Научная статья / Scientific paper
УДК: 556.013:004.942
DOI: 10.34753/HS.2026.8.1.27

Концептуальные гидрологические модели HBV и GR4J: современные средства реализации и примеры использования

А. М. Мирошниченко, К. И. Головнин
Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия
e-mail: anton199823@gmail.com, golovnin98@bk.ru

Аннотация. Концептуальные модели формирования речного стока широко применяются в задачах гидрологии суши по ряду причин. Прежде всего, такие модели основаны, как правило, на полуэмпирических зависимостях, упрощенно описывающих основные процессы на водосборе, включают небольшой набор калибруемых параметров и не требуют большого числа входных переменных. Вычислительная простота, толерантность к данным и появление в последние десятилетия культуры свободного обмена программными кодами значительно способствовали распространению концептуальных моделей, многие из них реализованы на широко используемых в научной среде языках программирования R и Python. Большинство таких моделей имеют открытый исходный код, справочную документацию, встроенные функции калибровки и оценки качества, а также средства визуализации. Целью данной работы является иллюстрация возможности использования подобных современных программных реализаций концептуальных моделей, которые могут быть в дальнейшем использованы для краткосрочного прогноза речного стока, восстановления стока за исторический период или изменения стока под воздействием климатических факторов. В качестве эксперимента был проведён обзор двух современных реализаций концептуальных моделей HBV и GR4J на языках Python и R для моделирования стока. На примере рек России и Казахстана показан процесс создания модели формирования стока с речного водосбора на основании открытых данных и свободно распространяемых программных библиотек, проведена оценка возможностей и ограничений применения современных реализаций моделей.

Ключевые слова: концептуальное моделирование; формирование речного стока; калибровка моделей; HBV; GR4J; программные средства гидрологического моделирования.
Для цитирования: Мирошниченко А. М., Головнин К. И. Концептуальные гидрологические модели HBV и GR4J: современные средства реализации и примеры использования // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2026. Т. 8. Вып. 1. С.27–46. DOI: 10.34753/HS.2026.8.1.27.

Conceptual Hydrological Models HBV and GR4J: Modern Implementation Tools and Examples of Application

Anton M. Miroshnichenko, Kirill I. Golovnin
Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
e-mail: anton199823@gmail.com, golovnin98@bk.ru

Abstract. Conceptual models of river runoff formation are widely used in land hydrology for several reasons. First, such models are typically based on semi-empirical relationships that provide a simplified representation of key processes within a catchment, include a limited set of calibrated parameters, and do not require a large number of input variables. Their computational efficiency, tolerance to data limitations, and the growing culture of open-source code sharing in recent decades have significantly contributed to their widespread adoption. Many of these models are implemented in commonly used scientific programming languages such as R and Python. Most implementations are open-source, well-documented, and provide built-in tools for calibration, performance evaluation, and visualization.

The aim of this study is to demonstrate the applicability of modern software implementations of conceptual hydrological models, which can be further used for short-term streamflow forecasting, reconstruction of historical runoff, and assessment of runoff changes under climate impacts. As part of the study, two contemporary

implementations of the HBV and GR4J conceptual models in Python and R were reviewed. Using case studies of rivers in Russia and Kazakhstan, the process of developing a catchment-scale runoff model based on open data and freely available software libraries is demonstrated. The results are used to assess the capabilities and limitations of these modern model implementations.

Keywords: conceptual modeling; river runoff formation; model calibration; HBV; GR4J; hydrological modeling software.

For citation: Miroshnichenko A.M., Golovnin K.I. Conceptual Hydrological Models HBV and GR4J: Modern Implementation Tools and Examples of Application. Hydrosphere. Hazard processes and phenomena, 2026, vol. 8, iss. 1, pp. 27–46. DOI: 10.34753/HS. 2026.8.1.27. (In Russian; abstract in English).

Введение

Исследование процессов формирования речного стока является классической задачей гидрологии суши, решение которой направлено на углубление понимания этих процессов для моделирования отклика речных водосборов на внешние воздействия и прогнозирования будущих состояний речных систем. Для наиболее точного воспроизведения этих процессов необходимы детальные физико-математические модели, сбор многокомпонентной исходной информации для которых требует больших затрат и редко реализуем на практике. Вычисления с использованием таких моделей также занимают продолжительное время, что не всегда отвечает требованиям оперативности, например, при выпуске краткосрочного прогноза. Одним из современных подходов к решению задач описания и прогноза состояния речных систем, объединяющих представления о формировании речного стока, являются концептуальные модели, которые предлагают упрощенное, но эффективное представление об определяющих его процессах [1]. Такие модели стали своеобразным «стандартом отрасли» и несколько десятилетий применяются во многих научно-прикладных задачах [2–4].

В процессе своего развития гидрологические исследования традиционно опирались на данные инструментальных наблюдений, полевые и лабораторные исследования речных водосборов, что позволяло разрабатывать представления о процессах формирования стока и создавать на их основе математические модели. Для формализации гидрологических моделей на всём протяжении исследований широко использовались методы математического анализа и вычислительного программирования. В последние десятилетия активное развитие языков программирования, вычислительных алгоритмов и систем управления данными интенсивно проникает и в эту область, открывая новые возможности для более глубокого и комплексного изучения процессов формирования стока в речных водосборах. Эта трансформация, также называемая цифровизацией, способствует постоянному совершенствованию вычислительных методов и открывает всё новые возможности для понимания, исследования и управления водными ресурсами.

Концептуальные гидрологические модели основаны на априорных представлениях о совокупности процессов гидрологического цикла на водосборе, описанных, как правило, эмпирическими или полуэмпирическими зависимостями, параметры которых определяются в ходе оптимизации. Несмотря на меньшую детализацию в описании процессов формирования стока в сравнении с физически обоснованными моделями, концептуальные модели получили широкое распространение в практике анализа и прогноза поведения речных систем [1].

Развитие информационных технологий за последние пять десятилетий привело к появлению большого числа моделей процессов гидрологического цикла суши. Физико-математические модели содержат детальные физически обоснованные представления описываемых процессов формирования речного стока с учетом их пространственной неоднородности, тогда как концептуальные модели интегрируют эти процессы в пределах речного водосбора. Перечень используемых в настоящее время в гидрологии суши и смежных дисциплинах моделей, доступных к скачиванию и

с открытым исходным кодом, собран на сайте гидрологической секции сообщества моделирования динамики поверхностных систем и насчитывает в себе на момент публикации 115 моделей[1]. Существуют также перечни программных инструментов для гидрологических задач, реализованных на языке Python и R.

К числу типично концептуальных моделей относятся HBV и GR4J, которые рассматриваются в настоящей статье. Авторы стремились показать применимость этих моделей для территории СНГ. В связи с этим в качестве примера были использованы два водосбора, обеспеченных данными гидрометеорологических наблюдений, расположенных в Российской Федерации и Республике Казахстан.

Статья организована следующим образом: в первой части приводится обзор моделей HBV и GR4J, их структуры, необходимых входных данных и параметров оптимизации. Далее рассмотрены примеры работы с программными пакетами для их реализации на языках Python и R.

Обзор концептуальных моделей HBV и GR4J

О распространенности этих моделей в научной среде свидетельствует число публикаций на широко используемых ресурсах. С момента разработки моделей к настоящему времени число ежегодно публикуемых посвящённых им работ увеличилось в разы. Так, в базе ScienceDirect на период 1998–2003 гг. ежегодно приходится 1–2 статьи с упоминанием модели GR4J, то в последние годы (2023–2024 гг.) их количество превысило 50 в год. Модель HBV в 2001–2004 гг. упоминалась в 6–9 работах каждый год, в 2022–2025 гг. – от 93 до 123 раз в отдельные годы. За более чем 40 лет своего существования она была использована в более чем 1400 публикациях, применялась в 95 странах и использовалась почти в 50 докторских диссертациях [5]. Широкое распространение этих моделей во многом обусловлено доступностью программных средств, в том числе на простых в освоении и использовании языках, таких как Python и R [7].

В библиотеках airGR[2,3], airGRteaching[4] на языке R представлены все функции, необходимые для подготовки входных данных, создания модели для водосбора, калибровки параметров и дальнейших расчётов, анализа и визуализации результатов. Подобно основным пакетам языка, для всех функций имеется достаточно полная справочная документация, упрощающая их использование.

Библиотека LuMod[5] языка Python включает набор инструментов для использования концептуальных гидрологических моделей с сосредоточенными параметрами (lumped models). При разработке LuMod был сделан акцент на удобство в использовании для исследовательских и учебных задач.

Широкому распространению указанных моделей способствовало включение их программных реализаций (кода) в установщики пакетов для языков Python (pip и conda) и R (Comprehensive R Archive Network, CRAN). Следует отметить, что необходимым условием включения является наличие разработанной документации, что несомненно повышает применимость программного кода конечными пользователями.

Далее приведены описания структуры моделей, а также примеры использования библиотек на Python и R для моделирования временных рядов речного стока рек Вельва в бассейне верхней Камы (РФ) и Буктырма в бассейне Черного Иртыша (РК).

[1] CSDMS contributors. Hydrological Models. [Электронный ресурс]. URL: https://csdms.colorado.edu/wiki/Hydrological_Models (дата обращения: 01.11.2025).

[2] AirGR: Hydrological modelling tools developed at IRSTEA [Электронный ресурс]. URL: https://gitlab.irstea.fr/HYCAR-Hydro/airgr (дата обращения: 01.11.2025).

[3] CRAN: Contributed Packages / L. Coron, O. Delaigue, G. Thirel [и др.], 2017a. DOI:10.32614/CRAN.package.airGR.

