

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2024-2-111-129>

УДК 556.06

Прогнозирование характеристик половодья 2024 года на реках Ишим, Тобол и Урал

***С.В. Борщ, 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*

В ФГБУ «Гидрометцентр России» разработаны методики прогнозирования характеристик весеннего половодья, которые были реализованы для восьми створов на реках Ишим, Тобол и Урал в 2024 году. Специфика методик состоит в простоте их получения и реализации для конкретного участка реки и возможности быстрой корректировки прогнозов по мере поступления текущей информации.

Максимальный уровень воды в прогнозируемом речном створе определялся по его зависимости от максимального уровня воды в створе, расположенном выше по течению. Дата прохождения пика половодья прогнозировалась с учетом даты прохождения пика в выше расположенном створе и вероятных значений времени его добегаания от верхнего створа до прогнозируемого нижнего. Дата снижения уровня воды до отметки опасного явления прогнозировалась с учетом высоты и даты прохождения пика половодья с использованием расчетной кривой спада, полученной путем статистического анализа спадов половодья, наблюдавшихся в прежние годы. Дата снижения уровня воды до отметки неблагоприятного явления прогнозировалась путем экстраполяции спада половодья, наблюдавшегося в течение 10–15 дней после прохождения пика половодья. Средняя заблаговременность прогнозов составляет 9 суток.

Прогнозы выпускались в детерминированной и вероятностной формах и дали удовлетворительные результаты, которые были использованы при организации и проведении мероприятий по защите населения и хозяйственных объектов от наводнений, наблюдавшихся в 2024 году. Эффективность разработанных методик позволяет рекомендовать их для использования при прогнозировании характеристик половодья в различных регионах России.

Ключевые слова: характеристики половодья, речной створ, уровень воды, статистический анализ, прогноз, детерминированная и вероятностная форма, защита от наводнений.

Forecasting the characteristics of the flood in 2024 on the Ishim, Tobol and Ural rivers

***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*

The Hydrometeorological Center of Russia has developed a system of methods for forecasting spring flood characteristics, which was implemented for eight stations on the Ishim, Tobol, and Ural rivers in 2024. Specific features of the methods are the simplicity of their obtaining and implementation for a particular river reach and a possibility of the fast correction of forecasts as the current information is available.

The peak water level at the station was predicted based on its dependence on the peak water level at the upstream station. The date of the flood peak was predicted with account of the data of the peak at the upstream station and probable values of the travel time from the upstream gauge to the predicted downstream one. The date of the water level drop to the level of a severe event was forecasted taking into account the height and date of the flood peak using the calculated recession curve obtained by the statistical analysis of flood recessions in the previous years. The date of the water level drop to the level of an adverse event was predicted by extrapolating the flood recession observed during 10–15 days after the flood peak. The mean forecast lead time is 9 days.

The forecasts were issued in a deterministic and probabilistic form and gave quite satisfactory results, which were used in the organization and implementation of measures to protect the population and economic facilities from the floods observed in 2024. The efficiency of the developed methods allows recommending them for use in predicting flood characteristics in various regions of Russia.

Keywords: flood characteristics, river gauge, water level, statistical analysis, forecast, deterministic and probabilistic form, flood protection

Введение

Среди задач, решаемых в рамках теории и практики гидрологических прогнозов, особое место занимает прогнозирование высоких половодий и паводков и предупреждение о вызываемых ими наводнениях. В условиях роста частоты и интенсивности опасных гидрологических явлений совершенствование таких прогнозов не только актуально, но и жизненно важно для широкого круга потребителей прогностической продукции, так как повышение их надежности и увеличение их заблаговременности в значительной степени определяет эффективность мероприятий по защите населения и хозяйственных объектов [1, 10, 14, 17, 20].

Вопросы предупреждения об опасных природных явлениях, в том числе о прохождении опасных паводков и наводнений на реках, находятся в приоритете у национальных гидрометеорологических служб, а также различных международных организаций, включая Всемирную метеорологическую организацию [13, 18, 21, 22].

Для прогнозирования характеристик половодий и паводков современная гидрология располагает достаточно широким и постоянно совершенствующимся арсеналом средств. Он включает различные концептуальные и физико-математические модели формирования речного стока на водосборе и трансформации волн половодий и паводков в русловой сети. В качестве упрощенного варианта используются физико-статистические зависимости прогнозируемой величины от известных к дате составления прогноза характеристик основных гидрометеорологических факторов, ее определяющих [4, 6–8, 11, 12, 15, 19].

В условиях экстремально высоких половодий, которые в 2024 году имели место на реках Ишим, Тобол и Урал, использование указанных методов прогнозирования сталкивается с определенными трудностями, которые обусловлены следующими причинами.

1. При выходе воды на пойму и при ее последующем широком разливе на отдельных участках реки временно могут формироваться рукава и протоки с различными скоростями течения, а также участки со стоячей водой [2, 5, 10, 16]. Такие участки реки временно представляют новый водный объект, располагаемые данные наблюдений за которым могут оказаться недостаточными или вообще отсутствовать. В результате параметры схемы получения прогноза, оценка которых выполнялась на основе гидрометеорологической информации за предыдущие годы, могут не соответствовать условиям прогнозируемого экстремального половодья. А это может негативно сказаться на точности прогнозов [2, 10, 12].

2. Модели формирования речного стока на водосборе и трансформации волны половодья в русловой сети требуют достаточно надежной информации о расходах воды. В то же время при широком разливе реки, русловых трансформациях, формировании новых рукавов и протоков измерение расходов воды или их определение путем экстраполяции зависимости расходов от уровней воды представляют трудноразрешимые задачи и не могут давать надежных результатов [1, 4, 7, 12, 17, 19].

3. Большинство располагаемых методов прогнозирования характеристик половодья пока мало приспособлены для достаточно быстрого и, следовательно, минимально трудоемкого уточнения прогнозов по мере регулярно поступающей информации об изменении уровня воды и площади затопления речной поймы. Преодоление этого недостатка и эффективное реагирование на поступающую информацию возможно на основе разработки, совершенствования и внедрения автоматизированных систем подготовки и выпуска прогнозов [4].

В ФГБУ «Гидрометцентр России» разработана система методик краткосрочного, среднесрочного и долгосрочного прогнозирования характеристик весеннего половодья, которая была реализована для рек Ишим, Тобол и Урал в 2024 году. Методики основаны на статистическом анализе данных наблюдений за уровнями воды в различных створах указанных рек.

Специфика разработанных методик состоит в простоте их получения и реализации для конкретного участка реки и возможности быстрой корректировки прогнозов по мере поступления текущей информации. Полученные с их помощью прогнозы оказались вполне удовлетворительными и были использованы при организации и проведении мероприятий по защите населения и хозяйственных объектов от наводнений, наблюдавшихся в 2024 году в Оренбургской, Курганской и Тюменской областях. Изложению этих методик и анализу полученных результатов и посвящена настоящая статья.

