, 300 p. [in Russ.].
9. Nastavlenie po sluzhbe prognozov. Razdel 3. Part 1. Prognozy rezhima vod sushi. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1962, 193 p. [in Russ.].
10. Resursy poverhnostnyh vod SSSR: Gidrologicheskaya izuchennost'. T. 11. Sredniy Ural i Priural'e. Vyp. 2. Tobol. Pod red. V. V. Nikolaenko. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1965, 240 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. Davie T. *Fundamentals of hydrology.* Second edition. London, New York, Taylor & Francis, 2008, 221 p.
13. Dingman S.L. *Physical Hydrology.* New York Macmillan Publishing Company, 1993, 575 p.
14. Greco M., Cravetta A., Della Morte R. *River flow.* London, Taylor and Francis Group, 2004. – 1024 p.
15. *WMO-No. 168. Guide to Hydrological Practices. Vol. I. Hydrology – From Measurement to Hydrological Information.* WMO, Geneva, 2009, 738 p.
16. *WMO-No. 168. Guide to Hydrological Practices. Vol. II. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices.* WMO, Geneva, 2009, 738 p.
17. *WMO-No. 1072. Manual on Flood Forecasting and Warning. WMO-No. 1072.* Geneva, 2011, 138 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.*