

Гидрометеорология и экология. 2024. № 77. С. 626—644.
Hydrometeorology and Ecology. 2024;(77):626—644.

Научная статья

УДК [556.535.1+556.535.3]:004.9(282.247.2)(282.257.1.29)
doi: 10.33933/2713-3001-2024-77-626-644

Методика краткосрочного прогнозирования уровней (расходов) воды рек Ленинградской области и Камчатского края с использованием автоматизированной информационной системы (АИС)

*Михаил Владимирович Георгиевский¹, Светлана Сергеевна Чепикова¹,
Антон Викторович Терехов², Эдуард Эдуардович Казаков³*

¹ Государственный гидрологический институт, mgeorgievsky@hotmail.com

² Арктический и антарктический научно-исследовательский институт

³ Независимый исследователь

Аннотация. В статье рассматривается методика прогнозирования уровней (расходов) воды с помощью автоматизированной информационной системы краткосрочных гидрологических прогнозов (АИС), разработанная в Государственном гидрологическом институте (ГГИ) для рек Ленинградской области (реки Тихвинка, Луга, Тосна и Тигода) и Камчатского края (реки Большая Воровская и Амчигача). В настоящее время технология прогнозирования АИС внедрена в оперативную практику Северо-Западного УГМС. АИС является готовым решением в области информационных технологий, требующим минимального количества исходной информации и времени для развертывания системы. Она имеет хорошие перспективы дальнейшей адаптации для различных речных бассейнов Российской Федерации.

Ключевые слова: методика краткосрочного прогнозирования, автоматическая информационная система, гидрологическое моделирование, автоматическая калибровка гидрологических моделей, реки Ленинградской области и Камчатского края.

Благодарности: работа выполнена в ГГИ в рамках темы Росгидромета 1.1.9 «Разработка и совершенствование моделей, методов и технологий прогнозирования гидрологических процессов и явлений в бассейнах рек и водохранилищ» (№ госрегистрации АААА—А20—120112690061—1).

Для цитирования: Георгиевский М. В., Чепикова С. С., Терехов А. В., Казаков Э. Э. Методика краткосрочного прогнозирования уровней (расходов) воды рек Ленинградской области и Камчатского края с использованием автоматизированной информационной системы (АИС) // Гидрометеорология и экология. 2024. № 77. С. 626—644. doi: 10.33933/2713-3001-2024-77-626-644.

Original article

Methodology of short—term water levels (discharges) forecast of rivers in Leningrad and Kamchatka regions using an automated information system (AIS)

*Mikhail V. Georgievsky¹, Svetlana S. Chepikova¹,
Anton V. Terekhov², Eduard E. Kazakov³*

¹ State Hydrological Institute, mgeorgievsky@hotmail.com

² Arctic and Antarctic Research Institute

³ Independent researcher

Summary. The article discusses a methodology for short-term forecasting of water levels and discharges in rivers of Leningrad and Kamchatka regions, developed by the State Hydrological Institute (SHI). The approach utilizes an Automated Information System (AIS) that integrates hydrological models (HBV, SimHYD, GR4J) and employs automated calibration methods to enhance accuracy. The system's forecasts are based on minimal input data, including daily temperature, precipitation, and water levels, ensuring adaptability for diverse river basins. AIS has been successfully implemented for operational use in the Northwest Hydrometeorological Service and is undergoing adaptation for rivers in Kamchatka. Testing has demonstrated high efficiency, with Nash-Sutcliffe model efficiency coefficients ranging from 0,62 to 0,90 for rivers in Leningrad. For Kamchatka, lower efficiency values are attributed to ongoing calibration. The system supports multiple lead times and improves predictions by averaging results from different models and correcting them using real-time data. The study emphasizes AIS's potential for national-scale application and identifies further improvements, such as integrating additional models for specific hydrological conditions and enhancing data processing techniques. The approach is positioned as a cost-effective and versatile tool for hydrological forecasting in Russia. This article presents a methodology for forecasting water levels and discharges using an automated information system for short-term hydrological forecasting (AIS), developed at the State Hydrological Institute (SHI) for rivers in the Leningrad (Tikhvinka, Luga, Tosna, and Tigoda) and Kamchatka (Bolshaya Vorovskaya and Amchigacha) Regions. The AIS forecasting technology has been integrated into the operational practice of the North-West Hydrometeorological Service. AIS is a comprehensive IT solution that requires minimal input data and setup time, offering significant potential for adaptation to other river basins across the Russian Federation.

Keywords: short-term forecasting methodology, automatic information system, hydrological modeling, automatic calibration of hydrological models, rivers of Leningrad and Kamchatka regions.

For citation: Georgievsky M. V., Chepikova S. S., Terekhov A. V., Kazakov E. E. Methodology of short—term water levels (discharges) forecast of rivers in Leningrad and Kamchatka regions using an automated information system (AIS). *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024;(77):626—644. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2024-77-626-644.

Одним из важнейших научных направлений деятельности Росгидромета является разработка систем автоматизированной подготовки данных и выпуска гидрологических прогнозов с целью повышения их надежности и своевременного принятия мер по защите народнохозяйственных объектов и населения от воздействия опасных гидрологических явлений [1]. Прогнозирование всегда являлось приоритетным направлением гидрологической науки с момента начала ее развития. За счет применения современных подходов в области информационных технологий (ИТ) становится возможным существенно автоматизировать методы гидрологического мониторинга и прогнозирования. Отметим, что в Российской

Федерации [2, 3, 4] и за рубежом [5] разработано множество различных автоматизированных информационных гидрологических систем. Они связаны в основном с мониторингом, моделированием и прогнозированием гидрологической обстановки в бассейнах рек. Примером применения такой системы на региональном уровне может служить система руководства по борьбе с быстро развивающимися наводнениями (англ. Flash Flood Guidance System) [6]. Если же рассматривать территорию Российской Федерации, то, несмотря на достаточное количество научных публикаций, посвященных автоматизированным системам гидрологических прогнозов, к полноценно функционирующим системам, выполняющим в настоящий момент в режиме реального времени краткосрочные гидрологические прогнозы, можно отнести только системы, разработанные в ФГБУ «Гидрометцентр России» («ГИС-Амур» [7], «ГИС-Волга» [8] и ГИС «Гидрология» [8]). Разработка альтернативных автоматизированных информационных систем (АИС) краткосрочных гидрологических прогнозов, основанных на компонентах с открытым исходным кодом, является актуальной и важной научно-практической задачей современной российской гидрологии.

В Государственном гидрологическом институте (ГГИ) на протяжении нескольких последних лет разрабатывается методика краткосрочного гидрологического прогнозирования, которая является основой АИС [9, 10, 11]. В настоящий момент АИС передана в опытную эксплуатацию в Северо-Западное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Северо-Западное УГМС) и используется для краткосрочного прогнозирования уровней воды для створов на реках Ленинградской области: Тихвинка, Луга, Тосна и Тигода. В конце 2022 г. на техническом совете Северо-Западного УГМС было принято решение внедрить технологию АИС в оперативную практику УГМС со статусом «консультативный» прогноз с заблаговременностью 1—2 суток для гидрологических постов: р. Тихвинка — г. Тихвин (прогнозы уровней периода половодья), р. Тихвинка — д. Горелуха (прогнозы уровней периодов половодья и дождевых паводков). В данный момент в сотрудничестве со специалистами Камчатского УГМС проходит заключительная фаза адаптации системы для рек Камчатского края (р. Амчигача и р. Большая Воровская).

