

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2026-1-159-170>

УДК 556.013

Адаптация модели формирования стока для некоторых рек юга Европейской территории России

Н.К. Семенова^{1,2}, Ю.А. Симонов^{1,2}, М.В. Шатохин¹

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

*²Институт вычислительной математики имени Г.И. Марчука
Российской академии наук, г. Москва, Россия
simonov@mecom.ru*

С целью выполнения оценки водности рек юга Европейской территории России в последующие 5 лет, предложена к использованию усовершенствованная модель формирования стока и сверхдолгосрочный прогноз метеорологических характеристик модели INM-CM5 с заблаговременностью 1–5 лет для некоторых речных бассейнов Дона, Кубани и Кумы. Данные речные бассейны отличаются высокой нагрузкой на водохозяйственный комплекс, что определяет их чувствительность как к межгодовой, так и внутригодовой изменчивости речного стока и его основных характеристик. С целью уточнения моделирования стока с помощью гидрологической модели, выполнено усовершенствование гидрологической модели формирования стока на водосборе НВУ путем внедрения алгоритма описания динамики плотности и высоты снежного покрова, а также блока расчета глубины промерзания почвогрунтов. Произведена адаптация усовершенствованной версии гидрологической модели для исследуемых рек, включающая вычисление расчетных коэффициентов модели, оптимизацию параметров и верификацию расчетов основных характеристик речного стока. Верификация модельных результатов на независимой выборке показала хорошую эффективность модели и ее применимость для выпуска сверхдолгосрочного прогноза характеристик стока. Разработан оптимальный алгоритм коррекции расчетов и прогнозов гидрологической модели, основанный на учете автокорреляции их ошибок, повышающий качество моделирования до 15–20 % для исследуемых водосборов.

Ключевые слова: речной сток, сверхдолгосрочный прогноз, гидрологическая модель, верификация

Adaptation of the runoff formation model for several southern rivers of Russia

N.K. Semenova^{1,2}, Yu.A. Simonov^{1,2}, M.V. Shatokhin¹

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

*²Marchuk Institute of Numerical Mathematics
of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
simonov@mecom.ru*

To assess river water availability in the south of European Russia over the next 5-year period, it is proposed to use a modified runoff formation model and a long-term meteorological forecast of the INM-CM5 model with a lead time of 1–5 years for several basins of the Don, Kuban, and Kuma rivers. These river basins are characterized by high loads on water management systems, which determines their sensitivity to both interannual and

intraannual variability of river runoff and its main characteristics. To estimate such variability, the HBV hydrological runoff formation model was modified using an algorithm for describing the dynamics of snow density and snow depth, as well as a module for calculating the freezing depth. The modified version of the hydrological model was adapted for the studied rivers. The adaptation included the calculation of model coefficients, parameter optimization, and verification of calculations of the main river characteristics. A validation of the model results on an independent sample demonstrated a good performance of the model and its applicability for producing long-term forecasts of runoff characteristics. An optimum algorithm for correcting hydrological model calculations and forecasts taking into account autocorrelation of their errors was developed, which increased the modeling accuracy by 15–20 % for the study watersheds.

Keywords: river runoff, long-term forecast, hydrological model, verification

Введение

Как показывают результаты ряда работ, в последние десятилетия произошли существенные изменения водности рек юга европейской части страны в части как изменения основных характеристик водности рек, так и внутригодового распределения стока [6, 14, 13], что приводит к росту нагрузки на воднохозяйственный комплекс данных рек. К основным пользователям прогнозов рек юга европейской территории относится сельское хозяйство, гидроэнергетика, речной транспорт и другие. Для повышения эффективности использования водных ресурсов рек пользователям гидрологической информации требуется оценка основных характеристик стока рек с заблаговременностью от месяцев до первых лет. Прогнозы различных гидрологических характеристик с заблаговременностью до 3 месяцев выпускают оперативно прогностические подразделения Росгидромета [2, 9, 10]. Была показана возможность сверхдолгосрочного прогнозирования стока рек России на основе динамического подхода [4, 17, 21, 23, 24], при котором водно-балансовая модель формирования речного стока HBV-96 используется совместно со сверхдолгосрочным ансамблевым метеорологическим прогнозом, полученным с помощью модели INM5 [5, 11]. Для анализа выбраны 12 речных бассейнов, расположенных в различных климатических и физико-географических зонах России. С заблаговременностью 1–5 лет прогнозировались среднегодовой и среднемесячные расходы воды, а также годовой максимум речного стока. Данные реанализа за период с 1980 по 2020 г. показали, что используемый динамический подход позволяет адекватно оценивать возможные межгодовые колебания речного стока и его внутригодовое распределение. Полученный с помощью моделей HBV-96 и INM5 ансамбль прогнозов годового и максимального стока для периода с 2023 по 2026 г. в достаточной степени согласуется с данными о водном режиме рассматриваемых рек [5, 11].