1. Прогнозирование максимальных уровней воды в период весеннего половодья

Максимальные уровни воды за период весеннего половодья 2024 года прогнозировались для четырех створов на реке Ишим, двух створов на реке Тобол и двух створов на реке Урал. Для получения прогнозов использовались данные гидрологических наблюдений с 1985 по 2023 год.

Использован частный случай классического метода соответственных уровней, предназначенного для прогнозирования трансформации волн половодий и паводков на участке реки с незначительным или синхронным промежуточным притоком [12].

Максимальный уровень воды в нижнем створе $H_{\max,H}$ см определялся в зависимости от уже наблюдавшегося максимального уровня воды в верхнем створе $H_{\max,B}$ см. Индексы, названия верхних и нижних створов и расстояния между ними помещены в табл. 1.

Таблица 1. Верхние и нижние створы на реках Ишим, Тобол и Урал
Table 1. Upper and lower gauges on the Ishim, Tobol and Ural rivers

| Верхний створ | Нижний створ | Расстояние |
|---|-----------------------------------|------------|
| 11410 р. Ишим – г. Петропавловск | 11411 р. Ишим – с. Ильинка | 147 км |
| 11411 р. Ишим – с. Ильинка | 11412 р. Ишим – г. Ишим | 168 км |
| 11412 р. Ишим – г. Ишим | 11413 р. Ишим – пгт Абатский | 142 км |
| 11413 р. Ишим – пгт Абатский | 11414 р. Ишим – с. Викулово | 135 км |
| 12010 р. Тобол – с. Звериноголовское | 12014 р. Тобол – г. Курган | 194 км |
| 12014 р. Тобол – г. Курган | 12018 р. Тобол – г. Ялуторовск | 278 км |
| 19054 р. Урал – г. Орск | 19063 р. Урал – г. Оренбург | 430 км |
| 19063 р. Урал – г. Оренбург | 19070 р. Урал – с. Илек | 209 км |

Для получения зависимости уровня $H_{\max,H}$ от уровня $H_{\max,B}$ использовались их фактические значения, наблюдавшиеся в течение указанного выше многолетнего периода. Тесноту и степень линейности этой зависимости характеризует коэффициент корреляции между величинами $H_{\max,H}$ и $H_{\max,B}$. Для всех речных участков он варьирует от 0,88 до 0,99. Однако в отличие от обычных случаев применения метода соответственных уровней, когда река не выходит за пределы своего русла, при высоких половодьях на рассматриваемых реках зависимости между максимальными

уровнями воды в верхнем и нижнем створах оказались нелинейными с изменением выпуклости графика функции (рис. 1). Это обусловлено тем, что при выходе воды на пойму и при ее последующем широком разливе характер зависимости уровня $H_{\max,H}$ от уровня $H_{\max,B}$ меняется. В связи с этим было принято решение описывать такую зависимость с помощью полинома третьей степени и получать прогноз по формуле:

$$\tilde{H}_{\max,H} = P_3(H_{\max,B}) = a_0 + a_1 H_{\max,B} + a_2 H_{\max,B}^2 + a_3 H_{\max,B}^3. \quad (1)$$

Выбор полинома третьей степени обусловлен тем, что это простейший вариант описания функции, меняющей выпуклость.

Параметры формулы (1) оценивались методом наименьших квадратов по ряду значений максимальных уровней воды в верхнем и нижнем створах за период с 1985 по 2023 год. Устойчивость полученной зависимости $H_{\max,H}$ от $H_{\max,B}$ для всех рассматриваемых речных створов подтверждается тем обстоятельством, что добавление данных за 2024 год практически не изменило оценки параметров формулы (1) и точность расчета максимальных уровней воды в нижнем створе.

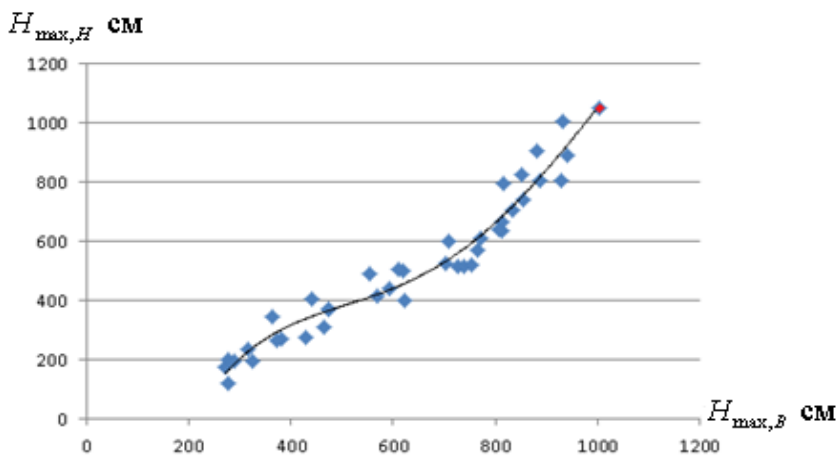


Рис. 1. Зависимость максимального уровня воды $H_{\max,H}$ в створе р. Тобол – г. Курган от максимального уровня воды $H_{\max,B}$ в створе р. Тобол – с. Звериноголовское.

Fig. 1. Dependence of the maximum water level $H_{\max,H}$ in the gauge of the Tobol river – Kurgan on the maximum water level $H_{\max,B}$ in the gauge of the Tobol River – Zverinogolovskoye village.

Во избежание ситуации, при которой прогноз максимального уровня оказывается ниже его фактического значения, все прогнозы по формуле (1) округлялись в большую сторону с точностью до 10 см.

Процедуру прогнозирования демонстрирует рис. 1, на котором показано поле фактических точек и график функции $\tilde{H}_{\max,H} = P_3(H_{\max,B})$. Полученный для 2024 года прогноз максимального уровня воды в створе р. Тобол – г. Курган выделен красной точкой.

Среднеквадратическая погрешность определяемого формулой (1) прогноза максимального уровня воды в нижнем створе $\tilde{H}_{\max,H}$ равна:

$$\tilde{S}_H = S_H \sqrt{1 - R^2}, \quad (2)$$

где S_H – оценка стандартного отклонения ряда фактических значений $H_{\max,H}$ за весь период наблюдений с 1985 по 2023 год; R – коэффициент корреляции между величинами $H_{\max,H}$ и $P_3(H_{\max,B})$ [3].

