

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Симонов Юрий Андреевич

**Прогнозирование стока рек России:
научно-методические основы и практическая реализация**

1.6.16 – Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора географических наук

Москва – 2023

Диссертация подготовлена в отделе речных гидрологических прогнозов
ФГБУ «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации»

Научный консультант – *Христофоров Андрей Валентинович,*
доктор географических наук, профессор

Официальные оппоненты – *Гармаев Ендон Жамьянович,*
доктор географических наук, чл.-корр.
РАН, директор Байкальского института
природопользования СО РАН

Георгиевский Владимир Юрьевич,
доктор географических наук, главный
научный отдела водных ресурсов
Государственного гидрологического
института

Коронкевич Николай Иванович,
доктор географических наук, профессор,
главный научный сотрудник лаборатории
гидрологии Института географии РАН

Защита диссертации состоится «14» декабря 2023 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета МГУ.016.2 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы д. 1, ГЗ МГУ, Географический факультет, 18 этаж, ауд. 1801 (тел. +7(495)9392238, факс +7 (495)9328836).

E-mail: Diss1102MSU@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале <https://dissovet.msu.ru/dissertation/016.2/2695>

Автореферат разослан « » октября 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор биологических наук

А.В. Ольчев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы исследования. В последнее десятилетие постоянное повышение технологического уровня и степени цифровизации рабочих процессов федеральных органов исполнительной власти и участников экономической деятельности страны привели к интенсивному возрастанию требований, предъявляемых потребителями к прогностической продукции, в том числе к ее качеству, форме представления, способам и скорости доведения ее до пользователей и т.п. Эффективное удовлетворение этих требований возможно с помощью применения научно и технологически обоснованных и верифицированных методик прогнозирования, разработки и внедрения программных средств автоматизации расчетов по этим методикам, использования всего массива доступной гидрометеорологической информации, применения технологий геоинформационных систем (ГИС) для формирования прогностической продукции в виде цифровых информационных слоев, а также создания веб-приложений для визуализации прогностической информации в режиме реального времени. Решению этой задачи способствует всё возрастающий объем гидрометеорологической информации, поступающей из разных источников, включая автоматизированные речные посты и метеорологические станции, космические спутники, результаты численных прогнозов погоды различных моделей, а также доступные вычислительные мощности, современные программные средства и развитые информационные технологии, включая геоинформационные и веб-технологии.

В настоящее время согласно выводам экспертов Всемирной метеорологической организации (ВМО), обобщающих опыт служб гидрологических прогнозов стран-членов ВМО, обязательным атрибутом современной гидрометеорологической службы являются современные методы, методики и модели, специально созданные для оперативного гидрологического прогнозирования, а также автоматизированные системы подготовки и выпуска гидрологических прогнозов.

Именно эти автоматизированные системы составляют основу систем раннего предупреждения об опасных гидрологических явлениях. Аспекты использования систем раннего предупреждения о паводках и наводнениях, включая применение автоматизированных систем выпуска гидрологических прогнозов, а также доведения продукции до потребителей являются одной из центральных тем и отдельных программ международных организаций, в том числе ВМО, Управления Организации Объединенных Наций по уменьшению опасности бедствий, Программы развития ООН (ПРООН). В руководящих документах означенных выше организаций и программ подчеркивается

необходимость, наряду с разработкой современных методов гидрологических прогнозов, создавать системы автоматизации процесса выпуска прогнозов, эффективного и доведения в кратчайшие сроки прогнозов и предупреждений до пользователей (т.н. «последняя миля»). Для выпуска прогнозов используются различные методы и модели, как эмпирические, так и физические обоснованные модели формирования стока. Наиболее широкое применение в оперативных прогнозах имеют концептуальные модели, которые рассмотрены многими авторами и коллективами, в том числе специалистами Гидрометцентра России, Государственного гидрологического института, Института географии РАН, Дальневосточного регионального научно-исследовательского гидрометеорологического института, Среднесибирского УГМС, кафедры гидрологии суши Географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, а также многими зарубежными авторами. В последние годы все более широкое применение в практике гидрологических прогнозов получили детальные физико-математические модели. В нашей стране наибольшее распространение получили физико-математические модели, разработанные коллективом авторов Института водных проблем РАН. Доступно большое количество результатов исследований зарубежных авторов, обобщение которых представлено в руководствах ВМО.

Таким образом, автором диссертационной работы решаются весьма важные и актуальные проблемы, связанные с созданием принципиально новых, отвечающих мировому уровню развития гидрологической науки и практики основ системы гидрологического прогнозирования в нашей стране.

Цель и задачи работы. Цель диссертационной работы заключается в разработке принципиально новых, отвечающих мировому уровню развития гидрологической науки и практики основ системы гидрологического прогнозирования в России. Для достижения поставленной цели решались следующие основные задачи:

- разработка рекомендаций по оценке погрешности прогнозов речного стока и ее снижения с помощью различных вариантов коррекции;
- оценка возможностей применения метода экстраполяции гидрографа для различных речных створов России в зависимости от площади водосбора и его среднего уклона;
- оценка применимости концептуальной модели формирования речного стока HBV-96 для водосборов, находящихся в различных природных условиях и имеющих различные морфометрические характеристики;
- анализ качества прогнозирования суточного слоя осадков и среднесуточной температуры приземного слоя воздуха, полученных с помощью оперативной системы краткосрочного численного прогноза погоды COSMO-RU для территории России;

- определение влияния неопределенности хода метеорологических элементов в период заблаговременности долгосрочного прогноза речного стока на его погрешность;
- составление рекомендаций по разработке схем получения долгосрочных прогнозов речного стока с учетом неопределенности пространственной изменчивости характеристик его формирования и статистических свойств располагаемой гидрометеорологической информации;
- получение на основе данных рекомендаций методики долгосрочного прогнозирования характеристик стока рек бассейна Тобола и притока воды в Цимлянское водохранилище и внедрение её в оперативную практику;
- разработка методического подхода к созданию систем раннего предупреждения о паводках и наводнениях и доведения прогностической продукции до всех заинтересованных потребителей на основе обобщения передового опыта, а также опыта создания автоматизированных систем для реки Кубань, рек Черноморского побережья Краснодарского края, а также рек бассейна Амура и Волги;
- разработка единой автоматизированной системы выпуска краткосрочных и среднесрочных прогнозов среднесуточного расхода и уровня воды для территории России на основе использования метода экстраполяции гидрографа, а также модели формирования речного стока HBV-96 совместно с краткосрочным численным прогнозом погоды COSMO-RU.

Методы исследования. Для достижения поставленной цели и решения задач данной диссертационной работы применялся широкий круг методов исследования. В первую очередь использованы современные достижения информационных технологий, включая языки программирования Python с дополнительно подключаемыми библиотеками (в т.ч. статистического анализа), ГИС-технологии промышленного уровня ArcGIS for Desktop и ArcGIS for Server настольного и серверного исполнения, соответственно. Для внедрения разработанных в рамках исследования методик гидрологических прогнозов в оперативную практику были спроектированы, разработаны и развернуты реляционные базы на основе MicrosoftSQL и PostgreSQL, которые были снабжены множеством программных средств для предварительного приема, декодирования, первичного контроля, анализа и размещения оперативных гидрометеорологических данных в развёрнутых базах данных.

В качестве расчетной основы использованы в основном два подхода: для рек с плавным очертанием гидрографа разработан и применен метод экстраполяции расходов (уровней) воды, а для рек верхнего течения крупных и средних рек, так называемых конечных водосборов, применена одна из наиболее широко используемых концептуальных моделей формирования стока на водосборе HBV-96. Были составлены компьютерные

программы, реализующие эти методы, что позволило, во-первых, произвести адаптацию данных методов к различным речным бассейнам, во-вторых, внедрить и использовать их в оперативном режиме, и, в-третьих, выполнять технологическое обслуживание и усовершенствование, включая проведение повторных оптимизаций, использование нового источника исходной информации (например, массива реанализа или численных прогнозов новой метеорологической модели).

Для задач долгосрочных прогнозов в рамках работы также были использованы другие гидрологические модели, в частности, концептуальная модель формирования стока и его перемещения по руслу реки Института по строительству и технологии Республики Корея DWAT, используемая во многих странах мира в практике оперативной гидрологии и рекомендуемой в настоящее время Всемирной метеорологической организацией для внедрения и использования для нужд оперативного гидрологического прогнозирования.

В качестве примера для оценки влияния метеорологических факторов на неопределенность долгосрочных прогнозов характеристик речного стока совместно с сотрудниками Института водных проблем РАН была использована физико-математическая модель формирования стока ECOMAG применительно к бассейну Чебоксарского водохранилища совместно с методикой получения долгосрочного прогноза бокового притока воды к водохранилищу в вероятностной форме. Совместный программный комплекс получил название CRIGM.

Для выполнения оптимизации параметров модели формирования стока применен эволюционный метод SCE-UA, основанный на алгоритме перемешивания и эволюции выборок значений параметров. С этой целью использован язык программирования Python с библиотекой научных вычислений SciPy. Разработанные программные средства позволили осуществить оптимизацию параметров концептуальной модели для сотен водосборов России, что явилось важным шагом адаптации гидрологической модели для территории Российской Федерации.

Используемый в работе алгоритм коррекции прогнозов основан на авторегрессии ошибок расчетов модели, в соответствие с чем была разработана компьютерная программа, позволяющая рассчитывать параметры и коэффициенты алгоритма коррекции в результате анализа многолетних совместных рядов наблюдений и расчетов с использованием концептуальной модели HBV-96.

Широкое применение геоинформационных технологий с интернет направленностью позволило создать веб-сервер и веб-приложение для пользователей гидрологической продукции с широким наполнением продукции в разной форме и форматах.

Предметом защиты являются разработанные в рамках диссертационной работы и предлагаемые к реализации научно-методические основы совершенствования системы гидрологического прогнозирования в нашей стране, а также выводы и заключения, полученные автором в результате выполненных исследований.

Положения, выносимые на защиту.

1. Выводы о целесообразности внедрения методики прогнозирования речного стока необходимо делать после коррекции получаемых прогнозов, статистически обоснованной оценки их погрешности, сравнения с возможностями более простых методов, учета затрат на получение прогнозов и требований их потребителей.

2. В целях достижения максимального числа гидрологических постов, для которых могут быть получены достаточно надежные краткосрочные и среднесрочные прогнозы речного стока, необходимо использование для всей страны или для её крупных регионов единых методов прогнозирования и автоматизации процедуры оценки, содержащихся в них параметров.

3. При разработке методик долгосрочного прогнозирования целесообразно учитывать факторы, ограничивающие его заблаговременность и точность, перспективу использования этих методик в рамках автоматизированной системы подготовки и выпуска прогнозов, а также возможность учета климатических и антропогенных изменений условий формирования речного стока.

4. Единая для всей страны или для ее крупных регионов автоматизированная система подготовки и выпуска прогнозов речного стока необходима для внедрения современных методов его прогнозирования, своевременного обеспечения всех заинтересованных потребителей прогностической продукцией и максимально раннего предупреждения о нежелательных и опасных явлениях, связанных с водным режимом рек.

Научная новизна работы состоит в предложенном автором принципиально новом современном, отвечающем мировому уровню развития гидрологической науки и практики научно-методическом подходе к совершенствованию системы гидрологического прогнозирования в нашей стране.

Достоверность и апробация результатов. Все опубликованные и представленные в диссертации результаты были получены на общедоступном фактическом материале с использованием стандартных методов анализа и могут воспроизводиться другими исследователями. Общим применяемым в работе подходом является сопоставление получаемых результатов с данными имеющихся натуральных наблюдений и другими опубликованными результатами.

Материалы диссертации докладывались на заседании Ученого совета ФГБУ «Гидрометцентр России», на семинаре отдела гидрологии речных бассейнов Института водных проблем РАН, на заседании кафедры гидрологии суши Географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

В Роспатенте зарегистрировано более десяти результатов интеллектуальной деятельности (программ и баз данных), имеющих непосредственное отношение к данному диссертационному исследованию, в частности регистрационные документы Роспатента (свидетельства регистрации) были получены на следующие программные средства:

- программа «Амур метеопрогноз» для тематической предобработки и автоматического наполнения БД метеорологической информацией от прогностических моделей гидрометцентра России (2015 г.);
- программа «ГИС Амур» для доведения фактической и прогностической гидрометеорологической продукции в бассейне р. Амур до конечных пользователей с помощью ГИС и веб-технологий (2015 г.);
- веб-приложение «ГИС паводок» для доведения гидрометеорологической продукции до конечных пользователей с помощью ГИС и веб-технологий (2018 г.);
- программа «ГИС ледовые явления» для тематической предобработки и автоматического наполнения базы данных Гидрометцентра России гидрологическими наблюдениями;
- программный комплекс «ГИС Волга» для доведения фактической и прогностической гидрометеорологической продукции в бассейне реки Волга до конечных пользователей с помощью ГИС и веб-технологий (2020 г.);
- программный комплекс автоматизированного мониторинга, анализа и прогноза гидрологической обстановки на реках Российской Федерации – географическая информационная система «Гидрология» («ГИС Гидрология») (2022 г.).

Большинство из полученных в рамках данного диссертационного исследования результатов внедрено в оперативную деятельность ФГБУ «Гидрометцентр России» и других оперативно-производственных учреждений Росгидромета.

Результаты диссертационного исследования были неоднократно доложены на международных конференциях, симпозиумах и совещаниях, в том числе на мероприятиях ВМО ООН в рамках Комиссии по гидрологии, а с 2019 г. – в рамках рабочих встреч и семинаров Постоянного комитета по гидрологическому обслуживанию технической комиссии по обслуживанию и применению в области гидрометеорологии, в том числе на следующих мероприятиях:

- совещание по проблемам разработки методов и технологий прогнозирования быстроразвивающихся паводков (Вашингтон, США, февраль 2012 г.);
- симпозиум по прогнозированию опасных гидрометеорологических явлений, вызванных сильными осадками (Тайбей, Китай (Тайвань), июнь 2012 г.);
- совещание Росгидромета по вопросам разработки автоматизированной системы прогнозирования паводков в бассейне р. Кубань (Ростов-на-Дону, Россия, июнь 2012 г.);
- международная научная конференция по региональным проблемам гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды (Казань, Россия, октябрь 2012 г.);
- конференция Азиатско-Тихоокеанского Климатического Центра «Выпуск климатической продукции высокого разрешения: теоретические основы и применение» (Пусан, Корея, август 2013 г.);
- форум по оценке гидрометеорологических рисков (Лондон, Великобритания, июль 2014 г.);
- научный семинар «Сезонное гидрологическое прогнозирование – текущее состояние и положительный эффект от их использования в водном секторе экономики» (Кобленц, ФРГ, октябрь 2014 г.);
- совещание руководящей группы Демонстрационного проекта ВМО по прогнозированию наводнений в прибрежной зоне (Майами, США, ноябрь 2015 г.);
- 15-я сессия Комиссии по гидрологии ВМО (Рим, Италия, декабрь 2016 г.);
- конференция по планированию создания системы раннего предупреждения о многих опасных явлениях на юго-востоке Европы (Скопье, Северная Македония, февраль 2017 г.);
- глобальная конференция по автоматизированной системе прогнозирования быстроразвивающихся паводков (Анталья, Турция, ноябрь 2019 г.);
- совещание постоянного комитета ВМО ООН по гидрологическому обслуживанию (Женева, Швейцария, июнь 2022 г.);
- 2-я сессия технической комиссии ВМО по обслуживанию в сфере погоды, климата, гидрологии и сопутствующим сферам окружающей среды (Женева, Швейцария, октябрь 2022 г.);
- встреча координационной группы экспертов ВМО по гидрологии (Прага, Чехия, февраль 2023 г.).