Цель статьи — представить разработанную в ГГИ методику краткосрочного гидрологического прогнозирования, основанную на результатах моделирования трёх концептуальных гидрологических моделей (HBV, SimHYD и GR4J), и продемонстрировать её эффективность для различных речных бассейнов.

Общие сведения об автоматизированной информационной системе краткосрочных гидрологических прогнозов

На рис. 1 показана общая схема функциональных частей и потоков данных АИС. Система состоит из двух основных функциональных частей: подсистемы получения данных и гидрологического прогнозирования и подсистемы веб-интерфейса (веб-сервис) для конечных пользователей.

АИС функционирует по принципам клиент-серверной архитектуры. Серверное приложение построено на компонентах с открытым исходным кодом.



Рис. 1. Общая схема функциональных частей и потоков данных в АИС.

Fig. 1. Generalized diagram of the automatic information system for short-term hydrological forecasts.

В разработанной системе используются операционная система GNU/Linux Ubuntu, а также её средства по запуску операций по расписанию, компактная однофайловая система управления базами данных SQLite, язык программирования Python с библиотеками Flask, SQLAlchemy, SciPy, GDAL. Интегрированные в систему гидрологические модели HBV, SimHYD, GR4J также реализованы на языке Python. Графический веб-интерфейс АИС построен на базе языка JavaScript с использованием технологий Leaflet, DHTMLX и ApexCharts.

Первоначально были сформулированы два основных требования к разрабатываемой системе:

1. Использование минимального количества исходной гидрометеорологической информации для краткосрочного прогноза уровня воды (суточные температура воздуха, осадки и расходы или уровни воды).
2. Возможность быстрой адаптации системы для любого потенциально исследуемого речного бассейна, для которого имеется минимальный объем исходной информации.

АИС представлена на сервере Государственного гидрологического института и доступна по ссылке URL: <http://91.151.178.102:20006/>.

Исследуемые речные бассейны и исходная гидрометеорологическая информация

В настоящее время система используется для шести рек: четырех — в Ленинградской области и двух — в Камчатском крае, с расположенными на них десятью гидрологическими постами (рис. 2). На рис. 2 представлены бассейны рек в Ленинградской области и Камчатском крае, с расположенными на них гидрологическими постами, отображенные в разделе АИС «Карта» на сайте ФГБУ «ГГИ», а в табл. 1 приведены их основные характеристики.

Исходной гидрометеорологической информацией, необходимой для прогнозирования, являются:

— суточные данные по температуре воздуха и атмосферным осадкам, а также данные по расходам или уровням воды за исторический период, необходимые для моделирования и калибровки расходов (уровней) воды с помощью гидрологических моделей, входящих в модуль гидрологического моделирования и прогнозирования, а также верификации результатов моделирования;

— прогнозные данные по суточным температуре воздуха и осадкам (для АИС возможна различная заблаговременность прогнозных данных, в настоящий момент используются метеорологические данные заблаговременностью 3 суток)



Рис. 2. Бассейны исследуемых рек Ленинградской области (1—7) и Камчатского края (8—9) с расположенными на них гидрологическими постами:

- 1 — р. Луга — г. Кингисепп, 2 — р. Тосна — ст. Тосно, 3 — р. Тигода — г. Любань, 4 — р. Луга — ст. Толмачёво, 5 — р. Луга — г. Луга, 6 — р. Тихвинка — д. Горелуха, 7 — р. Тихвинка — г. Тихвин, 8 — р. Амчигача — с. Усть—Большерецк, 9 — р. Большая Воровская — с. Соболево.

Fig. 2. The basins of the studied rivers of Leningrad (1—7) and Kamchatka (8—9) Regions with the hydrological posts located on them:

- 1 — riv. Luga River — Kingisepp city, 2 — riv. Tosna — Tosno station, 3 — riv. Tigoda — Lyuban city, 4 — riv. Luga — Tolmachevo station, 5 — riv. Luga — Luga city, 6 — riv. Tikhvinka — vil. Gorelukha, 7 — riv. Tikhvinka — Tikhvin city, 8 — riv. Amchigacha — vil. Ust—Bolsheretsk, 9 — riv. Bolshaya Vorovskaya — vil. Sobolevo.

для осуществления гидрологического прогнозирования и фактические данные об уровнях (расходах) воды для коррекции результатов прогнозирования.

Таблица 1

Основные характеристики
исследуемых речных бассейнов и гидрологических постов (ГП)
Main characteristics of the studied river basins and hydrological gauging stations

Река — пост	Площадь бассейна, км ²	Отметка нуля поста	Система высот	Дата открытия	Разряд ГП	Используемые данные наблюдений
р. Тихвинка — г. Тихвин	1600	32,08	БС	11.10.2005	ГП2	с 2008 года
р. Тихвинка — д. Горелуха	2070	28,11	БС	06.08.1876	ГП1	с 2008 года
р. Луга — г. Луга	2330	35,08	БС	30.09.1934	ГП1	с 2008 года
р. Луга — ст. Толмачёво	6165	30,9	БС	14.04.1916	ГП1	с 2008 года
р. Луга — г. Кингисепп	12308	-0,06	БС	28.12.1932	ГП1	с 2008 года
р. Тосна — ст. Тосно	1300	24,69	БС	01.01.1920	ГП1	с 2008 года
р. Тигода — ст. Любань	589	28,9	БС	15.04.1944	ГП1	с 2008 года
р. Амчигача — с. Усть-Большерецк	304	2,00	усл.	26.08.1940	ГП3	с 1980 года
р. Большая Воровская — с. Соболево	3630	7,96	усл.	02.03.1941	ГП1	с 1976 года

Методика краткосрочного прогнозирования уровней/расходов воды

На рис. 3 представлено схематическое описание методики краткосрочного прогнозирования уровней (расходов) воды.

На первом этапе осуществляется адаптация модуля моделирования и прогнозирования для исследуемого речного бассейна (створа), который состоит из трех концептуальных гидрологических моделей HBV, SimHYD и GR4J. Для этой цели используются суточные гидрометеорологические данные по трем переменным, желательно за наиболее продолжительный исторический период: температуре воздуха, атмосферным осадкам и расходам или уровням воды. После подготовки необходимых данных по каждой модели осуществляется моделирование речного стока с помощью методов автоматической калибровки основных параметров модели. Результатом является оптимальный набор параметров модели, позволяющий моделировать речной сток наиболее приближенно к фактическому. Верификация осуществляется с помощью коэффициента Нэша-Сатклиффа.

На втором этапе осуществляется моделирование прогнозных значений речного стока с использованием полученного оптимального набора параметров для каждой гидрологической модели. Для этого используются соответствующие прогнозы температуры воздуха и осадков, а также текущие значения уровня или расхода воды с использованием зависимости $Q = f(H)$.

