

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2026-1-140-158>

УДК 556.013

Анализ результатов прогнозирования весеннего половодья 2025 года с помощью модели искусственного интеллекта

**Ю.А. Симонов¹, А.В. Христофоров¹, В.М. Колий¹,
К.А. Ковалев², Е.В. Малыгин², А.А. Осипцов^{2,3}, Н.С. Сотириади²**

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

²*ПАО «Сбербанк», Россия;*

³*Сколковский институт науки и технологий, г. Москва, Россия
simonov@mecom.ru, khristoforov_a@mail.ru, vkoliy@mecom.ru*

В рамках выполнения плана работ по Инциденту 53 «Паводки» произведена верификация прогнозов весеннего половодья 2025 года, полученных с помощью разработанной и используемой в ПАО «Сбербанк» методики на основе модели искусственного интеллекта, которая впервые была использована в данной сфере. Выполнена проверка прогнозов хода уровней воды в течение весеннего половодья 2025 года по методике ПАО «Сбербанк» для расположенных практически по всей территории России 1083 речных створов. Для 88 речных створов выполнена проверка долгосрочных прогнозов максимального уровня воды за период половодья 2025 года по различным методикам. Однако в настоящее время эти прогнозы не в полной мере удовлетворяют функциональным требованиям, которые предъявляют конечные потребители к прогнозной продукции Росгидромета, и уступают прогнозам, выпускаемым Гидрометцентром России. Предложен вариант коррекции прогнозов по методике Гидрометцентра России, позволяющий существенно повысить их точность. Рекомендована методика получения прогнозов в вероятностной форме, основанная на предположении, что ошибки прогнозов в детерминированной форме подчиняются нормальному распределению с постоянной дисперсией.

Ключевые слова: речной створ, уровень воды, гидрограф, половодье, искусственный интеллект, методика, долгосрочный прогноз, форма прогноза, проверка, коррекция

Analysis of the spring flood of 2025 forecasting using an artificial intelligence model

**Yu.A. Simonov¹, A.V. Khristoforov¹, V.M. Koliy¹,
K.A. Kovalev², E.V. Malygin², A.A. Osiptsov^{2,3}, N.S. Sotiriadi²**

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

²*Public Joint-Stock Company Sberbank of Russia;*

³*Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russia
simonov@mecom.ru,*

khristoforov_a@mail.ru, vkoliy@mecom.ru

Forecasts for the 2025 spring flood were verified based a methodology developed and used at Sberbank based on an artificial intelligence model. Water level forecasts for the 2025 spring flood were verified using Sberbank's model for 1,083 river gauges located virtually throughout Russia. Long-term maximum water level forecasts for the 2025 flood period were verified for 88 river gauges using various methodologies. However, these forecasts currently do not fully meet the functional requirements of end users for Roshydromet forecast products and are inferior to those issued by the Hydrometeorological Center of Russia. A proposed correction to the forecasts based on Hydrometcentre of Russia methodology significantly improves their reliability. A methodology for generating probabilistic forecasts is recommended, based on the assumption that deterministic forecast errors flow the normal distribution with constant variance.

Keywords: flood forecasts, artificial intelligence, hydrological model, river gauge, water level, hydrograph, long-term forecast, verification, correction

Введение

Эффективность мероприятий по защите населения и хозяйственных объектов от наводнений в значительной степени зависит от заблаговременности и точности прогнозов речного стока, и прежде всего прогнозов повышения и снижения уровней воды в реках в период половодья [4, 10–12, 18].

Современная гидрология располагает достаточно большим и постоянно увеличивающимся арсеналом средств получения таких прогнозов. Стали доступны более надежные и детальные метеорологические прогнозы, данные дистанционного зондирования наземными, авиационными и космическими средствами, данные учащенных наблюдений на гидрологических постах и площадные оценки метеорологических элементов. Совершенствуется программное обеспечение разработки и представления прогнозов с использованием геоинформационных и интернет-технологий. Одновременно с ростом информационной базы и развитием технических возможностей происходит разработка и внедрение новых математических моделей, дающих более детальное описание гидрологических процессов и предназначенных для получения не только краткосрочных, но и долгосрочных прогнозов. В последнее время методические основы гидрологического прогнозирования дополняются применением различных методов искусственного интеллекта, постоянно развиваются за счет обмена результатами, что в решающей степени обеспечивается деятельностью Всемирной метеорологической организации [4, 6, 10, 12, 14, 20].

Наиболее эффективными с практической точки зрения считаются прогнозы гидрографа в детерминированной и вероятностной форме, которые могут выпускаться в рамках автоматизированных систем подготовки и выпуска прогнозов и доведения прогностической продукции до всех заинтересованных потребителей для достаточно больших регионов с разнообразными природными условиями [5, 10, 17, 22]. Действующая с 2025 года методика, разработанная в ПАО «Сбербанк», позволяет выпускать

прогнозы гидрографа для различных периодов года, и в частности, для периода весеннего половодья, в течение которого вероятность наводнений на реках России особенно высока [8].

В международной практике активно развивается сотрудничество частных компаний и государственных гидрометеорологических служб по оценке климатических рисков, и в том числе по прогнозу наводнений [14, 15, 23]. Одним из ярких примеров участия частного сектора в разработке методов гидрологического прогнозирования является разработанная и используемая ПАО «Сбербанк» модель, предназначенная для анализа подверженности кредитного портфеля климатическим рискам. Увеличение частоты и тяжести последствий катастрофических климатических явлений вследствие глобального изменения климата представляет физический риск для активов контрагентов банка, что требует учета в кредитном процессе. При этом нарастание интенсивности опасных гидрологических явлений попадает в перечень физических рисков, которые требуют учета. Оценка применимости данной модели в практике оперативных гидрологических прогнозов Гидрометцентра России и Росгидромета дается в настоящей статье. Система методик прогнозирования, основанных на физико-статистических зависимостях и используемых в Гидрометцентре России, здесь и далее для краткости обозначена как Методика 1. Описание данных методик представлено в работах [4, 5, 7].

Методика ПАО «Сбербанк»

Методика прогнозирования гидрографа от ПАО «Сбербанк» здесь и далее обозначена как Методика 2 для краткости изложения. Методика 2 получена с использованием искусственного интеллекта, что отличает её от классических физико-статистических подходов, которые используются в данной области. Методика 2 изначально предназначена для использования во внутренних процессах Банка, таких как оценка кредитного риска клиентов Банка на всей территории Российской Федерации, в этом смысле она по построению имеет несколько иные цели и задачи, чем Методика 1. Вместе с тем представляет интерес задача сравнения двух методик в общей области применимости.