Для получения прогноза в вероятностной форме для каждого речного створа рассчитаны допустимые верхний и нижний пределы максимального уровня воды в нижнем створе при уровне значимости 10 %:

$$a(90\%) = \tilde{H}_{\max,H} - 1,645 * \tilde{S}_H; b(90\%) = \tilde{H}_{\max,H} + 1,645 * \tilde{S}_H. \quad (3)$$

При нормальном распределении вероятностей ошибок прогноза по формуле (1) фактические значения максимального уровня воды $H_{\max,H}$ с вероятностью 90 % должны попадать в интервал от нижнего предела $a(90\%)$ до верхнего предела $b(90\%)$ [3, 9].

Составление прогноза возможно через сутки после наступления пика половодья в верхнем створе, так как после прохождения пика в верхнем створе необходимо выждать хотя бы сутки, чтобы убедиться, что это был пик. Заблаговременность прогноза ΔT равна разности $T_H - T_{\text{пр}}$ между датой наступления пика в прогнозируемом нижнем створе T_H и датой составления прогноза $T_{\text{пр}}$.

В табл. 2 для каждого речного створа приведены: дата составления прогноза $T_{\text{пр}}$; заблаговременность прогноза ΔT суток; фактическое значение максимального уровня воды в 2024 году в прогнозируемом нижнем створе $H_{\max,H}$ см; его прогноз $\tilde{H}_{\max,H}$ см; коэффициент корреляции R между величинами $H_{\max,H}$ и $P_3(H_{\max,B})$; среднеквадратическая погрешность прогноза \tilde{S}_H см; округленные с точностью до 10 см границы доверительного интервала $a(90\%)$ и $b(90\%)$.

Данные табл. 2 показывают, что заблаговременность прогноза ΔT варьирует от 2 до 25 суток и в среднем равна 7,5 суткам. Таким образом, прогнозы относятся к категории краткосрочных, среднесрочных и даже долгосрочных.

В результате округления и завышения прогнозов все ошибки прогноза $\tilde{H}_{\max,H} - H_{\max,H}$ положительные, варьируют от 4 до 47 см и в среднем равны 23 см. Самую большую ошибку 47 см дал прогноз для створа

р. Тобол – г. Ялуторовск. Однако заблаговременность этого прогноза составляет 25 суток, то есть он является долгосрочным.

Таблица 2. Прогноз максимального уровня воды в 2024 году

Table 2. Forecast of the maximum water level in 2024

| Река | Пункт | $T_{ПР}$ | ΔT | $H_{\max,H}$ | $\tilde{H}_{\max,H}$ | R | $\tilde{\sigma}_H$ | $a(90\%)$ | $b(90\%)$ |
|-------|---------------|----------|------------|--------------|----------------------|-------|--------------------|-----------|-----------|
| Ишим | с. Ильинка | 14.04 | 4 | 891 | 900 | 0,996 | 20 | 870 | 930 |
| Ишим | г. Ишим | 19.04 | 3 | 1064 | 1090 | 0,993 | 39 | 1020 | 1160 |
| Ишим | пгт Абатский | 23.04 | 10 | 1236 | 1240 | 0,994 | 34 | 1180 | 1300 |
| Ишим | с. Викулово | 04.05 | 3 | 1168 | 1200 | 0,991 | 37 | 1140 | 1260 |
| Тобол | г. Курган | 13.04 | 7 | 1015 | 1050 | 0,987 | 39 | 980 | 1120 |
| Тобол | г. Ялуторовск | 21.04 | 25 | 743 | 790 | 0,919 | 57 | 700 | 880 |
| Урал | г. Оренбург | 09.04 | 5 | 1187 | 1200 | 0,974 | 39 | 1130 | 1270 |
| Урал | с. Илек | 15.04 | 3 | 918 | 940 | 0,990 | 20 | 910 | 970 |

Согласно данным табл. 2, все фактические значения $H_{\max,H}$ попали в соответствующие доверительные интервалы от $a(90\%)$ до $b(90\%)$ см. Следовательно, прогнозы максимального уровня воды в вероятностной форме имеют стопроцентную оправдываемость.

2. Прогнозирование сроков прохождения максимальных уровней воды

Необходимым дополнением к прогнозу $\tilde{H}_{\max,H}$ максимального уровня в заданном (нижнем) речном створе является прогноз даты его прохождения T_H . Оба прогноза составляются одновременно [12]. При известной дате прохождения пика половодья в верхнем створе T_B время добегания, то есть разность Δt между датами наступления максимальных уровней воды в верхнем и нижнем створах, определяет дату $T_H = T_B + \Delta t$ прохождения пика в прогнозируемом речном створе. Следовательно, необходим прогноз времени добегания Δt волны половодья на заданном участке реки.

В обычных случаях применения метода соответственных уровней, когда река не выходит за пределы своего русла, дата T_H прогнозируется на основе зависимости времени добегания Δt от максимального уровня воды в верхнем створе $H_{\max,B}$. Зависимость $\Delta t(H_{\max,B})$ носит убывающий характер, так как в этих условиях с повышением уровня воды возрастает скорость течения и, как результат, увеличивается скорость продвижения волны половодья по руслу [12, 19].

Анализ многолетних данных гидрологических наблюдений показал, что для рассматриваемых участков рек при прохождении высоких половодий статистически достоверная связь между величинами Δt и $H_{\max, B}$ отсутствует. Это может объясняться следующими причинами.

1. При выходе воды на пойму и ее последующем широком разливе на отдельных участках реки временно могут формироваться рукава и протоки с различными скоростями течения, а также участки со стоячей водой. Для пойменных участков характерна значительно меньшая глубина потока и более значительная шероховатость его ложа. В результате при высоких уровнях воды средняя скорость течения реки и скорость продвижения волны половодья могут снижаться, а время добегаания волны половодья может возрастать [5, 10, 16].

2. Для рассматриваемых речных створов характерны типичные для больших равнинных рек плавные очертания гидрографов половодья с нечетко выраженной вершиной и медленным спадом, на который в отдельные годы могут накладываться дождевые паводки и попуски из водохранилищ [5]. Самые высокие уровни воды наблюдаются в течение достаточно продолжительного периода, а четко выраженный пик половодья отсутствует. В таких условиях в каждом речном створе дата с максимальным уровнем воды зависит от непредсказуемых обстоятельств и может случайным образом варьировать в пределах нескольких дней. Разность Δt между датами наступления максимальных уровней воды в верхнем и нижнем створах может случайным образом варьировать в еще больших пределах.

Получение прогноза даты прохождения пика половодья включает следующие этапы.

- Для каждого прогнозируемого речного створа анализируется ряд фактических значений Δt , наблюдавшихся в течение периода с 1985 по 2023 год.

- Неправдоподобно большие и неправдоподобно малые, тем более отрицательные значения Δt , должны быть отброшены.