[4] CRAN: Contributed Packages / O. Delaigue, L. Coron, P. Brigode, G. Thirel, 2018. DOI:10.32614/CRAN.package.airGRteaching.

[5] Esparza S. A. LuMod: Conceptual hydrological models in Python [Электронный ресурс]. URL: https://zaul_ae.gitlab.io/lumod-docs/ (дата обращения: 01.11.2025).

Модель HBV

Модель HBV (Hydrologiska Byrå Vattenbalansavdelning) является одной из наиболее широко используемых концептуальных гидрологических моделей. HBV относится к моделям с сосредоточенными (едиными для всего водосбора) параметрами, однако возможно разделение моделируемого водосбора, например, для учёта высотного градиента температур и осадков [5]. Набор минимально необходимой информации для расчёта стока при помощи HBV включает ряды значений температуры воздуха, суммарных испаряемости и осадков, а также значение площади водосбора. Временной шаг равен, как правило, одним суткам, но возможно также моделирование с другими интервалами.

Модель HBV состоит из трех основных расчетных блоков:

- блок описания динамики снежного покрова;
- блок учета влажности почвы;
- блок расчёта единичного гидрографа и руслового стока.

В связи с наличием изначально открытого кода для модели был разработаны ряд дополнительный модулей, как например, для моделирования стока в регионах с распространением многолетнемёрзлых пород, блок транспорта наносов [7], распространения примесей [8] и т.п. В базовой реализации модель имеет набор основных параметров уравнений, описывающих различные процессы, такие как инфильтрация, испарение, таяние снега и др. (таблица 1). Эти параметры используются при калибровке модели с учётом их допустимых диапазонов.

Таблица 1. Параметры модели HBV, реализованной в библиотеке LuMod
Table 1. Parameters of the HBV model implemented in the LuMod library

Параметр	Описание
maxbas	Время добегания (сут)
tthres	Пороговая температура для начала таяния снега (°C)
dd	Коэффициент стаивания (мм/°C·сут)
cevp	Параметр испаряемости (PET), зависящий от землепользования (мм/сут·°C)
cevpam	Амплитуда синусовой функции для PET (-)
cevpph	Фаза функции синуса для коррекции PET (сут)
beta	Коэффициент формы для гидрографа стока (-)
fc	Максимальная полевая влагоемкость почвы (мм)
pwp	Влажность завядания почвы в долях от fc (-) [0,1]
k0	Коэффициент поверхностного стока ($сут^{-1}$)
k1	Коэффициент межпластового стока ($сут^{-1}$)
k2	Коэффициент подземного стока ($сут^{-1}$)
lthres	Пороговый уровень воды для формирования поверхностного стока (мм)
snow0	Начальные запасы влаги в снежном покрове (мм)
s0	Начальный запас влаги в почве (s/fc) [0,1]
w01	Запас воды в верхнем почвенном резервуаре (мм)
w02	Запас воды в нижнем почвенном резервуаре (мм)

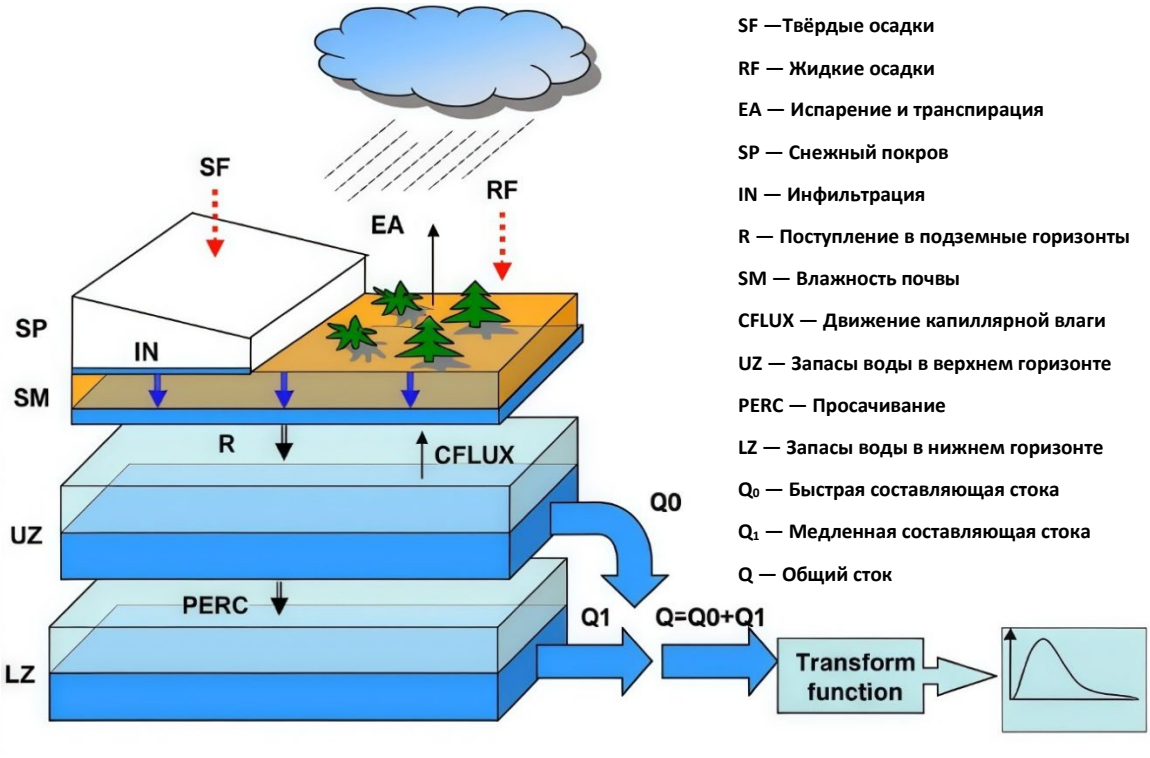

Рисунок 1. Схематическое описание модели HBV [11]
Figure 1. Schematic description of the HBV model [11]

Модель GR4J

Модель GR4J (Génie Rural à 4 paramètres journalier) также предназначена для описания дождевого стока на основе уравнений, содержащих 4 калибруемых параметра (таблица 2), что отражено в названии [10]. Как и для HBV, используются ряды средних значений температуры воздуха, суммарных испаряемости и осадков (рисунок 2), испаряемость может быть рассчитана исходя из среднесуточной температуры и широты водосбора [11]. Расчетный шаг модели составляет одни сутки (что следует из названия). Для учёта накопления и таяния снега на водосборе GR4j обычно применяется совместно с моделью динамики снежного покрова CemaNeige (таблица 2, рисунок 2).

Данная модель успешно применялась к различным водосборам в России [12], Франции, Словении и Австралии [13] для оценки воздействия на речные экосистемы, прогнозы многолетних изменений речного стока в Марокко [14], для краткосрочного прогноза паводков [15].

Таблица 2. Описание параметров GR4J и CemaNeige
Table 2. Description of the GR4J and CemaNeige parameters

Параметр	Описание
Речной сток (GR4J)	
X1	Ёмкость формирования стока (мм)
X2	Коэффициент водообмена (с грунтовыми водами, мм)
X3	Ёмкость трансформации стока (мм)
X4	Время бассейнового добегания (сутки)
Динамика снежного покрова (CemaNeige)	
cT	Коэффициент инерционности показателя температуры снежного покрова
Kf	Коэффициент стаивания (мм/(сутки*°C))

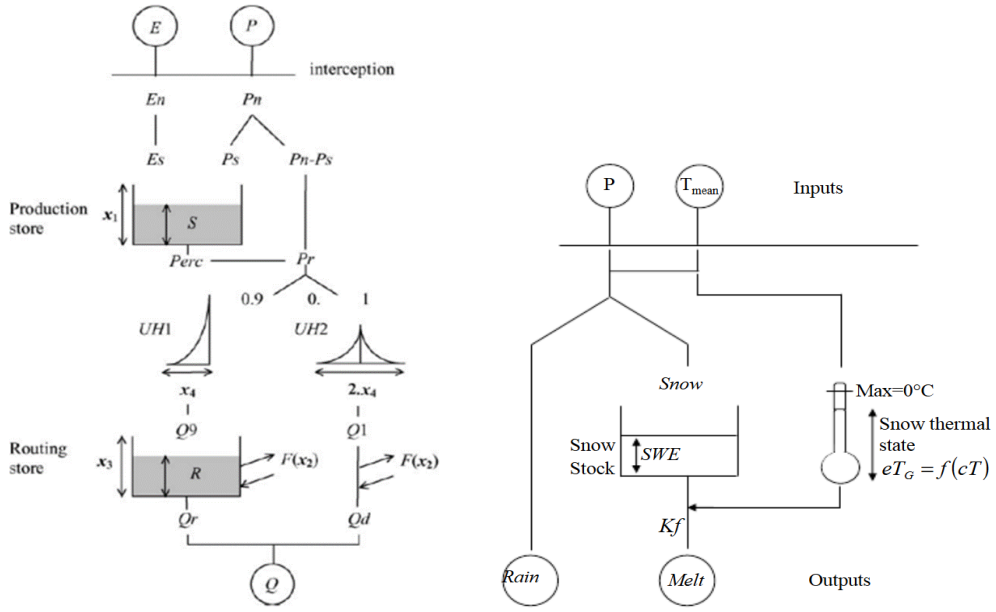

Рисунок 2. Схематическое представление модели GR4J (слева) и CemaNeige (Справа) [16]
Figure 2. Schematic representation of the GR4J (left) and CemaNeige (right) models [16]

В модели CemaNeige также предусмотрен учёт изменения температур и осадков с высотой и, следовательно, отличных условий снегонакопления на высотных уровнях. Для этого водосбор может быть разделен на несколько равных по площади частей, соответствующих определённому диапазону высот. Для этого в модели может быть дополнительно добавлена гипсографическая кривая (распределение площади водосбора с высотой).