Кроме того, главные выводы работы также были положены в основу документов ВМО, регламентирующих разработку и усовершенствование систем раннего

предупреждения о возникновении паводков и наводнений, в частности «Оценочное руководство по системам раннего предупреждения о паводках и наводнениях» (Assessment Guidelines for End-to-End Flood Forecasting and Early Warning Systems. WMO, No. 1286, 2022) и «Руководство по наводнениям в прибрежной зоне» (Guidelines on Implementation of a Coastal Inundation Forecasting – Early Warning System. WMO, No. 1293, 2022).

По теме диссертации опубликовано 46 печатных работ (без тезисов докладов), в том числе 1 монография (Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Прогнозирование стока рек России. М.: Гидрометцентр России, 2023. 200 с.) и 29 статей в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности и отрасли наук.

Личный вклад соискателя. В диссертационной работе представлены результаты исследований, в которых вклад автора был ключевым на всех этапах от постановки задачи до реализации работы и внедрении результатов в оперативную практику. В представленных результатах, полученных совместно с соавторами, соискателю принадлежит инициативная или равноправная роль в постановке задачи, выполнении численных экспериментов, вспомогательных расчетов, интерпретации и внедрении результатов.

Практическая значимость работы. Результаты диссертационного исследования послужили основой при разработке автоматизированных систем выпуска гидрологических прогнозов и доведения их до потребителей в бассейнах крупных рек России – Кубани, рек черноморского побережья Краснодарского края, Амура и Волги. Выходная продукция в режиме реального времени с помощью веб-приложения используется широким кругом специалистов, в том числе гидрологами-прогнозистами территориальных подразделений Росгидромета, а также специалистами МЧС России, и вносит существенный вклад в принятие обоснованных решений при подготовке официальных прогнозов и, при необходимости, штормовых предупреждений и оповещений о риске возникновения или возникновении опасной гидрологической ситуации на исследуемых реках России.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, списка обозначений и сокращений, заключения и списка литературы из 231 наименования. Объем работы составляет 237 страниц, включая 54 иллюстрации и 54 таблицы.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность коллективу сотрудников Гидрометцентра России, благодаря взаимодействию с которым достигнуты результаты, положенные в основу диссертационного исследования. Особая благодарность и глубокая признательность С.В. Борщу за неоценимый опыт в научной и производственной сфере гидрометеорологических прогнозов, которым он щедро делился, а также Р.М. Вильфанду за существенную поддержку при выполнении диссертационного исследования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность и степень разработанности темы исследования, приводится цель, задачи работы, а также методы исследования, выносимые на защиту положения и их научная новизна. Указывается достоверность и апробация результатов, личный вклад соискателя и практическая значимость работы.

ГЛАВА 1. Прогнозирование речного стока

В главе всесторонне рассматриваются постановка задачи прогнозирования речного стока и способы ее решения. Рассматриваются требования к заблаговременности речного стока, факторы, ее ограничивающие. В современной отечественной практике гидрологический прогноз относится к категории краткосрочных, если его заблаговременность не превышает 5–6 суток, среднесрочных – с заблаговременностью от 6–7 до 12–15 суток, долгосрочных – с заблаговременностью более 12–15 суток. Как правило, долгосрочные прогнозы выпускаются один раз в год, а краткосрочные прогнозы – ежедневно (в некоторых случаях каждые 6 или 12 часов) в течение некоторого периода (месяц, сезон, фаза гидрологического режима, квартал, год). Среднесрочные прогнозы могут выпускаться один раз в год или многократно, как правило, ежедневно в течение определенного периода времени. Дается сокращенный перечень факторов, определяющих ошибки прогнозов речного стока.

Определяются характеристики стока рек или притока воды в водохранилища, для которых выпускаются прогнозы различной заблаговременности, а также форма выражения прогнозов речного стока – детерминированная или вероятностная. В основном связанные между собой методики прогнозов в детерминированной и в вероятностной форме имеют одинаковое качество, что дало основание в работе вести рассмотрение прогнозов водного режима рек и водохранилищ, выражаемых в детерминированной форме.

Рассматриваются методы и методики прогнозирования речного стока, имея в виду, что метод представляет собой общий подход к решению задачи с учетом физической сущности процессов формирования стока, а методика является способом получения прогнозов для конкретного речного створа и отражает локальные физико-географические особенности, степень информационного обеспечения. В главе приводятся основные используемые в настоящее время методы гидрологического прогнозирования, которые используют достижения отечественных и зарубежных гидрологических исследований, и нашли отражение в информационных изданиях Росгидромета и Всемирной Метеорологической Организации. Дается их краткое описание в зависимости от

прогнозируемой характеристики речного стока или притока воды в водохранилище с учетом физико-географических особенностей условий их формирования, требуемой заблаговременности прогноза и необходимого информационного обеспечения. Отмечается, что разработанные автором и внедренные в практику оперативного прогнозирования методы краткосрочного и среднесрочного прогноза на основе использования модели формирования стока и экстраполяции гидрографа успешно дополняют ранее предложенные методы гидрологических прогнозов.

Приводится описание математических моделей стока, используемых в оперативных гидрологических прогнозах, а также их классификация с точки зрения степени детальности описания стокоформирующих процессов, объектов моделирования, а также видом их применения. Показано, что с учетом специфики оперативных гидрологических прогнозов, в прогностической практике наиболее часто прибегают к использованию концептуальных моделей (упрощенного типа) и эмпирических моделей. Одной из первых концептуальных моделей, хорошо проявивших себя в оперативной практике, является модель формирования стока Гидрометцентра СССР. В связи с тем, что наиболее распространенной в мировой практике является концептуальная модель HBV и ее различные модификации, именно последняя была выбрана в качестве расчетной основы для составления методики краткосрочных гидрологических прогнозов для многих речных постов Российской Федерации, которая была адаптирована под руководством автора для речных бассейнов России.

Предлагаемые методические основы совершенствования системы прогнозирования стока рек России включают положение о том, что вопрос о целесообразности внедрения той или иной методики должен решаться после коррекции получаемых с ее помощью прогнозов, статистически обоснованной оценки их погрешности и эффективности по сравнению с альтернативными методами.

В целях повышения точности проверяемой методики в работе предлагается применять два метода ее коррекции.

Первый метод линейной регрессии разработан и получил внедрение в практику гидрологического прогнозирования в ФГБУ «Гидрометцентр России». Отличаясь простотой, он может быть достаточно эффективным и рекомендуется для коррекции прогнозов любой заблаговременности. В нем учитываются стандартные статистические оценки математического ожидания $m(Y)$ и среднеквадратического отклонения $\sigma(Y)$ прогнозируемой величины Y , аналогичные оценки $m(\tilde{Y})$ и $\sigma(\tilde{Y})$ для ее прогноза \tilde{Y} и оценка коэффициента корреляции R между величинами Y и \tilde{Y} . Скорректированный прогноз определяется по формуле линейной регрессии:

$$\tilde{Y}_c = m(Y) + R \frac{\sigma(Y)}{\sigma(\tilde{Y})} [\tilde{Y} - m(\tilde{Y})]. \quad (1)$$

Данный метод устраняет систематическую ошибку прогнозов и снижает их погрешность. В диссертации приводятся примеры того, как данный метод позволяет снизить погрешности различных методик прогнозирования речного стока на 10–35%.

Второй метод учета автокорреляции ошибок прогноза нашел широкое применение в мировой практике краткосрочного прогнозирования речного стока. Идея метода состоит в том, что если к дате $t - \Delta t$ составления прогноза с уже известные ошибки предшествующих прогнозов образуют серию отрицательных или, наоборот, положительных значений, то прогноз на дату t с заблаговременностью Δt следует занизить или, соответственно, завысить.

Предполагаемая ошибка прогноза $\delta(t) = Y(t) - \tilde{Y}(t)$ оценивается по формуле, соответствующей модели стационарного процесса авторегрессии порядка l с учетом известных к дате $t - \Delta t$ ошибок предыдущих прогнозов:

$$\tilde{\delta}(t) = \sum_{i=1}^l a_i \delta(t - \Delta t - i + \lambda) \quad (2)$$

Скорректированный прогноз на дату t с заблаговременностью Δt определяется в виде:

$$\tilde{Y}_c(t) = \tilde{Y}(t) + \tilde{\delta}(t). \quad (3)$$

Параметр λ равен 1, если при составлении прогноза для даты t уже известна ошибка прогноза $\delta(t - \Delta t)$. Параметр λ равен 0 в противном случае, когда известна только ошибка $\delta(t - \Delta t - 1)$. Остальные параметры формулы (2) определяются, исходя из условия минимума среднеквадратической погрешности скорректированного прогноза. Как правило, число слагаемых l в формуле (2) варьирует от 3 до 6.

В настоящей работе данный метод применяется при значениях $\lambda = 0$ и $l = 5$. Приводятся примеры, когда данный метод коррекции позволяет снизить погрешность ежедневно выпускаемых краткосрочных прогнозов речного стока в несколько раз.

В целях совершенствования системы прогнозирования стока рек России для получения статистически обоснованных оценок погрешности и эффективности проверяемых методик рекомендуется использовать результаты, опубликованные в монографии С.В. Борща и А.В. Христофорова «Оценка качества прогнозов речного стока» 2015 г.

При оценке среднеквадратической погрешности прогноза S следует различать проверку методики на зависимом и независимом материале.

В случае проверки на независимом материале, который образован гидрометеорологической информацией, не использованной при получении методики, стандартная статистическая оценка величины S является несмещенной и при достаточно большом объеме проверочной выборки дает правильное представление о точности проверяемой методики.

В случае проверки на зависимом материале стандартная статистическая оценка величины S приводит к ее систематическому занижению. Причем это занижение может быть весьма значительным, если число оцениваемых параметров схемы получения прогноза велико по сравнению с длиной рядов гидрологических и метеорологических наблюдений.

Для преодоления возникающих при этом проблем рекомендуется использовать следующие методы.

Оценка погрешности выпускаемых один раз год долгосрочных и среднесрочных прогнозов речного стока может быть получена одним из двух методов.

Метод 1 является наиболее простым и позволяет оценивать среднеквадратическую погрешность прогноза на зависимом материале по ряду ошибок проверочных прогнозов за n лет, использованных при разработке проверяемой методики. В целях получения несмещенной оценки погрешности прогноза используется теоретическая формула, в которой учитывается соотношение между длиной ряда проверочных прогнозов n и числом k оцениваемых параметров формулы получения прогноза.

Метод 2 «выбрасываемой точки» Дж.В. Тьюки является универсальным, однако более трудоемким. Последовательно исключается каждый год с номером i и по оставшимся наблюдениям за $n-1$ год строится вариант схемы получения прогноза, у которого частично меняются используемые параметры или графики. Полученный для года с номером i прогноз $\tilde{Y}_{(i)}$ сравнивается с фактическим значением Y_i прогнозируемой гидрологической характеристики. Данная процедура выполняется поочередно для всех лет $i = 1, \dots, n$ с возвращением в обучающий ряд данных года, исключенного на предыдущем этапе. В результате образуется ряд ошибок n проверочных прогнозов, полученных на независимом материале.

Оценка погрешности краткосрочных и среднесрочных прогнозов, выпускаемых ежедневно в течение некоторого периода (месяца, фазы водного режима, года) может быть получена одним из двух методов.

Метод 3 кросс-валидации является наиболее простым и часто используемым. Данные за лет n гидрометеорологических наблюдений разбиваются на обучающий ряд продолжительностью n_0 лет и контролирующий ряд продолжительностью $n_k = n - n_0$ лет.

Обучающий ряд используется для разработки методики прогнозирования, а контролирующий ряд – для ее проверки.

Метод 4 является более трудоемким, однако дает более точные результаты. По существу он является вариантом метода 2 «выбрасываемой точки». Последовательно исключается каждый год с номером i и по оставшимся наблюдениям за $n-1$ год строится вариант схемы получения прогноза. Данная процедура выполняется поочередно для всех лет с возвращением в обучающий ряд данных года, исключенного на предыдущем этапе. В результате для рассматриваемого периода образуется ряд ошибок проверочных прогнозов, полученных на независимом материале.

В отечественной практике прогнозов речного стока эффективность методики прогнозирования оценивается путем сравнения ее погрешности S с погрешностью σ_A альтернативного прогноза. Для долгосрочных и некоторых среднесрочных прогнозов в качестве такового используется климатический прогноз с погрешностью σ , а для краткосрочных и некоторых среднесрочных прогнозов – инерционный прогноз с погрешностью σ_A . В действующих Наставлениях по службе прогнозов 1962 г. вопрос о качестве проверяемой методики решается в зависимости от величины S/σ_A и оправдываемости прогнозов P , которая равна частоте случаев, когда ошибка прогнозов не превышает допустимую величину $\delta_{\text{доп}} = 0,674 \sigma_A$. Причем решается слишком упрощенно.

В большинстве стран мира, а в последние годы и в России используется опубликованный в 1970 г. показатель Нэша–Сатклиффа. Данный показатель достаточно точно выражается формулой:

$$NSE = 1 - \frac{S^2}{\sigma^2}. \quad (4)$$

Таким образом, показатель Нэша–Сатклиффа вполне подходит для оценки эффективности долгосрочных и некоторых среднесрочных прогнозов речного стока, для которых в качестве альтернативы используется климатический прогноз, однако он не применим для оценки эффективности для краткосрочных и некоторых среднесрочных прогнозов, для которых в качестве альтернативы используется инерционный прогноз.

В целях преодоления указанных недостатков и получения статистически обоснованных выводов об эффективности проверяемых методик прогнозирования речного стока рекомендуется использовать правила, в которых учитываются число проверочных прогнозов, коэффициент корреляции между ошибками прогноза по проверяемой методике и ошибками альтернативного прогноза и автокорреляцию этих ошибок.

В конце главы даны рекомендации по выбору наиболее подходящих методик прогнозирования, исходя не только из их погрешности и эффективности, но и из интересов потребителей прогностической информации, трудовых и финансовых затрат при ее получении.