- По сокращенному таким образом ряду продолжительностью не менее 25 лет должны быть получены оценки среднего значения $M(\Delta t)$ и стандартного отклонения $S(\Delta t)$.

Границы доверительного интервала для вероятных значений Δt определяются нижним $\min(\Delta t)$ и верхним $\max(\Delta t)$ пределами:

$$\min(\Delta t) = M(\Delta t) - 1,645 * S(\Delta t), \max(\Delta t) = M(\Delta t) + 1,645 * S(\Delta t). \quad (4)$$

Ожидаемое значение времени добегаания волны половодья Δt должно попадать в доверительный интервал от нижнего предела $\min(\Delta t)$ до верхнего предела $\max(\Delta t)$ с вероятностью, близкой к 90 %.

В табл. 3 для каждого речного створа приведены: дата T_B прохождения пика половодья в вышерасположенном створе; дата T_H прохождения пика в нижерасположенном створе; разность между этими датами Δt в 2024 году. Там же приведены округленные с точностью до суток среднее значение $M(\Delta t)$, стандартное отклонение $S(\Delta t)$; нижний $\min(\Delta t)$ и верхний $\max(\Delta t)$ пределы доверительного интервала для времени добегания пика половодья Δt .

Таблица 3. Характеристики времени добегания Δt пика половодья в 2024 году

Table 3. Characteristics of the time of reaching Δt the peak of the flood in 2024

| Река | Пункт | T_B | T_H | Δt | $M(\Delta t)$ | $S(\Delta t)$ | $\min(\Delta t)$ | $\max(\Delta t)$ |
|-------|---------------|-------|-------|------------|---------------|---------------|------------------|------------------|
| Ишим | с. Ильинка | 13.04 | 18.04 | 5 | 8,5 | 3,6 | 3 | 14 |
| Ишим | г. Ишим | 18.04 | 22.04 | 4 | 6,6 | 2,9 | 2 | 11 |
| Ишим | пгт Абатский | 22.04 | 03.05 | 11 | 9,3 | 2,2 | 6 | 13 |
| Ишим | с. Викулово | 03.05 | 07.05 | 4 | 7,2 | 3,5 | 1 | 13 |
| Тобол | г. Курган | 12.04 | 20.04 | 8 | 9,8 | 2,8 | 5 | 14 |
| Тобол | г. Ялуторовск | 20.04 | 16.05 | 26 | 23 | 7 | 11 | 34 |
| Урал | г. Оренбург | 08.04 | 14.04 | 6 | 10,1 | 2,8 | 5 | 15 |
| Урал | с. Илек | 14.04 | 18.04 | 4 | 5,1 | 2,6 | 1 | 9 |

Помещенные в табл. 3 данные показывают, что для всех речных створов фактические значения Δt попали в соответствующие доверительные интервалы.

Прогноз \tilde{T}_H даты прохождения пика в нижнем створе определяется путем прибавления среднего значения времени добегания $M(\Delta t)$ к дате T_B прохождения пика в верхнем створе, то есть $\tilde{T}_H = T_B + M(\Delta t)$.

Вероятностная форма прогноза даты T_H определяется границами доверительного интервала, в который эта дата должна попасть с вероятностью приблизительно равной 90 %:

$$\min(T_H) = T_B + \min(\Delta t); \quad \max(T_H) = T_B + \max(\Delta t). \quad (5)$$

В табл. 4 для каждого речного створа приведены: дата составления прогноза T_{IP} ; заблаговременность прогноза $\Delta T = T_H - T_{IP}$; фактическая дата прохождения пика половодья в прогнозируемом нижнем створе в 2024 году T_H ; ее прогноз \tilde{T}_H ; прогнозируемые пределы $\min(T_H)$ и $\max(T_H)$ вероятных значений этой даты.

Таблица 4. Прогноз даты прохождения пика половодья в 2024 году**Table 4.** Forecast of the date of the flood peak in 2024

| Река | Пункт | $T_{пр}$ | ΔT | T_H | \tilde{T}_H | $\min(T_H)$ | $\max(T_H)$ |
|-------|---------------|----------|------------|-------|---------------|-------------|-------------|
| Ишим | с. Ильинка | 14.04 | 4 | 18.04 | 21.04 | 16.04 | 27.04 |
| Ишим | г. Ишим | 19.04 | 3 | 22.04 | 24.04 | 20.04 | 29.04 |
| Ишим | пгт Абатский | 23.04 | 10 | 03.05 | 01.05 | 28.04 | 05.05 |
| Ишим | с. Викулово | 04.05 | 3 | 07.05 | 10.05 | 04.05 | 16.05 |
| Тобол | г. Курган | 13.04 | 7 | 20.04 | 21.04 | 17.04 | 26.04 |
| Тобол | г. Ялуторовск | 21.04 | 25 | 16.05 | 13.05 | 02.05 | 25.05 |
| Урал | г. Оренбург | 09.04 | 5 | 14.04 | 18.04 | 13.04 | 23.04 |
| Урал | с. Илек | 14.04 | 3 | 18.04 | 19.04 | 15.04 | 23.04 |

Прогнозы даты прохождения пика половодья имеют ту же заблаговременность ΔT , что и прогнозы высоты этого пика. Она варьирует от 3 до 25 суток и в среднем равна 7,5 суткам. Таким образом, прогнозы относятся к категории краткосрочных, среднесрочных и даже долгосрочных.

Согласно данным табл. 4, абсолютные значения ошибки прогноза $\tilde{T}_H - T_H$ варьируют от 1 до 4 суток и в среднем равны 3 суткам. Все фактические значения T_H попали в соответствующие доверительные интервалы от $\min(T_H)$ до $\max(T_H)$. Следовательно, прогнозы даты прохождения максимального уровня воды в вероятностной форме имеют стопроцентную оправдываемость.

Примером описанной процедуры является получение вероятностной формы прогноза прохождения пика половодья в створе р. Тобол – г. Курган в 2024 году. В расположенном выше по течению створе р. Тобол – с. Звериноголовское пик половодья прошел 12 апреля. Согласно табл. 3, минимальное и максимальное вероятное время добегания волны половодья между этими створами равны $\min(\Delta t) = 5$ суток и $\max(\Delta t) = 14$ суток. Следовательно, с вероятностью приблизительно 90 % пик половодья в створе р. Тобол – г. Курган должен был пройти с 17 по 26 апреля 2024 года. Фактически этот пик наблюдался 20 апреля, то есть прогноз даты прохождения максимального уровня воды в реке Тобол у города Курган полностью оправдался.