Для выпуска сверхдолгосрочного прогноза аномалий водности данных рек были рассмотрены четыре водосбора: два крупных притока р. Дон – реки Хопер и Медведица, а также реки Кубань и Кума. Выбранные гидрологические посты и их характеристики за многолетний период представлены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики исследуемых речных бассейнов
Table 1. The characteristics of the studied river basins

№	Индекс	Река	Пункт	Площадь, км ²
1	78013	Дон	ст-ца Казанская	102000
2	78017	Дон	г. Серафимович	169000
3	78141	Хопер	г. Поворино	19100
4	78202	Медведица	ст-ца Арчединская	33700
5	83157	Кубань	с. Успенское	12800
6	84037	Кума	г. Буденновск	15000

Выбор данных речных бассейнов обусловлен их важностью для водопотребителей и водопользователей южных районов европейской территории нашей страны, а также значимыми отрицательными трендами годового стока на некоторых из них [13], что накладывает дополнительное давление на водохозяйственный комплекс в пределах их бассейнов. В то же время в связи с большой антропогенной нагрузкой на бассейны данных рек отмечаются затруднения с водопользованием и водопотреблением. Основными пользователями гидрологической информационной и аналитической продукции в данное время являются гидроэнергетика, речной транспорт, забор воды на орошение [8].

В работе использованы данные гидрологических и метеорологических наблюдений за 35-летний период с 1991 по 2024 г., полученных с наблюдательной сети метеорологических станций Росгидромета (рис. 1). Вычисление среднего значения по бассейну за расчетные сутки производилось путем расчета среднеарифметического значения в связи с однородным пространственным распределением метеорологических станций на территории изучаемых бассейнов. За этот же период использованы данные ежедневных расходов воды, полученных из архивов ВНИИГМИ-МЦД и Гидрометцентра России.

Усовершенствование модели формирования стока

В работах [5, 11] использована модель формирования стока HBV-96, широко используемая в практике гидрологических прогнозов в России и по всему миру [20, 22]. Одним из недостатков данной модели является отсутствие блока расчета глубины промерзания почв, что в условиях российских рек имеет ограничение для ее использования. В условиях сезонного промерзания почвогрунтов на большинстве рек России, включая реки юга Европейской территории России, процессы формирования стока в весенний период года отличаются своей спецификой, приводящей к формированию так называемых запирающих слоев [7], приводящих к повышенному поверхностному стоку в период весеннего снеготаяния. Для устранения данного недостатка предложена схема расчета глубины промерзания

почвы, основанная на ранее используемых подходах в модели формирования стока Гидрометцентра СССР [7]. Включение расчета глубины промерзания почв в модель формирования стока НВВ-96 представлялось необходимым действием для ее дальнейшего применения для речных бассейнов России по причине широкого влияния эффекта промерзания почвогрунтов на процессы формирования талого стока.