ГЛАВА 2. Прогнозирование речного стока методом экстраполяции гидрографа

В главе излагаются результаты применения метода экстраполяции гидрографа, который разработан при участии автора и предназначен для краткосрочного и среднесрочного прогнозирования расходов и уровней воды.

Метод основан на том, что характерный для достаточно крупных равнинных рек плавный ход ежедневных расходов воды дает возможность его экстраполяции на несколько суток вперед и определять прогноз с заблаговременностью Δt суток в виде обобщенного полинома. Оценка $k+1$ его параметров по известным к дате составления прогноза $t - \Delta t$ расходам воды $Q(t - \Delta t)$, $Q(t - \Delta t - 1)$, ..., $Q(t - \Delta t - k)$ приводит к тому, что получаемый путем такой экстраполяции прогноз определяется формулой:

$$\mathcal{Q}(t) = \sum_{i=0}^k a_i(\Delta t) Q(t - \Delta t - i) + b(\Delta t), \quad (5)$$

параметры которой подлежат оценке по данным гидрологических наблюдений.

Во избежание необоснованно низких и высоких значений прогноза результаты применения формулы (5) необходимо корректировать, заменяя такие экстремальные значения $\mathcal{Q}(t + \Delta t)$ допустимым минимумом $\min Q$ или максимумом $\max Q$. Окончательный прогноз расхода воды выражается формулой:

$$\tilde{Q}(t + \Delta t) = \begin{cases} \min Q, & \text{если } \mathcal{Q}(t + \Delta t) < \min Q; \\ \mathcal{Q}(t + \Delta t), & \text{если } \min Q \leq \mathcal{Q}(t + \Delta t) \leq \max Q; \\ \max Q, & \text{если } \mathcal{Q}(t + \Delta t) > \max Q. \end{cases} \quad (6)$$

Прогнозирование уровней воды выполняется аналогичным образом.

Метод экстраполяции гидрографа реализован в целях прогнозирования в течение всего года среднесуточных расходов и уровней воды в оборудованных гидрологическими постами речных створах, расположенных по всей территории России. Среднесуточные уровни воды прогнозировались для 2776 створов (рис. 1). Среднесуточные расходы воды прогнозировались для 2098 створов.

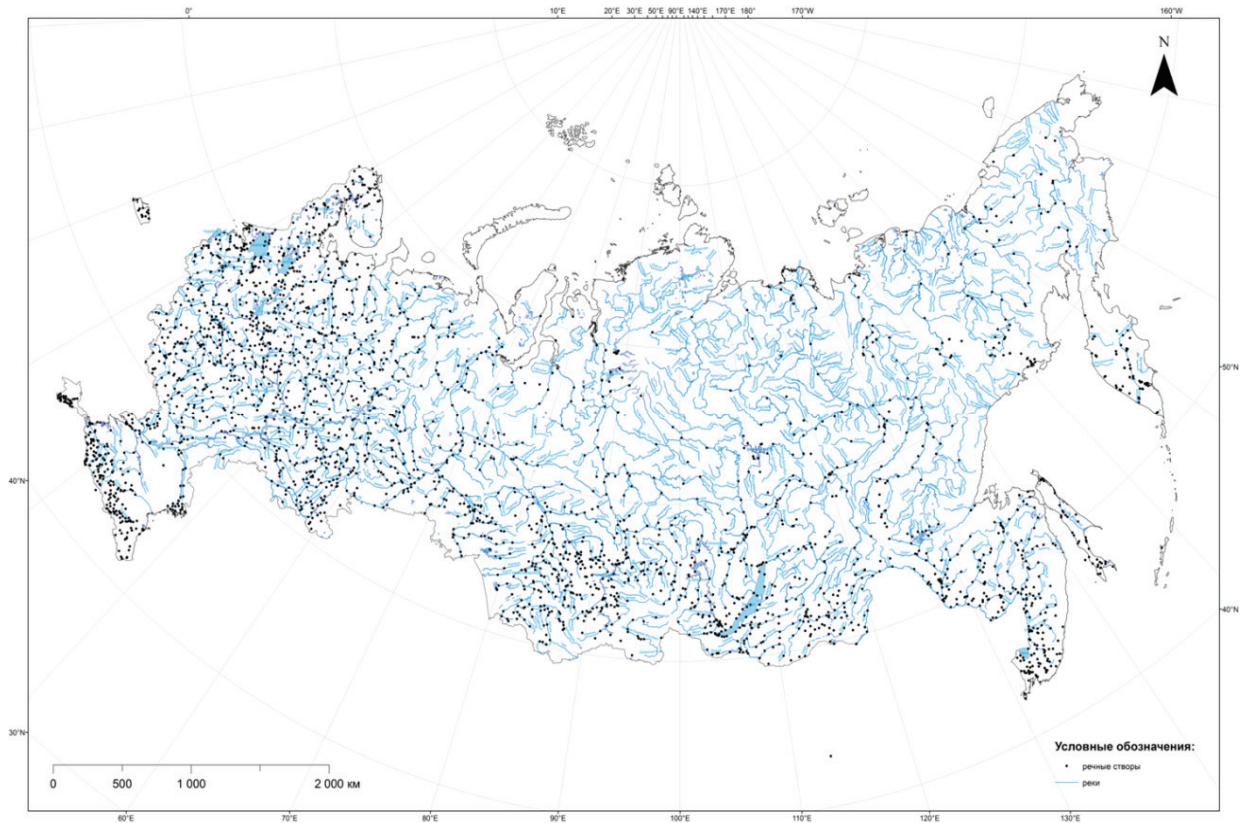


Рисунок 1. Расположение анализируемых речных створов на территории России

Параметры формул (5) и (6) оценивались по ряду ежедневных гидрологических наблюдений за период с 01. 01. 2010 по 31. 12. 2020 гг. Оптимальные значения параметра k , при которых среднеквадратическая погрешность прогноза принимает минимальное значение, не превышали 5. На этом основании все прогнозы определялись по формуле (5) при $k = 5$.

Возможности метода экстраполяции гидрографа демонстрирует табл. 1, в которой для всех значений заблаговременности Δt суток приведено число речных створов, для которых получены хорошие и удовлетворительные прогнозы расходов Q , м³/с и уровней воды H , см с показателем $S/\sigma_{\Delta} < 0,80$ и оправдываемостью $P > 60\%$.

Таблица 1. Число речных створов с хорошими и удовлетворительными прогнозами различной заблаговременности

| Δt | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Q | 1000 | 723 | 545 | 456 | 382 | 328 | 301 | 277 | 258 | 240 |
| H | 1262 | 909 | 704 | 558 | 461 | 384 | 337 | 294 | 252 | 223 |

Приведенные данные показывают, что даже с заблаговременностью $\Delta t = 10$ суток расходы воды удовлетворительно прогнозируются для 240 створов, а уровни воды для 223 створов.

Как и следовало ожидать, метод экстраполяции гидрографов оказался неприменимым для рек с малой площадью и большим уклоном водосбора, в частности, для малых горных рек. Расположенные на таких реках створы дали приблизительно половину случаев, когда прогнозы расходов и уровней воды оказались неудовлетворительными даже при минимальной заблаговременности $\Delta t = 1$. Это объясняется тем, что при малых размерах и больших уклонах водосбора речной сток очень быстро, часто за несколько часов реагирует на таяние снега или на выпадение жидких осадков. В результате водный режим определяется серией кратковременных паводков, за пределами зимней межени ход среднесуточных расходов и уровней имеет пилообразный характер и его невозможно предсказать методом экстраполяции даже на сутки.

Для рек с большой площадью и малым уклоном водосбора ход среднесуточных расходов и уровней имеет, как правило, плавный характер, поэтому метод экстраполяции гидрографа позволяет давать удовлетворительные прогнозы с достаточно большой заблаговременностью. Для таких крупнейших российских рек, как Амур, Лена, Енисей, Обь, Иртыш, Тобол, Кама, Дон, Северная Двина и Печора, этот метод дает не только удовлетворительные, но и хорошие прогнозы с заблаговременностью до 10 суток.

В целях оценки прогнозируемости стока рек России методом экстраполяции гидрографа для каждого гидрологического поста определялась максимальная заблаговременность удовлетворительного прогноза Δ_{\max} , которая характеризует плавность изменения расходов воды во времени и возможность его экстраполяции. Анализировалась зависимость этого показателя от площади соответствующего водосбора A и среднего уклона его поверхности I . В качестве исходных данных использованы данные по речным створам, расположенным практически по всей территории России, для которых естественный водный режим которых не нарушен расположенными выше по течению водохранилищами.

На основе разнообразной информации об условиях формирования речного стока и о его режиме на территории России выделено 18 с единой расчетной зависимостью показателя прогнозируемости речного стока Δ_{\max} от соответствующей каждому региону функции морфометрических характеристик водосбора $f(A, I)$. Эти регионы покрывают 79% площади всей страны и представлены на рис. 2. В табл. 2 для каждого региона приведены его номер, название, число речных створов N , оптимальный для данного региона вариант функции $f(A, I)$ и коэффициент его корреляции r с показателем Δ_{\max} .

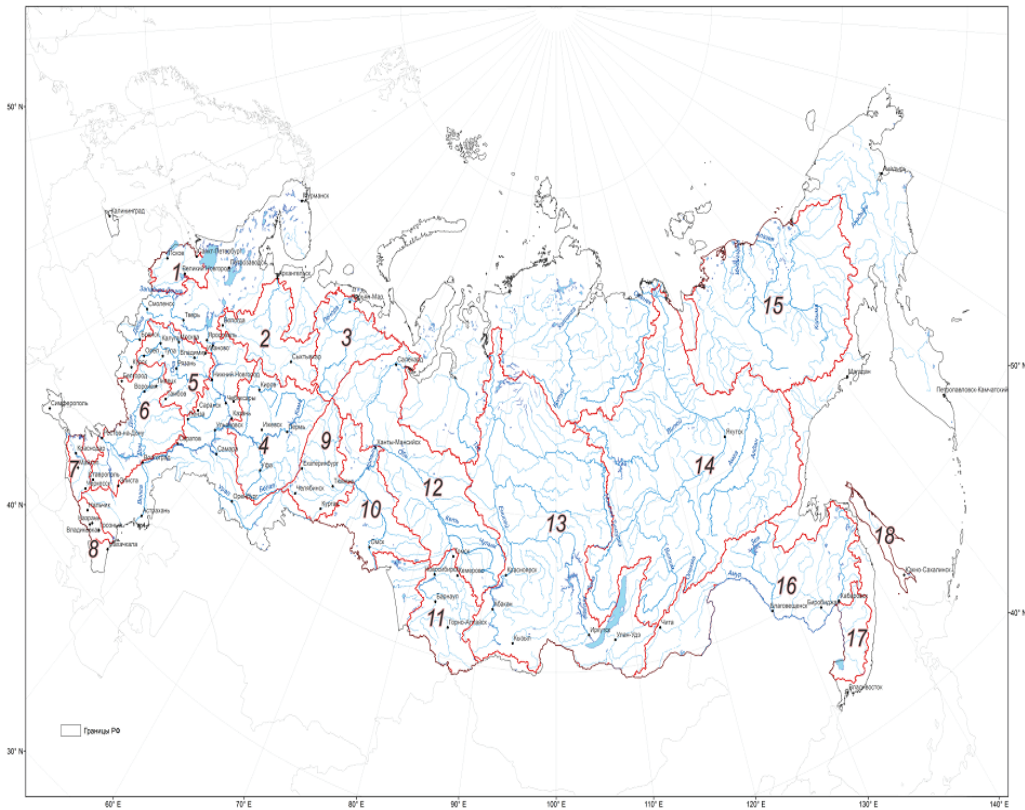


Рисунок 2. Регионы с единой расчетной зависимостью показателя прогнозируемости речного стока от функции морфометрических характеристик $f(A, I)$

Таблица 2. Характеристики выделенных регионов

| № | Регион | N | Вид $f(A, I)$ | r |
|----|------------------------|-----|---------------------|------|
| 1 | Северо-Запад России | 71 | $\ln(A)$ | 0,76 |
| 2 | Бассейн Северной Двины | 75 | $\ln(A)$ | 0,77 |
| 3 | Бассейн Печоры | 46 | A | 0,84 |
| 4 | Бассейн Камы | 129 | $\sqrt{A/I}$ | 0,82 |
| 5 | Бассейн Оки | 66 | $\sqrt{A/I}$ | 0,84 |
| 6 | Бассейн Дона | 75 | $\ln(A)$ | 0,80 |
| 7 | Бассейн Кубани | 25 | $\sqrt{A/I}$ | 0,77 |
| 8 | Бассейн Терека | 33 | $\ln(A)+1,3 \ln(I)$ | 0,76 |
| 9 | Бассейн Тобола | 36 | $\ln(A)$ | 0,81 |
| 10 | Бассейн Иртыша | 78 | $\ln(A/I)$ | 0,80 |
| 11 | Бассейн Верхней Оби | 162 | $\sqrt{A/I}$ | 0,82 |
| 12 | Бассейн Нижней Оби | 32 | $\ln(A)$ | 0,91 |
| 13 | Бассейн Енисея | 80 | $\sqrt{A/I}$ | 0,76 |
| 14 | Бассейн Лены | 88 | $\ln(A/I)$ | 0,75 |
| 15 | Северо-Восток России | 63 | $\ln(A)-4 \ln(I)$ | 0,79 |
| 16 | Бассейн Амура | 54 | $\ln(A)$ | 0,88 |
| 17 | Приморье | 43 | A | 0,75 |
| 18 | Сахалин | 25 | $\sqrt{A/I}$ | 0,75 |

Для всех выделенных регионов зависимость показателя Δ_{\max} от оптимального варианта функции морфометрических характеристик $f(A, I)$ оказалась недостаточно тесной для надежного определения максимальной заблаговременности удовлетворительных прогнозов расхода воды в речном створе при известных значениях площади A и среднего уклона поверхности I его водосбора. Однако эти зависимости позволяют оценить предельно низкое значение $f(A, I)$, которое обеспечивает удовлетворительные прогнозы с достаточно большой заблаговременностью, и предельно высокое, при котором удовлетворительные прогнозы возможны только с малой заблаговременностью или невозможны вообще ($\Delta_{\max} = 0$). Например, на рис. 3 представлен график зависимости максимальной заблаговременности удовлетворительных прогнозов Δ_{\max} от величины $\ln(A)$, полученный для бассейна Амура.