В качестве исходной информации рассматриваемая Методика 2 использует:

- данные ежедневных наблюдений среднесуточного уровня воды на гидрологических постах;
- прогнозы ICON и ERA5-Seasonal хода метеорологических элементов;
- данные ежедневных наблюдений за приземной температурой воздуха и осадками;
- данные о ландшафтной структуре водосборов и их хозяйственной освоенности;
- физико-географические атрибуты HydroATLAS;

– цифровую модель рельефа.

Для прогнозирования уровней воды использована рекуррентная нейронная сеть Handoff-Forecast LSTM с входными данными ERA5-Land или ERA-Seasonal [19]. Для обучения использована метеорологическая и гидрологическая информация за период с 2008 по 2022 год (АИС ГМВО, на момент разработки эти данные были в открытом доступе, на данный момент источник недоступен). После получения уровней воды производилась помесечная корректировка модели в соответствии со средним помесечным расхождением на тестовом периоде.

Долгосрочные метеорологические прогнозы выражаются в виде ансамбля вероятного хода осадков и температуры воздуха в течение периода их заблаговременности. Подстановка этих ансамблей в нейронную сеть Handoff-Forecast LSTM позволяет получать ансамбль вероятного хода уровней воды в течение прогнозируемого периода. Это позволяет получать гидрологические прогнозы в вероятностной форме. Такие прогнозы гидрографа различных периодов 2025 года получены для 1083 оборудованных гидрологическими постами речных створов, расположенных практически по всей территории России (рис. 1).

Приведем подробное описание архитектуры модели в рамках Методики 2. Разработанная методика базируется на модификации архитектуры Long Short-Term Memory (LSTM), реализованной в рамках библиотеки NeuralHydrology. Используется структура Handoff-Forecast LSTM, которая разделяет процесс на два этапа:

- Handoff (Инициализация): Сеть обрабатывает исторические данные (осадки, температура, расход воды) за период $t=1, \dots, T$ handoff для обновления скрытых состояний (h, c). Это формирует внутреннее представление гидрологического состояния водосбора.

- Forecast (Прогноз): Используя финальные состояния этапа Handoff, сеть генерирует прогноз уровней воды на будущий период. На этом этапе модель не получает фактических измерений уровня воды, а опирается на метеорологические прогнозы.

Гиперпараметры. Скрытый слой LSTM-Handoff (256), скрытый слой LSTM-Forecast (128), оптимизатор AdamW, функция потерь RMSE.

Используются следующие *данные и периоды обучения*. Обучение проводилось на выборке из 1389 речных водосборов Российской Федерации, не имеющих пропусков в данных. Целевая переменная: среднесуточные уровни воды (АИС-ГМВО). Периоды: тренировка (01.01.2008 – 31.12.2018); валидация (01.01.2019 – 31.12.2020); тест (01.01.2021 – 31.12.2022).

Учет физико-географических характеристик. Для учета пространственной неоднородности используется вектор статических атрибутов (geo_вес), полученный из глобального набора HydroATLAS и HydroBASINS. Включает: морфологию (лес, пашня, урбанизация), гидрологию (озерность, болота), морфометрию (площадь, высота, уклоны), геологию (типы почв, карст).

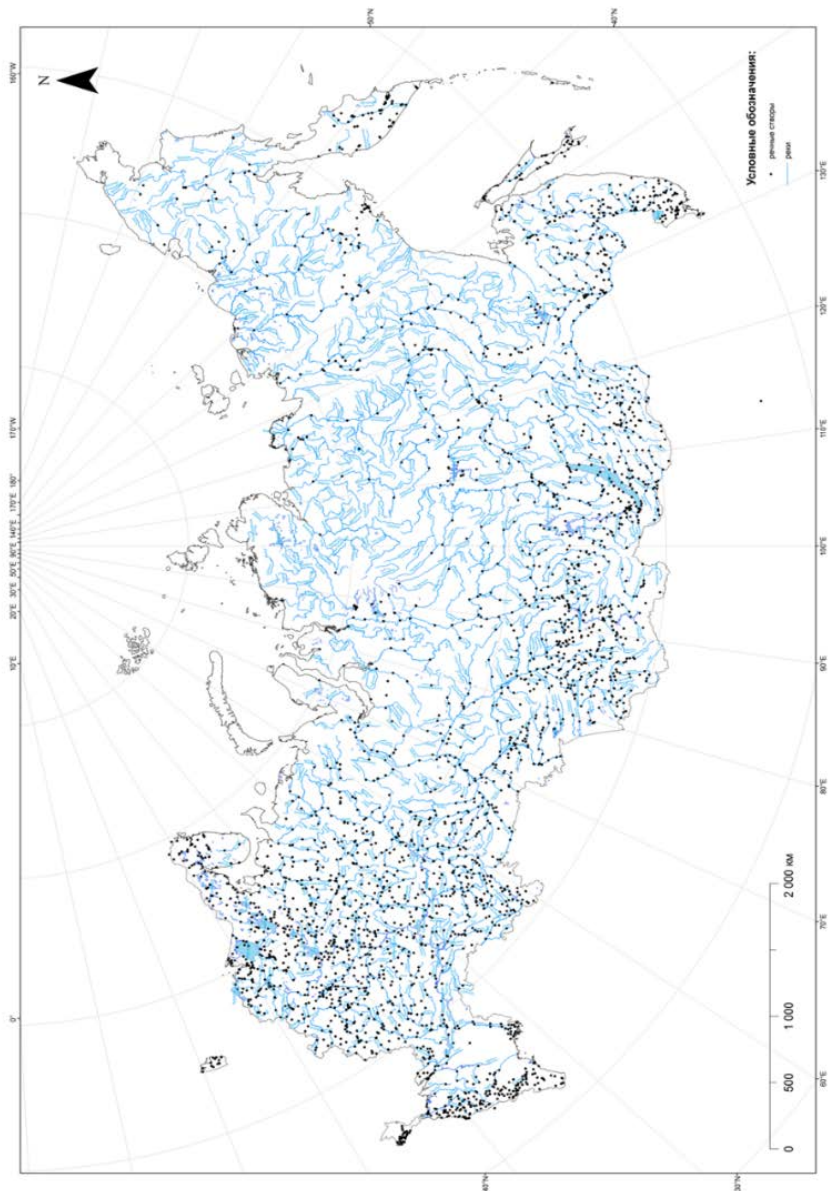


Рис. 1. Расположение прогнозируемых речных створов.
Fig. 1. Location of forecast river gauges.