3. Прогнозирование спада половодья до отметки опасного явления

Важнейшей прогнозируемой характеристикой спада половодья является дата $T_{оя}$ снижения уровня воды до отметки $H_{оя}$ опасного явления, превышение которой может наносить большой материальный ущерб и представлять угрозу здоровью и жизни людей. Критические уровни воды

$H_{OЯ}$ назначаются УГМС и для рассматриваемых речных створов их значения приведены ниже в табл. 6.

Прогнозирование даты $T_{OЯ}$ возможно после того, как максимальный уровень половодья H_{max} и дата его прохождения T_{max} уже известны. В предлагаемой методике используется предварительный прогноз кривой спада уровней воды $H(t)$, в которой время t измеряется в сутках после даты прохождения пика половодья, так что дате его пика T_{max} соответствует значение $t = 0$. Функцию предлагается описывать уравнением:

$$H(t) = H_{min} + (H_{max} - H_{min}) * F(t), \quad (6)$$

где H_{min} – минимальный за весь период наблюдений уровень воды в конце спада половодья в летне-осенний период; $F(t)$ – некоторая функция, которая предполагается общей для спада половодья в рассматриваемом речном створе за все годы, в которые пик половодья был достаточно высоким и дождевые паводки не накладывались на его спад. Функция $F(t)$ равна единице при $t = 0$ и убывает до нуля с ростом t .

Минимальный уровень воды H_{min} , до которого при отсутствии значительных дождей может снижаться кривая спада половодья $H(t)$, определяется по фактическим данным гидрологических наблюдений в прогнозируемом речном створе.

При наличии года под номером i с четко выраженной кривой спада $H_i(t)$ и высоким максимальным уровнем воды $H_{max,i}$ оценка функции $F(t)$ определяется формулой:

$$F_i(t) = \left[\frac{H_i(t) - H_{min}}{H_{max,i} - H_{min}} \right]. \quad (7)$$

Успешность оценки функции $F_i(t)$ по формуле (7) зависит от правильности выбора года с четко выраженным спадом достаточно высокого половодья.

После того, как оценка функции $F_i(t)$ по формуле (7) получена, ее следует подставлять в формулу (6), которая для года под номером i даст оценку кривой спада $H_i(t)$. Эта функция равна уже известному для прогнозируемого половодья максимальному уровню воды H_{max} при $t = 0$ и убывает до минимального уровня H_{min} с ростом t . Данную процедуру следует выполнить для $k = 2 - 6$ подходящих лет. В результате будут получены частные прогнозы $H_1(t)$, ..., $H_k(t)$ ожидаемого спада уровней при максимуме H_{max} с датой его прохождения T_{max} .

Свидетельством обоснованности использования основной формулы (6) и успешности выбора лет и получения оценок $H_i(t)$ являются близкие

значения функций $H_1(t), \dots, H_k(t)$ при всех значениях t . Для каждого из рассматриваемых створов на реках Ишим, Тобол и Курган такие функции оказались достаточно близкими. В качестве примера на рис. 2 представлены три прогнозные оценки кривой спада уровней половодья 2024 года в створе р. Урал – г. Оренбург, полученные по данным за 1988 год с максимальным уровнем 842 см, за 1998 год с максимальным уровнем 907 см и за 2005 год с максимальным уровнем 894 см.

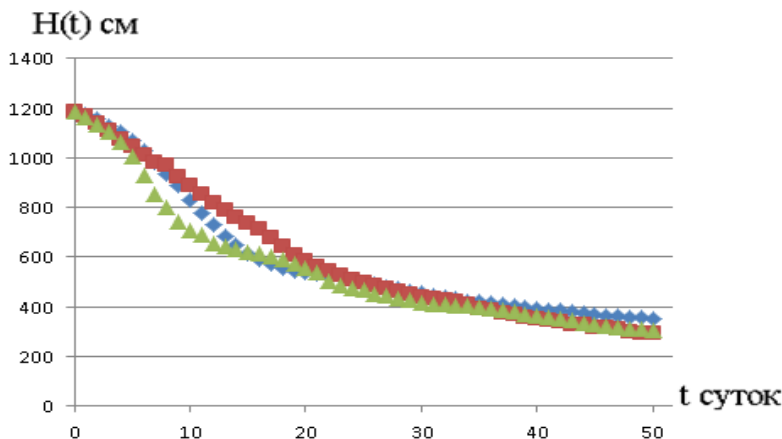


Рис. 2. Оценки кривой спада половодья 2024 года в створе р. Урал – г. Оренбург по данным 1988 года (синим), 1998 года (красным), 2005 года (зеленым).

Fig. 2. Estimates of the 2024 flood recession curve in the gauge of the Ural river – Orenburg according to data from 1988 (blue), 1998 (red), 2005 (green).

Расчетную кривую спада половодья $\tilde{H}(t)$ следует получать путем осреднения частных прогнозов $H_1(t), \dots, H_k(t)$. При этом время t следует перевести в календарные даты с учетом даты T_{\max} прохождения пика половодья.

Прогноз $\tilde{T}_{OЯ}$ даты снижения уровня воды до отметки $H_{OЯ}$ опасного явления на основе расчетной кривой спада определяется из условия:

$$\tilde{H}(\tilde{T}_{OЯ} - 1) \geq H_{OЯ}, \quad \tilde{H}(\tilde{T}_{OЯ}) < H_{OЯ}. \quad (8)$$

Для удобства получения прогнозов даты $\tilde{T}_{OЯ}$ расчетную кривую спада удобно представлять в табличном виде. В качестве примера в табл. 5 приведены ординаты прогноза кривой спада половодья 2024 года $\tilde{H}(t)$ в створе р. Урал – г. Оренбург.

Таблица 5. Ординаты прогноза расчетной кривой спада половодья 2024 года $\tilde{H}(t)$ в створе р. Урал – г. Оренбург

Table 5. Ordinates of the forecast of the calculated curve of the flood recession in 2024 $\tilde{H}(t)$ in the gauge of the Ural river – Orenburg

| Дата t | $\tilde{H}(t)$ | Дата t | $\tilde{H}(t)$ |
|--------------|----------------|----------|----------------|
| 14.04 | 1187 | 24.04 | 809 |
| 15.04 | 1168 | 25.04 | 773 |
| 16.04 | 1141 | 26.04 | 735 |
| 17.04 | 1115 | 27.04 | 704 |
| 18.04 | 1080 | 28.04 | 680 |
| 19.04 | 1040 | 29.04 | 658 |
| 20.04 | 990 | 30.04 | 639 |
| 21.04 | 939 | 01.05 | 618 |
| 22.04 | 899 | 02.05 | 597 |
| 23.04 | 850 | 03.05 | 576 |

В соответствие с данными табл. 5, для половодья 2024 года в створе р. Урал – г. Оренбург при $H_{OЯ} = 930$ см спад уровня воды до отметки опасного явления прогнозировалось на дату $\tilde{T}_{OЯ} = 22.04.2024$, которая в таблице выделена жирным шрифтом.