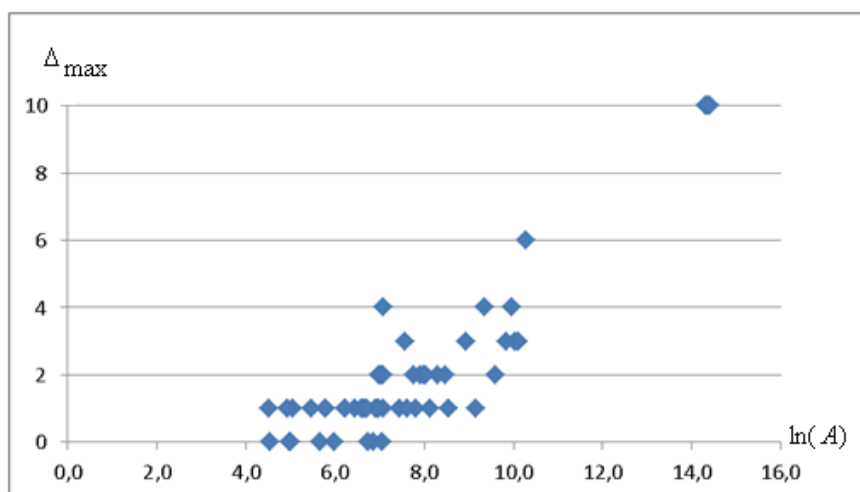


Рисунок 3. График зависимости показателя Δ_{\max} от величины $\ln(A)$, полученный для бассейна Амура

Данный график позволяет сделать следующие выводы: для речных створов с показателями $\ln(A) > 11$, т.е. $A > 60000 \text{ км}^2$, метод экстраполяции гидрографа позволяет получать удовлетворительные прогнозы расходов воды с заблаговременностью не менее 7 суток; для речных створов с показателями $\ln(A) < 7$, т.е. $A < 1000 \text{ км}^2$, метод экстраполяции гидрографа позволяет получать удовлетворительные прогнозы расходов воды с заблаговременностью не более суток.

В главе даны примеры использования метода экстраполяции гидрографа для прогнозирования стока рек бассейна Тобола и Дона. В частности в табл. 3 для рек бассейна Дона приведено соотношение S/σ_{Δ} между среднеквадратической погрешностью прогноза среднесуточных уровней воды методом экстраполяции гидрографа и погрешностью инерционного прогноза.

Таблица 3. Значения показателя S/σ_{Δ} для прогнозов уровней воды на реках бассейна Дона при заблаговременности $\Delta t = 1, \dots, 10$ суток

| Река | Пост | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|------------|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Дон | г. Задонск | 0,59 | 0,71 | 0,76 | – | – | – | – | – | – | – |
| Дон | г. Лиски | 0,70 | 0,76 | 0,80 | 0,81 | 0,81 | – | – | – | – | – |
| Дон | х. Хованский | 0,73 | 0,72 | 0,74 | 0,75 | 0,76 | 0,77 | – | – | – | – |
| Дон | г. Серафимович | 0,75 | 0,73 | 0,74 | 0,75 | 0,77 | 0,78 | 0,79 | 0,80 | 0,80 | 0,81 |
| Дон | ст. Новогригорьевская | 0,77 | 0,78 | 0,75 | 0,78 | 0,77 | 0,77 | 0,76 | 0,75 | 0,75 | 0,76 |
| Сосна | г. Елец | 0,60 | 0,70 | – | – | – | – | – | – | – | – |
| Воронеж | г. Липецк 2 | 0,63 | 0,71 | 0,76 | 0,81 | 0,84 | – | – | – | – | – |
| Воронеж | с. Чертовицкое | 0,73 | 0,76 | 0,79 | 0,82 | 0,84 | 0,85 | – | – | – | – |
| Битюг | г. Бобров | 0,57 | 0,69 | 0,75 | 0,80 | 0,84 | – | – | – | – | – |
| Хопер | г. Болашов | 0,41 | 0,52 | 0,62 | 0,69 | 0,73 | 0,76 | 0,78 | 0,79 | 0,81 | 0,81 |
| Хопер | г. Поворино | 0,50 | 0,57 | 0,59 | 0,60 | 0,62 | 0,65 | 0,66 | 0,67 | 0,68 | 0,68 |
| Хопер | г. Новохоперск | 0,50 | 0,53 | 0,57 | 0,60 | 0,62 | 0,65 | 0,66 | 0,67 | 0,68 | 0,69 |
| Хопер | х. Барминский | 0,54 | 0,65 | 0,71 | 0,74 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,76 | 0,78 | 0,79 |
| Ворона | г. Уварово | 0,47 | 0,59 | 0,66 | 0,71 | 0,74 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | – | – |
| Медведица | ст. Арчединская | 0,64 | 0,71 | 0,73 | 0,77 | 0,81 | 0,84 | – | – | – | – |
| Сев. Донец | г. Белая Калитва | 0,88 | 0,94 | – | – | – | – | – | – | – | – |
| Калитва | х. Погорелое | 0,64 | 0,72 | 0,77 | 0,81 | – | – | – | – | – | – |
| Сал | х. Балабинка | 0,51 | 0,59 | 0,66 | 0,72 | 0,76 | 0,78 | 0,80 | – | – | – |

Приведенные данные показывают, что максимальная заблаговременность удовлетворительных прогнозов варьирует от 1 до 10 суток и в среднем превышает 5 суток. Сходные результаты получены для прогнозов среднесуточных расходов воды. Пример достаточно удачной экстраполяции гидрографа демонстрирует рис. 4.

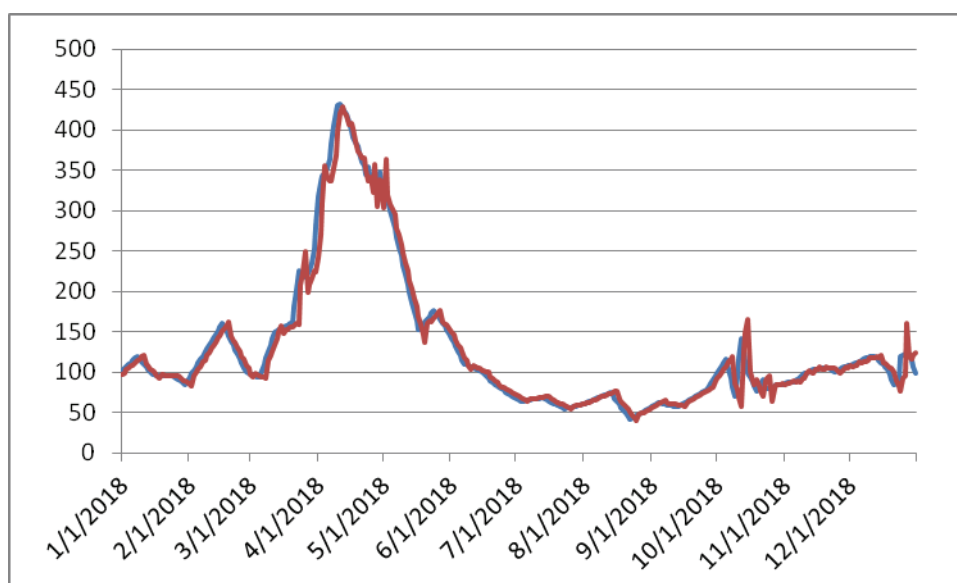


Рисунок 4. Фактические (синим) и спрогнозированные с заблаговременностью $\Delta t = 3$ суток (красным) гидрографы в створе р. Северский Донец – г. Белая Калитва в 2018 г.

ГЛАВА 3. Краткосрочное прогнозирование речного стока на основе модели HBV-96 и системы COSMO-RU

Третья глава посвящена разработанной автором методике ежедневного краткосрочного прогнозирования среднесуточных расходов воды с использованием концептуальной модели формирования речного стока HBV-96 и оперативной системы численного прогнозирования погоды COSMO-RU.

Разработанная в Гидрометеорологическом институте Швеции модель HBV-96 в качестве входной информации модель использует осредненные по территории водосбора ежедневные значения среднесуточной температуры приземного слоя воздуха и суточного слоя осадков. На выходе получают ежедневные значения среднесуточных расходов воды в замыкающем речном створе.

Разработанная в ФГБУ «Гидрометцентр России» оперативная система регионального краткосрочного численного прогноза погоды COSMO-RU позволяет получать четыре раза в сутки прогнозы с заблаговременностью до 78 часов более 70 метеорологических полей, включая поля осадков и приземной температуры воздуха.

Методика реализована для 590 речных бассейнов, в замыкающих створах которых имелись гидрологические посты (рис. 5).

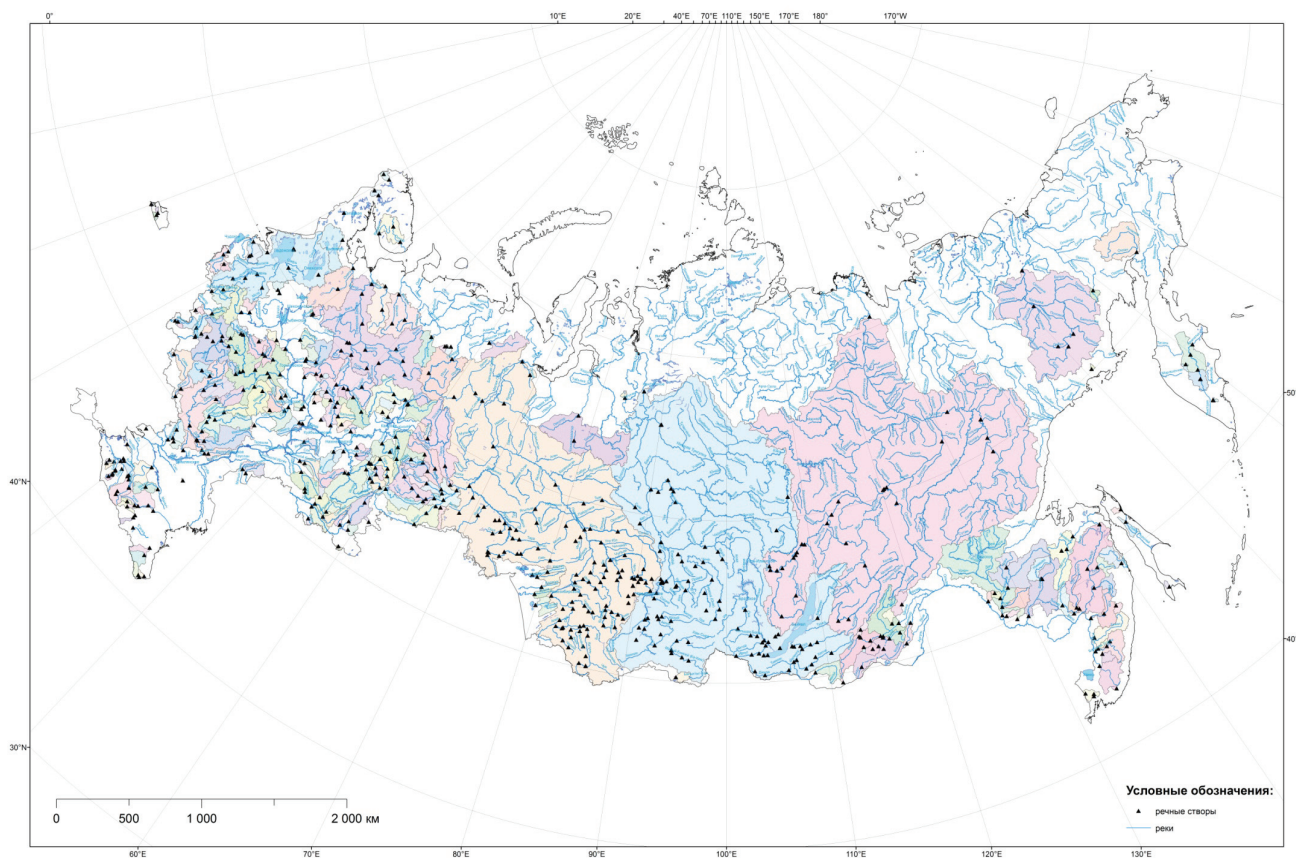


Рисунок 5. Расположение использованных гидрологических постов

Площадь речных бассейнов варьирует от 1 до 2 850 000 км² (Обь) и в среднем равна 71 652 км². Границы речных бассейнов были рассчитаны с использованием геоинформационного программного обеспечения (ArcGIS for Desktop) и цифровой модели рельефа, созданной на основе топографических карт масштаба 1 : 100 000. Для каждого речного бассейна формировался архив данных наблюдений на метеорологических станциях, расположенных в его пределах или в его окрестностях, а также данных наблюдений за расходами и уровнями воды в их замыкающих створах.

В качестве исходной информации использованы данные гидрометеорологических наблюдений и метеорологических прогнозов за период с 01.01.2010 по 31.12.2020 гг. Для нахождения оптимальных значений параметров модели использована обучающая выборка, образованная данными за период с 01.01.2010 по 31.12.2016 гг. Для оценки точности расчетов и прогнозов на независимом материале использованы данные за период с 01.01.2017 по 31.12.2020 гг.

Разработка и проверка предлагаемой методики включает три этапа:

1. Расчет среднесуточных расходов воды с помощью модели HBV-96;
2. Оценка качества метеорологических прогнозов с помощью системы COSMO-RU;
3. Реализация и проверка методики прогнозирования речного стока.

Оценка возможностей использования модели HBV-96 для рек России получена на основе расчетов среднесуточных расходов воды, когда на входе в эту модель используются фактические значения осредненных по территории водосбора осадков и приземной температуры воздуха. Для определения этих метеорологических характеристик на основе срочных наблюдений на каждой метеорологической станции учитывался часовой пояс, в котором она находится. При получении осредненных по территории речного бассейна значений учитывалось расположение относящихся к этому речному бассейну метеорологических станций.

Реализация методики расчета среднесуточного расхода воды выполнена на языке программирования Python с привлечением программных модулей Numpy, Pandas, Arcgisscripting, SciPy, Matplotlib. Программное обеспечение включает в себя ряд программ, реализующих расчетные этапы подготовки и информации и выполнения расчетов. Оптимизация параметров модели выполнена с помощью алгоритма SCE-UA перемешивания и эволюции комплексов их значений. В целях повышения точности модельных расчетов применен метод коррекции, который учитывает автокорреляцию их ошибок.

По результатам верификации расчетов без их корректировки показатель *NSE* качества моделирования Нэша–Саттклиффа в среднем оказался равным 0,68. Хорошие

результаты с соотношением $NSE \geq 0,80$ были получены для 151 речных бассейнов (26%). Удовлетворительные результаты с соотношением $0,50 \leq NSE < 0,80$ были получены для 362 речных бассейнов (61%). Неудовлетворительные результаты с соотношением $NSE < 0,50$ были получены для 77 речных бассейнов (13%).

По результатам верификации расчетов с их коррекцией показатель NSE качества моделирования Нэша–Саттклиффа в среднем оказался равным 0,95. Хорошие результаты с соотношением $NSE \geq 0,80$ были получены для 557 речных бассейнов (94%). Удовлетворительные результаты с соотношением $0,50 \leq NSE < 0,80$ были получены для 29 речных бассейнов (5%). Неудовлетворительные результаты с соотношением $NSE < 0,50$ были получены для 4 речных бассейнов (1%).