Также представленные данные требуют предварительной обработки для формирования временных рядов, в данном случае среднесуточных расходов воды. Подготовка возможна в любых табличных редакторах. Для дальнейшего использования в настоящей статье все данные о гидрометеорологических величинах были сведены в единую таблицу базы данных, которая готовится для каждой модели путем простых манипуляций, описанных ниже.

Методика исследования

Ниже рассматриваются основные знания и шаги, необходимые для моделирования стока. Особое значение при построении моделей имеет корректная подготовка входных данных и выбор подходящих методов оценки качества. Использование временных рядов метеорологических наблюдений и расходов воды позволяет сформировать непрерывную основу для калибровки и последующего тестирования моделей. При этом важно обеспечить согласованность данных по временным интервалам, а также учитывать возможные пропуски и погрешности измерений, которые могут влиять на устойчивость результатов моделирования.

Ключевым этапом моделирования является калибровка параметров, при которой достигается наилучшее соответствие между рассчитанными и наблюдаемыми значениями расходов воды. Для объективной оценки качества моделирования применяются количественные метрики NSE и KGE, позволяющие анализировать различные аспекты точности — от общей формы гидрографа до величины ошибок. Последующая валидация на независимом временном интервале обеспечивает проверку устойчивости моделей и их пригодности для практического использования в задачах прогнозирования.

Подготовка данных

Подготовка исходных данных идентична для обеих используемых моделей. Для сбора необходимых данных метеорологических наблюдений для территории России использовались информационные ресурсы Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации Федеральной службы по гидрометеорологии и

мониторингу окружающей среды Российской Федерации[6]. Данные в Автоматизированной информационной системе обработки режимной информации (АИСОРИ) изначально представлены в удобной для расчетов форме временных рядов, для многих метеостанций имеются достаточно полные архивы с начала регулярных наблюдений.

Данные о расходах воды получены из ГИС ЦП Вода[7]. На этом ресурсе размещены данные гидрологических наблюдений с 2008 года, поступающие в систему в течение, как правило, одного-двух лет. Доступные на этом ресурсе данные гидрологических наблюдений для большинства постов охватывают период с 2008 до календарного года, предшествующего моменту размещения.

Для сбора гидрологических и метеорологических данных по территории Казахстана был использован веб-сайт Национальной гидрометеорологической службы Республики Казахстан[8].

Зачастую для исследуемого водосбора сложно найти близко расположенную метеостанцию, данные для которой были бы репрезентативны для воспроизведения речного стока. Современным подходом в этом случае является использование атмосферного реанализа [12; 17] в данной работе были использованы данные глобального атмосферного реанализа ERA5 Land, выпускаемые Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) и доступные в системе Google Earth Engine [18]. Эти данные о среднесуточной температуре воздуха на высоте 2 м и суммарном слое осадков за сутки представлены в растровом формате с размером ячейки 0,1x0,1°. В настоящей работе для расчёта метеорологического воздействия на водосбор применялась процедура взвешенного осреднения значений метеовеличин с учётом как полностью, так и частично покрываемых контуром водосбора ячеек сетки реанализа. При использовании концептуальных моделей эта процедура обязательна, так как позволяет вычислить воздействие на водосбор в целом, а не точечно [19–20].

В качестве первого объекта исследования был выбран водосбор р. Вельва выше створа поста Ошиб (индекс 76147, площадь 836 км^2), расположенный в правобережной части бассейна верхней Камы, в природной зоне тайги, на территории Пермского края. Средняя высота водосбора составляет 186 м. Режим реки Вельва относится к восточно-европейскому типу с максимальным стоком во время весеннего снеготаяния, однако в летний период возможны дождевые паводки, когда расходы сопоставимы с периодом весеннего половодья. В связи с высокой интенсивностью такие паводки могут приводить к опасным и неблагоприятным последствиям, для предупреждения которых требуется методика оперативного прогноза на основе модели формирования стока. Сток реки не зарегулирован, антропогенное воздействие на водосбор небольшое, главной отраслью хозяйственной деятельности является лесозаготовка.

Ближайшей к исследуемому водосбору является метеостанция Кудымкар (индекс 28116). Следующие в порядке удаления пункты наблюдательной сети расположены на значительно большем расстоянии и использование данных с них для расчёта метеорологического воздействия на водосбор не является целесообразным. Схема расположения водосбора и пунктов наблюдений представлена на рисунок 3.

[6] Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации (ВНИИГМИ-МЦД) [Электронный ресурс]. — URL: https://meteo.ru/ (дата обращения: 01.11.2025).
[7] ГИС ЦП Вода [Электронный ресурс]. — URL: https://gis.favr.ru/personal-account (дата обращения: 01.11.2025).
[8] РГП «КАЗГИДРОМЕТ» [Электронный ресурс]. URL: www.kazhydromet.kz (дата обращения: 20.04.2026)

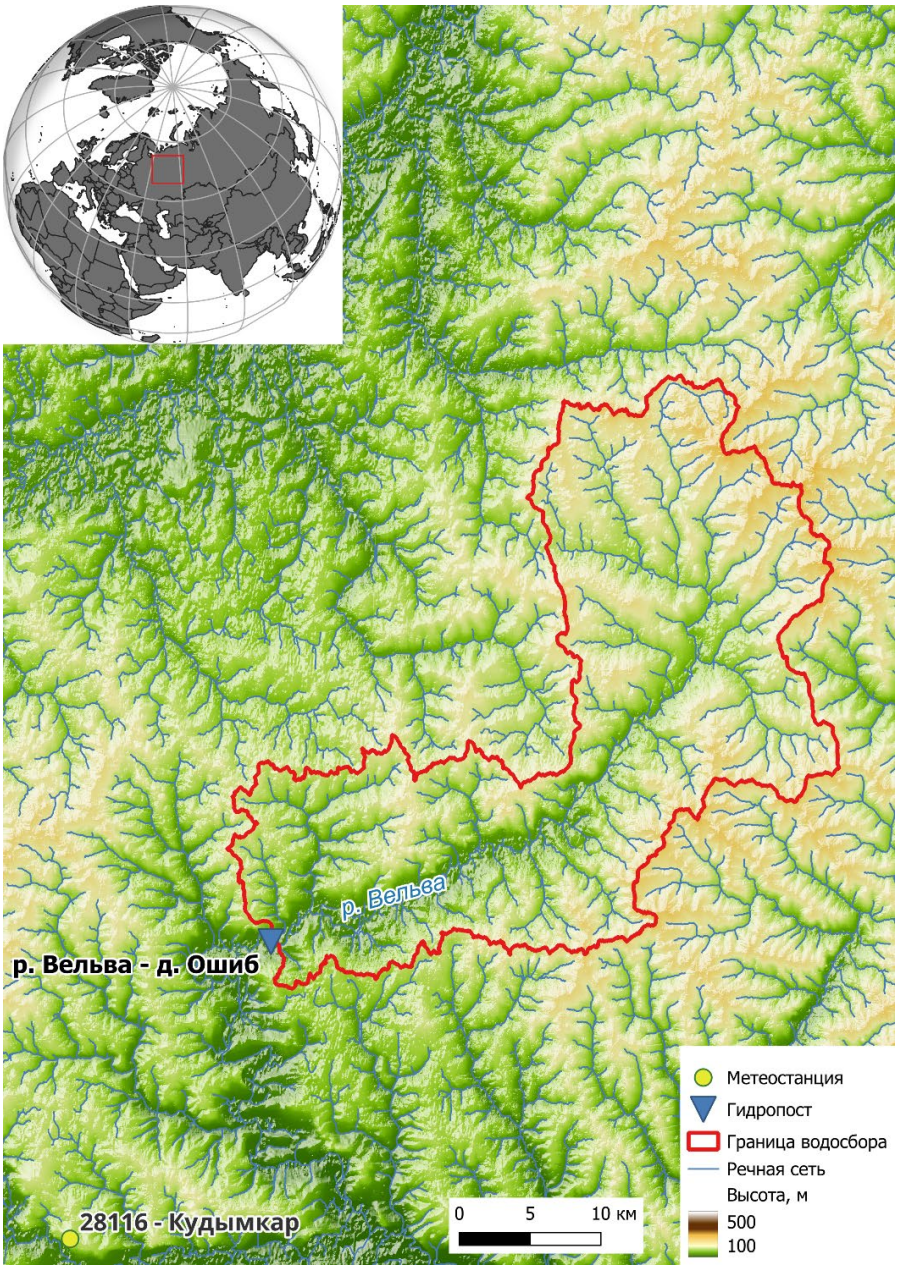

Рисунок 3. Расположение водосбора поста р. Вельва – д. Ошиб и ближайшей метеостанции (Кудымкар)
Figure 3. Location of the Velva River – Oshib village catchment and the nearest meteorological station (Kudymkar)

Вторым исследуемым объектом послужил водосбор реки Буктырма выше поста Берель (индекс 11124), расположенный в Восточно-Казахстанской области Республики Казахстан. Буктырма является правым притоком Иртыша в его верхнем течении. Площадь водосбора р. Буктырмы выше створа составляет 1937 км^2 (что примерно в 2,5 раза больше, чем для первого объекта). Водосбор расположен в среднегорной местности западного Алтая, средняя высота водосбора составляет 2232 м. Буктырма в данном пункте имеет режим горной реки: начало половодья приходится в среднем на апрель, максимальные расходы – на конец мая-начало июня. Спад половодья продолжительный, осложняемый дождевыми паводками, межень устанавливается в ноябре, что можно видеть на рисунках 9, 10, 13, 14. Ближайшим к центру водосбора пунктом метеорологических наблюдений является метеостанция Маркакольского заповедника (индекс 4888600), расположенная на удалении около 80 км (рисунок 4).