Предлагаемая методика позволяет прогнозировать дату снижения уровня воды до отметки опасного явления уже через сутки после прохождения пика половодья, то есть с максимально возможной заблаговременностью. Прогнозы $\tilde{T}_{OЯ}$ могут давать более ранние даты по сравнению с фактическими датами $T_{OЯ}$. Это обусловлено следующими причинами.

1. При получении расчетной кривой спада $H(t)$ по формуле (6) учитывается минимальный за весь период наблюдений уровень воды в конце спада половодья в летне-осенний период H_{\min} . При спаде прогнозируемого половодья уровень воды, скорее всего, будет снижаться до более высокой отметки.

2. При получении используемой в формуле (6) вспомогательной функции $F(t)$ и расчетной кривой спада прогнозируемого половодья $H(t)$ использовались данные о фактически наблюдавшихся высоких половодьях с четко выраженным, а, следовательно, с максимально быстрым спадом. Спад прогнозируемого экстремально высокого половодья может происходить медленнее за счет более продолжительного освобождения от воды максимально затопленной поймы.

Примером задержки спада половодья служит ситуация в створах на реке Ишим.

В створе р. Ишим – с. Ильинка в 2024 году наблюдались два четко выраженных пика половодья. Первый пик с максимальным уровнем воды наблюдался 18 апреля, а второй, более низкий пик – 29 апреля. В связи с этим 30 апреля был выпущен уточняющий прогноз, результаты которого приведены в табл. 6.

Таблица 6. Прогноз даты спада уровней воды до отметки $H_{ОЯ}$ в 2024 году

Table 6. Forecast of the date of the decline of water levels to the dangerous mark in 2024

| Река | Пункт | $H_{ОЯ}$ | $T_{ПР}$ | $T_{ОЯ}$ | $\tilde{T}_{ОЯ}$ | $\min \tilde{T}_{ОЯ}$ | $\max \tilde{T}_{ОЯ}$ | ΔT |
|-------|-------------|----------|----------|----------|------------------|-----------------------|-----------------------|------------|
| Ишим | с. Ильинка | 800 | 30.04 | 11.05 | 10.05 | 07.05 | 13.05 | 11 |
| Ишим | г. Ишим | 850 | 02.05 | 21.05 | 22.05 | 19.05 | 25.05 | 19 |
| Тобол | г. Курган | 850 | 21.04 | 30.04 | 01.05 | 28.04 | 04.05 | 9 |
| Урал | г. Орск | 700 | 09.04 | 13.04 | 13.04 | 10.04 | 16.04 | 4 |
| Урал | г. Оренбург | 930 | 15.04 | 23.04 | 22.04 | 19.04 | 25.04 | 8 |
| Урал | с. Илек | 890 | 19.04 | 26.04 | 23.04 | 20.04 | 26.04 | 7 |

В створе р. Ишим – г. Ишим в 2024 году также наблюдались два менее выраженных пика половодья. Первый пик с максимальным уровнем воды наблюдался 22 апреля, а второй, более низкий и слабо выраженный пик – 1 мая. В связи с этим 2 мая также был выпущен уточняющий прогноз, результаты которого приведены в табл. 6.

В расположенных ниже по течению створах р. Ишим – пгт Абатский и р. Ишим – с. Викулово под влиянием отмеченной выше двойной волны половодья и ее последующей трансформации в русле пик половодья оказался настолько распластанным, что сколько-нибудь надежное прогнозирование его спада оказалось невозможным.

При выпуске прогноза даты снижения уровня воды до отметки опасного явления в вероятностной форме ожидаемая дата $T_{ОЯ}$ спада уровня воды до отметки $H_{ОЯ}$ задается доверительным интервалом с границами:

$$\min \tilde{T}_{ОЯ} = \tilde{T}_{ОЯ} - 3; \max \tilde{T}_{ОЯ} = \tilde{T}_{ОЯ} + 3. \quad (9)$$

В табл. 6 для створов на реках Ишим, Тобол и Урал с максимальными уровнями воды, превышающими отметку опасного явления, приведены: отметка $H_{ОЯ}$ см опасного явления; дата составления прогноза $T_{ПР}$; фактическая дата $T_{ОЯ}$ снижения уровня воды до опасной отметки; ее прогноз $\tilde{T}_{ОЯ}$; границы доверительного интервала $\min \tilde{T}_{ОЯ}$ и $\max \tilde{T}_{ОЯ}$; заблаговременность прогноза $\Delta T = T_{ОЯ} - T_{ПР}$ суток.

Данные табл. 6 показывают, что заблаговременность прогноза ΔT варьирует от 4 до 19 суток и в среднем равна 9,7 суток. Таким образом, прогнозы в основном относятся к категории среднесрочных.

Согласно данным табл. 6, абсолютные значения ошибок прогноза $T_{оя} - \tilde{T}_{оя}$ не превышают трех суток и в среднем равны 1,2 суткам. Все фактические значения $T_{оя}$ попали в соответствующие доверительные интервалы от $\min \tilde{T}_{оя}$ до $\max \tilde{T}_{оя}$. Следовательно, прогнозы даты снижения уровня воды до отметки опасного явления в вероятностной форме имеют стопроцентную оправдываемость.

4. Прогнозирование спада половодья до отметки неблагоприятного явления

Другой важной прогнозируемой характеристикой половодья является дата $T_{ня}$ снижения уровня воды до отметки $H_{ня}$ неблагоприятного явления, превышение которой также значительно затрудняет деятельность отдельных отраслей хозяйства и наносит ущерб экономике и населению.

Критические уровни воды $H_{ня}$ назначаются УГМС и для рассматриваемых речных створов их значения приведены в табл. 7.