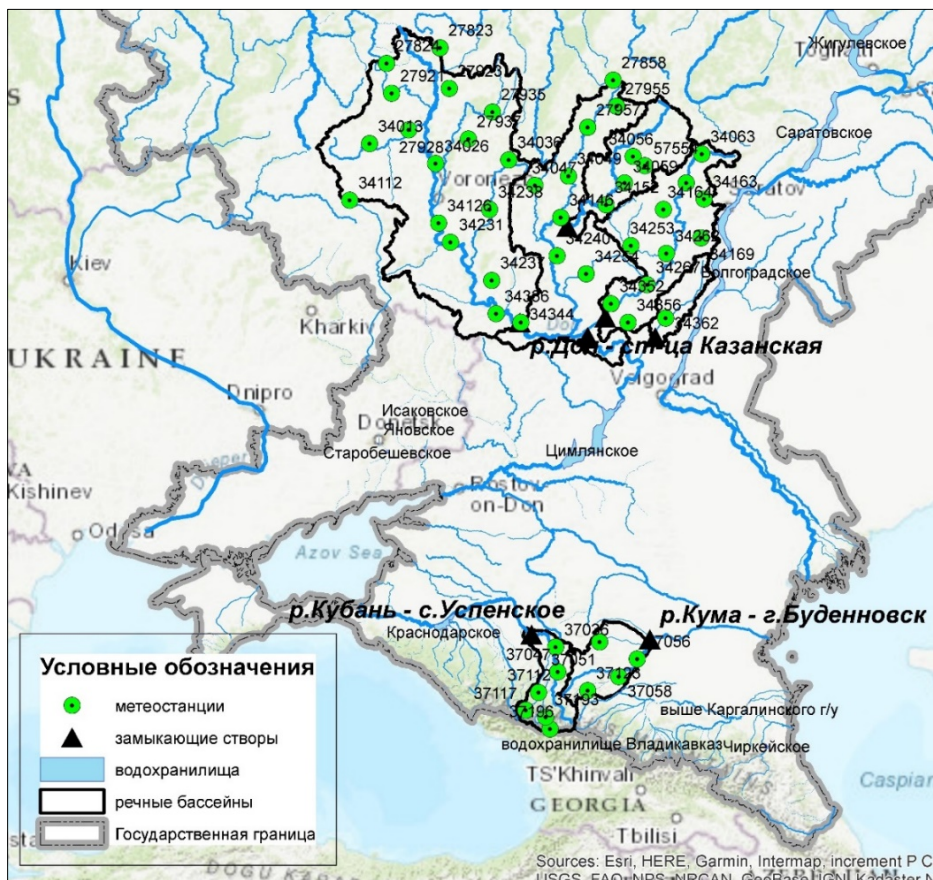


Рис. 1. Расположение исследуемых речных бассейнов, замыкающих створов их водосборов, а также метеорологических станций.

Fig. 1. The location of the studied river basins, their outlets, as well as weather stations.

В соответствие со схематизацией [7], в слое почвы выделяется верхний слой толщиной Z_{max} . При отрицательной температуре часть воды в почве будет превращаться в лед, что приводит к формированию слоя промерзания. При наступлении положительных температур будет происходить обратный процесс. Переход температуры почвы через $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ будет приводить к образованию нового слоя промерзания (оттаивания). При перепадах

температуры по данной схеме могут образовываться несколько слоев промерзшей и талой почвы, слои могут сливаться. В расчетную схему положено, что фазовые переходы влаги происходят только на фронте промерзания или оттаивания, а в зоне отрицательной температуры вся влага замерзает. Поток тепла и влаги с нижней границы отсутствует, а фильтрующаяся при таянии вода не участвует в процессах теплообмена. В этом случае уравнение для расчета глубины промерзания (оттаивания) выглядит следующим образом:

$$Z_i(t + \Delta t) = - \left(\frac{\lambda_{\text{п}}}{\lambda_{\text{с}}} \right) H_{\text{с}} + \sqrt{\left[\left(\frac{\lambda_{\text{п}}}{\lambda_{\text{с}}} \right) H_{\text{с}} + Z_i(t) \right]^2 + \frac{2\lambda_{\text{п}}|T_{\text{с}}|\Delta t}{\rho_{\text{в}}L_{\text{л}}\theta_{\text{п}}}}, \quad (1)$$

где $\rho_{\text{в}}$ – плотность воды; $L_{\text{л}}$ – удельная теплота плавления льда; $\theta_{\text{п}}$ – влажность почвы (по объему); $H_{\text{с}}$ – толщина снежного покрова; $T_{\text{с}}$ – температура поверхности снега; $\lambda_{\text{п}}$, $\lambda_{\text{с}}$ – теплопроводности почвы и снега соответственно. Параметры $H_{\text{с}}$, $T_{\text{с}}$, $\theta_{\text{п}}$ берутся средние за промежуток времени Δt ; $\rho_{\text{в}}$, $L_{\text{л}}$ – константы. Теплопроводность снега рассчитывается по зависимости:

$$\lambda_{\text{с}} = 1.373 \cdot 10^{2.25\rho_{\text{с}}}, \quad (2)$$

где $\lambda_{\text{с}}$ в Дж/(см²·ч·°С); $\rho_{\text{с}}$ – плотность снега, г/см³. Теплопроводность почвы – более сложный параметр, формула расчета которого будет меняться в зависимости от текущего слоя. Выражение для талой почвы будет иметь следующий вид:

$$\lambda_{\text{п.т}} = \left[(5.42\rho_{\text{п}} - 3.34) \left(\ln \frac{\theta_{\text{п}}}{\rho_{\text{п}}} + 4.6 \right) - (1.6\rho_{\text{п}} - 0.5) \right] \cdot 4.19, \quad (3)$$

где $\rho_{\text{п}}$ – плотность почвы (по объему); $\theta_{\text{п}}$ – влажность почвы (по объему). Следуя [3] запишем выражение для теплопроводности мерзлой почвы:

$$\lambda_{\text{п.м}} = \lambda_{\text{п.т}} + \left[0.8 + 26.7 \left(\frac{\theta_{\text{п}}}{\rho_{\text{п}}} - 0.1 \right) \right] \cdot 4.19. \quad (4)$$

Соответственно, для слоя оттаивания $\lambda_{\text{п}} = \lambda_{\text{п.т}}$, для промерзания $\lambda_{\text{п}} = \lambda_{\text{п.м}}$.