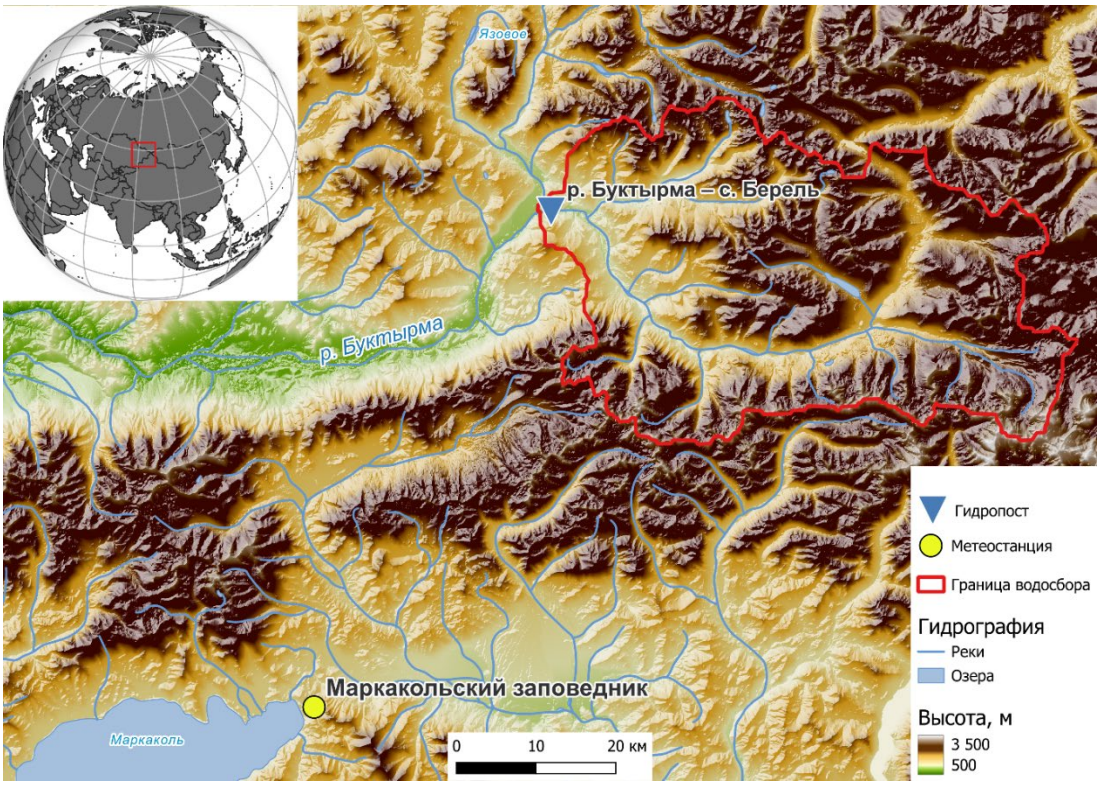

Рисунок 4. Расположение водосбора поста р. Буктырма – с. Берель и ближайшей метеостанции (Маркакольский заповедник)

Figure 4. Location of the Bukhtarma River – Berel village catchment and the nearest meteorological station (Markakol Nature Reserve)

Необходимые для моделирования суточного речного стока данные наблюдений включают регулярные временные ряды значений осадков и температур, измеренных или средних (суммарных) за временной интервал, соответствующий шагу моделирования стока (одни сутки). Данные об осадках и температурах имеются для каждой станции. Испаряемость может быть рассчитана исходя из известных значений температуры и широты водосбора; в данном случае применялся метод, предложенный в [11].

Калибровка и валидация

Важное значение при калибровке имеет выбор критерия оптимизации, периодов инициализации условий формирования стока («разогрева»), калибровки и валидации модели. В данном случае критерием оптимизации является коэффициент Нэша-Сатклиффа (NSE), для «разогрева» был отведён первый год, калибровка осуществлялась для 2/3 из оставшихся лет, валидация производилась на последней трети периода.

Следовательно, для калибровки реки Вельва использовался промежуток с 2009 по 2016 годы, валидация – с 2017 по 2020 годы, и период калибровки с 2007 по 2016 годы с валидацией на промежутке с 2017 по 2021 годы для реки Буктырма. Как показывает рисунок 7, период калибровки является достаточно репрезентативным: включает годы с высокими (2016) и низкими (2011) весенними половодьями, в 2015 и 2017 годах наблюдались высокие паводки во время летне-осенней межени.

После завершения калибровки сохраняются наилучшие параметры модели, соответствующие максимальному значению выбранного критерия оптимизации. Полученные параметры можно использовать для дальнейшего анализа и прогнозирования гидрологических характеристик. Они позволяют рассчитать значения стока с наименьшей ошибкой в рамках выбранной модели и заданных условий, а также обеспечивают основу для проведения сценарных расчетов и оценки чувствительности модели к изменениям входных данных.

Далее в статье приведен результат калибровки и валидации моделей HBV и GR4J для рек Вельва и Буктырма.

Моделирование с помощью библиотек LuMod и AirGr

В данном разделе рассматривается применение библиотеки LuMod[5] (реализация для модели HBV) и AirGr[2] для моделирования расходов воды. В качестве примера используется набор метеоданных о температуре, осадках и испаряемости, представленный в виде таблицы временных рядов.

Библиотека LuMod сопровождается открытой документацией, ориентированной на практическое использование моделей. Она содержит описание библиотеки, инструкции по установке и базовые примеры использования, демонстрирующие запуск моделей (HYMOD, HBV, GR4J и др.) и анализ полученных результатов. Кроме того, документация включает руководство к инструментам для оценки качества моделирования, калибровки параметров и анализа неопределенности, что позволяет использовать библиотеку как для научных исследований, так и для учебных задач гидрологического моделирования.

Для работы с обеими моделями необходимо располагать данными о площади моделируемого водосбора, для автоматического пересчета величины речного стока из $м^3/с$ в мм слоя. Так же, при отсутствии данных о испаряемости потребуется значение широты для автоматического ее расчета.

- area – площадь водосбора ($км^2$),
- lat – географическая широта (°).

Если значения параметров известны априори, они могут быть установлены пользователем при создании модели, однако как правило известны только некоторые интервалы значений для данного региона и необходима процедура калибровки. В библиотеке LuMod она реализована методом Монте-Карло, который представляет собой случайный перебор множества комбинаций параметров в заданных границах, которые пользователю необходимо задать для исследуемого объекта.

В библиотеке AirGr основные входные данные, требуемые для работы модели, включают в себя: временные ряды значений осадков, температуры, испаряемости, стока в замыкающем створе, широту и площадь водосбора. Также в модели CemaNeige предусмотрен учёт гипсографической кривой для моделирования снежного покрова отдельно по высотным зонам (для целей данной работы не использовалось).

Далее необходимо разделить модель на калибровочную и тестовые части. После выбора метода калибровки (в данном случае калибровка Мишеля) и метрики качества (NSE) запускается встроенная процедура калибровки. Метод калибровки Мишеля сочетает алгоритмы глобального и локального поиска. На первом этапе в пространстве параметров (сетке значений с определённым для каждого параметра шагом) находится вектор значений, в котором достигается максимум функции оптимизации. Далее в близлежащей области осуществляется локальный поиск с меньшим шагом [4]. Этот метод существенно отличается от используемого в библиотеке LuMod метода Монте-Карло.

В случаях, когда на предшествующий период уже был произведён модельный расчёт, новая модель может быть построена с учётом начальный условий: слоя воды в ёмкостях X1 и X3, ординат единичного гидрографа, содержания воды в снеге и его показателя температуры для модели CemaNeige (таблица 2).

Также существует программная реализация моделей формирования речного стока возможность интерактивного (reactivity) изменения параметров модели при помощи функции ShinyGR из пакета airGRteaching (рисунок 5), принимающей на вход исходные ряды данных и выполняющая калибровку на выбранный период. Это позволяет наглядно показать влияние различных значений коэффициентов модели на форму результирующего гидрографа, наполнение отдельных модельных емкостей и результирующие коэффициенты качества.

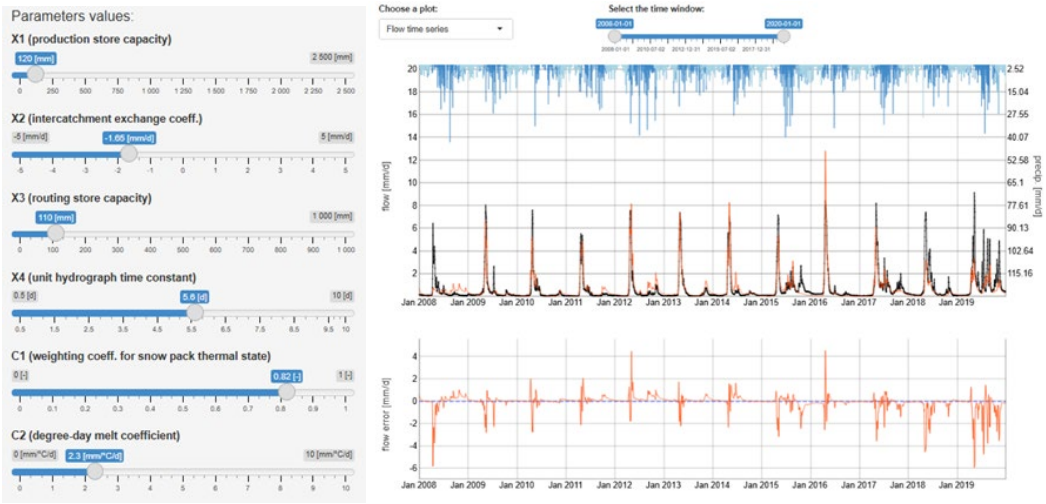

Рисунок 5. Окно интерактивного изменения параметров модели в режиме shinyGR
Figure 5. Interactive model parameter modification window in shinyGR mode

Необходимо отметить, что ввиду большого числа разновидностей модели, способов калибровки невозможно выполнить построение, калибровку и запуск модели в рамках одной функции. Однако для последовательного выполнения всех этапов моделирования может быть создана пользовательская функция, включающая различные функции пакета airGR. В данном примере функция принимает на вход исходные ряды данных и границы периодов калибровки и валидации, выполняет калибровку и моделирование на соответствующих периодах, выдаёт список выходных объектов: результат калибровки, графики, начальные условия, модельные расходы, значения NSE для периодов калибровки и валидации.