Метеорологические данные и реанализ. Для обучения используется реанализ ERA5-Land ($0.1 \times 0.1^\circ$) – суточные осадки, min/max температуры. Привязка к водосборам осуществляется методом взвешенной пространственной агрегации. Для прогноза (инференс) используется комбинация источников: краткосрочный прогноз (модель ICON, 0.1°) и долгосрочный прогноз до 30 дней (ERA-Seasonal, 1.0°).

Верификация и оценка качества проводилась на тестовом периоде (2021–2022 гг.) для 2803 гидропостов. Характеристики точности прогноза (10 дней, ERA5-Land): медианное RMSE = 29.3 см, коэффициент корреляции $r = 0.82$. Для оценки точности зон затопления использовался алгоритм HAND. Критерий совпадения: ошибка уровня $\leq \pm 50$ см, ROC-AUC: 0.74, Recall: 0.87.

Описание архитектуры системы. Библиотека NeuralHydrology выступает в качестве вычислительного ядра, вокруг которого развернута промышленная инфраструктура оценки рисков (End-to-End Pipeline). Процесс обработки данных разделен на 4 функциональных слоя.

Слой данных отвечает за сбор и подготовку исторической базы для обучения. Агрегация источников: автоматический сбор данных из АИС-ГМВО (гидрология), ERA5-Land/Seasonal (метеорология) и MERIT Hydro/HydroATLAS (география). ETL-процессы включают расчет контуров водосборов (библиотека rpysheds) и поддержку «виртуальных постов», пространственную агрегацию метеоданных на сетку водосборов и формирование векторов статических признаков.

Слой прогноза и хранения. Оперативный контур для регулярного прогнозирования. Инференс: запуск скрипта `short_forecast_run.py`, реализующего цепочку `Handoff` → `Forecast`. Входные потоки: ансамбль данных (ERA5-Land для контекста, ICON/Seasonal для будущего). Преобразование прогноза уровня (1D) в карту затопления (2D) с использованием метода HAND (Height Above Nearest Drainage). Сохранение результатов в витрину данных.

Аналитический слой. Преобразование прогнозов в оценки рисков. Вероятностное моделирование: расчет вероятности затопления для каждой ячейки раstra (использование распределения Гумбеля). Бизнес-логика: пересечение зон затопления с геопозициями активов Банка. Оценка ущерба: расчет потенциальных финансовых рисков и формирование сигналов для оповещения.

Слой визуализации. Интерфейс конечного пользователя. Дашборд: отображение данных из витрины. Функционал: графики хода уровней, интерактивные тепловые карты глубин и вероятностей затопления, алерты.

Начиная с некоторой даты, методика дает прогнозы уровня воды в заданном речном створе. Прогнозы выпускаются на сутки вперед, на двое суток вперед и так далее в течение достаточно продолжительного периода (это ансамблевый прогноз на основе предварительно обученной нейросетевой модели; период заблаговременности определяется либо доступным

оперативным прогнозом погоды, либо сезонными прогнозами. В нашем случае использована комбинация прогноза погоды на 14 дней и прогноза климатических параметров сезонного ансамблевого прогноза от ECMWF до 7 месяцев). Таким образом, в течение первых пяти суток прогнозы относятся к категории краткосрочных, в течение последующих десяти суток прогнозы относятся к категории среднесрочных, но подавляющая часть прогнозов имеет заблаговременность более 10 суток, и следовательно, в основном выпускаемые прогнозы относятся к категории долгосрочных [1, 4].

Анализировались результаты прогнозирования гидрографа в течение периода с 03.02.2025 по 31.05.2025. Выбор этого варианта Методики 2 обусловлен тем, что, за исключением случаев экстремального подъема уровня воды при ледовых заторах, именно в течение этого периода на реках России проходит пик половодья. С учетом аномально теплой весны 2025 года активные весенние процессы на реках ЕТР и юга Западной Сибири начали развиваться во второй половине февраля и в первой декаде марта, в связи с этим было использован выпуск прогноза от 3 февраля 2025 года.

Для указанного периода вероятностная форма выпуска прогноза гидрографа определяется рассчитанными квантилями $H(25\%)$, $H(50\%)$ и $H(75\%)$, меньше которых ожидаемое значение уровня воды должно оказаться с вероятностями 25 %, 50 % и 75 % соответственно.

Проверка методики

Получаемые с помощью проверяемой методики прогнозы сравнивались с фактическими значениями уровня воды H см, наблюдавшимися в рассматриваемом речном створе в течение всего прогнозируемого периода. Вероятностная форма выпуска прогноза определяет специфику такой проверки.

По всему ряду проверочных прогнозов рассчитывались частоты P_1^* , P_2^* и P_3^* случаев, когда фактические уровни воды H оказывались меньше прогнозируемых значений $H(25\%)$, $H(50\%)$ и $H(75\%)$. Качество прогнозов определяется близостью этих частот к заданным вероятностям $P_1 = 0,25$, $P_2 = 0,50$ и $P_3 = 0,75$.

Согласно теореме Муавра – Лапласа, при достаточно большом числе проверочных прогнозов $n = 118$ и существенно отличающихся от 0 и 1 вероятностях $P_1 = 0,25$, $P_2 = 0,50$, $P_3 = 0,75$ распределение вероятностей частот P_1^* , P_2^* и P_3^* практически не отличается от нормального [2].

При уровне значимости (вероятности ошибки критерия) α стандартного статистического критерия разницы между частотой P_i^* и заданной вероятностью P_i при $i = 1, 2, 3$ не выходит за пределы случайных ошибок определения частоты, обусловленных ограниченностью ряда проверочных прогнозов, если выполняется неравенство:

$$\frac{|P_i^* - P_i| \sqrt{n}}{\sqrt{P_i(1-P_i)}} < t\left(\frac{\alpha}{2}\right), \quad (1)$$

где $t\left(\frac{\alpha}{2}\right)$ – квантиль нормального распределения, равный 2,576 при $\alpha = 1\%$ [2].

В табл. 1 приведено относительное число створов (в долях от 1083), для которых неравенство (1) выполняется для каждой из частот P_1^* , P_2^* и P_3^* при уровне значимости $\alpha = 1\%$. Там же в столбце «Все» приведено относительное число створов, для которых неравенство (1) выполняется для всех трех частот, то есть вероятностный прогноз оказался удовлетворительным.