В используемом уравнении (1) присутствует высота снежного покрова. Задание данной величины возможно либо с учетом данных наблюдений (на метеорологических станциях или при использовании данных снегомерных маршрутов), либо с помощью ее моделирования. Для задания данной величины в настоящей работе использован усовершенствованный ранее вариант модели динамики снежного покрова с внедренным алгоритмом расчета плотности снега и его высоты [12]. Верификация алгоритма для выбранных водосборов показала хорошее качество сходимости фактически наблюдаемых и смоделированных величин плотности снега и его высоты [12].

Проверка предложенного алгоритма расчета глубины промерзания выполнена с использованием данных наблюдений за температурой воздуха, суммой осадков, глубиной промерзания почвы на наблюдательной сети Росгидромета за период 2010–2024 гг. для используемых водосборов. Выполнялась проверка как для отдельных станций, так и для среднего значения по водосборам. Разработан код программы, полностью моделирующий данный процесс на основе ежесуточных значений температуры воздуха, влажности почвы, а также характеристик почвенного покрова (в т. ч. полевой влагоемкости, влажности завядания).

Адаптация гидрологической модели

Подготовка гидрологической модели к использованию в рамках поставленной задачи сверхдолгосрочного прогноза характеристик водности исследуемых рек в 2026–2030 гг. состояла в её адаптации, включая расчет всех необходимых расчетных коэффициентов модели и «априорных» параметров, автоматической оптимизации параметров модели, ручной калибровки параметров, верификации результатов моделирования и внедрения алгоритма коррекции выходного результата моделирования. Расчетные коэффициенты, а также априорные параметры модели рассчитаны на основе цифровой модели рельефа, карт типов растительности и почвенного покрова (например, площади и среднего уклона водосбора, его широты, гидрофизических параметров почвенного покрова, доли непроницаемой поверхности и т. д.) в рамках программных ГИС средств.

Оптимизация параметров гидрологической модели выполнялась с помощью алгоритма перемешивания и эволюции комплексов (выборок) значений параметров SCE-UA [18]. Для нахождения оптимальных значений параметров модели использована обучающая выборка, образованная данными гидрологических и метеорологических наблюдений за период с 01.01.2001 по 31.12.2016. Данный период можно считать репрезентативным, так как практически для всех рассматриваемых рек в течение этого периода наблюдались многоводные, маловодные и средние по водности годы. Оптимизация включала следующие этапы:

- случайным образом генерируется выборка значений векторов, образованных оцениваемыми параметрами;
- ранжирование членов выборки по значению целевой функции, т. е. суммы квадратов ошибок расчета;
- выполняется процедура разбиения выборки на ряд «комплексов» (перетасовка векторов) и последующая эволюция каждого из комплексов;
- производится обратное объединение измененных комплексов (после эволюции значений векторов) в единую выборку;
- повторяется процедура ранжирования на основе оценки значений целевой функции, перетасовка, разбиение на комплексы, эволюция комплексов.

Цикл процедур повторяется до тех пор, пока не выполняется изначально заданное условие сходимости. Изначальная случайная перетасовка пространства параметров создает предпосылку для поиска глобального оптимума целевой функции без привязки к заранее заданным начальным значениям параметров. Использовано программное обеспечение PEST, которое позволяет производить оптимизацию параметров широкого круга моделей, в том числе при помощи рассматриваемого алгоритма оптимизации [16, 19]. Скорость выполнения оптимизации с помощью данного алгоритма и используемых программных средств составила от 20 до 30 минут при размере обучающей выборки $N = 2557$.

Оптимизация выполнена с использованием данных наблюдений за период 2010–2015 гг. Значение NSE 0.8 свидетельствует об удовлетворительном качестве расчетов с использованием входной информации и подобранных параметров модели.

В рамках выполнения проекта было разработано веб-приложение на базе пакета *Dash*, которое обеспечивает возможность как автоматической калибровки параметров используемой гидрологической модели (усовершенствованной модели HBV-96), так и ручной настройки для более точной оптимизации. Такой подход позволяет гибко управлять процессом калибровки и повышать точность моделирования. Библиотека *Dash* основана на архитектуре *React* и представляет из себя инструмент для создания интерактивных веб-интерфейсов с использованием различных компонентов, что обеспечивает высокую гибкость и расширяемость разрабатываемых приложений. Благодаря интеграции с библиотеками визуализации *Dash* позволяет реализовать динамичные графики и аналитические панели. Дополнительно к процедуре оптимизации была выполнена ручная настройка (калибровка) параметров модели с использованием ранее разработанного программного обеспечения (рис. 2).