Результаты расчёта на основе данных метеорологических наблюдений

В первую очередь рассмотрим результаты калибровки и валидации с использованием данных метеорологических наблюдений. При расчёте по HBV полученные значения NSE и KGE для периода калибровки (Ошиб, Вельва) составляют 0,63 и 0,53 соответственно (таблица 3), значения обеих метрик позволяют сделать вывод о приемлемом для концептуальных моделей качестве. При использовании GR4J значения метрик ещё выше и составляют 0,86 и 0,87.

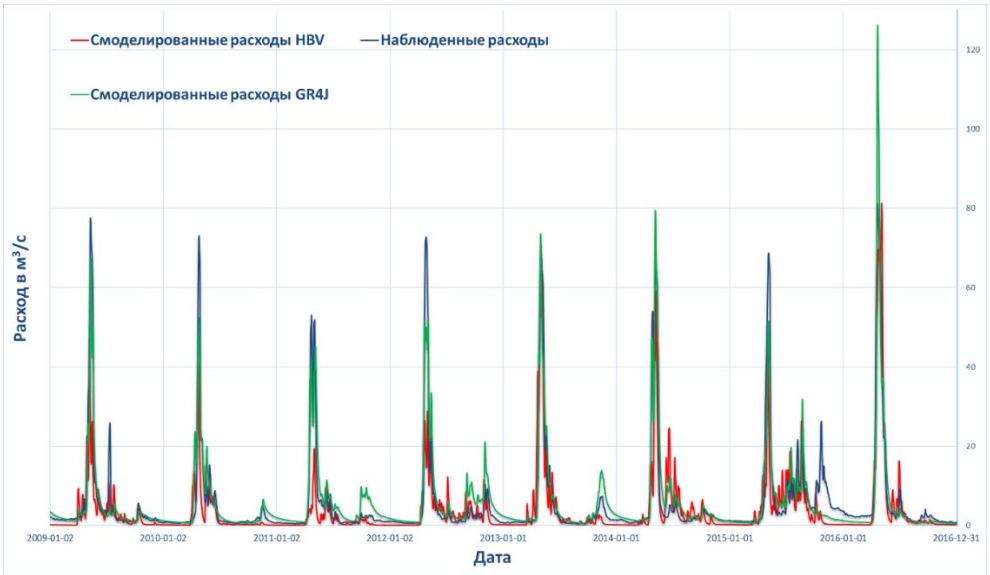

Рисунок 6. Результаты калибровки моделей HBV и GR4J для реки Вельва
Figure 6. Calibration results of the HBV and GR4J models for the Velva River

Таблица 3. Значения метрик по результатам калибровки для HBV и GR4J (Вельва, Ошиб)
Table 3. Metric values based on calibration results for HBV and GR4J (Velva, Oshib)

Метрика	Калибровка HBV	Калибровка GR4J
NSE	0,62	0,86
KGE	0,53	0,87

На этапе валидации наблюдается существенное снижение (до менее чем 0,5) значений метрик качества для модели HBV, однако модель GR4J сохраняет способность к воспроизведению гидрографов – NSE и KGE равны 0,61 и 0,42 соответственно (рисунок 6).

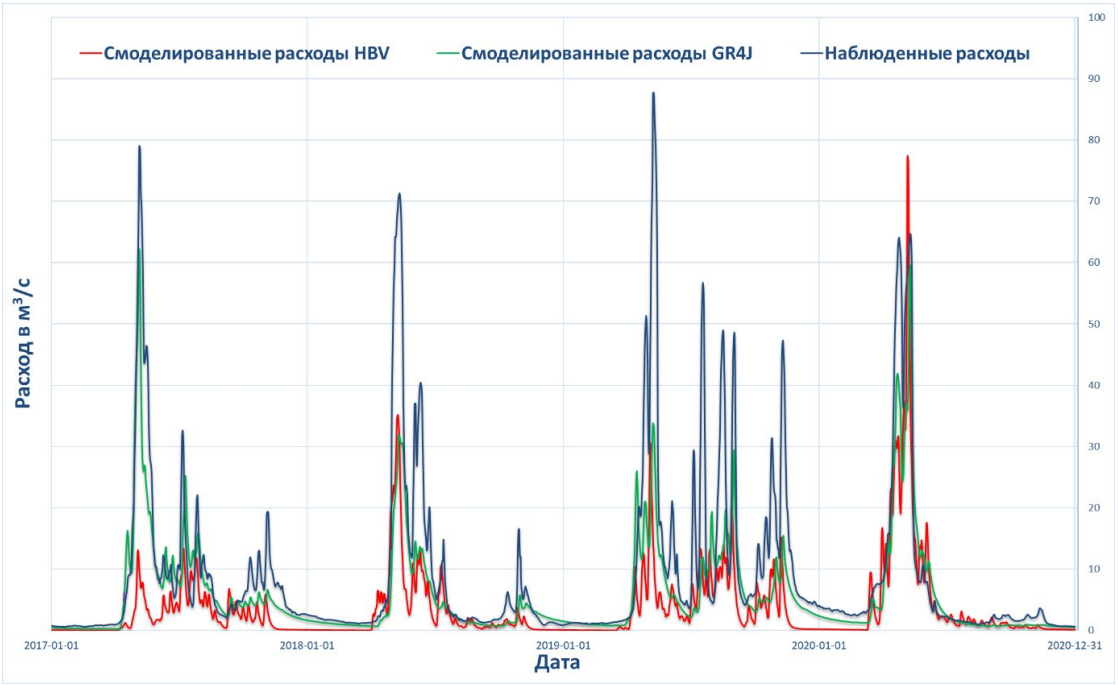

Рисунок 7. Результаты валидации моделей HBV и GR4J на реке Вельва
Figure 7. Validation results of the HBV and GR4J models for the Velva River

Таблица 4. Метрики валидации реки Вельва для HBV и GR4J
Table 4. Validation metrics of the Velva River for HBV and GR4J

Метрика	Валидация HBV	Валидация GR4J
NSE	0,31	0,61
KGE	0,14	0,42

Стоит также отметить, что применённый в работе простой алгоритм калибровки, основанный на генерации случайных наборов параметров методом Монте-Карло и реализованный в библиотеке LuMod, не во всех случаях обеспечивает достижение высоких значений NSE при единичном запуске процедуры подбора. Это связано с вероятностной природой метода, при которой пространство параметров исследуется случайно и без направленного поиска оптимума, что может приводить к пропуску областей с наилучшими решениями. Тем не менее, благодаря своей вычислительной эффективности, простоте реализации и отсутствию требований к сложной настройке, данный подход остаётся удобным инструментом для первичной калибровки моделей [21].

Для реки Буктырмы полученные на этапе калибровки значения NSE также можно охарактеризовать как удовлетворительные. Меньшие, чем для Вельвы, значения NSE связаны с характерным для Буктырмы водным режимом,

осложненным частыми дождевыми паводками, которые зачастую не подкреплены данными наблюдений на метеостанции и приводят к существенным ошибкам моделирования.

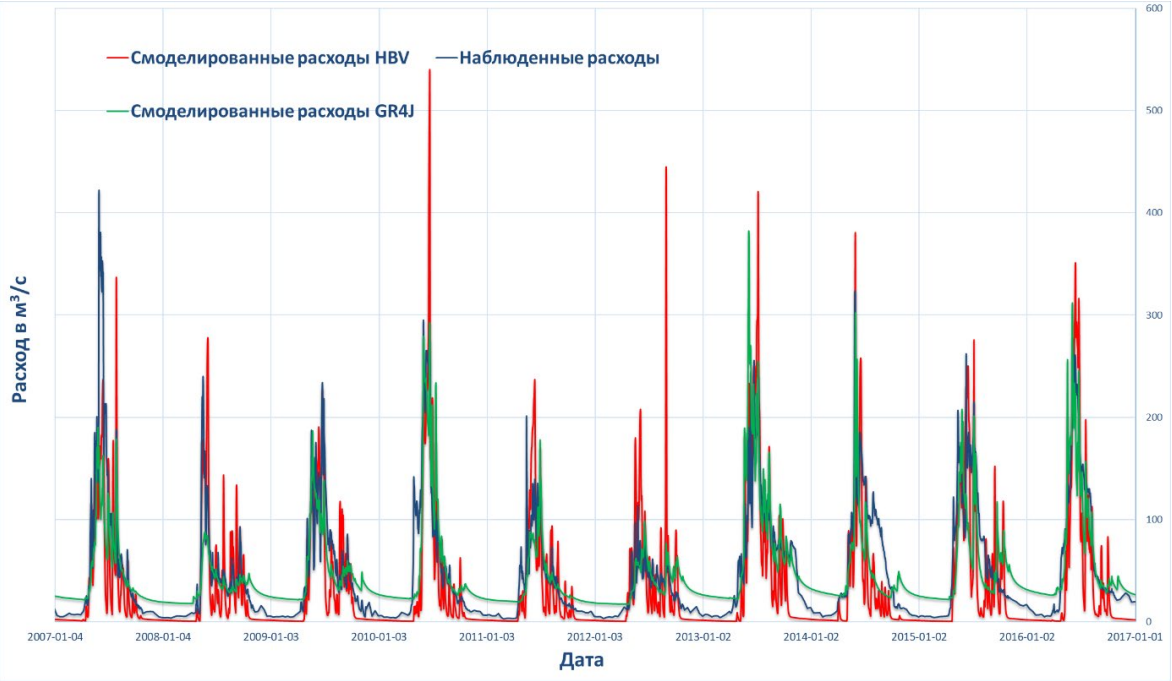

Рисунок 8. Результаты калибровки моделей HBV и GR4J на реке Буктырма
Figure 8. Calibration results of the HBV and GR4J models for the Bukhtarma River