Таким образом, коррекция модельных расчетов является важным элементом предлагаемой методики, так как позволяет существенно повышать их точность.

В целом, полученные результаты свидетельствуют о пригодности модели HBV-96 для описания процессов формирования стока рек России в различных природных условиях.

Оценка возможностей использования системы COSMO-RU для получения краткосрочных прогнозов речного стока получена на основе анализа ошибок получаемых с ее помощью прогнозов суточного слоя осадков и среднесуточной температуры приземного слоя воздуха для 2081 метеорологических станций, расположенных практически по всей территории России.

В целях повышения точности прогнозов применен метод коррекции, который использует формулу линейной регрессии. Эффективность такой коррекции определяется отношением S/\mathcal{E} среднеквадратических погрешностей прогноза до и после ее применения. В табл.4 средние для всех 2081 метеорологических станций значения S/\mathcal{E} и среднеквадратической погрешности скорректированного прогноза \mathcal{E} для прогнозов слоя осадков $\tilde{P}(\Delta t)$ и температуры воздуха $\tilde{T}(\Delta t)$ с заблаговременностью $\Delta t = 1, 2, 3$ суток.

Таблица 4. Средние показатели скорректированных прогнозов

| | $\tilde{P}(1)$ | $\tilde{P}(2)$ | $\tilde{P}(3)$ | $\tilde{T}(1)$ | $\tilde{T}(2)$ | $\tilde{T}(3)$ |
|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| S/\mathcal{E} | 1,15 | 1,20 | 1,24 | 1,13 | 1,14 | 1,17 |
| \mathcal{E} | 3,48 | 3,75 | 3,98 | 1,77 | 2,02 | 2,29 |

Приведенные значения отношения S/\mathcal{E} показывают, что данный метод коррекции прогнозов повышает их точность в среднем на 20% для слоя осадков и на 15% для температуры воздуха.

При переходе от отдельных метеостанций к осредненным по территории водосбора величинам качество прогнозов слоя осадков и температуры воздуха возрастает. Эффект осреднения наглядно демонстрирует табл. 5, в которой помещены средние значения коэффициента корреляции R между фактическим слоем осадков и его прогнозом $\tilde{P}(\Delta t)$, между фактической температурой воздуха и ее прогнозом $\tilde{T}(\Delta t)$ с заблаговременностью $\Delta t = 1, 2, 3$ суток для трех вариантов:

- с прогнозированием слоя осадков и температуры воздуха для каждой из 2081 метеорологических станций;
- с прогнозированием этих элементов, осредненных для каждого из 590 речных бассейнов;
- с прогнозированием этих элементов, осредненных для речных бассейнов с площадью не менее 100.000 км².

Таблица 5. Средние значения коэффициентов корреляции R для каждого из трех вариантов

| Вариант | $\tilde{P}(1)$ | $\tilde{P}(2)$ | $\tilde{P}(3)$ | $\tilde{T}(1)$ | $\tilde{T}(2)$ | $\tilde{T}(3)$ |
|---------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 1 | 0,594 | 0,504 | 0,403 | 0,987 | 0,984 | 0,979 |
| 2 | 0,666 | 0,582 | 0,484 | 0,990 | 0,987 | 0,983 |
| 3 | 0,812 | 0,741 | 0,662 | 0,993 | 0,991 | 0,988 |

Для оценки качества метеорологических прогнозов использованы широко применяемые в мировой практике гидрологического моделирования и прогнозирования градации:

- качество прогнозов относится к категории хороших при условии $R \geq 0,80$;
- качество прогнозов относится к категории удовлетворительных при условии $0,4 \leq R < 0,80$;
- качество прогнозов относится к категории неудовлетворительных при условии $R < 0,4$.

В табл. 6 приведена частота случаев, когда качество прогнозов слоя осадков $\tilde{P}(\Delta t)$ и температуры воздуха $\tilde{T}(\Delta t)$ с заблаговременностью $\Delta t = 1, 2, 3$ суток относится к той или иной категории.

В целом для всех 590 речных бассейнов качество прогнозов суточного слоя осадков следует признать удовлетворительным, а качество прогнозов среднесуточной температуры воздуха следует признать хорошим.

Таблица 6. Частота различных категорий качества метеорологических прогнозов

| Качество прогнозов | $\tilde{P}(1)$ | $\tilde{P}(2)$ | $\tilde{P}(3)$ | $\tilde{T}(1)$ | $\tilde{T}(2)$ | $\tilde{T}(3)$ |
|----------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Хорошее | 16% | 5% | 1% | 98% | 98% | 98% |
| Удовлетворительное | 78% | 85% | 77% | 0% | 0% | 0% |
| Неудовлетворительное | 6% | 9% | 22% | 2% | 2% | 2% |

На третьем этапе выполнена реализация и проверка предлагаемой методики прогнозирования среднесуточных расходов воды. Для получения такого прогноза известные к дате его составления осредненные по территории водосбора значения среднесуточной температуры воздуха и суточного слоя осадков и полученные с помощью системы COSMO-RU ожидаемые значения этих метеорологических элементов в течение периода заблаговременности используются в качестве входной информации для модели формирования речного стока HBV-96. В целях повышения точности прогнозов также применен метод коррекции, который учитывает автокорреляцию их ошибок и устраняет образование серий их положительных и отрицательных значений.

В целях автоматизации процедуры использования и верификации методики прогнозирования среднесуточных расходов воды на языке Python разработана компьютерная программа, которая включает этапы: считывание и обработку данных, которые могут храниться в одном или в нескольких файлах; оценку показателей качества получаемых расчетов; создание для каждого речного бассейна отдельной директории, в которой сохраняются параметры схемы получения прогнозов, показатели их качества и иллюстрирующие работу алгоритма графики; создание сводной таблицы с результатами прогнозов.

Качество прогнозов по предлагаемой методике демонстрирует табл.7, в которой приведено среднее значение отношения S/σ_{Δ} и относительное число речных бассейнов, для которых результаты прогнозов относятся к категории хороших ($S/\sigma_{\Delta} \leq 0,50$) и удовлетворительных ($0,50 < S/\sigma_{\Delta} \leq 0,80$).

Таблица 7. Показатели качества прогнозов по предлагаемой методике

| Показатель | $\Delta t = 1$ | $\Delta t = 2$ | $\Delta t = 3$ |
|--------------------------------------|----------------|----------------|----------------|
| S/σ_{Δ} | 0,72 | 0,80 | 0,62 |
| $S/\sigma_{\Delta} \leq 0,50$ | 12% | 13% | 28% |
| $0,50 < S/\sigma_{\Delta} \leq 0,80$ | 50% | 52% | 60% |

Помещенные данные свидетельствуют о том, что предлагаемая методика позволяет получать удовлетворительные и хорошие прогнозы среднесуточных расходов воды различной заблаговременности. Не смотря на снижение точности прогнозов с ростом их заблаговременности, за счет увеличения погрешности инерционного прогноза σ_{Δ} отношение S/σ_{Δ} не становится больше, а, наоборот, уменьшается. Для 252 речных бассейнов, расположенных в различных регионах России, методика позволяет получать хорошие и удовлетворительные прогнозы при всех трех значениях заблаговременности $\Delta t = 1, 2, 3$ суток.

На рис. 6 приведены совмещенные графики хода фактических и спрогнозированных с заблаговременностью 2 суток расходов воды для шести рек с различным типом водного режима. Гидрографы приведены для 2017 г., одного из трех лет, использованных для проверки методики на независимом материале. Приведенные графики демонстрируют высокое качество прогнозов среднесуточных расходов воды по предлагаемой методике – фактические и рассчитанные гидрографы отличаются незначительно.

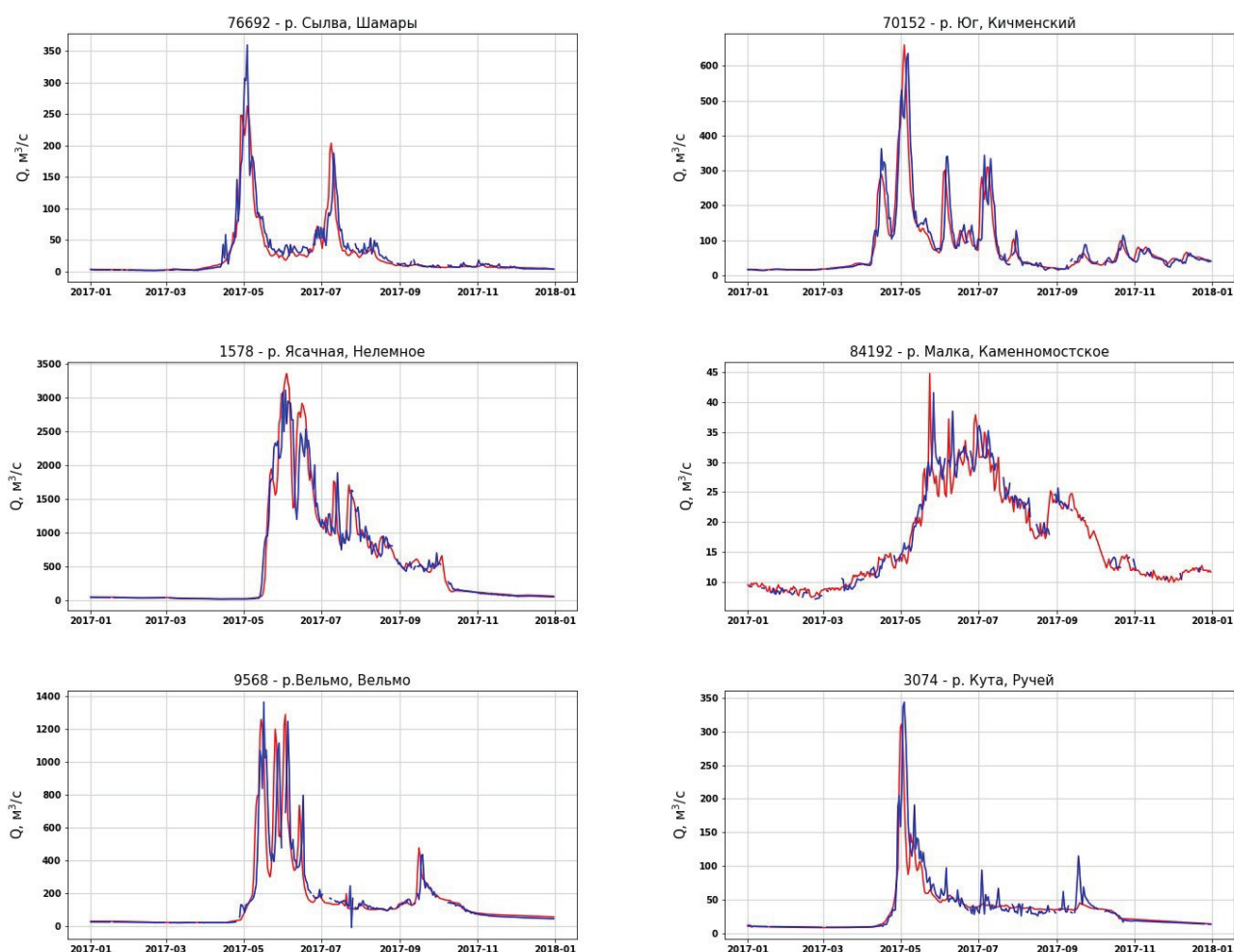


Рисунок 6. Фактические (синим) и спрогнозированные (красным) с заблаговременностью 2 суток гидрографы 2017 г.

В табл. 8 приведены характеристики рассматриваемых речных бассейнов: индекс гидрологического поста; название реки и пункта наблюдений; регион расположения; площадь водосбора; показатель NSE и отношение S/σ_{Δ} для прогнозов с заблаговременностью 2 суток.

Таблица 8. Характеристики рассматриваемых речных бассейнов

| Индекс | Река | Пункт | Регион | Площадь, км ² | NSE | S/σ_{Δ} |
|--------|---------|-----------------------|--------------------|-----------------------------|-------|---------------------|
| 76692 | Сылва | с. Шамары | бассейн Камы | 2140 | 0,933 | 0,53 |
| 1578 | Ясачная | с. Нелемное | бассейн Колымы | 32000 | 0,918 | 0,60 |
| 9568 | Вельмо | с. Вельмо | бассейн Енисея | 11800 | 0,859 | 0,66 |
| 70152 | Юг | г. Кичменский городок | бассейн Сев. Двины | 8890 | 0,921 | 0,62 |
| 84192 | Малка | с. Каменноостское | бассейн Терека | 1540 | 0,894 | 0,64 |
| 3074 | Кута | п. Ручей | бассейн Лены | 11200 | 0,891 | 0,60 |

Полученные результаты позволяют использовать предлагаемую методику в рамках автоматизированной системы подготовки и выпуска краткосрочных прогнозов стока рек России. Хорошие и удовлетворительные прогнозы по предлагаемой методике могут быть получены с заблаговременностью 1 сутки для 62% речных бассейнов, с заблаговременностью 2 суток – для 65%, с заблаговременностью 3 суток – для 88%.

Реализация предлагаемых методик расчета и краткосрочного прогнозирования стока рек бассейна Камы позволяет оценить влияние погрешности метеорологических прогнозов на качество прогнозов среднесуточных расходов воды, которое возрастает по мере увеличения их заблаговременности.

Использование модели HBV и системы COSMO-RU следует рассматривать, как один из возможных вариантов методики краткосрочного прогнозирования стока рек России. Разработанное программное обеспечение позволяет переходить к другим вариантам, использующим различные концептуальные модели формирования речного стока и системы получения метеорологических прогнозов.

ГЛАВА 4. Возможности долгосрочного прогнозирования речного стока

В главе анализируются факторы, ограничивающие возможности долгосрочного прогнозирования речного стока.

В качестве первого такого фактора рассматривается неопределенность хода метеорологических элементов в течение периода заблаговременности прогноза. По мере

внедрения все более совершенных моделей формирования речного стока и в условиях отсутствия достаточно надежных сверхдолгосрочных метеорологических прогнозов этот фактор будет оставаться главным источником погрешности долгосрочных прогнозов.

Предлагается оценка влияния данного фактора для получающих все большее распространение методик долгосрочного прогнозирования, основанных на моделях формирования речного стока и использующих ансамблевый подход, который предусматривает учет наблюдавшихся в прошлом сценариев хода метеорологических элементов в течение периода заблаговременности гидрологического прогноза.

В дополнение в среднеквадратической погрешности прогноза S учитывается погрешность модельных расчетов S_M , которая получается при подстановке в модель фактических данных о ходе метеорологических элементов в течение периода заблаговременности прогноза для каждого проверяемого года.