В целях повышения точности модельных расчетов применен метод коррекции, который учитывает автокорреляцию их ошибок и широко используется в мировой практике гидрологических прогнозов. Идея метода состоит в том, что если к дате t получения расчетного значения $\hat{Q}(t)$ уже известные результаты расчета за предыдущие сутки демонстрируют завышение или, наоборот, занижение фактических значений среднесуточного расхода воды $Q(t)$, то расчет для этой даты целесообразно уменьшить или, соответственно, увеличить [15]. Обоснованность такого приема возрастает, если ошибки предшествующих расчетов образуют серию отрицательных или положительных значений, что и было отмечено для подавляющего большинства рассматриваемых речных бассейнов.

Скорректированные расчетные значения среднесуточных расходов воды определяются формулой:

$$\tilde{Q}(t) = \hat{Q}(t) + \sum_{i=1}^k a_i [Q(t-i) - \hat{Q}(t-i)] + b. \quad (5)$$

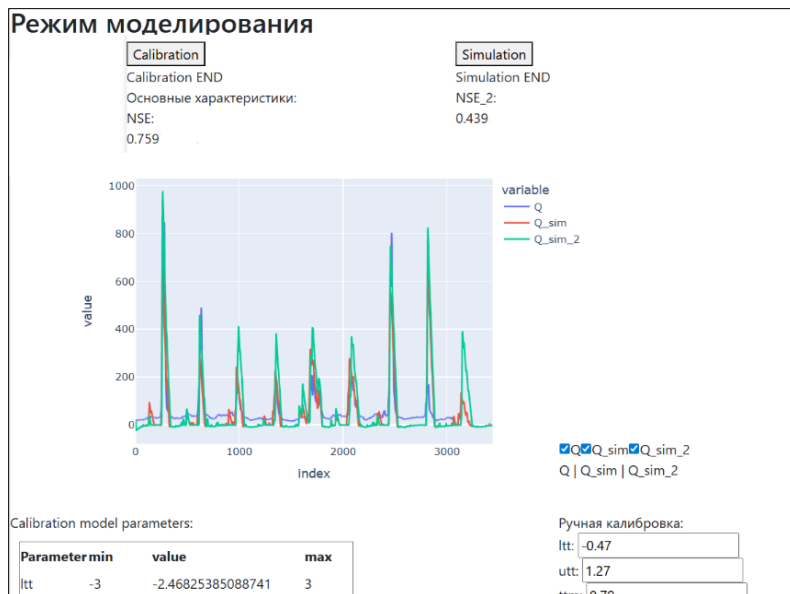


Рис. 2. Веб-приложение для оптимизации параметров используемой в исследовании гидрологической модели.

Fig. 2. A web application for optimizing the parameters of the hydrological model used in the study.

Дополнительный свободный член b в формуле (5) обеспечивает отсутствие систематической ошибки расчета. При любом заданном значении k оптимальные значения параметров a_1, \dots, a_k и b формулы (3) оценивались методом наименьших квадратов, который обеспечивает минимум суммы квадратов ошибок расчета за весь предназначенный для калибровки период с 01.01.2010 по 31.12.2016 продолжительностью $N = 2557$ суток. Оптимальное число k определялось с помощью критерия Акаике, в котором учитывается не только погрешность расчета для калибровочного периода, но и соотношение между числом $k + 1$ оцениваемых параметров и его длиной N . Сравнение полученных таким образом оптимальных значений k для всех 590 речных бассейнов позволило в целях упрощения методики расчета принять для них единое значение $k = 5$.

Использование усовершенствованной концептуальной модели формирования речного стока НВВ-96 с последующей коррекцией модельных расчетов описанным выше способом составляет основу предлагаемой методики получения среднесуточных расходов воды. Верификация модели выполнена для периода 2017–2024 гг. с использованием тех же критериев качества. Результаты моделирования расходов воды с применением усовершенствованной версии гидрологической модели НВВ-96, с учетом оптимизации параметров и процедуры коррекции позволяют получать модельные гидрографы стока с хорошей степенью точностью (рис. 3). Значения критерия Нэша – Сатклифа NSE и коэффициента корреляции R представлены в табл. 2.