Таблица 5. Значения метрик по результатам калибровки HBV и GR4J на реке Буктырма
Table 5. Metric values based on calibration results for HBV and GR4J for the Bukhtarma River

Метрика	Калибровка HBV	Калибровка GR4J
NSE	0,56	0,66
KGE	0,67	0,7

При переходе от этапа калибровки к независимому периоду валидации (рисунок 9) существенного ухудшения качества моделирования не наблюдается (таблица 6), что свидетельствует о надёжности используемых моделей. Для модели HBV отмечается незначительное снижение значения NSE на 0,11, что, в отличие от первого примера для реки Вельвы, является вполне приемлемым.

В то же время модель GR4J демонстрирует противоположную ситуацию: значение NSE на валидационном периоде оказывается даже больше на 0,03. Подобное поведение может быть связано с более удачной параметризацией модели GR4J, обеспечивающей лучшую устойчивость к вариациям входных данных, а также с особенностями гидрометеорологических условий рассматриваемых периодов. В совокупности полученные результаты подтверждают, что обе модели не подвержены выраженному переобучению, а их параметры обладают достаточной переносимостью на независимые временные интервалы, при этом GR4J демонстрирует несколько более высокую робастность в условиях проведённого эксперимента.

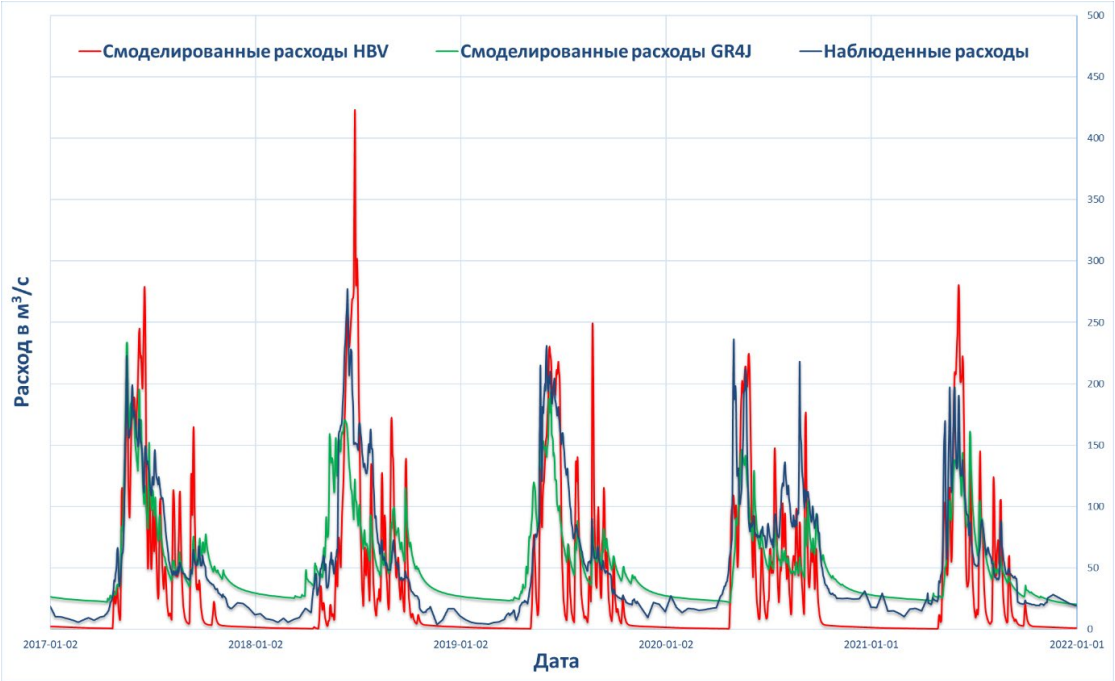

Рисунок 9. Результаты валидации моделей HBV и GR4J на реке Буктырма
Figure 9. Validation results of the HBV and GR4J models for the Bukhtarma River

Таблица 6. Метрики валидации реки Буктырма для HBV и GR4J
Table 6. Validation metrics of the Bukhtarma River for HBV and GR4J

Метрика	Валидация HBV	Валидация GR4J
NSE	0,45	0,69
KGE	0,6	0,67

После оценки итоговых метрик было получено представление, что это далеко не самые лучшие результаты. Так как калибровка проводилась несколько раз для проверки ее стабильности, было принято решение в качестве исходных данных использовать атмосферный реанализ, так как проблема результатов могла быть вызвана значительным удалением метеостанций от рассматриваемых водосборов. Включение реанализа обеспечило более репрезентативное описание климатических условий, что привело к существенному улучшению качества калибровки и повышению согласованности моделируемых и наблюдаемых гидрографов.

Результаты расчёта на основе данных реанализа

Далее аналогично рассмотрим полученные для калибровочного и валидационного периода результаты расчётов по HBV и GR4J с использованием данных атмосферного реанализа.

Как нетрудно заметить (рисунок 10, таблица 7), переход к более репрезентативным для водосбора данным реанализа позволил достичь на калибровочном периоде заметно более высоких значений обоих показателей для обеих моделей.

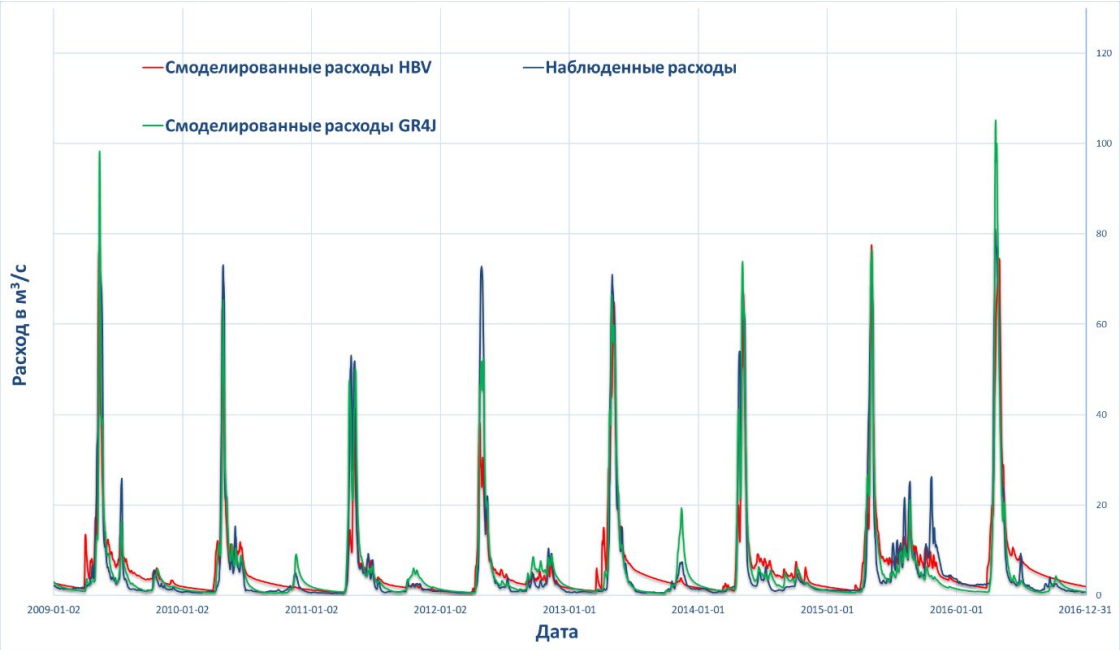

Рисунок 10. Результаты калибровки моделей HBV и GR4J для реки Вельва (исходные данные – реанализ)
Figure 10. Calibration results of the HBV and GR4J models for the Velva River (input data: reanalysis)

Таблица 7. Метрики калибровки для HBV и GR4J для реки Вельва на данных реанализа
Table 7. Calibration metrics for HBV and GR4J for the Velva River using reanalysis data

Метрика	Калибровка HBV	Калибровка GR4J
NSE	0,8	0,89
KGE	0,74	0,91

На валидационном периоде обе модели сохраняют близкое к высокому качество воспроизведения гидрографа (рисунок 11, таблица 8). Можно заметить также некоторое преимущество модели HBV в моделировании паводков во время летне-осенней межени.