Погрешность прогноза S всегда превосходит погрешность расчета S_M , и обусловлено это именно неопределенностью хода метеорологических элементов в течение периода заблаговременности. Возникающее в результате этой неопределенности дополнительное слагаемое среднего квадрата ошибки прогноза равно:

$$S_{met}^2 = S^2 - S_M^2. \quad (7)$$

Влияние неопределенности хода метеорологических характеристик в период заблаговременности прогноза речного стока предлагается характеризовать величиной:

$$f = (S_{met}^2 / S^2) * 100\%, \quad (8)$$

которая может варьировать от 0 до 100%.

В главе приводятся примеры влияния неопределенности задания метеорологических характеристик. В частности, в Институте водных проблем РАН совместно с ФГБУ «Гидрометцентр России» на базе физико-математической модели формирования речного стока ECOMAG разработаны методики долгосрочного прогнозирования объема незарегулированного притока воды в Чебоксарское водохранилище за второй квартал W_{II} (км³) и максимального расхода этого притока Q_{max} (м³/с). Использован ансамбль сценариев хода метеорологических элементов в период заблаговременности прогноза, который получен по данным наблюдений с 1967 по 2014 гг. Проверочные прогнозы выполнены по данным наблюдений с 1982 по 2014 гг. В табл. 9 приведены показатели качества расчетов и прогнозов весеннего притока воды в Чебоксарское водохранилище.

Таблица 9. Показатели качества расчетов и прогнозов весеннего притока воды в Чебоксарское водохранилище

| Характеристика | S | S_M | S_{met} | f |
|----------------|------|-------|-----------|-----|
| W_{II} | 5,32 | 2,81 | 4,52 | 72% |
| Q_{max} | 2539 | 1163 | 2257 | 79% |

Данные табл. 9 свидетельствуют о значительном вкладе неопределенности хода метеорологических элементов в течение периода заблаговременности прогноза на погрешность прогнозирования объема притока и о еще большем вкладе в погрешность прогнозирования максимального расхода незарегулированного притока воды за второй квартал. Значительный вклад неопределенности хода метеорологических элементов обусловлен характерными для водосбора Чебоксарского водохранилища оттепелями и снегопадами в начале второго квартала и дождями в конце.

Приведенные в главе 4 примеры позволяют сделать вывод, что предлагаемая оценка влияния неопределенности хода метеорологических элементов в период заблаговременности гидрологического прогноза на его погрешность в достаточной степени согласуется с условиями формирования стока рассматриваемых рек. Эта оценка зависит не только от климатических условий формирования речного стока, но и от точности его моделирования. При снижении погрешности модельных расчетов она возрастает и может приближаться к 100%. По мере увеличения возможностей получения гидрометеорологической информации и внедрения все более совершенных моделей формирования речного стока неопределенность хода метеорологических элементов в течение заблаговременности прогноза будет основным фактором, определяющим качество его прогнозирования.

В качестве другого фактора, ограничивающего возможности долгосрочного прогнозирования речного стока рассматривается неопределенность пространственной изменчивости характеристик его формирования. При использовании концептуальных моделей с сосредоточенными параметрами или рекомендуемых Руководством, по гидрологическим прогнозам, различных полуэмпирических формул применяется осреднение характеристик формирования речного стока по территории водосбора. В связи с этим необходимо обратить внимание на то, что такое осреднение приводит к трансформации физически обоснованных формул, описывающих процессы формирования речного стока.

В частности, в каждой точке водосбора расход воды поверхностного и внутриводосборного склонового стока q определяется расходом поступления на его поверхность талых и дождевых вод h и расходом потерь p на испарение, поверхностное задержание, восполнение запасов воды в почве и отток влаги в нижележащие слои грунта физически обоснованной формулой:

$$q = q(h, p) = \begin{cases} & \text{если } h \leq p; \\ h - p, & \text{если } h > p. \end{cases} \quad (9)$$

Если обозначить через $f(h, p)$ совместную плотность пространственного распределения расхода поступления воды h и расхода потерь p , то средний для всего водосбора расход воды склонового стока определяется формулой:

$$\bar{q} = \int_0^{\infty} \int_p^{\infty} (h - p) f(h, p) dh dp. \quad (10)$$

В главе показано, что при различных вариантах определения функции $f(h, p)$ получаются различные варианты зависимости среднего для всего водосбора расходы воды склонового стока \bar{q} от осредненных значений \bar{h} и \bar{p} . В то же время выбор вариантов функции пространственного распределения $f(h, p)$ основан не на теории, а на сложившихся традициях и опыте их применения в гидрологических прогнозах.

Таким образом, попытки осреднения пространственной изменчивости характеристик речного стока приводят к исчезновению физически обоснованных формул. Теоретические и полу теоретические формулы превращаются в чисто эмпирические. Для их получения необходимо учитывать статистические свойства располагаемой гидрометеорологической информации и перспективу их использования в рамках автоматизированной системы подготовки и выпуска прогнозов.

В главе приведены примеры достаточно успешной реализации такого подхода.

В частности, для рек бассейна Тобола в целях выпускаемого 25 марта долгосрочного прогноза максимального уровня воды за период половодья H_{\max} в качестве предикторов предложено использовать средний по водосбору максимальный запас воды в снежном покрове S_{\max} , логарифм среднего расхода воды за ноябрь предыдущего года $\ln(Q_{XI})$ и средний расход за предшествующий дате составления прогноза месяц Q_{III} . В целях получения прогноза предложена формула:

$$\tilde{H}_{\max} = b_0 + b_1 S_{\max} + b_2 \ln(Q_{XI}) + b_3 Q_{III}, \quad (11)$$

параметры которых оценивались методом наименьших квадратов по по ряду фигурирующих в ней переменных за период с 1968 по 2021 гг. В табл. 10 приведены коэффициент корреляции R между фактическими значениями и их прогнозами; среднеквадратическая погрешность прогноза $S_{\text{мм}}$; показатель эффективности прогноза S/σ ; оправдываемость прогноза P , равная частоте случаев, когда абсолютные значения ошибок прогноза не превышали значение допустимой ошибки $0,674 \sigma$.

Таблица 10. Показатели качества прогнозов максимального уровня воды за период половодья

| Река | Пункт | R | S | S/σ | P |
|--------|--------------|------|------|------------|-----|
| Тобол | г. Курган | 0,75 | 143 | 0,61 | 69% |
| Уй | п. Плодовый | 0,71 | 82,7 | 0,71 | 68% |
| Исеть | с. Мехонское | 0,68 | 73,8 | 0,73 | 71% |
| Тура | г. Туринск | 0,86 | 86,1 | 0,51 | 88% |
| Ница | г. Ирбит | 0,81 | 55,5 | 0,55 | 80% |
| Тавда | с. Таборы | 0,73 | 78,2 | 0,67 | 66% |
| Сосьва | с. Морозково | 0,66 | 77,0 | 0,75 | 64% |

Приведенные показатели свидетельствуют о том, что для всех рассматриваемых бассейнов долгосрочные прогнозы максимального уровня воды за период половодья по предлагаемой методике также могут быть отнесены к категории удовлетворительных.

Таким образом, правильный учет располагаемых к дате составления долгосрочного прогноза характеристик весеннего стока позволил получить методики, которые могут быть использованы в целях научного обоснования мероприятий по использованию водных ресурсов рек бассейна Тобола и защите населения и хозяйственных объектов от наводнений в период весеннего половодья.

ГЛАВА 5. Системы выпуска прогнозов и их доведения до потребителей

В главе предложено описание разработанной под руководством автора структура системы выпуска гидрологических прогнозов и их доведения до потребителей, при создании которой использован передовой мировой и отечественный опыт по созданию такого рода систем, выражаемый прежде всего в программах и региональных проектах Всемирной Метеорологической Организации (ВМО), в создании которых автор принимал непосредственное участие. Прежде всего использован опыт глобальной системы по оценке и оповещению о быстроразвивающихся паводков, системы прогнозирования наводнений в прибрежной зоне и проекте о заблаговременных предупреждениях о многих опасных явлениях в юго-восточной Европе.

Приводятся разработанные методические основы создания систем выпуска прогнозов в части научных, технических и технологических аспектов их функционирования. Показано, что с учетом объема, частоты поступления исходной гидрометеорологической информации, а также сложности применяемых методов и моделей подготовки гидрологических прогнозов такие системы должны функционировать в автоматизированном режиме, обладать возможностью обработки исходной информации, быть устойчивыми к бесперебойной работе, осуществлять подготовку прогностической продукции в современном виде с

помощью веб-приложения с учетом требования пользователей прогностической продукции. Для выполнения данных требований структура систем раннего предупреждения должна включать в себя три основных компонента (рис. 7):

- информационная основа, предназначенная для хранения, систематизации, управления, поддержки и ведения массивов оперативной и архивной гидрометеорологической информации (наблюдений и прогнозов);
- выпуск прогнозов расхода (уровня) воды в период прохождения паводков, включая автоматизацию прогностических методик (гидрологическая модель, ее адаптация, оптимизация параметров, коррекция прогноза и т.д.);
- доведение до пользователей на основе ГИС и веб-технологий подготовки фактической и прогностической информационно-аналитической информации в графическом виде с помощью веб-приложения.

Каждый из представленных компонентов состоит из ряда процессов, например, подготовка данных начинается с их приема, декодировки, первичного контроля, усвоения, обработки в требуемый временной вид и формат для организации входа в гидрологические модели; подготовки метеорологического прогноза, формировании прогностического ансамбля (в случае, если метеорологический прогноз доступен в ансамблевой форме) и т.д. Если принять во внимание уточнение прогноза по вновь поступившим данным или последнему метеорологическому прогнозу, то рассматриваемую схему необходимо выполнить еще раз.

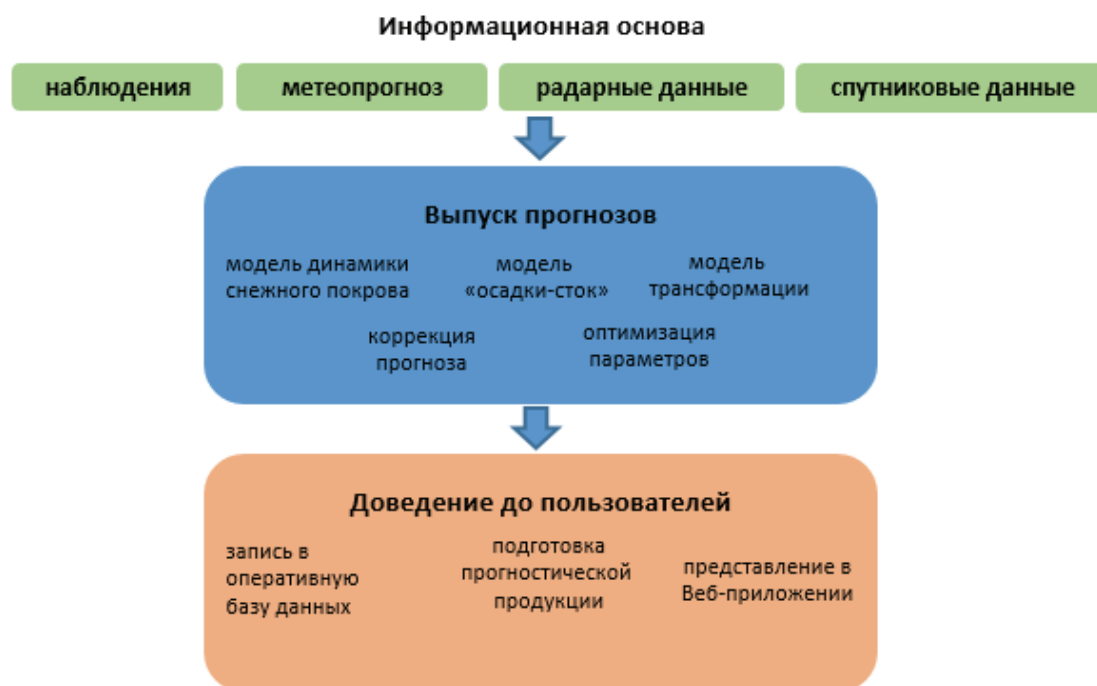


Рисунок 7. Основные этапы процесса составления выпуска краткосрочного гидрологического прогноза

Ядром информационной основы является база данных, которая помимо непосредственно данных должна быть снабжена программными средствами ее управления (размещения данных, архивирования, дозаписи и т.д.). Показано, что для обеспечения максимального эффекта от автоматизации систем выпуска прогнозов следует использовать базы данных реляционного типа из-за ее совместимости с геоинформационным программным обеспечением и облегченным доступом для программы обработки информации. Для баз данных такого типа необходимо установить на основе общих значений связь, или соединение, между таблицей с оперативными данными и соответствующим слоем пространственных данных, содержащим значения индекса и пространственные координаты точки наблюдений (станций и постов). В качестве иллюстрации на рисунке 7 дано графическое представление связей в оперативной реляционной базе данных между таблицами с оперативными данными гидрологических наблюдений, данными о ледовых явлениях и таблицей со справочными данными на основе значений полей, содержащих индексы гидрологических постов. Таким образом, оперативно поступающие и рассчитываемые данные получают пространственную привязку через координаты пункта наблюдений и в дальнейшем могут быть отображены в картографической форме в рамках Веб-приложения для визуализации для пользователя продукции.