Возможны несколько вариантов получения прогнозных метеоданных: с серверов управлений гидрометслужбы Росгидромета, по электронной почте, с порталов свободно распространяемых метеорологических данных (например, Global

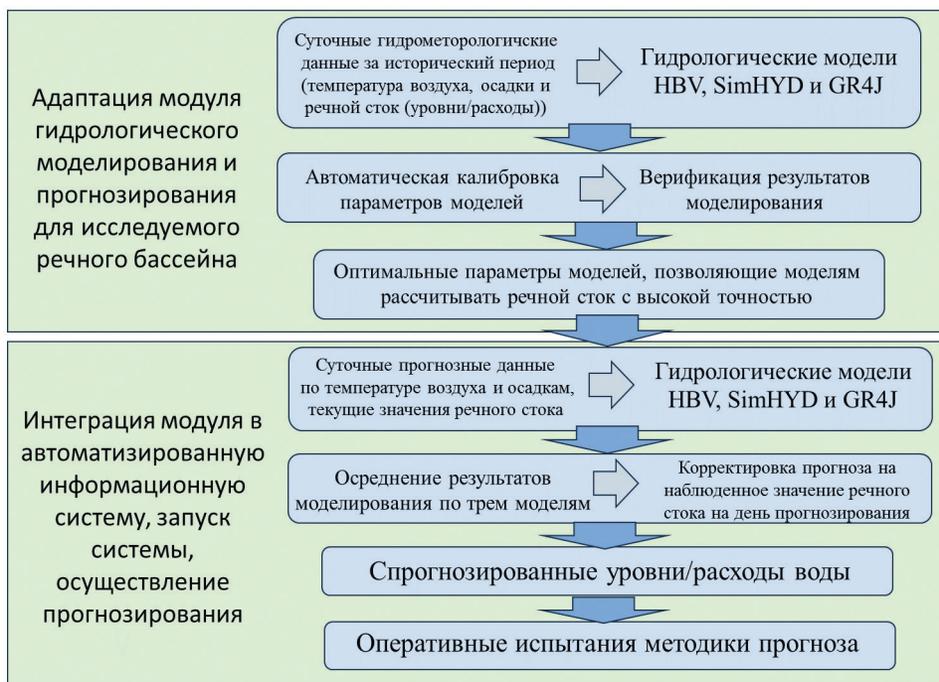


Рис. 3. Схематическое описание методики краткосрочного прогнозирования расходов/уровней воды.

Fig. 3. Schematic description of the methodology for short-term forecasting of water levels/discharges.

Forecast System (GFS) [12] или OpenWeather (OWM) [13]). Прогнозные данные для рек Ленинградской области предоставляются Северо-Западным УГМС (прогнозные метеорологические данные заблаговременностью 84 часа выкладываются на сервер УГМС), а данные для рек Камчатского края получаются с портала свободно распространяемых метеорологических данных Open-Meteo.com.

После получения прогнозной информации каждой моделью осуществляется моделирование расходов (уровней воды). Прогнозные значения, полученные по каждой модели, сначала усредняют, а затем корректируют на наблюдаемое значение уровня воды на день прогнозирования. Усреднение прогнозных значений от нескольких моделей помогает сгладить ошибки, характерные для каждой из них, повышая общую точность прогноза, так как модели могут компенсировать недостатки друг друга. Корректировка усредненного прогноза на основе реального значения за «сегодняшний» день позволяет учитывать актуальные изменения и повышает точность прогноза в краткосрочной перспективе.

Завершающим этапом перед применением методики в составе АИС являются оперативные испытания эффективности прогнозирования. Испытания осуществляются в соответствии с руководящими документами Росгидромета [14, 15].

Оценка эффективности методики рассчитывается отдельно для каждого гидрологического поста, для которого прогнозируется уровень (расход) воды на основе критериев, описанных ниже.

Модуль гидрологического моделирования и прогнозирования

Модуль гидрологического моделирования и прогнозирования является основой АИС. В настоящий момент модуль включает три концептуальные гидрологические модели: HBV, SimHYD и GR4J. Данные модели являются моделями связи количества осадков и температуры воздуха с объемом речного стока и параметризуются набором численных переменных, подбор оптимальных значений которых является единственной задачей калибровки моделей. Краткое описание моделей приводится ниже.

Гидрологическая модель HBV, разработанная в 70-е годы прошлого века в Швеции [16], является частью гидрологической многоцелевой системы Всемирной Метеорологической Организации. Модель включает три основных модуля: формирование и таяние снежного покрова, динамика влаги в почве и испарение, формирование и трансформация стока. Входные данные — атмосферные осадки, температура воздуха и потенциальная эвапотранспирация. HBV — известная гидрологическая модель, изначально разработанная для применения в снегодоминантных речных бассейнах. Она успешно адаптирована для речных бассейнов, расположенных в разных странах, включая Российскую Федерацию [17].

Модель SimHYD (на англ. SIMplified HYDrograph — упрощенный гидрограф) разработана австралийским Совместным исследовательским центром гидрологии водосбора (на англ. Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology) [18]. Является упрощенной версией концептуальной гидрологической модели «осадки—речной сток» HYDROLOG, разработанной в 1972 г. SimHYD моделирует ежедневный сток, используя в качестве входных данных суточные осадки и потенциальную эвапотранспирацию. Принцип работы модели основан на взаимодействии трех резервуаров: потери воды при перехвате осадков растительностью, почвенной влаги и подземных вод. SimHYD — одна из наиболее часто используемых моделей дождевого стока в Австралии, которая была успешно применена более чем для 360 речных бассейнов страны [19, 20].

Модель GR4J была разработана в начале 1980-х годов в государственном исследовательском институте Cemagref во Франции. Первая версия модели имела только один параметр. Дальнейшая ее разработка проводилась путем использования большого количества водосборов для оценки качества моделирования и улучшения самой модели. Подход к моделированию GR4J является, в основном, эмпирическим [21] и состоит из поиска наиболее эффективных ее структур с целью получения надежной и экономичной с точки зрения исходных данных и параметров гидрологической модели. GR4J была применена для большого количества водосборов во Франции, а также в других странах с использованием различных систем тестирования и продемонстрировала хорошие результаты [22, 23].

Так как в модели SIMHYD и GR4J не включен блок расчета снеготаяния, то совместно с ними использовалась модель формирования снежного покрова

Sema-Neige [24, 25]. Данная модель основана на методе температурных коэффициентов стаивания, имеет возможность полураспределенного применения и в качестве исходных данных использует температуру воздуха и осадки.

Модуль гидрологического моделирования и прогнозирования также включает:

- блок пересчета смоделированных расходов в уровни воды и обратно;
- блок увязки уровней воды между гидрологическими постами;
- модель машинного обучения CatBoost (градиентного бустинга) для осуществления прогнозов уровней воды для створов, где не измеряются расходы (работает в тестовом режиме).

Калибровка моделей

Для успешного применения гидрологической модели для конкретного речного водосбора (под успешным подразумевается возможность моделировать речной сток близко к наблюдаемым значениям) необходимо подобрать оптимальные значения основных ее параметров. Для этого используются методы ручной или автоматической калибровки. Так как при разработке АИС ставилась задача быстрой адаптации системы для любого гипотетического исследуемого речного бассейна, то было решено включить в систему методы автоматической калибровки параметров, учитывая, что для концептуальных моделей применение данных методов не требует значительных временных ресурсов по сравнению с распределенными сеточными моделями.