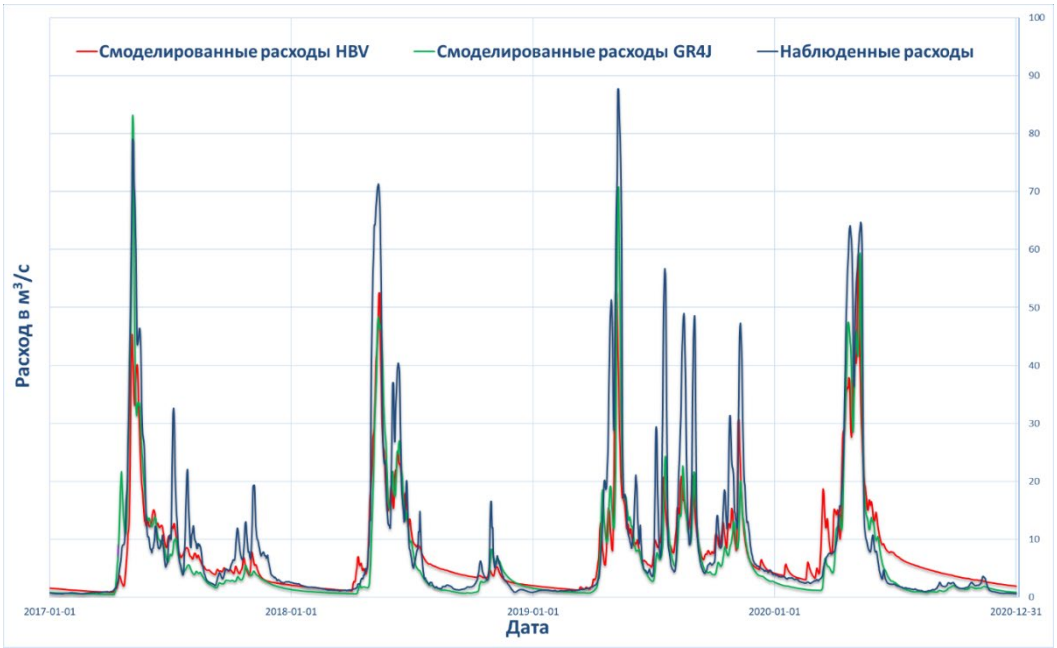

Рисунок 11. Результаты валидации моделей HBV и GR4J для реки Вельва (исходные данные – реанализ)
Figure 11. Validation results of the HBV and GR4J models for the Velva River (input data: reanalysis)

Таблица 8. Метрики результатов валидации HBV и GR4J для реки Вельва на данных реанализа
Table 8. Metrics of validation results for HBV and GR4J for the Velva River using reanalysis data

Метрика	Валидация HBV	Валидация GR4J
NSE	0,68	0,75
KGE	0,54	0,57

По результатам калибровки и валидации моделей для реки Вельва на исходных данных различных источников, можно сделать вывод, что модели в целом хорошо воспроизводят различные фазы гидрологического режима. Расчёт по данным реанализа привёл к увеличению значений NSE на 0,1 для калибровки и 0,25 для валидации в среднем для обеих моделей.

Результаты калибровки моделей для Буктырмы (рисунок 12) так же показывают хорошие значения метрик качества (таблица 9). Обе модели воспроизводят гидрограф с сопоставимой точностью, несколько лучшей оказывается GR4J.

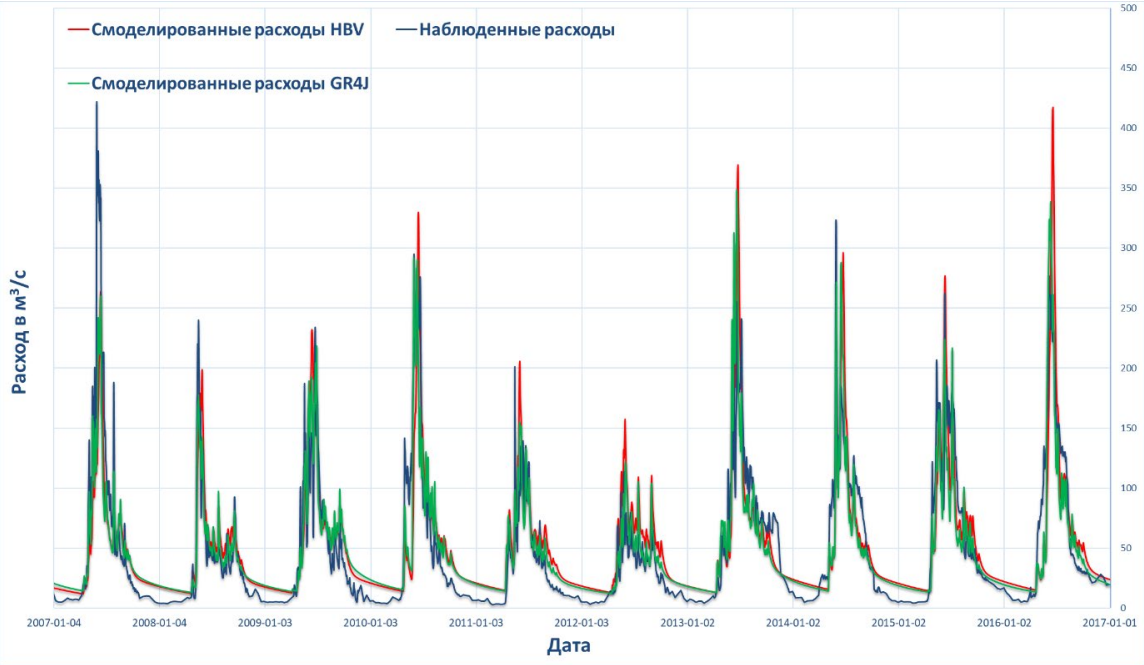

Рисунок 12. Результаты калибровки моделей HBV и GR4J на реке Буктырма (исходные данные – реанализ)
Figure 12. Calibration results of the HBV and GR4J models for the Bukhtarma River (input data: reanalysis)

Таблица 9. Метрики результатов калибровки HBV и GR4J для реки Буктырма на данных реанализа
Table 9. Metrics of calibration results for HBV and GR4J for the Bukhtarma River using reanalysis data

Метрика	Калибровка HBV	Калибровка GR4J
NSE	0,71	0,79
KGE	0,80	0,82

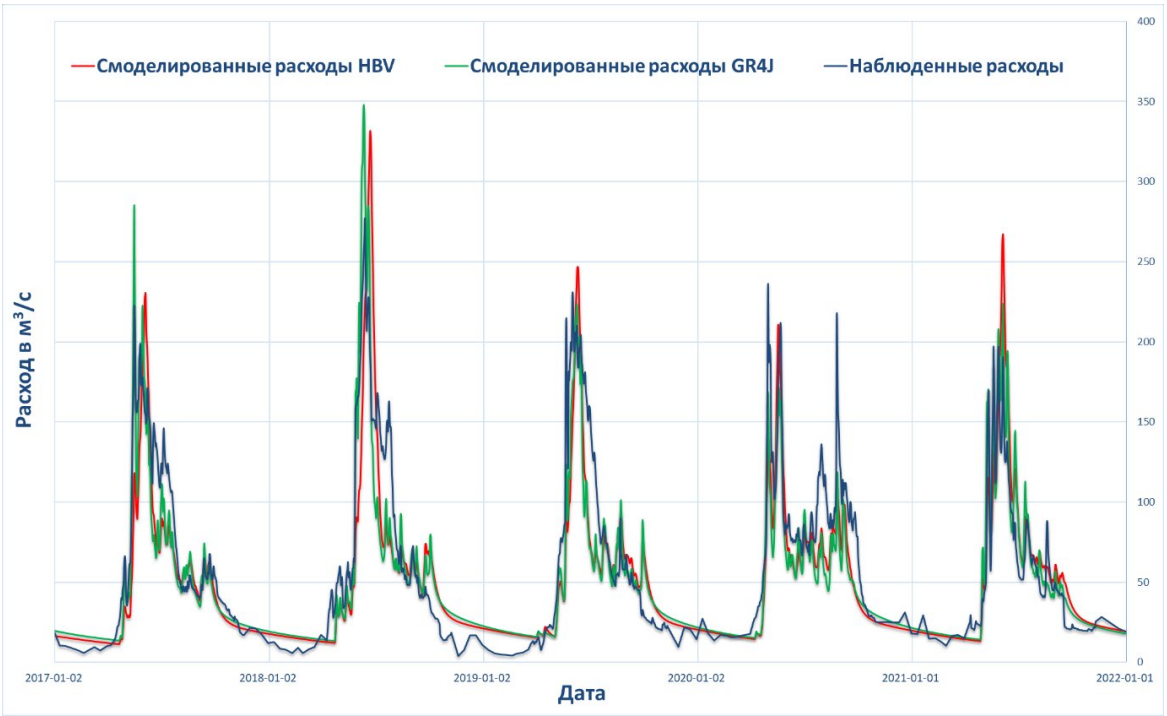

Рисунок 13. Результаты валидации моделей HBV и GR4J для реки Буктырма (исходные данные – реанализ)

Figure 13. Validation results of the HBV and GR4J models for the Bukhtarma River (input data: reanalysis)

Таблица 10. Метрики валидации реки Буктырма для HBV и GR4J на данных реанализа

Table 10. Validation metrics of the Bukhtarma River for HBV and GR4J using reanalysis data

Метрика	Валидация HBV	Валидация GR4J
NSE	0,76	0,81
KGE	0,83	0,85

По результатам калибровки и валидации моделей на реке Буктырма, так же, как и для реки Вельва, можно отметить хорошее воспроизведение гидрографов. Значения NSE по сравнению с калибровкой и валидацией на исходных данных наблюдений с метеостанций в среднем выросли на 0,14 для калибровки и 0,22 для валидации. Так же стоит отметить необычную особенность повышения значений метрик на валидационном периоде.