Таблица 7. Прогноз даты спада уровней воды до отметки $H_{ня}$ в 2024 году

Table 7. Forecast of the date of the decline of water levels to the unfavorable mark $H_{ня}$ in 2024

| Река | Пункт | $H_{ня}$ | $T_{пр}$ | $T_{ня}$ | $\tilde{T}_{ня}$ | $\min \tilde{T}_{ня}$ | $\max \tilde{T}_{ня}$ | ΔT |
|-------|-------------|----------|----------|----------|------------------|-----------------------|-----------------------|------------|
| Ишим | с. Ильинка | 750 | 30.04 | 31.05 | 04.06 | 30.05 | 09.06 | 31 |
| Тобол | г. Курган | 700 | 05.05 | 12.05 | 12.05 | 07.05 | 17.05 | 7 |
| Урал | г. Орск | 360 | 23.04 | 01.05 | 29.04 | 24.04 | 04.05 | 8 |
| Урал | г. Оренбург | 760 | 28.04 | 04.05 | 06.05 | 01.05 | 11.05 | 6 |
| Урал | с. Илек | 850 | 28.04 | 08.05 | 10.05 | 05.05 | 15.05 | 10 |

Предлагаемая методика прогнозирования даты $T_{ня}$ основана на экстраполяции наблюдаемой в течение 10–15 суток кривой спада уровней воды $H(t)$ с помощью полинома третьей степени $H = P_3(t)$, параметры которого подбираются автоматически с помощью программы Excel. Прогноз $\tilde{T}_{ня}$ на основе этой кривой спада определяется из условия:

$$P_3(\tilde{T}_{ня} - 1) \geq H_{ня}, P_3(\tilde{T}_{ня}) < H_{ня}. \quad (10)$$

При получении такого прогноза должно выполняться дополнительное условие: после добавления соответствующих прогнозируемому году значений $\tilde{T}_{ня}$ и $P_3(\tilde{T}_{ня})$ к фактическим значениям t и $H(t)$ используемой

кривой спада коэффициент корреляции между величинами $H(t)$ и $P_3(t)$ должен принимать максимальное значение.

Процедуру прогнозирования демонстрирует рис. 3, на котором показана фактическая кривая спада половодья $H(t)$ в створе р. Урал – г. Оренбург в 2024 году и график функции $H = P_3(t)$. Соответствующая составленному 28 апреля 2024 года прогнозу точка с координатами $\tilde{T}_{НЯ}$ и $P_3(\tilde{T}_{НЯ})$ выделена красным цветом.

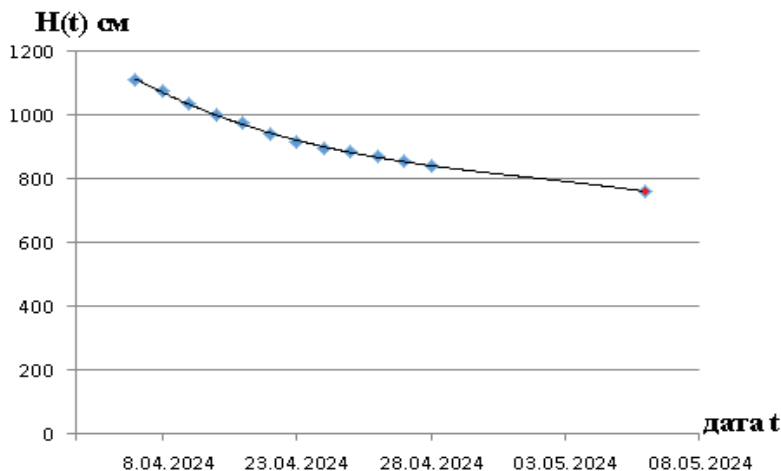


Рис. 3. Прогноз даты $T_{НЯ}$ в створе р. Урал – г. Оренбург в 2024 году.

Fig. 3. Forecast of the date $T_{НЯ}$ in the gauge of the Ural river – Orenburg in 2024.

Аппроксимация фактической кривой спада уровней воды $H(t)$ полиномом $P_3(t)$ и тем более его экстраполяция служат источником значительных ошибок прогноза. В связи с этим прогноз целесообразно выпускать в вероятностной форме. Ожидаемая дата спада уровней воды до отметки $H_{НЯ}$ задается доверительным интервалом с границами:

$$\min \tilde{T}_{НЯ} = \tilde{T}_{НЯ} - 5; \max \tilde{T}_{НЯ} = \tilde{T}_{НЯ} + 5. \quad (11)$$

В табл. 7 для створов с назначенными отметками уровня воды неблагоприятного явления на реках Ишим, Тобол и Урал приведены: отметка $H_{НЯ}$ см неблагоприятного явления; дата составления прогноза $T_{ПР}$; фактическая дата $T_{НЯ}$ снижения уровня воды до отметки $H_{НЯ}$; ее прогноз $\tilde{T}_{НЯ}$; границы доверительного интервала $\min \tilde{T}_{НЯ}$ и $\max \tilde{T}_{НЯ}$; заблаговременность прогноза $\Delta T = T_{НЯ} - T_{ПР}$ суток.

Данные табл. 7 показывают, что заблаговременность прогноза ΔT варьирует от 6 до 31 суток и в среднем равна 12,4 суток. Таким образом, все прогнозы относятся к категории среднесрочных.

Согласно данным табл. 7, абсолютные значения ошибок прогноза $T_{НЯ} - \tilde{T}_{НЯ}$ не превышают четырех суток и в среднем равны 2 суткам. Все фактические значения $T_{НЯ}$ попали в соответствующие доверительные интервалы от $\min \tilde{T}_{НЯ}$ до $\max \tilde{T}_{НЯ}$. Следовательно, прогнозы даты снижения уровня воды до отметки неблагоприятного явления в вероятностной форме имеют стопроцентную оправдываемость.

По мере поступления данных гидрологических наблюдений прогнозы можно корректировать. При этом заблаговременность прогнозов будет снижаться, а их точность – возрастать.

Заключение

В отделе речных гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» разработана система методик краткосрочного, среднесрочного и долгосрочного прогнозирования характеристик весеннего половодья, которая была реализована для 8 створов на реках Ишим, Тобол и Урал в 2024 году. Прогнозировались пик половодья, то есть максимальный уровень воды, дата прохождения пика половодья, даты снижения уровня воды до отметки опасного и неблагоприятного явления. Все четыре методики основаны на статистическом анализе данных гидрологических наблюдений за период с 1985 по 2023 год.

Максимальный уровень воды в прогнозируемом нижнем речном створе определялся в зависимости от уже наблюдавшегося максимального уровня воды в верхнем створе. Средняя заблаговременность прогнозов равна 7,5 суткам. Средняя ошибка прогнозов равна 23 см.

Дата прохождения пика половодья в прогнозируемом нижнем створе определялась с учетом даты прохождения пика в верхнем створе и вероятных значений времени его добегающего от верхнего створа до нижнего. Средняя заблаговременность прогнозов равна 7,5 суткам. Средняя ошибка прогнозов равна 3 суткам.

Дата снижения уровня воды до отметки опасного явления определялась с учетом высоты и даты прохождения пика половодья с использованием расчетной кривой спада, полученной путем статистического анализа спадов половодья, наблюдавшихся в прежние годы. Средняя заблаговременность прогнозов равна 9,7 суткам. Средняя ошибка прогнозов равна 1,2 суток.