Изначально для подбора оптимальных параметров моделей применялся автоматизированный подход, основанный на методе случайного подбора оптимальных параметров, схожий с подходом, предложенным в [26], суть которого заключается в следующем: сначала выполняется 100000 итераций случайного выбора параметров с оценкой каждой комбинации по критерию Нэша-Сатклиффа на основе архивной метеорологической и гидрологической информации за наиболее продолжительный доступный период. Затем отбирается лучшая комбинация параметров, и для неё выполняется новый итеративный отбор — каждый параметр немного увеличивается или уменьшается, и оценивается градиент критерия Нэша-Сатклиффа. После того, как для параметра достигается наилучшее локальное значение критерия, осуществляется переход к следующему параметру.

Позже в АИС был добавлен второй способ оптимизации параметров, который основан на алгоритме глобальной автоматизации и разработан специально для калибровки концептуальных гидрологических моделей в Университете Аризоны (на англ. Shuffled Complex Evolution Model — SCE-UA). SCE-UA ищет глобальный оптимум функции, эволюционируя кластеры образцов, взятых из пространства параметров с помощью систематического конкурентного эволюционного процесса. Алгоритм продемонстрировал свою эффективность при калибровке гидрологических моделей [27] и широко применяется в различных научных и инженерных областях. Процесс калибровки в АИС заключается в создании конфигурационных файлов с заданными граничными значениями параметров моделей, выбора целевой функции (в нашем случае было выбрано значение квадратного корня среднеквадратической ошибки) и запуска калибровки с выбранным количеством итераций (100 тысяч).

Верификация результатов моделирования и оценки качества гидрологических прогнозов

В настоящее время одним из наиболее часто употребляемых в большинстве стран мира критериев как для оценки качества результатов работы гидрологических моделей, так и для калибровки и верификации моделей, является критерий Нэша-Сатклиффа, разработанный в 1970 г. [28]. На основе данного критерия осуществлялся выбор оптимальных параметров моделей.

В практике Росгидромета вывод о применимости методики прогнозирования делается по результатам сравнения с погрешностью альтернативного прогноза [29]. Основным критерием качества и применимости прогноза является отношение S/σ_{Δ} , где S — средняя квадратическая погрешность проверяемых прогнозов, σ_{Δ} — погрешность альтернативного прогноза. Поскольку разработанная АИС предназначена для краткосрочных прогнозов уровней воды, в качестве альтернативной методики выбран инерционный прогноз. Для оценки его погрешности используется следующая формула:

$$\sigma_{\Delta} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta_i - \underline{\Delta})^2}, \quad (1)$$

где σ_{Δ} — погрешность альтернативного прогноза, n — количество измерений.

Величина $\underline{\Delta}$ вычисляется как среднее арифметическое ряда $\Delta_1 \dots \Delta_n$, образованного n наблюдавшимися изменениями уровня за период заблаговременности прогноза. Число прогнозов для каждой временной заблаговременности прогноза (1, 2 и 3 суток вперед) должно быть не менее 60 для периода половодья и не менее 30 для дождевых паводков (для каждого поста). Отношение S/σ_{Δ} рассчитывается отдельно для периодов половодья, паводков и межени. Эффективной считается методика, для которой отношение S/σ_{Δ} меньше или равно 0,8.

По значениям показателя S/σ_{Δ} определяется обеспеченность методики в процентах (P): каждый прогноз считается оправдавшимся, если его ошибка не превышает допустимую погрешность, равную $\pm 0,674\sigma_{\Delta}$. Обеспеченность методики рассчитывается исходя из отношения оправдавшихся прогнозов к общему их количеству. Оценка эффективности проводится отдельно для ансамблевого прогноза, скорректированного с учетом фактического уровня воды, и для нескорректированного, а также отдельно для всех категорий заблаговременности: одни, двое и трое суток.

Результаты применения гидрологических моделей для исследуемых бассейнов

В табл. 2 представлена оценка качества результатов расчетов по гидрологическим моделям, входящим в состав модуля гидрологического прогнозирования и моделирования АИС, для исследуемых рек, выполненная методом автоматической калибровки SCE-UA за исторический период. Представленные значения получены за 2008—2020 гг. для рек Ленинградской области и 1986—1994 гг. для рек Камчатского края. На основе полученных параметров моделей автоматизированной информационной системой в настоящее время осуществляется расчет прогнозных значений речного стока в исследуемых створах.

Оценка качества результатов моделирования гидрологических моделей, входящих в состав АИС, для исследуемых рек, полученных методом автоматической калибровки SCE-UA за исторический период

Quality assessment of the modeling results of the hydrological models included in the AIS for the studied rivers, obtained by the SCE-UA automatic calibration method for the historical period

Река — створ	HBV		SimHYD		GR4	
	СКО	Критерий Нэ-ша-Сатклиффа	СКО	Критерий Нэ-ша-Сатклиффа	СКО	Критерий Нэ-ша-Сатклиффа
р. Луга — г. Кингисепп	675	0,73	76,5	0,65	79,1	0,63
р. Луга — г. Луга	51,9	0,73	60,8	0,63	60,1	0,63
р. Луга — ст. Толмачёво	65,1	0,78	64,9	0,78	76,3	0,70
р. Тигода — г. Любань	41,5	0,83	45,0	0,80	47,6	0,77
р. Тосна — ст. Тосно	29,9	0,90	38,1	0,84	61,2	0,58
р. Амчигача — с. Усть-Большерецк	17,5	0,45	20,9	0,22	19,8	0,30
р. Большая Воровская — с. Соболево	11,9	0,64	10,5	0,71	10,3	0,73

В качестве примера на рис. 4 и 5 показаны рассчитанные гидрологическими моделями системы на основе полученных параметров значения уровней воды по сравнению с наблюдаемыми значениями для рассматриваемых рек (за период

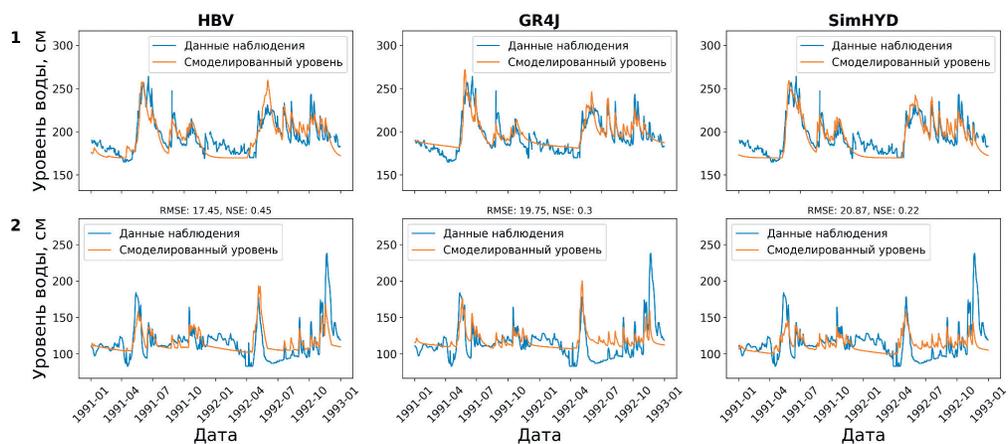


Рис. 4. Смоделированные и наблюдаемые уровни воды для двух гидрологических створов Камчатского Края (за период с 1991 г. по 1993 г.):

1 — р. Большая Воровская — с. Соболево, 2 — р. Амчигача — с. Усть-Большерецк.