Обсуждение результатов

В результате сравнения моделей HBV и GR4J (рисунки 11, 13) можно сделать вывод, что GR4J показывает уровень качества лучше, что было продемонстрировано тестированием на общедоступном наборе материалов гидрометеорологических наблюдений (рисунки 7, 11) как по равнинному водосбору реки Вельва, так и по полугорному водосбору реки Буктырма. Модель HBV показала более низкие значения метрик, что можно объяснить бóльшим числом параметров и сравнительно более простым алгоритмом их подбора при калибровке методом Монте-Карло. Модель GR4J, благодаря меньшей структурной сложности и более адаптированному методу калибровки, продемонстрировала устойчивость, что подтверждается относительно небольшим понижением метрик качества при переходе от обучающей выборки к валидационной (таблицы 5, 8 и 10).

Различия между моделями становятся особенно заметны при анализе стока в период межени и паводков. GR4J позволяет точнее моделировать периоды с устойчиво низкими и высокими расходами, в то время как HBV занижает и завышает их, соответственно. В данной работе при калибровке использовался

NSE на данных без преобразования ряда стока, что приводит к увеличенной чувствительности моделей к пиковым значениям во время половодья и в межень.

На основе результатов моделирования, можно заключить, что обе программных реализации моделей HBV и GR4J (LuMod и airGR), доступные для широкого круга пользователей, могут быть применены как в исследовательских целях, так и в образовательной практике. Возможность визуализации, а также достаточно полная документация к программным пакетам, позволяет в относительно короткий срок освоить методы калибровки и интерпретации результатов.

Выводы

Модели HBV и GR4J остаются одними из наиболее применяемых концептуальных моделей в гидрологии благодаря своей простоте, хорошей воспроизводимости и реализации на распространенных и широко используемых языках программирования. На примере моделирования гидрографа рек Вельва и Буктырма была показана успешная реализация обеих моделей к различным условиям формирования стока при наличии базовых данных метео- и гидрологических наблюдений. Дополнительно, была выполнена оценка возможностей использования данных глобального атмосферного реанализа для улучшения качества моделирования в случае нерепрезентативности данных метеорологических измерений. Показано существенное улучшение в этом случае результатов расчетов речного стока для обоих водосборов.

Результаты исследования показывают, что современные реализации моделей HBV и GR4J в библиотеках LuMod и airGR, при наличии базовых знаний программирования, позволяют эффективно адаптировать их для работы с водосборами в различных физико-географических условиях. Это возможно благодаря качественной документации библиотек, удобной реализации алгоритмов моделей со встроенными средствами калибровки параметров и наличию глобальных метеоданных в открытых источниках. Однако стоит сказать и об ограничениях, к которым можно отнести чувствительность результатов к качеству исходных данных, что было показано при сравнении калибровки и валидации на исходных данных с метеостанций с полученными результатами расчетов по метеоданных с реанализа. Так же необходимо учитывать ручной выбор периодов калибровки и валидации. Тем не менее, полученные результаты демонстрируют, что имеющиеся в открытом доступе минимально необходимые для расчёта данные и программные средства позволяют выполнить моделирование стока в различных физико-географических условиях с приемлемой точностью.

Полученные в ходе подготовки данной статьи исходные программные коды размещены в открытом репозитории[9]. Репозиторий содержит описание структуры проекта, инструкции по запуску, сведения об используемых языках программирования, версиях библиотек, а также сопроводительную документацию (README). Представленные материалы могут быть использованы в качестве основы для решения широкого круга задач концептуального моделирования речного стока.

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы № FMWZ-2025-0001 Государственного задания Института водных проблем Российской академии наук.

Acknowledgments

This work was carried out as part of Project No. FMWZ-2025-0001 under the State Assignment of the Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences.

[9] Мирошниченко А.Д. Репозиторий “hydro_models” [Электронный ресурс]. URL: https://github.com/Inlupa/hydro_models/tree/main (дата обращения: 06.05.2026)

Литература / References

1. Мотовилов Ю. Г., Гельфан А. Н. Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М.: РАН, 2018. 296 с. DOI: 10.31857/S9785907036222000001.
2. Mazzoleni M., Amaranto A., Solomatine D. –P. Integrating Qualitative Flow Observations in a Lumped Hydrologic Routing Model. Water Resources Research, 2019, vol. 55, №7, pp.6088–6108. DOI:10.1029/2018WR023768.
3. Refsgaard J.C., Knudsen J. Operational Validation and Intercomparison of Different Types of Hydrological Models. Water Resources Research, 1996, vol. 32, no. 7, pp. 2189–2202. DOI:10.1029/96WR00896.
4. Coron L., Thirel G., Delaigue O. et al. The suite of lumped GR hydrological models in an R package. Environmental Modelling & Software, 2017, vol .94, pp.166–171. DOI:10.1016/j.envsoft.2017.05.002.
5. Bergström S. Development and Application of a Conceptual Runoff Model for Scandinavian Catchments SMHI Rep. RHO 7. 1976.134 p.
6. Slater L. J., Thirel G., Harrigan S. et al. Using R in hydrology: a review of recent developments and future directions. Hydrology and Earth System Sciences, 2019, vol. 23, no. 7. pp. 2939–2963. DOI:10.5194/hess-23-2939-2019.
7. Lidén R. A new approach for estimation suspended sediment yield. Hydrology and Earth System Sciences, 1999, vol.3, no.2. pp.285–294. DOI:10.5194/hess-3-285-1999.
8. Pettersson A., Arheimer B., Johansson B. Nitrogen Concentrations Simulated with HBV-N: New Response Function and Calibration Strategy. Hydrology Research, 2001, vol. 32, no. 3, pp. 227–248. DOI:10.2166/nh.2001.0014.
9. Solomatine D. P., Shrestha D. L. A novel method to estimate model uncertainty using machine learning techniques / Water Resources Research, 2009, vol. 45, no. 12. p. 1181. DOI:10.1029/2008WR006839.
10. Perrin C., Michel C., Andréassian V. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. Journal of Hydrology, 2003, vol.279, no. 1–4, pp.275–289. DOI:10.1016/S0022-1694(03)00225-7.
11. Oudin L., Michel C., Anctil F. Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? Journal of Hydrology, 2005, vol. 303, no. 1–4, pp.275–289. DOI:10.1016/j.jhydrol.2004.08.025.
12. Ayzel, G. OpenForecast v2: Development and Benchmarking of the First National-Scale Operational Runoff Forecasting System in Russia. Hydrology, 2021, vol. 8, no. 1, p.3. DOI:10.3390/hydrology8010003.
13. Mathevet R. Camargue incertaine. Sciences, usages et natures. Ed. Buchet Chastel, Col. Écologie, Paris, 2004. Pp.99–100. DOI: 10.4000/mediterranee.356.
14. Lahnik O., Tramblay Y., Hanich L. Future water resources and droughts in the Atlas Mountains of Morocco under a high-emission climate scenario. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2025, vol. 59, no. 5, p. 102371. DOI:10.1016/j.ejrh.2025.102371.
15. Wijayarathne D. B., Coulibaly P. Identification of hydrological models for operational flood forecasting in St. John's, Newfoundland, Canada. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2020, vol. 27, p.100646. DOI:10.1016/j.ejrh.2019.100646.
16. Valéry A., Andréassian V., Perrin C. As simple as possible but not simpler': What is useful in a temperature-based snow-accounting routine? Part 2 – Sensitivity analysis of the Cemaneige snow accounting routine on 380 catchments. Journal of Hydrology, 2014, vol. 517, no. 12., pp.1176–1187. DOI:10.1016/j.jhydrol.2014.04.058.
17. Абрамов Д. В., Курочкина Л. С., Морейдо В. М. Разработка базы данных гидрологических, метеорологических и физико-географических характеристик для речных водосборов на территории

Российской Федерации // Метеорология и гидрология. 2026. Вып. 3, С.70–83. DOI:10.52002/0130-2906-2026-3-70-83.

18. Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A. et al. ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. Earth System Science Data, 2021, vol.13, no. 9. pp. 4349–4383. DOI:10.5194/essd-13-4349-2021.
19. Chen J., Brissette F. P. Hydrological Modelling Using Proxies for Gauged Precipitation and Temperature. Hydrol. Process., 2017, vol. 31, pp. 3881–3897. DOI:10.1002/HYP.11304.
20. Cirilo J. A., de Oliveira D.S., de Figueiredo Ferraz G., Alves F.H.B., de Lucena Corrêia Campos M., de Araújo L.F., de Oliveira O.F., de Souza J.D.S., da Silva Correa, S., Vasconcelos H.X.T. et al. From Small to Mega River Basins−adaptation of a Lumped Hydrological Model for Runoff Simulation. J. Hydrol., 2026, 671, 135263. DOI:10.1016/j.jhydrol.2026.135263.
21. Wang A., Solomatine D. P. Practical Experience of Sensitivity Analysis: Comparing Six Methods, on Three Hydrological Models, with Three Performance Criteria. Water, 2019, vol .11, no. 5., p. 1062. DOI:10.3390/w11051062.

Поступила в редакцию / Received 27.03.2026
Принята к публикации / Accepted 27.05.2026

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мирошниченко Антон Дмитриевич, аспирант, Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия; главный эксперт, ООО «СИБИНТЕК-СОФТ»; ORCID: 0009-0007-5343-0847, SPIN-код: 9777-4758; anton199823@gmail.com.

Головнин Кирилл Игоревич, инженер, Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия; SPIN-код: 9905-4381, ORCID: 0009-0001-9551-8755; e-mail: golovnin98@bk.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anton D. Miroshnichenko, Postgraduate Student, Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; Chief Expert, SIBINTEK-SOFT; ORCID: 0009-0007-5343-0847, SPIN-code: 9777-4758; e-mail: anton199823@gmail.com.

Kirill I. Golovnin, engineer, Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; SPIN-code: 9905-4381, ORCID: 0009-0001-9551-8755; e-mail: golovnin98@bk.ru.