Дата снижения уровня воды до отметки неблагоприятного явления определялась путем экстраполяции спада половодья, наблюдавшегося в течение 10–15 дней после прохождения пика половодья. Средняя заблаговременность прогнозов равна 12,4 суток. Средняя ошибка прогнозов равна 2 суткам.

Все прогнозы выпускались не только в обычной детерминированной, но и в вероятностной форме с указанием соответствующих доверительных интервалов, в которые прогнозируемая характеристика половодья должна попасть с вероятностью приблизительно равной 90 %. Оправдываемость таких прогнозов оказалась стопроцентной.

Прогнозы указанных характеристик половодья оказались вполне удовлетворительными и были использованы при организации и проведении мероприятий по защите населения и хозяйственных объектов от наводнений, наблюдавшихся в 2024 году на реках Ишим, Тобол и Урал.

Простота и эффективность разработанных методик позволяет рекомендовать их для использования при прогнозировании характеристик половодья в различных регионах России.

Список литературы

1. Алексеевский Н.И., Фролова Н.Л., Христофоров А.В. Мониторинг гидрологических процессов и повышение безопасности водопользования. М.: Изд-во МГУ, 2011. 387 с.
2. Бегани Н.Ф. Прогнозирование дождевых паводков на основе территориально-общих зависимостей. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 181 с.
3. Борц С.В., Христофоров А.В. Оценка качества прогнозов речного стока // Труды Гидрометцентра России. 2015. Специальный выпуск 355. 198 с.
4. Борц С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Прогнозирование стока рек России. М.: Гидрометцентр России, 2023. 200 с.
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. Комаров В.Д. Весенний сток равнинных рек европейской части СССР, условия его формирования и методы прогнозов. М.: Гидрометеиздат, 1959. 259 с.
7. Кучмент Л.С., Демидов В.Н., Мотовилов Ю.Г. Формирование речного стока. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 216 с.
8. Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н. Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. - М., Изд-во РАН, 2018. 300 с.
9. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть 1. Прогнозы режима вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 193 с.
10. Нежиховский П.А. Наводнения на реках и озерах. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 183 с.
11. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 1. Долгосрочные прогнозы элементов водного режима рек и водохранилищ. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 356 с.
12. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 2. Краткосрочный прогноз расхода и уровня воды на реках. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 245 с.
13. Сендайская рамочная программа по снижению риска бедствий на 2015–2030 гг., Управление ООН по уменьшению опасности бедствий. Женева, 2015 40 с.
14. Экстремальные гидрологические ситуации / под ред. Н.И. Коронкевича, Е.А. Барабанова, И.С. Зайцевой. М.: Медиа-ИРЕСС, 2010. 464 с.
15. Adams T.E., Pagano T.C. Flood Forecasting – A Global Perspective. Academic Press, 2016. 480 p.
16. Dingman S.L. Physical Hydrology. New York Macmillan Publishing Company, 1993 575 p.
17. Guide to Hydrological Practices. Volume I. Hydrology – From Measurement to Hydrological Information // WMO-No. 0168. 2009. 238 p.
18. Guidelines in Implementation of Coastal Inundation Forecasting – Early Warning System // WMO-No. 1293. 2022. 61 p.
19. Manual on Flood Forecasting and Warning // WMO-No. 1072. 2011. 138 p.
20. Multi-hazard Early Warning Systems: A Checklist. World Meteorological Organization, 2018. 18 p.

21. Swail V., Grimes S., Pilon P., Canterford R., Simonov Y. Early Warnings of Coastal Inundation // WMO Bulletin. 2019. Vol. 68 (2). P. 49-55.

22. WMO-No. 1281. World Meteorological Congress. Abridged Final Report of the Extraordinary Session. Virtual session. 11–21 October 2021. 248 p.

References

1. Alekseevskiy N.I., Frolova N.L., Khristoforov A.V. Monitoring gidrologicheskikh processov i povyshenie bezopasnosti vodopol'zovaniya. Moscow, MSU publ., 2011, 387 p. [in Russ.].

2. Befani N.F. Prognozirovanie dozhdevykh pavodkov na osnove territorial'no obshchih zavisimostey. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1977, 181 p. [in Russ.].

3. 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.].

4. Borsch S.V., Simonov Y.A., Khristoforov A.V. Prognozirovanie stoka rek Rossii [Stream-flow forecasting in Russia]. Moscow, Hydrometcenter of Russia, 2023, 200 p. [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. Komarov V.D. Vesenniy stok ravninykh rek evropeyskoy chasti SSSR, usloviya ego formirovaniya i metody prognozov. Moscow, Gidrometeoizdat publ., 1959, 259 p. [in Russ.].

7. Kuchment L.S., Demidov V.N., Motovilov Yu.G. Formirovanie rechnogo stoka. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1983, 216 p. [in Russ.].

8. Motovilov Yu.G., Gel'fan A.N. Modeli formirovaniya stoka v zadachah gidrologii rechnykh basseynov. Moscow, Izd-vo RAN, 2018, 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. Nezhikhovskiy R.A. Navodneniya na rekah i ozerah. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1988, 183 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 rashkoda i urovnya vody na rekah. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1989, 245 p. [in Russ.].

13. Sendayskaya ramochnaya programma po snizheniyu riska bedstviy na 2015–2030 gg., Upravlenie OON po umen'sheniyu opasnosti bedstviy. Zheneva, 2015, 40 p. [in Russ.].

14. Ekstremal'nye gidrologicheskie situatsii. pod red. N.I. Koronkevicha, E.A. Barabanova, I.S. Zaytsevoy. Moscow, Media-PRESS publ., 2010, 464 p. [in Russ.].

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

16. Dingman S.L. Physical Hydrology. New York Macmillan Publishing Company, 1993, 575 p.

17. Guide to Hydrological Practices. Volume I. Hydrology – From Measurement to Hydrological Information. WMO-No. 0168, 2009, 238 p.

18. Guidelines in Implementation of Coastal Inundation Forecasting – Early Warning System. WMO-No. 1293, 2022, 61 p.

19. Manual on Flood Forecasting and Warning. WMO-No. 1072, 2011, 138 p.

20. Multi-hazard Early Warning Systems: A Checklist. World Meteorological Organization, 2018, 18 p.

21. Swail V., Grimes S., Pilon P., Canterford R., Simonov Y. Early Warnings of Coastal Inundation. WMO Bulletin, 2019, vol. 68, no. 2, pp. 49-55.

22. WMO-No. 1281. World Meteorological Congress. Abridged Final Report of the Extraordinary Session. Virtual session. 11–21 October 2021, 248 p.

Поступила 28.05.2024; одобрена после рецензирования 06.06.2024;
принята в печать 17.06.2024.

Submitted 28.05.2024; approved after reviewing 06.06.2024;
accepted for publication 17.06.2024.