Таблица 1. Относительное число створов, для которых выполняется неравенство (1)

Table 1. Relative number of gauges for which inequality (1) is satisfied

α	$P^*(25\%)$	$P^*(50\%)$	$P^*(75\%)$	Все
1 %	19 %	20 %	17 %	1 %

Из 1083 речных створов методика дала удовлетворительные результаты для всех трех квантилей для 11 створов, то есть в 1% случаев.

Оценить соответствие всех трех частот P_1^* , P_2^* и P_3^* заданным вероятностям $P_1 = 0,25$, $P_2 = 0,50$, $P_3 = 0,75$ позволяет другой критерий. При уровне значимости α стандартного статистического критерия разница между всеми частотами P_i^* и заданными вероятностями P_i при $i = 1, 2, 3$ не выходит за пределы случайных ошибок определения этих частот, если выполняется неравенство:

$$n \sum_{i=1}^3 \frac{(P_i^* - P_i)^2}{P_i(1-P_i)} < \chi_3^2(\alpha), \quad (2)$$

где $\chi_3^2(\alpha)$ – квантиль распределения «хи – квадрат» с тремя степенями свободы, равный 11,345 при $\alpha = 1\%$ [2].

Из 1083 речных створов неравенство (2) выполняется всего для 12 створов, то есть в 1,1% случаев.

Таким образом, для подавляющего числа прогнозируемых створов (99%) Методика 2 в первоначальной редакции не позволит использовать ее для потребителей прогнозной продукции Росгидромета. Поэтому было принято решение Методике 2 скорректировать, чтобы убрать систематическую погрешность, о чем будет рассказано подробно далее.

Прогноз максимальных уровней воды за период половодья

Наибольший практический интерес представляет качество прогнозирования максимальных уровней воды за период половодья. Для половодья 2025 года фактическое значение максимального уровня воды сравнивалось с тремя вариантами прогноза в детерминированной форме:

- 1) максимальное за период половодья значение квантиля $H(50\%)$, прогнозируемого по Методике 2;
- 2) долгосрочный прогноз максимального уровня воды за период половодья, ежегодно выпускаемый по Методике 1.

Сравнение выполнялось для всех 88 речных створов, для которых такие прогнозы были выпущены по Методикам 1 и 2. Разумеется, сравнение фактического значения максимального уровня воды с вариантами его прогноза всего за один год не позволяет оценить точность прогнозирования для каждого конкретного речного створа. Однако наличие таких результатов для 88 речных створов позволяет получить представление о возможностях каждой из сравниваемых методик в целом.

Сравнение абсолютных ошибок прогноза максимального уровня воды за период половодья 2025 года для 88 речных створов, расположенных практически по всей территории России, показало, что по сравнению с Методикой 2 выпускаемые по Методике 1 прогнозы в целом оказались точнее в 2,2 раза. Абсолютные значения ошибок прогноза по Методике 1 оказались меньше ошибок прогноза по Методике 2 для 64 речных створов (73 %).

Для исходных нескорректированных прогнозов по Методике 2 характерна значительная систематическая ошибка прогнозов – среднее значение разности $H - H(50\%)$ составляет 64 см, то есть проверяемые прогнозы в основном занижают уровни воды периода половодья. Другая причина, связанная с существенным уменьшением диапазона вероятных значений прогнозируемой величины, рассмотрена в разделе, посвященном получению вероятностной формы выпуска прогноза.

Выводы, полученные по результатам проверки прогнозов по Методике 2, наглядно иллюстрируются рис. 2, 3 и 4. На этих рисунках для половодья 2025 года на реках Кама и Ишим представлены совмещенные графики хода фактических уровней воды H (факт) и прогнозируемых значений $H(25\%)$, $H(50\%)$ и $H(75\%)$ см. Оба рисунка демонстрируют занижение уровней воды и сужение диапазона их вероятных значений.

При этом стоит отметить, что результат моделирования уровня воды на части гидростовов улучшается при обновлении прогноза климатических параметров, используемых моделью. Так, прогноз, рассчитанный от 8 марта 2025 года, дает намного более точное предсказание относительно исходного расчета (рис. 4). Это говорит о значительном влиянии климатических параметров на качество модели.

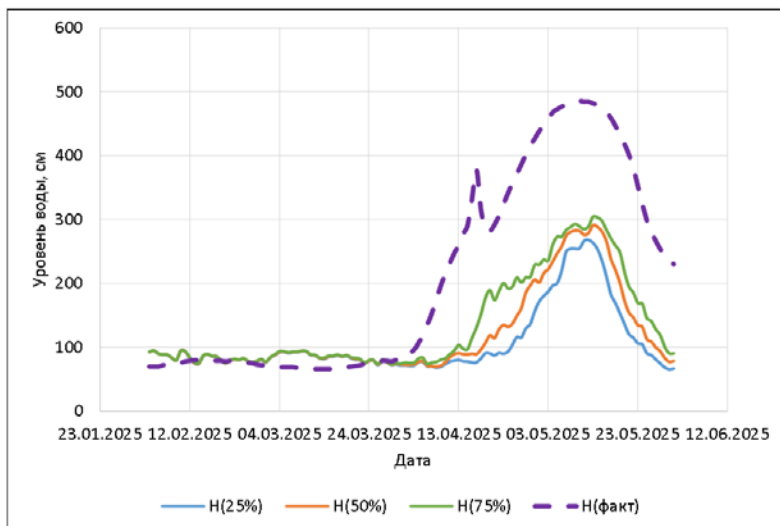


Рис. 2. Совмещенные графики хода фактических уровней воды H (факт) и прогнозируемых значений $H(25\%)$, $H(50\%)$ и $H(75\%)$ в течение половодья 2025 года на реке Кама.

Fig. 2. Combined graphs of the observed water levels H (observed) and predicted values $H(25\%)$, $H(50\%)$ and $H(75\%)$ during the 2025 flood on the Kama River.