Fig. 4. Modeled and observed water levels for two hydrological sections of Kamchatka Krai (for the period from 1991 to 1993):

1 — riv. Bolshaya Vorovskaya — vil. Sobolevo, 2 — riv. Amchigacha — vil. Ust-Bolsheretsk.

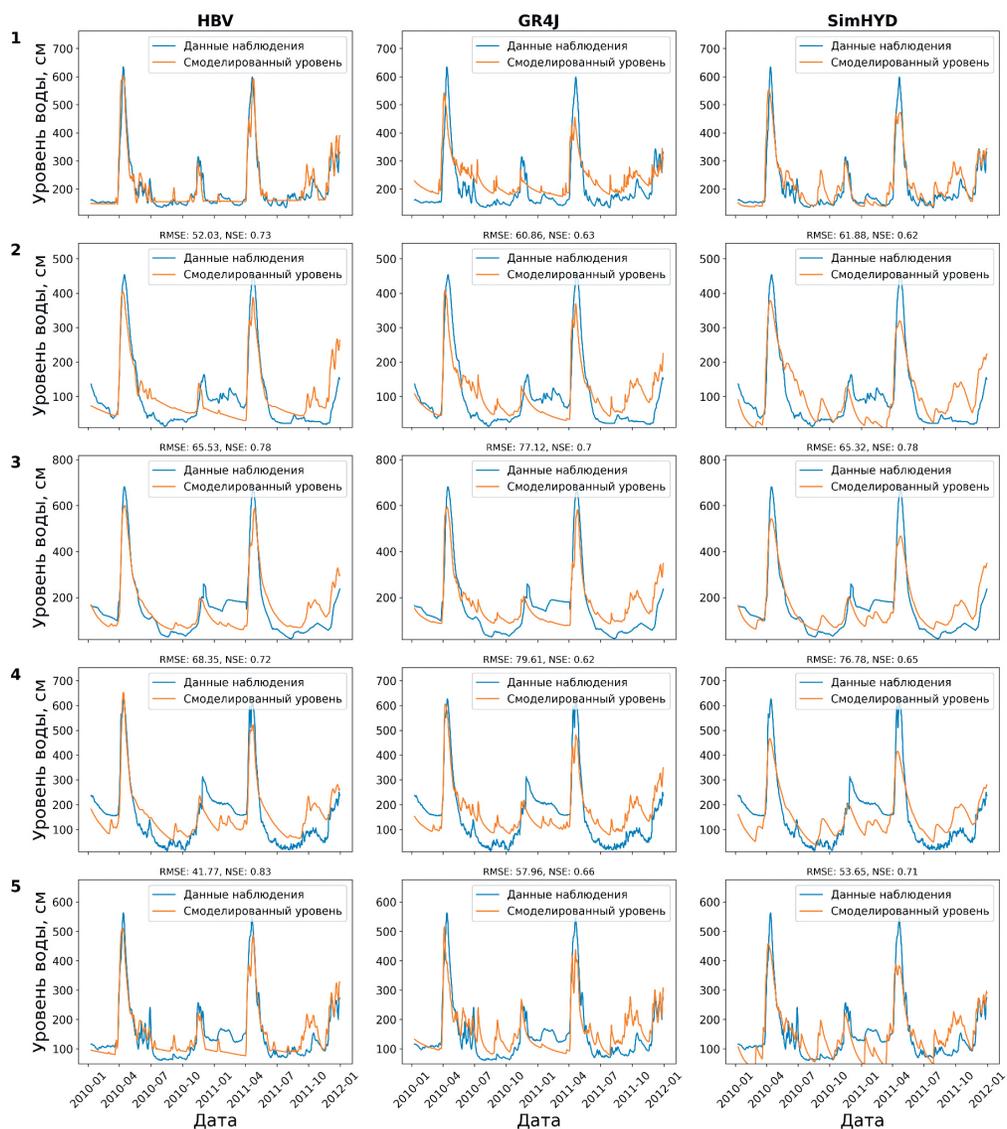


Рис. 5. Смоделированные и наблюдаемые уровни воды для основных гидрологических створов на реках Ленинградской области (за период с 2010 г. по 2012 г.):

1 — р. Тосна — ст. Тосно, 2 — р. Луга — г. Луга, 3 — р. Луга — ст. Толмачёво,
4 — р. Луга — г. Кингисепп, 5 — р. Тигода — г. Любань.

Fig. 5. Modeled and observed water levels for the main hydrological cross—sections on the rivers of the Leningrad Region (for the period from 2010 to 2012):

1 — riv. Tosna — Tosno station, 2 — riv. Luga — Luga city, 3 — riv. Luga — Tolmachevo station,
4 — riv. Luga River — Kingisepp city, 5 — riv. Tigoda — Lyuban city.

с января 2010 г. по январь 2012 г. для рек Ленинградской области и за период с января 1991 г. по январь 1993 г. для рек Камчатского края).

Как уже отмечалось, заключительным этапом перед запуском АИС является испытание оценки эффективности методики краткосрочного прогнозирования. На рис. 6 показаны периоды половодья и паводков, для которых осуществлялась оценка, а в табл. 3 в качестве примера успешных испытаний методики приводятся результаты оценки эффективности краткосрочного прогнозирования уровней воды на гидрологическом посту р. Тихвинка — д. Горелуха в 2020 г. — 2022 г.