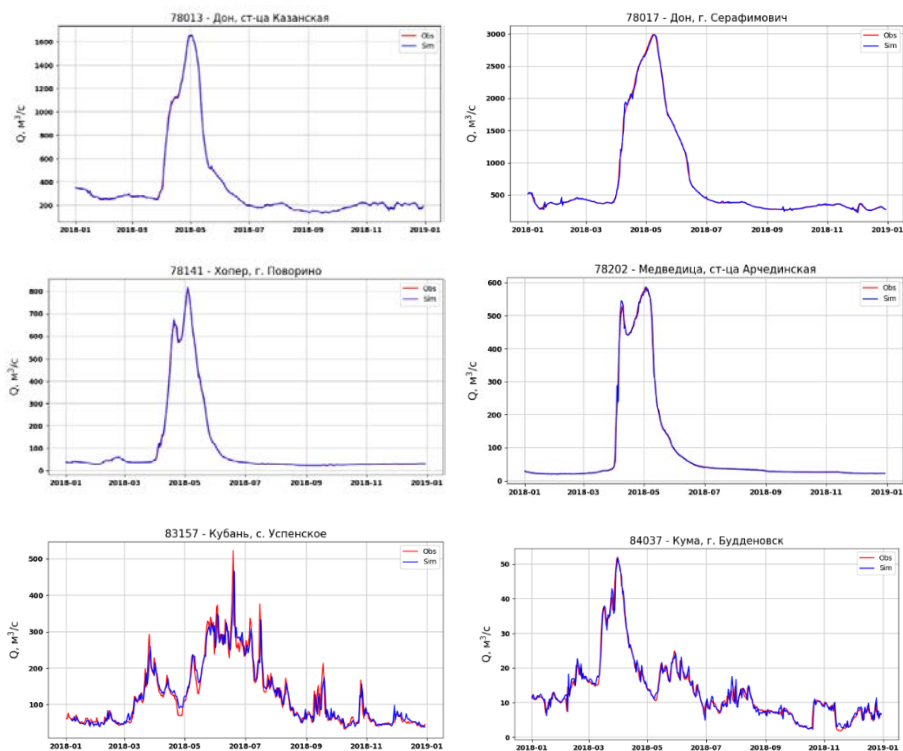


Рис. 3. Пример моделирования графиков хода расходов воды по фактическим метеорологическим данным для рассматриваемых гидрологических постов.

Fig. 3. An example of modeling graphs of water discharges according to actual meteorological data for the analyzed gaging stations.

Таблица 2. Значения критериев качества моделирования ежедневных расходов воды у рассматриваемых створов

Table 2. The values of the skill scores of modeling daily water discharges at the analyzed gages

№	Индекс	Река	Пункт	До коррекции		После коррекции	
				NSE	R	NSE	R
1	78013	Дон	ст-ца Казанская	0.42	0.69	0.67	0.83
2	78017	Дон	г. Серафимович	0.52	0.75	0.71	0.90
3	78141	Хопер	г. Поворино	0.71	0.84	0.89	0.95
4	78202	Медведица	ст-ца Арчединская	0.67	0.87	0.85	0.97
5	83157	Кубань	с. Успенское	0.82	0.91	0.91	0.98
6	84037	Кума	г. Буденновск	0.49	0.73	0.65	0.87

Заключение

Выполнено усовершенствование гидрологической модели формирования стока на водосборе путем внедрения алгоритма описания динамики плотности снежного покрова, а также блока промерзания почвогрунтов на основе решения уравнения теплового баланса в зоне аэрации. Результаты моделирования стока рек бассейнов Дона, Кубани и Кумы продемонстрировали хорошую эффективность новой версии модели.

Произведена адаптация усовершенствованной версии гидрологической модели для рек бассейнов Дона, Кубани и Кумы, включающая вычисление расчетных коэффициентов модели, оптимизацию модельных параметров и верификацию расчетов основных характеристик речного стока. Верификация модельных результатов на независимой выборке показала хорошую эффективность модели и ее применимость для выпуска сверхдолгосрочного прогноза характеристик стока.

Разработан и внедрен оптимальный алгоритм коррекции расчетов и прогнозов выходов гидрологической модели, основанный на учете автокорреляции их ошибок. Предлагаемый метод коррекции расчетов ежедневных расходов воды позволяет повысить качество моделирования до 15–20 % для исследуемых водосборов.

Адаптированная модель формирования стока будет использована совместно с выходами климатической модели INM-CM5 для составления сверхдолгосрочного прогноза характеристик водного стока рек на период 2026–2030 годов.

Работа выполнена в Институте вычислительной математики имени Г.И. Марчука Российской академии наук при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-17-00247).