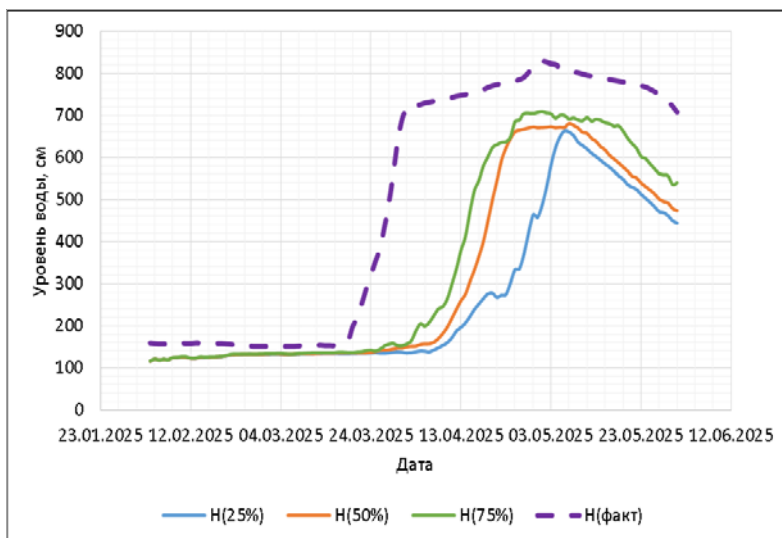


Рис. 3. Совмещенные графики хода фактических уровней воды H (факт) и прогнозируемых значений $H(25\%)$, $H(50\%)$ и $H(75\%)$ в течение половодья 2025 года на реке Ишим.

Fig. 3. Combined graphs of the observed water levels H (observed) and predicted values $H(25\%)$, $H(50\%)$ and $H(75\%)$ during the 2025 flood on the Ishim River.

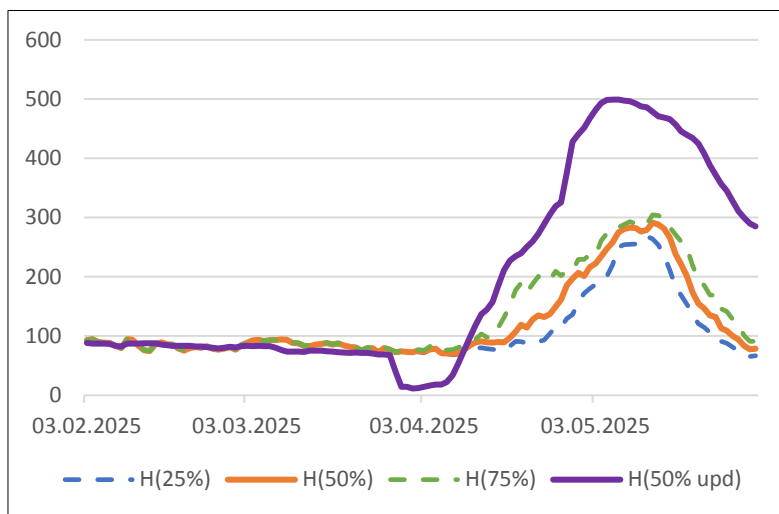


Рис. 4. Совмещенные графики прогнозируемых значений от 8 марта $H(50\% \text{ upd})$ и исходного прогноза от начала февраля $H(25\%)$, $H(50\%)$ и $H(75\%)$ в течение половодья 2025 года на реке Кама.

Fig. 4. Combined graphs of the observed water levels H (observed) and predicted values $H(25\%)$, $H(50\%)$ and $H(75\%)$ during the 2025 flood on the Kama River.

Коррекция прогнозов

Для многих речных створов имеет место достаточно высокая корреляция между фактическими уровнями воды H и прогнозируемыми по Методике 2 квантилями, что позволяет ввести процедуру корректировки. В частности, для 457 прогнозируемых створов (42 %) коэффициент корреляции между фактическим уровнем воды H и прогнозом $H(50\%)$ превышает значение 0,60. Это позволяет воспользоваться методом коррекции прогнозов, предложенным в работе [3].

Рекомендуемый метод коррекции уже достаточно широко применяется в практике гидрологического прогнозирования и в большинстве случаев позволяет существенно повысить точность прогнозов речного стока, выпускаемых в детерминированной форме [3, 4].

Так как коэффициент корреляции между прогнозами $H(25\%)$, $H(50\%)$ и $H(75\%)$ близок к единице, в качестве исходной можно было использовать любую из этих характеристик, однако представляется наиболее удобным корректировать прогноз $H(50\%)$, наиболее близкий к среднему значению ожидаемых уровней воды.

В качестве предварительной подготовки на основе ряда фактических значений уровня воды H и соответствующих им прогнозов $H(50\%)$ необходимо получить стандартные статистические оценки:

– математического ожидания $M(H)$ и стандартного отклонения $S(H)$ фактических значений уровня воды H ;

– аналогичных характеристик $M[H(50\%)]$ и $S[H(50\%)]$ значений прогноза $H(50\%)$;

– коэффициента корреляции R между величинами H и $H(50\%)$.

Параметры коррекции определяются формулами:

$$a = R \frac{S(H)}{S[H(50\%)]}, \quad (3)$$

$$b = M(H) - aM[H(50\%)]. \quad (4)$$

В качестве прогноза уровня воды в детерминированной форме следует использовать скорректированное значение прогноза $H(50\%)$:

$$\tilde{H}(50\%) = aH(50\%) + b. \quad (5)$$

Скорректированный по формуле (5) прогноз $\tilde{H}(50\%)$ имеет такое же среднее значение $M(H)$, что и прогнозируемая величина, то есть данный метод коррекции позволяет устранить возможную систематическую ошибку прогноза.

Среднеквадратическая погрешность такого прогноза равна

$$S_{\text{пп}} = S(H)\sqrt{1-R^2}. \quad (6)$$

Если использовать в качестве детерминированной формы прогноза по Методике 2 величину $H(50\%)$, то среднеквадратическая погрешность такого прогноза больше определяемой формулой (6) среднеквадратической погрешности скорректированного прогноза $S_{\text{пп}}$ в среднем по всем 1083 речным створам в 3,4 раза. Таким образом, предлагаемая коррекция дает очень большой эффект.

Согласно Наставлению по службе прогнозов [7], выпускаемый в детерминированной форме такой скорректированный прогноз относится к категории хороших при условии $S_{\text{пп}} / S(H) \leq 0,50$ и к категории удовлетворительных при условии $0,50 < S_{\text{пп}} / S(H) \leq 0,80$.

Из 1083 рассматриваемых речных створов прогнозы уровня воды по формуле (5) относятся к категории хороших для 120 створов (11 %) и к категории удовлетворительных для 337 створов (31 %). Таким образом, скорректированный вариант Методики 2 позволяет получать хорошие и удовлетворительные прогнозы гидрографа половодья для 457 речных створов (42 %).

В конце каждого половодья рекомендуется пересчитывать параметры коррекции a и b по формулам (3) и (4) с учетом всех данных об уже выпущенных прогнозах $H(50\%)$ и соответствующих фактических значениях уровня воды H . В течение следующего половодья эти параметры должны использоваться в формуле (5) для получения прогноза $\tilde{H}(50\%)$. Описанная процедура должна ежегодно повторяться. Таким образом, следует получать периодически корректируемый долгосрочный прогноз уровней воды в детерминированной форме.