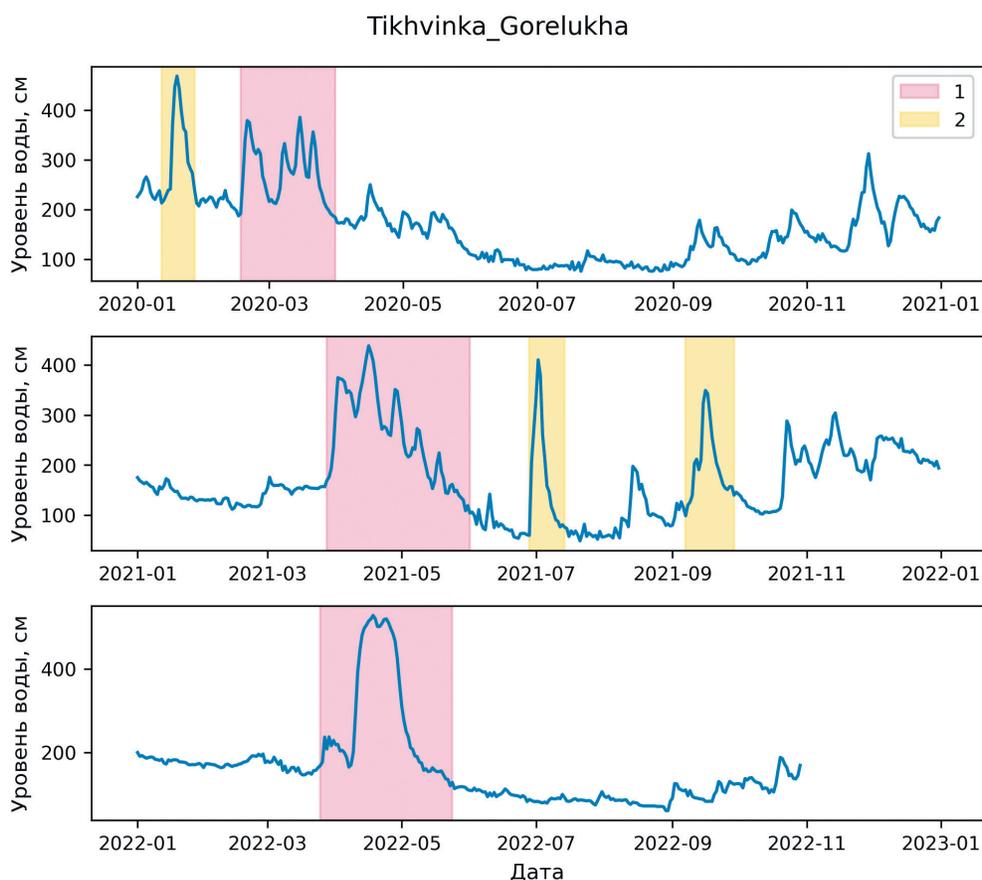


Рис. 6. Измеренные уровни воды на гидрологическом посту р. Тихвинка — д. Горелуха в 2020 г. — 2022 г.:

1 — половодье, 2 — дождевые паводки.

Fig. 4. Measured water levels at the hydrological post of riv. Tikhvinka — vil. Gorelukha in 2020—2022:

1 — spring flood, 2 — rain floods.

Таблица 3

Результаты оценки эффективности методики краткосрочного прогнозирования уровней воды на гидрологическом посту р. Тихвинка — д. Горелуха в 2020 г. — 2022 г. (заблаговременность 2 суток)

Assessment results of the effectiveness of the methodology for short—term forecasting of water levels at the hydrological post of riv. Tikhvinka — vil. Gorelukha in 2020—2022 (lead time: 2 days)

Год	Период	Даты	S , см	σ_{Δ} , см	S/σ_{Δ}	P , %	n , сут.
2021	Половодье	28.03.21—01.06.21	27 (62)*	48	0,57 (1,42)	59 (17)	54
	Дождевые паводки	28.06.21—14.07.21,	45 (99)	79	0,57 (1,25)	73 (12)	33
		07.09.21—29.09.21					
	Год целиком	01.01.21—31.12.21	28 (76)	42	0,65 (1,79)	57 (12)	240
2022	Половодье	25.03.22—24.05.22	25 (125)	53	0,47 (2,35)	45 (12)	51
	Дождевые паводки	—	—	—	—	—	—
	Первые 3 кв. года	01.01.22—30.09.22	16 (82)	27	0,58 (3,06)	62 (18)	218

Примечание: знак * здесь и далее в таблице в скобках указан результат без коррекции на текущий уровень.

Обсуждение

По мнению авторов, существует несколько возможных направлений для продолжения разработки и улучшения системы прогнозирования. Прежде всего, это касается основного модуля гидрологического моделирования и прогнозирования. В настоящий момент модуль основан на использовании трех концептуальных гидрологических моделей. Нельзя не отметить, что модели продемонстрировали хорошие результаты для исследуемых рек. Тем не менее, данный список моделей не является окончательным, поскольку хорошо известно, что гидрологические модели по-разному моделируют сток для речных бассейнов с различным генезисом формирования стока. Для дальнейшего усовершенствования модуля гидрологического моделирования нужна интеграция в него гидрологических моделей, разработанных для различных специфических условий формирования стока (например, для горных рек или засушливых регионов) с целью более гибкой настройки системы для конкретных рек.

Методы автоматической калибровки параметров позволяют избежать субъективности и временных затрат при ручной калибровке моделей. Используемый в настоящий момент метод автоматизации Университета Аризоны хорошо себя зарекомендовал при калибровке различных гидрологических моделей, но, по мнению авторов, в данном направлении необходимо проведение дальнейших научных исследований.

Результаты прогнозирования уровней воды, особенно в случаях дождевых паводков, зависят от исходной прогнозной метеорологической информации, в первую очередь, от прогнозных данных по осадкам. Как бы хорошо не была настроена система прогнозирования, если прогнозные данные некорректны, то результаты прогнозирования могут быть неудовлетворительными.

Основные выводы

В статье представлена методика краткосрочного прогнозирования уровней (расходов) воды, являющаяся основным блоком автоматизированной информационной системы краткосрочных гидрологических прогнозов, разработанной в ГГИ. В настоящий момент АИС адаптирована и функционирует в онлайн-режиме для четырех рек Ленинградской области и двух рек Камчатского края. Применение системы для данных рек продемонстрировало ее эффективность: показатели критерия Нэша-Сатклиффа составляют 0,62—0,90 для гидрологических постов Ленинградской области. Для рек Камчатского края показатели критерия хуже (0,30—0,73), но для данных постов все еще проходит адаптация системы с целью повышения качества прогнозирования.

В результате проведения испытаний по оценке эффективности методики краткосрочного прогнозирования в Северо-Западном УГМС были установлено, что показатели $S/\sigma\Delta$ и оправдываемости выше при оценке в периоды половодья и паводков, чем для всего года. Также было выявлено, что для заблаговременности в двое суток показатели эффективности моделирования выше для всех моделей, чем для заблаговременности в одни сутки.

Представленная система является готовым решением в области информационных технологий, которое при минимальном наборе исходной гидрометеорологической информации может быть адаптировано для других речных бассейнов Российской Федерации.

Список литературы

1. Бельчиков В. А., Борщ С. В., Павроз Ю. А. и др. Современное состояние и перспективы совершенствования системы оперативного гидрологического прогнозирования в Гидрометцентре России // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4 (374). С. 184—202.
2. Вуглинский В. С., Гусев С. И. Вторая очередь автоматизированной информационной системы государственного водного кадастра // Метеорология и гидрология. 1989. № 7. С. 105—107.
3. Зеленцов В. А., Потрясаев С. А., Пиманов И. Ю. и др. Автоматизация мониторинга и комплексного моделирования гидрологической обстановки в бассейнах рек // Ученые записки Российской государственной гидрометеорологической академии. 2019. № 55. С. 74—85. DOI:10.3390/33/2074-2762-2019-55-74-85.
4. Кузьмин В. А., Полякова А. А., Еремина С. В. и др. Автоматизированное прогнозирование опасных гидрологических явлений на малоизученных и неизученных водосборах Российской Федерации // Ученые записки Российской государственной гидрометеорологической академии. 2013. № 29. С. 29—35.
5. Sánchez-Quispe S. T., Madrigal J., Rodríguez-Licea, D. et al. Development of a Low-Cost Automated Hydrological Information System for Remote Areas in Morelia, Mexico // Water. 2023. 15. 3888. doi: 10.3390/w15223888.
6. Georgakakos K. P., Modrick T. M., Shamir E. et al. The flash flood guidance system implementation worldwide: A successful multidecadal research-to-operations effort // Bulletin of the American Meteorological Society. 2022. 103 (3). E665—E679.
7. Фролов А. В., Асмус В. В., Борщ С. В. и др. «ГИС Амур»: система мониторинга, прогнозирования и раннего оповещения о наводнениях // Метеорология и гидрология. 2016. №3. С. 5—21.
8. Дерюгина В. В., Борщ С. В., Кровотынцев В. А. и др. ВЕБ ГИС системы мониторинга и прогнозирования гидрологической обстановки в бассейнах крупных рек России с использованием наземных и спутниковых данных // Материалы 17-й Всероссийской открытой конференции