Список литературы

1. Борц С.В., Гельфан А.Н., Морейдо В.М., Мотовилов Ю.Г., Симонов Ю.А. Долгосрочный ансамблевый прогноз весеннего притока воды в Чебоксарское водохранилище на основе гидрологической модели: результаты проверочных и оперативных испытаний // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 366. С. 68–86.
2. Борц С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Прогнозирование стока рек России. М.: Гидрометцентр России, 2023. 200 с.
3. Борц С.В., Христофоров А.В. Оценка качества прогнозов речного стока // Труды Гидрометцентра России. 2015. Специальный вып. 355. 198 с.
4. Гельфан А.Н. Динамико-стохастическое моделирование формирования талого стока. М.: Наука, 2007. 276 с.
5. Грицун А.С., Семенова Н.К., Симонов Ю.А., Хан В.М., Христофоров А.В. Анализ сверхдолгосрочных прогнозов метеорологических характеристик речных бассейнов России с помощью модели климата INM-CM5 // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2024. №4 (394). С. 39–57.
6. Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Киреева М.Б. Современные изменения водного режима рек в бассейне Дона // Водные ресурсы. 2013. Т. 40, № 40. С. 544–556.
7. Корень В.И. Математические модели в прогнозах речного стока. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 200 с.
8. Лурье П.М., Панов В.Д., Ткаченко Ю.Ю. Река Кубань: гидрография и режим стока. СПб.: Гидрометеиздат, 2005. 498 с.

9. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть 1. Прогнозы режима вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 193 с.
10. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 1. Долгосрочные прогнозы элементов водного режима рек и водохранилищ. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 356 с.
11. Семенова Н.К., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Сверхдолгосрочный прогноз стока рек России // *Метеорология и гидрология*. 2023. № 12. С. 47-56
12. Симонов Ю.А., Семенова Н.К., Христофоров А.В. Методика краткосрочных прогнозов расходов воды на реках бассейна Камы на основе использования модели HBV // *Метеорология и гидрология*. 2021. № 6. С. 55-65
13. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В.М. Катцова. СПб.: Научное издание, 2022. 676 с.
14. Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Григорьев В.Ю., Гельфан А.Н., Сазонов А.А., Шевченко А.И. Сток рек России при происходящих и прогнозируемых изменениях климата: обзор публикаций. Часть 1 // *Водные ресурсы*. 2022. Т. 49, № 3. С. 251-269.
15. Христофоров А.В., Юмина Н.М. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: АИП, 2017. 151 с.
16. Doherty J. Calibration and Uncertainty Analysis for Complex Environmental Models: Second Edition. Watermark Numerical Computing, Brisbane, Australia, 2025. 318 p.
17. Driessen T.L.A., Hurkmans R.T.W.L., Terink W., Hazenberg P., Torfs P.J.J.F., Uijlenhoet R. The hydrological response of the Ourthe catchment to climate change as modeled by HBV model // *Hydrol. Earth System Sci*. 2010. Vol. 14, no. 4. P. 651-665.
18. Duan Q., Sorooshian S., Gupta V. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models // *Journal of Hydrology*. 1994. Vol. 158, is. 3-4. P. 265-284.
19. Duan Q.Y., Gupta V.K., Sorooshian S. Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization // *J. Optimum Theory Application*. 1993. Vol. 76. P. 501-521.
20. Guide to Hydrological Practices. Volume II. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices // WMO-No. 168. World Meteorological Organization, 2009. 302 p.
21. Guidelines on Seasonal Hydrological Prediction // WMO-No. 1274. World Meteorological Organization, 2021. 67 p.
22. Lindström G., Johansson B., Persson M., Gardelin M., Bergström S. Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model // *Journal of Hydrology*. 1997. Vol. 201 (1-4). P. 272-288.
23. Prudhomme C., Hannaford J., Harrigan S. et al. Hydrological Outlook UK: An Operational Streamflow and Groundwater Level Forecasting System at Monthly to Seasonal Time Scales // *Hydrological Sciences Journal*. 2017. Vol. 62 (16). P. 2753-2768.
24. Zhu E., Yuan X., Wood A.W. Benchmark decadal forecast skill for terrestrial water storage estimated by an elasticity framework // *Nat Commun*. 2019. Vol. 10. P. 1237.