Получение вероятностной формы выпуска прогноза

Анализ результатов прогнозирования уровней воды по Методике 2 показал, что частота P_1^* , как правило, превышает 25 %. Ее среднее для всех 1083 створов значение равно 41,2 %. Частота P_3^* , как правило, меньше 75 %. Ее среднее для всех 1083 створов значение равно 51,9 %. Это указывает на то, что прогнозы по Методике 2 систематически занижают диапазон вероятных значений уровня воды.

Отмеченная закономерность обусловлена тем, что в данной методике используется ансамблевый подход, который в последние годы получил большое распространение в зарубежной и отечественной практике прогнозов речного стока [6, 9, 13, 14, 22]. Главный недостаток этого подхода состоит в том, что при получении прогнозов речного стока в вероятностной форме учитывается не вся неопределенность возможных значений прогнозируемой величины, а только та ее часть, которая обусловлена неопределенностью хода метеорологических характеристик в течение периода заблаговременности гидрологического прогноза. При этом не учитывается вклад в погрешность прогноза неизбежных случайных ошибок определения используемых гидрометеорологических характеристик, ошибок определения самой прогнозируемой величины, недостаточной адекватности и полноты описания процессов формирования речного стока в используемой методике и ограниченности данных наблюдений, используемых для ее построения [1, 4, 9].

В работе [9] приведены примеры, когда использование ансамблевого подхода сужает доверительные интервалы для вероятных значений прогнозируемой величины на 40 % и даже на 80 %, что является недопустимым с точки зрения потребителей прогностической продукции, которые стремятся учесть наиболее неблагоприятные и опасные проявления водного режима рек.

В тех случаях, когда ансамблевый подход слишком сильно занижает возможный диапазон ожидаемых значений уровня воды, для получения вероятностной формы выпуска прогноза рекомендуется подход, основанный на статистическом анализе ошибок проверочных прогнозов. Правила реализации такого подхода подробно изложены в работах [1, 9].

Для долгосрочных прогнозов уровней воды на многочисленных примерах проверен и рекомендуется вариант, в котором предполагается нормальное распределение вероятностей ошибок прогнозирования с постоянным стандартным отклонением $S_{гр}$ [1].

Если скорректированное с помощью формул (3), (4) и (5) значение $\tilde{H}(50\%)$ использовать в качестве детерминированной формы выпуска долгосрочного прогноза уровней воды, то вероятностная форма выпуска прогноза определяется квантилем $\tilde{H}(P_0)$, меньше которого ожидаемое значение уровня воды должно оказаться с заданной вероятностью P_0 .

При нормальном распределении вероятностей ошибок прогноза $H - \tilde{H}(50\%)$ эти значения определяются формулой:

$$\tilde{H}(P_0) = \tilde{H}(50\%) + t(P_0)S_{\text{ГП}}, \quad (7)$$

где $S_{\text{ГП}}$ – среднеквадратическая погрешность скорректированного прогноза, определяемая формулой (6). При различных вероятностях P_0 значения $t(P_0)$ приведены в табл. 2.

Таблица 2. Значения $t(P_0)$ при различных вероятностях P_0

Table 2. Values $t(P_0)$ for different probabilities P_0

P_0	5 %	10 %	25 %	50 %	75 %	90 %	95 %
$t(P_0)$	-1,6448	-1,2816	-0,6745	0	0,6745	1,2816	1,6448

В качестве примера для 12 речных створов, расположенных в различных регионах России, в табл. 3 приведены характеристики прогнозов уровней воды в период весеннего половодья, полученных по Методике 2 и по ее скорректированному варианту.

Таблица 3. Характеристики прогнозов уровней воды

Table 3. Characteristics of water level forecasts

Река	P_1^*	P_2^*	P_3^*	$S_{\text{ГП}}/S(H)$	\tilde{P}_1^*	\tilde{P}_2^*	\tilde{P}_3^*
Печора	9%	10%	13%	0,53	19%	55%	72%
Ока	62%	62%	66%	0,79	31%	53%	80%
Сылва	51%	52%	55%	0,56	35%	53%	76%
Малка	100%	100%	100%	0,93	31%	47%	72%
Обь	14%	17%	25%	0,46	18%	56%	75%
Енисей	62%	67%	69%	0,75	33%	60%	92%
Лена	15%	16%	18%	0,59	26%	59%	78%
Амур	90%	91%	96%	0,44	30%	56%	81%
Зея	0%	0%	0%	0,99	23%	61%	88%
Ишим	0%	0%	0%	0,99	13%	28%	86%
Урал	29%	30%	31%	0,63	29%	58%	80%
Дон	0%	0%	0%	0,48	26%	59%	74%

Частоты P_1^* , P_2^* и P_3^* случаев, когда фактические уровни воды H см оказывались меньше прогнозируемых по Методике 2 квантилей $H(25\%)$,

$H(50\%)$ и $H(75\%)$, достаточно сильно отличаются от заданных вероятностей 25 %, 50 % и 75 %. Даже при уровне значимости $\alpha = 1\%$ неравенство (1) одновременно для всех трех частот и неравенство (2) не выполняются ни для одного из рассматриваемых речных створов.

Как уже было отмечено, скорректированное по формуле (5) значение $\tilde{H}(50\%)$ может использоваться в качестве долгосрочного прогноза уровня воды в детерминированной форме. Приведенные в табл. 3 показатели качества таких прогнозов $S_{\text{пр}}/S(H)$ свидетельствуют о том, что для трех речных створов скорректированные прогнозы дают хорошие результаты с соотношением $S_{\text{пр}}/S(H) \leq 0,50$. Для шести створов скорректированные прогнозы дают удовлетворительные результаты с соотношением $0,50 < S_{\text{пр}}/S(H) \leq 0,80$.

Таким образом, для 9 речных створов с выделенными жирным шрифтом значениями $S_{\text{пр}}/S(H)$ получена вполне рабочая схема долгосрочного прогнозирования ежедневного хода уровней воды в период половодья.

Вероятностная форма скорректированного прогноза определяется квантилями $\tilde{H}(25\%)$, $\tilde{H}(50\%)$ и $\tilde{H}(75\%)$, рассчитанными по формуле (7).