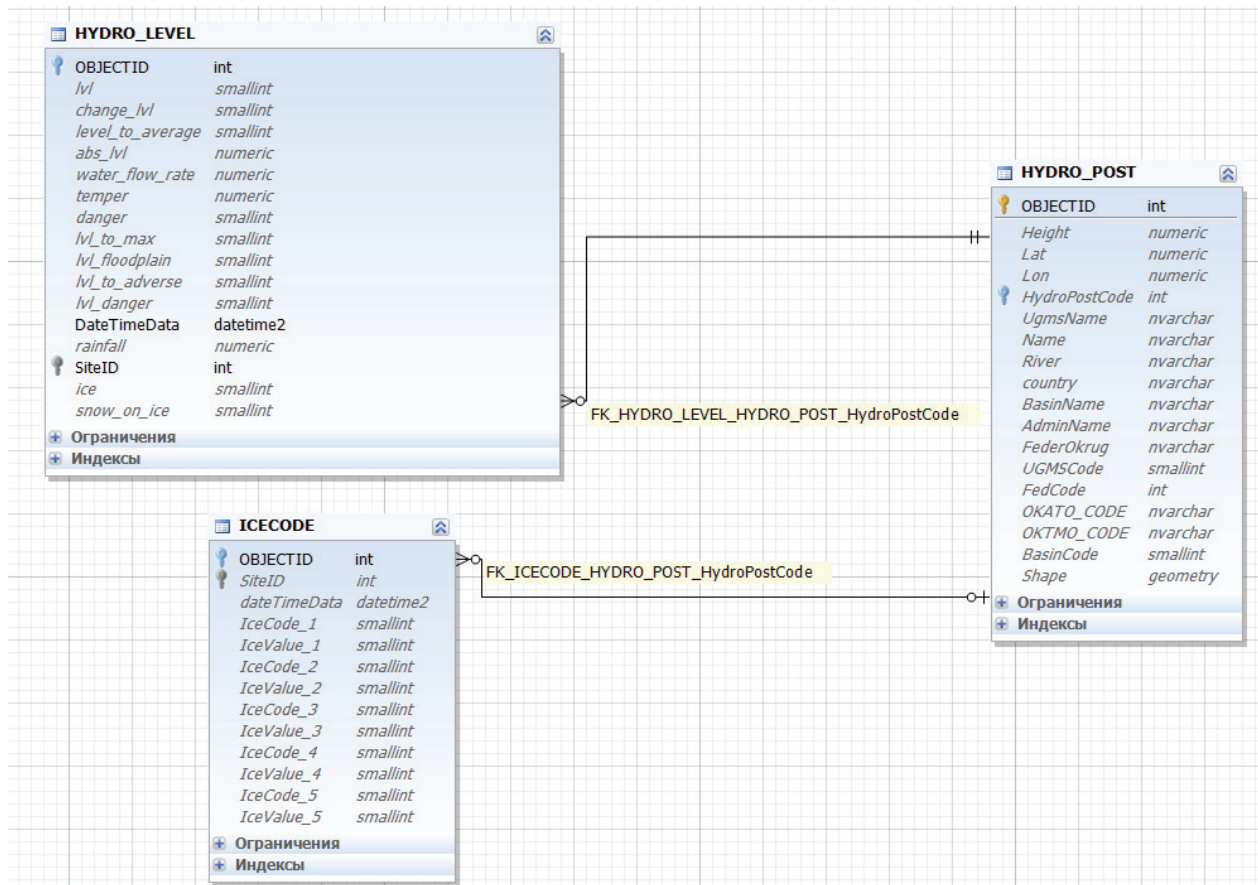


Рисунок 8. Графическое представление связей в оперативной реляционной базе данных

База данных должна содержать два вида информации:

- оперативно обновляемая информация (данные наблюдений и прогнозов в узлах сетки и пунктах наблюдений – гидрологических постах, метеорологических станциях, агрометеорологических станциях и снегомерных маршрутах);
- атрибутивная информация о пунктах сети гидрометеорологических наблюдений в рассматриваемом бассейне – так называемые метаданные наблюдательной сети (код пункта наблюдений, название, отметка нуля графика поста и т.д.).

Большое внимание в главе уделено вопросам автоматизации выпуска гидрологических прогнозов, который состоит в подготовке требуемой гидрометеорологической информации (с использованием рассмотренной выше базы данных), запуска гидрологической модели в режиме оперативного выпуска прогнозов, коррекции прогноза, а также записи результатов в базу данных. Ядром данного компонента являются программные средства автоматизированного запуска гидрологической модели, связывания с базой данных. Как показано в ранних главах работы алгоритм коррекции существенно уточняет качество расчетов с помощью гидрологической модели.

Реализация процесса автоматизации расчета и выпуска гидрологического прогноза зависит от многих факторов, в том числе от: оперативной системы вычислительных средств, формы реализации методики прогнозирования, вида программных средств реализации метода или модели и т.д. Например, для выпуска краткосрочных прогнозов расходов (уровней) воды для рек бассейна Камы выше Камского водохранилища использована модель НВУ-96, а также модели трансформации расходов воды на участках рек, реализованные на языке программирования *Python*, а также его внешних модулей. При запуске программы осуществляется поиск исходных файлов с необходимой гидрометеорологической информацией (как наблюдаемой, так и прогностической), формирование входного файла для гидрологической модели, запуск модели, обработка финального результата прогнозирования.

Для эффективного оперативного обеспечения потребителей фактической и прогностической информацией система выпуска прогнозов должна содержать блок подготовки, визуализации выходной прогностической продукции и доведения ее до конечных пользователей. Рекомендуется использовать ГИС и веб-технологии для реализации данного блока, что позволяет визуализировать и интегрировать в Веб приложении географическую, гидрологическую, метеорологическую, синоптическую, спутниковую геопространственную информацию. Подробное описание программных средств, рекомендуемых для создания компонента доведения информационно-аналитической и прогностической продукции до пользователя приведено в заключительной части главы 5.

ГЛАВА 6. Автоматизированные системы прогнозирования речного стока и раннего предупреждения о паводках и наводнениях Гидрометцентра России

В главе приводятся результаты создания автоматизированных систем подготовки и выпуска гидрологических прогнозов, созданных при ведущем участии автора диссертации и внедренных в практику оперативного гидрологического прогнозирования Гидрометцентра России. Системы разработаны с учетом передового международного и отечественного опыта, изложенного в рекомендациях в предыдущей главе диссертации.

Одной из первых автоматизированных систем прогнозирования, разработанной в Гидрометцентре России, является система прогноза паводков и наводнений на реках бассейна Кубани и Черноморского побережья России, разработанная в 2012 г. В рамках данной системы происходит выпуск краткосрочного прогноза уровней (расходов) воды для гидрологических постов бассейна рек Кубани и основных рек черноморского побережья Краснодарского края с заблаговременностью до трех суток. Визуализация прогностической продукции выполняется в геоинформационной среде и доводится до пользователей прогнозов по электронной почте.

Более совершенной автоматизированной системой прогнозирования паводков, максимально использующей достижения в области ГИС и Веб технологий, является система «ГИС Амур». Она представляет собой систему автоматизированного краткосрочного прогнозирования и мониторинга наводнений на р. Амур и реализована на основе ГИС и веб-технологий, что позволяет визуализировать и интегрировать в веб-приложении всю гидрометеорологическую информацию. Разработанная подсистема является территориально распределенной: подготовка гидрометеорологической продукции, включая расчеты и прогнозы, осуществляется в Гидрометцентре России, прием и обработка спутниковых данных производится в Дальневосточном центре НИЦ «Планета», сбор и обработка информации с зарубежных спутников выполняются в Европейском центре НИЦ «Планета». Система «ГИС Амур» включает следующие компоненты (рис. 9):

- компонент базы данных, предназначенный для управления, поддержки и ведения массивов гидрометеорологической информации;
- ГИС-компонентов для управления ГИС-серверами и автоматизированными рабочими местами, предназначенными для расчетов и прогнозов гидрометеорологических параметров, а также для подготовки фактической и прогностической информации (серверные и корпоративные ГИС);
- веб-компонентов для взаимодействия с пользователями (веб-сервер с веб-приложением).

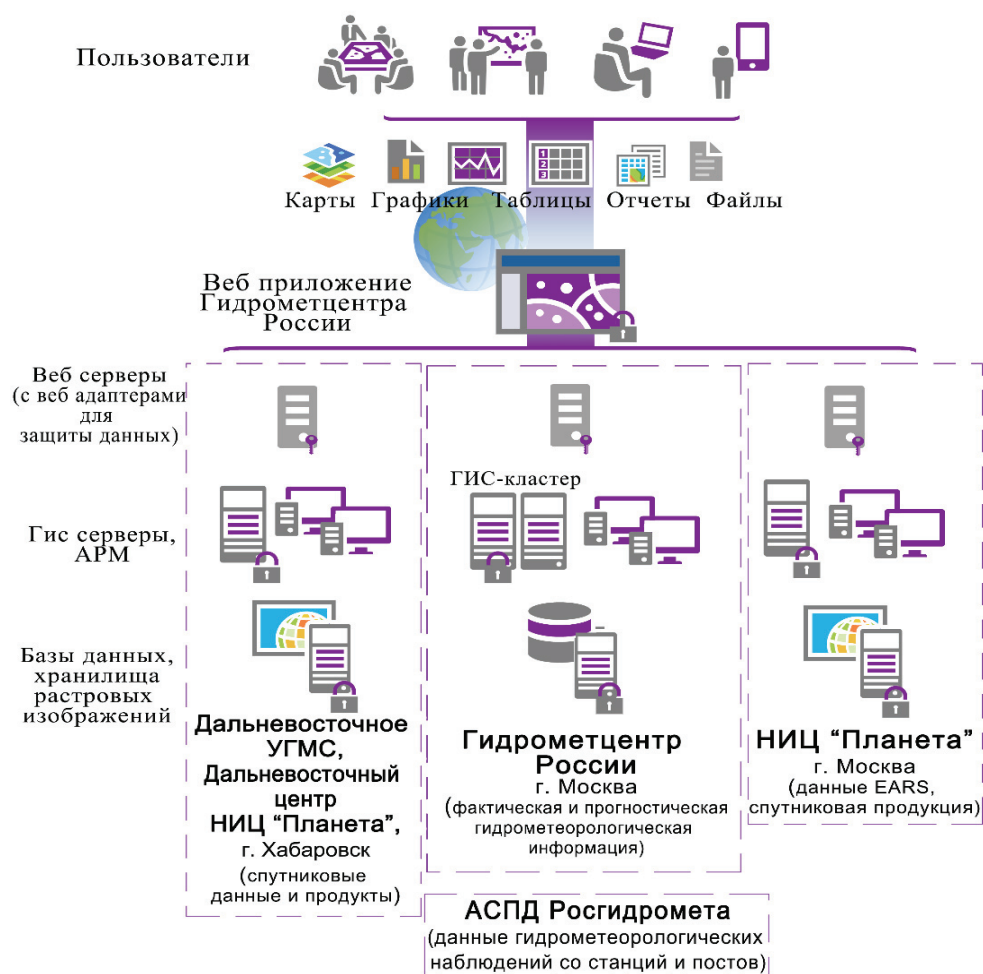


Рисунок 9. Структурная схема подсистемы подготовки и доведения до потребителей выходной продукции системы раннего предупреждения «ГИС Амур»

Графический интерфейс веб-приложения разрабатывался с учетом специфики предоставления пользователям широких возможностей и удобства для визуализации информационно-аналитической и прогностической продукции (рис. 10) и позволяет осуществлять просмотр, выборку, анализ и экспорт всей поступающей гидрологической, метеорологической и спутниковой информации для бассейна реки Амур. Помимо прогнозов уровня воды с заблаговременностью до 5 суток, в системе представлена информация по прогнозу суточного притока воды в Зейское водохранилище, реализованная с помощью модели формирования стока на водосборе и прогнозов четырех численных моделей атмосферы.

Ведущим мировым центром по геоинформационным технологиям ESRI (Environmental Systems Research Institute), система «ГИС Амур» была признана «Проектом 2015 года», а Гидрометцентр России и НИЦ «Планета» (организации – разработчики системы) получили высшую награду за особые достижения в области применения геоинформационных технологий (Special Achievement in GIS Award 2015).

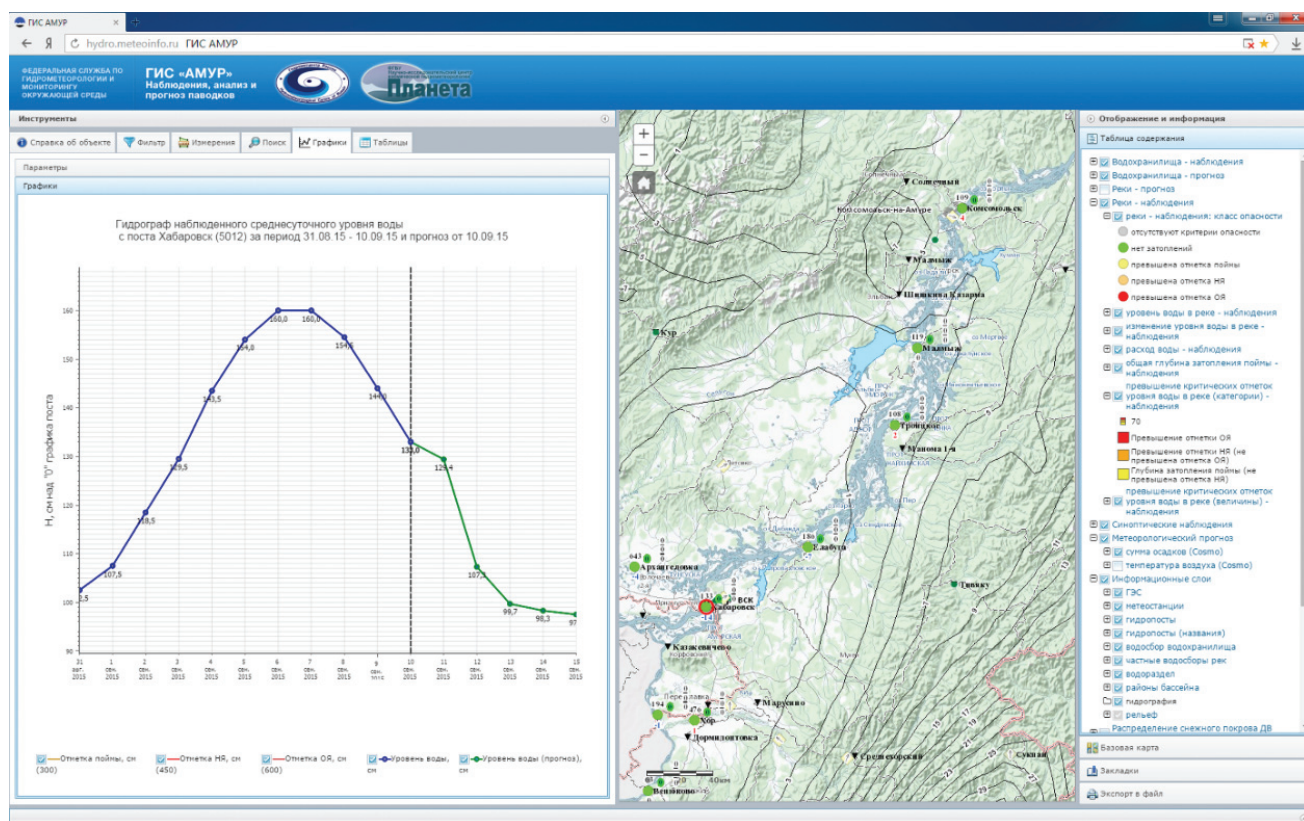


Рисунок 10. Пример представления прогностической продукции в рамках системы раннего предупреждения «ГИС Амур»

В главе приводится информация о разработанной в период 2017–2019 гг. под руководством автора автоматизированной системе выпуска среднесрочных прогнозов по бассейну Волги – «ГИС Волга», которая представляет из себя модернизацию базовой технологии гидрологического прогнозирования водного и ледового режимов в бассейне Волги. Рассматривается положенная в основу системы база данных гидрометеорологической информации, выполняющая роль информационной компоненты базовых технологий гидрологического прогнозирования в рамках данной системы автоматизированных прогнозов. Приводятся аспекты разработки и автоматизации методики прогноза среднесуточных значений расхода и уровня воды для периода весеннего половодья и летне-осеннего паводкового периода на реках бассейна Волги, основанной как на моделях формирования стока, так и на основе метода экстраполяции гидрографа. Показано, что созданные средства представления выходной прогностической продукции с помощью программных средств ГИС позволяют в графической форме представить гидрограф и внутригодовой ход уровня воды, отображающего как наблюдаемые, так и прогностические данные с указанием отметки поймы, неблагоприятных и опасных отметок уровня воды для быстрого понимания гидрологической обстановки на рассматриваемом гидрологическом посту.