.References

1. Borsch S.V., Gelfan A.N., Moreydo V.M., Motovilov Yu.G., Siminov Yu.A. Long-term ensemble forecasting of spring inflow into the Cheboksary reservoir based on the hydrological model: results of operational testing. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2017, vol. 366, pp. 68-86 [in Russ.].
2. Borsch S.V., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V. Prognozirovanie stoka rek Rossii [Streamflow forecasting in Russia]. Moscow, Hydrometcenter of Russia publ., 2023, 200 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. Gelfan A.N. Dinamiko-stokhasticheskoe modelirovanie formirovaniya talogo stoka. M.: Nauka Publ., 2007, 276 p. [in Russ.].
5. Gritsun A.S., Semenova N.K., Simonov Yu.A., Khan V.M., Khristoforov A.V. Analysis of ultra-long-term forecasts of meteorological characteristics of Russian river basins using the

INM-CM5 climate model outputs. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2024, vol. 394, no. 4, pp. 39-57. DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2024-4-39-57> [in Russ.].

6. *Dzhamalov R.G., Frolova N.L., Kireeva M.B.* Current changes in river water regime in the Don River basin. *Water Resources*, 2013, vol. 40, no. 6, pp. 573-584.

7. *Koren' V.I.* Matematicheskie modeli v prognozhah rechnogo stoka. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1991, 200 p. [in Russ.].

8. *Lur'e P.M., Panov V.D., Tkachenko Ju.Ju.* Reka Kuban': gidrografija i rezhim stoka. Saint Petersburg: Gidrometeoizdat publ., 2005, 498 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. *Rukovodstvo po gidrologicheskim prognozam. Vyp. 1. Dolgosrochnye prognozy elementov vodnogo rezhima rek i vodohranilishch.* Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1989, 356 p. [in Russ.].

11. *Semenova N.K., Simonov Y.A., Khristoforov A.V.* Extended Streamflow Prediction for Russian Rivers. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2023, vol. 48, pp. 1019-1028. DOI: 10.3103/S1068373923120026.

12. *Simonov Y.A., Semenova N.K., Khristoforov, A.V.* Short-range Streamflow Forecasting of the Kama River Based on the HBV Model Application. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2021, vol. 46, pp. 388-395. DOI: 10.3103/S1068373921060054.

13. *Tretij ocenochnyj doklad ob izmenenijah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossijskoj Federacii / pod red. V.M. Katcova.* Saint Petersburg: Naukoemkie tehnologii publ., 2022, 676 p.

14. *Frolova N.L., Magritskii D.V., Kireeva M.B., Grigoriev V.Yu., Gelfan A.N., Sazonov A.A., Shevchenko A.I.* Streamflow of Russian Rivers under current and forecasted climate changes: a review of publications. 1. Assessment of changes in the water regime of russian Rivers by observation data. *Water Resources*, 2022, vol. 49, no. 3, pp. 333-350.

15. *Khristoforov A.V., Yumina N.M.* Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika: Uchebnoe posobie. Moscow, APR publ., 2017, 151 p. [in Russ.].

16. *Doherty J.* Calibration and Uncertainty Analysis for Complex Environmental Models: Second Edition. Watermark Numerical Computing, Brisbane, Australia, 2025, 318 p.

17. *Driessen T.L.A., Hurkmans R.T.W.L., Terink W., Hazenberg P., Torfs P.J.J.F., Uijlenhoet R.* The hydrological response of the Ourthe catchment to climate change as modeled by HBV model. *Hydrol. Earth System Sci.*, 2010, vol. 14, no. 4, pp. 651-665.

18. *Duan Q., Sorooshian S., Gupta V.* Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. *Journal of Hydrology*, 1994, vol. 158, is. 3-4, pp. 265-284.

19. *Duan Q.Y., Gupta V.K., Sorooshian S.* Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization. *J. Optimum Theory Application*, 1993, vol. 76, pp. 501-521.

20. *Guide to Hydrological Practices. Volume II. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices. WMO-No. 168.* World Meteorological Organization, 2009, 302 p.

21. *Guidelines on Seasonal Hydrological Prediction. WMO-No. 1274.* World Meteorological Organization, 2021, 67 p.

22. *Lindström G., Johansson B., Persson M., Gardelin M., Bergström S.* Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. *Journal of Hydrology*, 1997, vol. 201 (1-4), pp. 272-288.

23. *Prudhomme C., Hannaford J., Harrigan S. et al.* Hydrological Outlook UK: An Operational Streamflow and Groundwater Level Forecasting System at Monthly to Seasonal Time Scales. *Hydrological Sciences Journal*, 2017, vol. 62 (16), pp. 2753-2768.

24. *Zhu E., Yuan X., Wood A.W.* Benchmark decadal forecast skill for terrestrial water storage estimated by an elasticity framework. *Nat Commun.*, 2019, vol. 10, pp. 1237.