- «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва: ИКИ РАН. 2019. С. 84.
9. Казаков Э. Э., Шеманаев К. В., Журавлев С. А. и др. Автоматизированная система краткосрочного гидрологического прогнозирования, основанная на концептуальных моделях с открытым исходным кодом (на примере р. Тихвинки) // Четвертые виноградовские чтения. Гидрология от познания к мировоззрению: сборник докладов международной научной конференции памяти выдающегося русского ученого Юрия Борисовича Виноградова. 2020. С. 268—273.
 10. Kazakov E. E., Shemanaev K. V., Zhuravlev S. A. et al. Automated short-term forecast system based on open-source hydrological models for the Tikhvinka river (Leningrad region of Russia) // E3S Web of Conferences. 2020. V. 163. 02002. doi: 10.1051/e3sconf/202016302002.
 11. Сарафанов М. И., Казаков Э. Э., Борисова Ю. И. Применение методов машинного обучения для связей уровней воды на створах вверх и вниз по течению реки // Четвертые виноградовские чтения. Гидрология от познания к мировоззрению: сборник докладов международной научной конференции памяти выдающегося русского ученого Юрия Борисовича Виноградова. 2020. С. 151—156.
 12. Saha S., Moorthi S., Wu X. et al. The NCEP climate forecast system version 2 // J. Climate, 2014. V. 27. P. 2185—2208. doi: 10.1175/JCLI—D—12—00823.1.
 13. Yanes A. Openweather: a peer-to-peer weather data transmission protocol. Aalto University. Masters's thesis. 2011. 138 p.
 14. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Ч.1. Служба гидрологических прогнозов. Прогнозы режима вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 193 с.
 15. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 150 с.
 16. Lindström G., Johansson B., Persson M. et al. Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model // Journal of hydrology. 1997. 201 (1). P. 272—288.
 17. Лупакова С. Ю., Бугаец А. Н., Шапов В. В. Применение различных структур модели HBV для исследования процессов формирования стока на примере экспериментальных водосборов // Водные ресурсы. 2021. Том 48. №4. С. 417—426. doi: 10.31857/S032105962104012X.
 18. Chiew F. H. S., Peel M. C., Western A. W. Application and testing of the simple rainfall-runoff model SIMHYD / Mathematical models of small watershed hydrology and applications. 2002. P. 335—367.
 19. Peel M. C., Chiew F. H. S., Western A. W. et al. Extension of Unimpaired Monthly Streamflow Data and Regionalisation of Parameter Values to Estimate Streamflow in Ungauged Catchments / Canberra, National Land and Water Resources Audit. 2000.
 20. Chiew F. H. S., Vaze J., Viney N. R. et al. Rainfall-runoff modelling across the Murray-Darling Basin / A report to the Australian Government from the CSIRO Murray-Darling Basin Sustainable Yields Project. CSIRO, Australia. 2008. 62p.
 21. Michel C., Perrin C., Andréassian V. et al. Has basin-scale modelling advanced beyond empiricism? In: Andréassian V., Hall A., Chahinian N., Schaake, J. (eds). Large sample basin experiments for hydrological model parameterization: results of the model parameter experiment (MOPEX). 2006. IAHS Publication 307. P. 108—116.
 22. Andréassian V., Perrin C., Berthet L. et al. Crash tests for a standardized evaluation of hydrological models // Hydrol. Earth. Syst. Sci. 2009. 13. P. 1757—1764.
 23. Vaze J., Perraud J.—M., Viney N. R. et al. Rainfall-runoff modelling across southeast Australia: Data-sets, models and results // Australian Journal of Water Resources. 2010. 14(2). P. 101—116.
 24. Valéry A., Andréassian V., Perrin C. As simple as possible but not simpler: What is useful in a temperature-based snow-accounting routine? Part 1 — Comparison of six snow accounting routines on 380 catchments // J. Hydrol. 2014. 517. P. 1166—1175. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.04.059, 2014a.
 25. 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 // J. Hydrol. 2014. 517. P. 1176—1187. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.04.058, 2014b.

26. Lindstrom G. A simple automatic calibration routine for the HBV model // *Hydrology Research*. 1997. 28(3). P. 153—168.
27. Duan Q., Sorooshian S., Gupta V. K. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models // *Journal of hydrology*. 1994. Vol. 158(3—4). P. 265—284.
28. Nash J. E., Sutcliffe J. V. River flow forecasting through conceptual models. Part 1 — A discussion of principles // *Journal of hydrology*. 1970. V. 10. P. 282—290.
29. Борщ С. В., Христофоров А. В. Оценка качества прогнозов речного стока // *Труды Гидрометцентра России. Специальный выпуск*. 2015. 355. С. 3—195.