Приведенные в табл. 3 частоты \tilde{P}_1^* , \tilde{P}_2^* и \tilde{P}_3^* случаев, когда фактические уровни воды оказывались меньше этих прогнозируемых квантилей, оказались достаточно близкими к заданным вероятностям 25 %, 50 % и 75 %. При уровне значимости $\alpha = 1\%$ неравенство (1) выполняется для всех трех частот одновременно для большинства рассматриваемых речных створов. Исключение составляют створы на реках Енисей, Зея и Ишим.

Их всех 1083 прогнозируемых речных створов для 474 створов (44 %) при уровне значимости $\alpha = 1\%$ неравенство (1) выполняется для всех трех частот \tilde{P}_1^* , \tilde{P}_2^* и \tilde{P}_3^* одновременно. Неравенство (2) выполняется для 498 створов (46 %). При этом удовлетворительные результаты проверки этих частот дали положительные результаты практически для всех створов с удовлетворительными скорректированными прогнозами в детерминированной форме. Следовательно, для значительной части рассмотренных речных створов предлагаемая схема получения прогнозов уровней воды в вероятностной форме выглядит вполне удовлетворительно.

Таким образом, наиболее точными оказались прогнозы максимального уровня воды за период половодья 2025 года, выпускаемые по Методике 1. Менее точными оказались первоначальные прогнозы по нескорректированной Методике 2. По своей точности предлагаемый скорректированный вариант Методики 2 занимает промежуточное положение. С точки зрения широты выборки данных, на которых обучена и откалибрована модель, то Методика 2 базируется на данных по 2803 гидропостам, тогда как Методика 1 охватывает 88 гидропостов. Обе Методики для выполнения расчетов для одного гидропоста требуют считанные секунды машинного времени и с точки зрения вычислительной эффективности являются сравнимыми.

Заключение

Рассмотрена используемая в ПАО «Сбербанк» методика прогноза наводнений (Методика 2), которая впервые в данной области разработана на основе методов искусственного интеллекта. Выполнена проверка прогнозов суточного хода уровней воды, полученных по данной Методике 2, в течение половодья 2025 года для расположенных практически по всей территории России 1083 речных створов. Проверка показала, что частоты случаев, когда фактические уровни вод оказываются меньше прогнозируемых для каждых суток квантилей $H(25\%)$, $H(50\%)$ и $H(75\%)$, значительно отличаются от заданных вероятностей 25 %, 50 % и 75 %.

Проведено сравнение с физико-статистической методикой прогнозирования речного стока, которая разработана и используется в ФГБУ «Гидрометцентр России» (Методика 1). Выполненное для расположенных в различных регионах страны 88 речных створов сравнение ошибок прогноза максимального уровня воды за период половодья 2025 года показало, что наиболее точными оказались прогнозы, выпускаемые по Методике 1.

Причинами выявленных недостатков Методики 2 являются значительные систематические ошибки прогнозирования и использование ансамблевого подхода, который может существенно снижать диапазон вероятных значений прогнозируемой величины.

Достаточно высокая корреляция между фактическими уровнями воды и прогнозируемыми квантилями для большинства рассматриваемых речных створов позволила использовать хорошо себя зарекомендовавший и достаточно простой метод коррекции прогнозируемых квантилей $H(50\%)$. Скорректированные значения $\tilde{H}(50\%)$ могут использоваться в качестве детерминированной формы прогноза ежесуточных уровней воды в период половодья. Предлагаемая коррекция прогнозов повышает их точность в 3,4 раза и позволяет получать хорошие и удовлетворительные прогнозы гидрографа половодья для 457 речных створов.

Предположение о нормальном распределении вероятностей ошибок такого прогноза позволило предложить достаточно простую методику получения прогнозов уровня воды в вероятностной форме. Близость получаемых по этой методике частот \tilde{P}_1^* , \tilde{P}_2^* и \tilde{P}_3^* к заданным вероятностям 25 %, 50 % и 75 % для многих речных створов свидетельствует о правомочности используемого предположения и об удовлетворительном качестве предлагаемой методики получения прогнозов в вероятностной форме.

Предлагаемая коррекция прогнозов по Методике 2 повышает их точность. В связи с этим данную коррекцию можно рассматривать в качестве первого, но достаточно важного шага на пути к совершенствованию Методики 2. К другим возможным шагам по совершенствованию Методики 2 можно отнести расширение используемых гидрометеорологических баз данных для выполнения оптимизации гидрологических моделей и обучения модели искусственного интеллекта, учет динамики снежного покрова

и промерзания почв, использование актуальных зависимостей «расход – уровень» воды, а также использование детальных цифровых моделей рельефа для повышения точности расчета зон затоплений.

Список литературы

1. Борц С.В., Христофоров А.В. Оценка качества прогнозов речного стока // Труды Гидрометцентра России. 2015. Специальный выпуск 355. 198 с.
2. Борц С.В., Христофоров А.В., Юмина Н.М. Статистический анализ в гидрологических прогнозах. М.: Гидрометцентр России, 2018. 160 с.
3. Борц С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Методы коррекции прогнозов речного стока // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 1 (375). С. 162-175.
4. Борц С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Прогнозирование стока рек России. М.: Гидрометцентр России, 2023. 200 с.
5. Борц С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Выбор методов прогнозирования речного стока // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2024. № 1 (391). С. 71-117.
6. Кучмент Л.С., Гельфан А.Н. Ансамблевые долгосрочные прогнозы весеннего половодья с помощью физико-математических моделей формирования стока // Метеорология и гидрология. 2007. № 2. С. 76–88.
7. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть 1. Прогнозы режима вод суши. Л.: Гидрометеоиздат, 1962. 193 с.
8. Наука в Сбере 2023: информационный сборник / Под общ. ред. А. Р. Ефимова. М.: Сбер, 2023. 92 с.
9. Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Вероятностная форма выпуска прогнозов речного стока // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2025. № 2 (396). С. 141-158.
10. Симонов Ю.А. Оперативная гидрология в деятельности Всемирной метеорологической организации // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2025. № 2 (396). С. 121-140.
11. Adams T.E., Pagano T.C. Flood Forecasting – A Global Perspective. Academic Press, 2016. 480 p.
12. Assessment Guidelines for End-to-End Flood Forecasting and Early Warning Systems // WMO-No. 1293. 2022. 61 p.
13. Buizza R., Hollingsworth A., Lalaurette F., Ghelli A. Probabilistic Predictions of Precipitation Using the ECMWF Ensemble Prediction System // Weather and Forecasting. 1999. Vol. 14. P. 168-189.
14. Establishing a Flood-Proof District in Bilbao, Spain. -Public-Private Partnerships to adapt to floods of a Former Industrial Peninsula. Published 25 Apr 2025. Modified 25 Apr 2025. <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/mission/solutions/mission-stories/flood-proof-district-in-bilbao-story44>
15. EU-US Insurance Dialogue Project. Climate Risk and Resilience Workstream. June 2023 Summary Report. <https://home.treasury.gov/system/files/311/government-affairs-eu-us-insurance-dialogue-project-ws2-climate-risk-and-resilience-summary-report-june-2023.pdf>
16. Gelfan A., Moreydo V., Motovilov Y., Solomatine D. Long-term ensemble forecast of snowmelt inflow into the Cheboksary Reservoir under two different weather scenarios // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2018. Vol. 22. P. 2073-2089.
17. Greco M., Cravetta A., Della Morte R. River flow. London: Taylor and Francis Group, 2004. 1024 p.
18. Guide to Hydrological Practices. Volume II. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices // WMO-No. 168. 2009. 302 p.
19. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabate, J., ... & Thépaut J.N. The ERA5 global reanalysis // Quarterly journal of the royal meteorological society. 2020. Vol. 146 (730). P. 1999-2049.
20. Manual on Flood Forecasting and Warning // WMO-No 1072. 2011. 138 p.

21. Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A., Albergel C., Arduini G., Balsamo G., ... & Thépaut J.N. ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications // Earth system science data. 2021. Vol. 13(9). P. 4349-4383.

22. Pappenberger F., Pagano T.C., Gelfan A., Kuchment L. et al. Hydrological ensemble prediction systems around the Globe // Handbook of Hydrometeorological Ensemble Forecasting. Berlin: Springer Heidelberg, 2016. P. 1.35.

23. Sally Priest Shared roles and responsibilities in flood risk management // Journal of Flood Risk Management. March 2019. Vol. 12, is. 1. DOI: 10.1111/jfr3.12528

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., Khristoforov A.V., Yumina N.M. Statisticheskij analiz v gidrologicheskikh prognozakh [Statistical Analysis in Hydrologic Forecasts]. Moscow: Gidrometcentr Rossii Publ., 2018, 160 p. [in Russ.].

3. Borsch S.V., Simonov Y.A., Khristoforov A.V. Metody korrekcii prognozov rechnogo stoka [Methods for the streamflow forecast correction] *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2020, vol. 375, no. 1, pp. 162-175. DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2020-1-162-175> [in Russ.].

4. Borshch S.V., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V. Prognozirovaniye stoka rek Rossii [Streamflow forecasting in Russia]. Moscow, Hydrometcenter of Russia Publ., 2023, 200 p. [in Russ.].

5. Borshch S.V., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V. Vybory metodov prognozirovaniya rechnogo stoka [Selection of methods for streamflow forecasting] *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2024, vol. 391, no. 1, pp. 71-117. DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2024-1-71-117> [in Russ.].

6. Kuchment L.S., Gel'fan A.N. Long-Term Ensemble Forecast of Snowmelt Runoff with the Help of the Physics-Based Models of Runoff Generation. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2011, vol. 32, no. 2, pp. 126-134.

7. Nastavlenie po sluzhbe prognozov. Razdel 3. Part 1. Prognozy rezhima vod sushi. Lenin-grad, Gidrometeoizdat Publ., 1962, 193 p. [in Russ.].

8. Nauka v Sbere 2023: informacionnyj sbornik / Pod obshh. red. A. R. Efimova. Moscow: Sber Publ., 2023. 92 p. [in Russ.].

9. Simonov Yu.A., Khristoforov A.V. Veroyatnostnaya forma vypuska prognozov rechnogo stoka [A probabilistic form of streamflow forecasts]. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2025, vol. 396, no. 2, pp. 141-158. DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-2-141-158> [in Russ.].

10. Simonov Yu.A. Operativnaya gidrologiya v dejatel'nosti Vsemirnoj meteorologicheskoy organizatsii [Activities of the World Meteorological Organization in the field of operational hydrology]. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2025, vol. 396, no. 2, pp. 121-140. DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-2-121-140> [in Russ.].

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

12. Assessment Guidelines for End-to-End Flood Forecasting and Early Warning Systems. *WMO-No. 1293*, 2022, 61 p.

13. Buizza R., Hollingsworth A., Lalaurette F., Ghelli A. Probabilistic Predictions of Precipitation Using the ECMWF Ensemble Prediction System. *Weather and Forecasting*, 1999, vol. 14, pp. 168-189.

14. Establishing a Flood-Proof District in Bilbao, Spain. -Public-Private Partnerships to adapt to floods of a Former Industrial Peninsula. Published 25 Apr 2025. Modified 25 Apr 2025. <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/mission/solutions/mission-stories/flood-proof-district-in-bilbao-story44>

15. EU-US Insurance Dialogue Project. Climate Risk and Resilience Workstream. June 2023 Summary Report. <https://home.treasury.gov/system/files/311/government-affairs-eu-us-insurance-dialogue-project-ws2-climate-risk-and-resilience-summary-report-june-2023.pdf>
16. Gelfan A., Moreydo V., Motovilov Y., Solomatine D. Long-term ensemble forecast of snowmelt inflow into the Cheboksary Reservoir under two different weather scenarios. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2018, vol. 22, pp. 2073-2089.
17. Greco M., Cravetta A., Della Morte R. River flow. London: Taylor and Francis Group, 2004, 1024 p.
18. Guide to Hydrological Practices. Volume II. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices. WMO-No. 168, 2009, 302 p.
19. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabate, J., ... & Thépaut J.N. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly journal of the royal meteorological society*, 2020, vol. 146 (730), pp. 1999-2049.
20. Manual on Flood Forecasting and Warning. WMO-No 1072, 2011, 138 p.
21. Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A., Albergel C., Arduini G., Balsamo G., ... & Thépaut J.N. ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth system science data*, 2021, vol. 13(9), pp. 4349-4383.
22. Pappenberger F., Pagano T.C., Gelfan A., Kuchment L. et al. Hydrological ensemble prediction systems around the Globe. *Handbook of Hydrometeorological Ensemble Forecasting*. Berlin: Springer Heidelberg, 2016, pp. 1.35.
23. Sally Priest Shared roles and responsibilities in flood risk management. *Journal of Flood Risk Management*, March 2019, vol. 12, is. 1. DOI: 10.1111/jfr3.12528

Поступила 06.11.2025; принята в печать 17.03.2026.
Submitted 06.11.2025; accepted for publication 17.03.2026.