References

1. Belchikov V. A., Borshch S. V., Pavroz Yu. A. et al. Current status and prospects for improving the operational hydrological forecasting system in the Hydrometeorological Center of Russia. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy = Hydrometeorological Research and Forecasting*. 2019; 4(374):(184—202). doi: 10.37162/2618—9631—2019—4—184—202. (In Russ.).
2. Vulginskij V. S., Gusev S. I. The second stage of the automated information system of the state water cadastre. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and hydrology*. 1989; (7):(105—107). (In Russ.).
3. Zelentsov V. A., Potryasaev S. A., Pimanov I. Yu. et al. Automation of monitoring and complex modeling of the hydrological situation in river basins. *Uchenye zapiski Rossijskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta = Scientific Notes of the Russian State Hydrometeorological University*. 2019;(55):(74—85). doi:10.33933/2074—2762—2019—55—74—85. (In Russ.).
4. Kuzmin V. A., Polyakova A. A., Eremina S. V. et al. Automated forecasting of hazardous hydrological phenomena in poorly studied and unstudied watersheds of the Russian Federation. *Uchenye zapiski Rossijskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta = Scientific Notes of the Russian State Hydrometeorological University*. 2013; (29): (29—35). (In Russ.).
5. Sánchez—Quispe, S. T., Madrigal J., Rodríguez—Licea D. et al. Development of a Low—Cost Automated Hydrological Information System for Remote Areas in Morelia, Mexico. *Water*. 2023; (15): (3888). doi:10.3390/ w15223888.
6. Georgakakos K. P., Modrick T. M., Shamir E. et al. The flash flood guidance system implementation worldwide: A successful multidecadal research-to-operations effort. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2022; 103 (3): (E665—E679).
7. Frolov A. V., Asmus V. V., Borshch S. V. et al. “GIS Amur”: system for monitoring, forecasting and early warning of floods. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and hydrology*. 2016; (3): (5—21). (In Russ.).
8. Deryugina V. V., Borshch S. V., Krovotyntsev V. A. et al. WEB GIS system for monitoring and forecasting the hydrological situation in the basins of large rivers in Russia using ground and satellite data. *Materialy 17—j Vserossijskoj otkrytoj konferencii «Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa» = Proceedings of the 17th All—Russian open conference “Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space”* Moscow: IKI RAN. 2019; (84).
9. Kazakov E. E., Shemanaev K. V., Zhuravlev S. A. et al. Automated short-term hydrological forecasting system based on open source conceptual models (using the example of the Tikhvinka River). *Chetvertye Vinogradovskie chteniya. Gidrologiya ot poznaniya k mirovozzreniyu: Sbornik dokladov mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii pamyati vydayushchegosya russkogo uchenogo Yuriya Borisovicha Vinogradova = IV Vinogradov Conference “Hydrology: from learning to worldview”* In memory of outstanding Russian hydrologist Yury Vinogradov. 2020; 268—273. (In Russ.).
10. Kazakov E. E., Shemanaev K. V., Zhuravlev S. A. et al. Automated short-term forecast system based on open-source hydrological models for the Tikhvinka river (Leningrad region of Russia). *E3S Web of Conferences*. 2020; (163): 02002. doi: 10.1051/e3sconf/202016302002.
11. Sarafanov M. I., Kazakov E. E., Borisova Yu. I. Application of machine learning methods for linking water levels at the upstream and downstream river channels. *Chetvertye Vinogradovskie chteniya. Gidrologiya ot poznaniya k mirovozzreniyu: Sbornik dokladov mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii pamyati vydayushchegosya russkogo uchenogo Yuriya Borisovicha Vinogradova = IV Vinogradov Conference “Hydrology: from learning to worldview”* In memory of outstanding Russian hydrologist Yury Vinogradov.. 2020:(151—156). (In Russ.).

12. Saha S., Moorthi S., Wu X. et al. The NCEP climate forecast system version 2. *Journal of climate*. 2014; (27): (2185—2208). doi: 10.1175/JCLI—D—12—00823.1.
13. Yanes A. Openweather: a peer-to-peer weather data transmission protocol. Aalto University. Masters's thesis. 2011; 138 p.
14. *Nastavlenie po sluzhbe prognozov. Razdel 3. Ch.I. Sluzhba gidrologicheskikh prognozov. Prognozy rezhima vod sushi = Manual for the forecast service. Section 3. Part I. Hydrological forecast service. Forecasts of the land water regime*. L.: Gidrometeoizdat, 1962; 193 p. (In Russ.).
15. Metodicheskie ukazaniya. Provedenie proizvodstvennyh (operativnyh) ispytaniy novykh i usovershenstvovannykh metodov gidrometeorologicheskikh i geliogeofizicheskikh prognozov = Guideline document 52.27.284—91. Methodological instructions. Conducting production (operational) tests of new and improved methods of hydrometeorological and heliogeophysical forecasts. L.: Gidrometeoizdat, 1991; 150 p. (In Russ.).
16. Lindström G., Johansson B., Persson M. et al. Development and test of the distributed HBV—96 hydrological model. *Journal of hydrology*. 1997; 201(1—4): 272—288.
17. Lupakova S. Yu., Bugaets A. N., Shamov V. V. Application of various structures of the HBV model to study the processes of runoff formation on the example of experimental catchments. *Vodnye resursy = Water resources*. 2021; 48 (4): (417—426). doi: 10.31857/S032105962104012X. (In Russ.).
18. Chiew F. H. S., Peel M. C., Western A. W. Application and testing of the simple rainfall—runoff model SIMHYD. *Mathematical models of small watershed hydrology and applications*. 2002; (335—367).
19. Peel M. C., Chiew F. H. S., Western A. W. et al. Extension of Unimpaired Monthly Streamflow Data and Regionalisation of Parameter Values to Estimate Streamflow in Ungauged Catchments. Canberra, National Land and Water Resources Audit. 2000.
20. Chiew F. H. S., Vaze J., Viney N. R. et al. Rainfall-runoff modelling across the Murray-Darling Basin. A Report to the Australian Government From the CSIRO Murray—Darling Basin Sustainable Yields Project. Canberra: Australia. 2008; 62 p.
21. Michel C., Perrin C., Andréassian V. et al. Has basin-scale modelling advanced beyond empiricism? *IAHS Publication*. 2006; (307): 108—116.
22. Andréassian V., Perrin C., Berthet L. et al. HESS Opinions “Crash tests for a standardized evaluation of hydrological models”. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2009; (13): 1757—1764.
23. Vaze J., Perraud J.—M., Viney N. R. et al. Rainfall-runoff modelling across southeast Australia: Data-sets, models and results. *Australian Journal of Water Resources*. 2010; 14 (2): 101—116.
24. Valéry A., Andréassian V., Perrin C. “As simple as possible but not simpler”: What is useful in a temperature—based snow—accounting routine? Part 1 — Comparison of six snow accounting routines on 380 catchments. *Journal of hydrology*. 2014; (517): (1166—1175). doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.04.059.
25. Valéry A., Andréassian V., and 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; (517): (1176—1187). doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.04.058.
26. Lindstrom G. A simple automatic calibration routine for the HBV model. *Hydrology Research*. 1997; 28 (3): 153—168.
27. Duan Q., Sorooshian S., Gupta V. K. Optimal use of the SCE—UA global optimization method for calibrating watershed models. *Journal of hydrology*. 1994; 158 (3—4): 265—284.
28. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. Part 1 — A discussion of principles // *Journal of hydrology*. 1970. V. 10. P. 282—290.
29. Borsch S.V., Khristoforov A.V. Assessment of the quality of river runoff forecasts. *Trudi Gidromettsentra Rossii. Spetsialniy vipusk = Proceedings of the Hydrometeorological Center of Russia. Special issue*. 2015; (355): (3—195). (In Russ.).

Сведения об авторах

Георгиевский Михаил Владимирович, к.г.н., ведущий научный сотрудник, зам. заведующего лабораторией гидрофизики, руководитель группы геоинформационных технологий Государственного гидрологического института, mgeorgievsky@hotmail.com.

Чепикова Светлана Сергеевна, младший научный сотрудник группы геоинформационных технологий Государственного гидрологического института, chepikova.s@hydrology.ru.

Терехов Антон Викторович, научный сотрудник отдела географии полярных стран, Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, terexterex@gmail.com.

Казаков Эдуард Эдуардович, независимый исследователь, ee.kazakov@gmail.com.

Information about authors

Mikhail V. Georgievsky, Ph. D., Leading Researcher, Deputy Head of the Laboratory of Hydrophysics, Head of the Geoinformation Technologies Group, State Hydrological Institute.

Svetlana S. Chepikova, Junior Researcher, Geoinformation Technologies Group, State Hydrological Institute.

Anton V. Terekhov, Researcher, Department of Geography of Polar Countries, Arctic and Antarctic Research Institute.

Eduard E. Kazakov, Independent researcher.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 26.08.2024

Принята после доработки в печать 24.11.2024

The article was received on 26.08.2024

The article was accepted after revision on 24.11.2024