В период 2019–2022 гг. в ФГБУ «Гидрометцентр России» под руководством автора разработана автоматизированная система подготовки и выпуска краткосрочных и среднесрочных прогнозов расходов и уровней воды более чем для 2000 речных створов, расположенных практически по всей территории России. В методическом плане система основана на использовании модели формирования стока HBV и метода экстраполяции гидрографа, которые были рассмотрены в предыдущих главах работы. Основное назначение системы заключается в поддержке принятия решений гидрологом-прогнозистом при выпуске прогноза и в случае необходимости – штормового оповещения об опасном развитии паводковой обстановки на реках.

Для получения прогнозов в системе используются два метода – рассмотренный в главе 2 метод экстраполяции гидрографа и приведенный в главе 3 метод, основанный на применении концептуальной модели формирования речного стока HBV и оперативной системе численного прогнозирования погоды COSMO-RU. В методе экстраполяции гидрографа учитываются только данные гидрометрических наблюдений в прогнозируемом речном створе, относящиеся к дате составления прогноза и пяти предыдущим суткам. Он позволяет получать краткосрочные и среднесрочные прогнозы расхода воды для 2098 речных створов и прогнозы уровня воды для 2776 речных створов с заблаговременностью от 1 до 10 суток. Показано, что наиболее успешные прогнозы получаются для достаточно крупных равнинных рек с плавными очертаниями гидрографа и площадью водосбора более 5 000 км².

Модель HBV усваивает осредненные по территории водосбора значения суточного слоя осадков и среднесуточной температуры воздуха и прогнозы этих величин, получаемые с помощью системы численного прогноза погоды COSMO-RU, рассмотренной в главе 3 диссертации. Второй метод позволяет получать краткосрочные прогнозы расхода воды с заблаговременностью 1, 2 и 3 суток для 546 речных створов, расположенных практически по всей территории России.

Для конкретных потребителей визуализация прогнозов для интересующих их речных створов осуществляется в рамках веб-приложения (рис. 11) с указанием прогноза уровня воды, прогноза изменения уровня воды. Также дается прогноз гидрологической обстановки, т.е. состояния уровня воды относительно критических отметок (отметки поймы, неблагоприятного или опасного явлений).

Созданная автоматизированная система подготовки и выпуска краткосрочных и среднесрочных прогнозов расходов и уровней воды рек России может использоваться в качестве единой для всей страны системы раннего предупреждения о паводках и наводнениях.



Рисунок 11. Карты прогнозируемого состояния рек России, в рамках автоматизированной системы среднесрочного гидрологического прогноза

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итогом проведенного исследования являются следующие результаты.

1. Выполнен анализ методов, применяемых в отечественной и зарубежной практике для получения прогнозов речного стока в зависимости от их заблаговременности, природных условий и располагаемой гидрометеорологической информации.
2. Даны рекомендации по оценке погрешности прогнозов речного стока, ее снижения с помощью различных вариантов коррекции и оценке преимущества предлагаемой методики прогнозирования перед альтернативными методами климатического или инерционного прогноза.
3. Разработана автоматизированная система подготовки и выпуска краткосрочных и среднесрочных прогнозов стока рек России методом экстраполяции гидрографа, в котором учитываются только известные значения прогнозируемой величины за дату выпуска прогноза и за несколько предыдущих суток.
4. Предложено районирование территории России, которое позволяет оценивать возможности применения данного метода в зависимости от площади водосбора и его среднего уклона.
5. Выполнена оценка применимости концептуальной модели формирования речного стока HBV-96 для водосборов, находящихся в различных природных условиях и имеющих различные морфометрические характеристики.

6. Для территории России выполнен анализ качества прогнозирования суточного слоя осадков и среднесуточной температуры приземного слоя воздуха, полученных с помощью оперативной системы регионального краткосрочного численного прогноза погоды COSMO-RU.

7. Разработана автоматизированная система подготовки и выпуска краткосрочных прогнозов расходов воды на основе концептуальной модели формирования речного стока HBV-96 и системы краткосрочного численного прогноза погоды COSMO-RU, которая реализована для 546 речных бассейнов, расположенных практически по всей территории России.

8. Предложена и практически реализована оценка влияния неопределенности хода метеорологических элементов в период заблаговременности долгосрочного прогноза речного стока на его погрешность. Показано, что, в зависимости от водного режима реки и прогнозируемой характеристики ее стока, вклад этой неопределенности в погрешность прогноза может составлять от 20 до 80% и более.

9. Даны рекомендации по разработке схем получения долгосрочных прогнозов речного стока с учетом неопределенности пространственной изменчивости характеристик его формирования, статистических свойств располагаемой гидрометеорологической информации, перспективы их использования в рамках автоматизированной системы и возможности учета климатических и антропогенных изменений водного режима реки.

10. На основе данных рекомендаций разработаны и внедрены в оперативную практику методики долгосрочного прогнозирования характеристик стока рек бассейна Тобола и притока воды в Цимлянское водохранилище.

11. На основе обобщения мирового опыта в области создания систем подготовки, выпуска прогнозов речного стока и их доведения до всех заинтересованных потребителей предложен общий методический подход к разработке систем раннего предупреждения о паводках и наводнениях.

12. Для регионов с максимальной паводковой опасностью – бассейнов рек Амур, Кубань и Черноморского побережья Краснодарского края – предложена система раннего предупреждения об опасных паводках и ожидаемых наводнениях.

13. Для бассейна Волги разработана автоматизированная система подготовки, выпуска и доведения до потребителей прогнозов речного стока различной заблаговременности, которая позволяет повысить обоснованность водохозяйственных решений и своевременность мер по защите от опасных явлений, связанных с водным и ледовым режимом рек.

14. Для территории России разработана единая автоматизированная система подготовки и ежедневного выпуска краткосрочных и среднесрочных прогнозов

среднесуточного расхода и уровня воды. В зависимости от заблаговременности прогноза и прогнозируемой характеристики в ней используется метод экстраполяции гидрографа и метод, основанный на модели формирования речного стока HBV-96 и системе краткосрочного численного прогноза погоды COSMO-RU.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, определенных в п. 2.3 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова:

1. **Симонов Ю.А.**, Христофоров А.В. Анализ многолетних колебаний стока рек бассейна Северного Ледовитого океана // Водные ресурсы. 2005. Т. 32. № 6. С. 645–652. *Переводная версия: Simonov Yu.A., Khristoforov A.V. Analysis of many-year variations in river runoff into Arctic Ocean // Water Resources. 2005. V. 32. № 6. P. 587–593. JIF = 1.00, доля участия 70%.*

2. Бельчиков В.А., Полунин А.Я., **Симонов Ю.А.**, Христофоров А.В. Поливариантное оценивание возможных климатических изменений речного стока на примере бассейна Северной Двины // Метеорология и гидрология. 2009. № 3. С. 74–84. *Переводная версия: Belchikov V.A., Polunin A.Ya., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V. Polyvariant estimation of possible climatologic river runoff changes with emphasis on the Northern Dvina catchment // Russian Meteorology and Hydrology. 2009. V. 34. № 3. P. 180–186. JIF = 0.70, доля участия 60%.*

3. Бельчиков В.А., Полунин А.Я., **Симонов Ю.А.**, Христофоров А.В. Оценка возможных климатических изменений стока рек бассейна Северной Двины в XXI в. // Метеорология и гидрология. 2013. № 2. С. 84–92. *Переводная версия: Belchikov V.A., Polunin A.Ya., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V. Estimation of possible climatic changes of river runoff in the Northern Dvina basin in the 21st century // Russian Meteorology and Hydrology. 2013. V. 38. № 2. P. 119–125. JIF = 0.70, доля участия 70%.*

4. Борщ С.В., Самсонов Т.Е., **Симонов Ю.А.**, Львовская Е.А. Визуализация гидрологической обстановки в бассейнах крупных рек средствами ГИС-технологий // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2013. Вып. 349. С. 47–62. ИФ РИНЦ = 0,74, доля участия 30%.

5. Борщ С.В., **Симонов Ю.А.** Оперативная система краткосрочных гидрологических прогнозов расхода воды на реках Кубани // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2013. Вып. 349. С. 63–87. ИФ РИНЦ = 0,74, доля участия 70%.

6. Борщ С.В., Леонтьева Е.А., **Симонов Ю.А.** Представление выходной продукции оперативных гидрологических прогнозов в ГИС // Труды Гидрометеорологического научно-

исследовательского центра Российской Федерации. 2014. Вып. 351. С. 141–153. ИФ РИНЦ = 0,74, доля участия 60%.

7. Борщ С.В., **Симонов Ю.А.**, Христофоров А.В., Юмина Н.М. Краткосрочное прогнозирование уровней воды на реке Амур // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2015. Вып. 353. С. 26–45. ИФ РИНЦ = 0,74, доля участия 60%.

8. Борщ С.В., **Симонов Ю.А.**, Христофоров А.В. Система прогнозирования паводков и раннего оповещения о наводнениях на реках черноморского побережья Кавказа и бассейна Кубани // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2015. Вып. 356. 247 с. ИФ РИНЦ = 0,74, доля участия 60%.

9. Борщ С.В., Бураков Д.А., **Симонов Ю.А.** Методика оперативного расчета и прогноза суточного притока воды в водохранилища Зейской ГЭС // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2016. Вып. 359. С. 106–127. ИФ РИНЦ = 0,74, доля участия 60%.

10. **Симонов Ю.А.**, Ликарь Э.-Л.Д., Фролова Н.Л. Оценка применимости модели динамики снежного покрова SNOW-17 в практике оперативного гидрологического прогнозирования в России // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2016. Вып. 360. С. 95–112. ИФ РИНЦ = 0,74, доля участия 60%.

11. Фролов А.В., Асмус В.В., Вильфанд Р.М., Борщ С.В., Жабина И.И., Затягалова В.В., Кровотынцев В.А., Кудрявцева О.И., Леонтьева Е.А., **Симонов Ю.А.**, Степанов Ю.А. «ГИС Амур»: система мониторинга, прогнозирования и раннего оповещения о наводнениях // Метеорология и гидрология. 2016. № 3. С. 5–21. *Переводная версия*: Frolov A.V., Asmus V.V., Vil'fand R.M., Borshch S.V., Zhabina I.I., Zatyagalova V.V., Krovotyntsev V.A., Kudryavtseva O.I., Leont'eva E.A., **Simonov Yu.A.**, Stepanov Yu.A. GIS-Amur system of flood monitoring, forecasting, and early warning // Russian Meteorology and Hydrology. 2016. V. 41. № 3. P. 157–169. JIF = 0.70, доля участия 70%.

12. Борщ С.В., Гельфан А.Н., Морейдо В.М., Мотовилов Ю.Г., **Симонов Ю.А.** Долгосрочный ансамблевый прогноз весеннего притока воды в Чебоксарское водохранилище на основе гидрологической модели: результаты проверочных и оперативных испытаний // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2017. Вып. 366. С. 68–86. ИФ РИНЦ = 0,74, доля участия 50%.

13. Борщ С.В., Леонтьева Е.А., **Симонов Ю.А.**, Христофоров А.В., Чупин И.В. Оптимизация сети снегомерных маршрутов в бассейне Верхней Волги // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 3 (369). С. 62–73. ИФ РИНЦ = 0,74, доля участия 60%.

14. Борщ С.В., **Симонов Ю.А.**, Христофоров А.В., Чупин И.В., Юмина Н.М. Экстраполяция гидрографов как метод краткосрочного прогнозирования речного стока //

Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 3 (369). С. 74–86. ИФ РИНЦ = 0,74, доля участия 60%.

15. Борщ С.В., Леонтьева Е.А., **Симонов Ю.А.**, Христофоров А.В. Оценка влияния конфигурации наблюдательной сети на точность долгосрочных прогнозов речного стока // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 4 (370). С. 122–136. ИФ РИНЦ = 0,74, доля участия 60%.

16. Borsch S., Khristoforov A., Leontieva E., **Simonov Y.**, Krovotynzev V., Zatyagalova V. A basin approach to a hydrological service delivery system in the Amur River basin // Geosciences. 2018. V. 8. № 3. P. 93. SJR = 0.66, доля участия 60%.

17. Бельчиков В.А., Борщ С.В., Павроз Ю.А., Романов А.В., Сильницкая М.И., **Симонов Ю.А.**, Христофоров А.В. Современное состояние и перспективы совершенствования системы оперативного гидрологического прогнозирования в Гидрометцентре России // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4 (374). С. 184–202. ИФ РИНЦ = 0,74, доля участия 55%.

18. Борщ С.В., **Симонов Ю.А.**, Христофоров А.В. Методы коррекции прогнозов речного стока // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 1 (375). С. 162–175. ИФ РИНЦ = 0,74, доля участия 60%.

19. Борщ С.В., **Симонов Ю.А.**, Христофоров А.В. Эффективность моделирования и прогнозирования речного стока // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 1 (375). С. 176–189. ИФ РИНЦ = 0,74, доля участия 70%.

20. **Симонов Ю.А.**, Семенова Н.К., Христофоров А.В. Методика краткосрочных прогнозов расходов воды на реках бассейна Камы на основе использования модели HBV // Метеорология и гидрология. 2021. № 6. С. 55–65. *Переводная версия*: **Simonov Yu.A.**, Semenova N.K., Khristoforov A.V. Short-range streamflow forecasting of the Kama River based on the HBV model application // Russian Meteorology and Hydrology. 2021. V. 46. № 6. P. 388–395. JIF = 0.70, доля участия 70%.

21. Борщ С.В., Колий В.М., Семенова Н.К., **Симонов Ю.А.**, Христофоров А.В. Прогнозирование стока рек России методом экстраполяции гидрографа // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. № 2 (380). С. 77–94. ИФ РИНЦ = 0,74, доля участия 60%.

22. Борщ С.В., Колий В.М., Семенова Н.К., **Симонов Ю.А.**, Христофоров А.В. Возможность прогнозирования стока рек России методом экстраполяции гидрографа в зависимости от характеристик их водосборов // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. № 3 (381). С. 115–130. ИФ РИНЦ = 0,74, доля участия 60%.

23. Borsch S., **Simonov Y.**, Khristoforov A., Semenova N., Koliy V., Ryseva E., Krovotyntsev V., Derugina V. Russian rivers streamflow forecasting using hydrograph extrapolation method // Hydrology. 2022. V. 9. № 1. P. 1. SJR = 0.54, доля участия 60%.

24. Борщ С.В., Семенова Н.К., **Симонов Ю.А.**, Христофоров А.В. Методики краткосрочного прогнозирования стока рек бассейна Камы // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2022. № 3 (385). С. 127–143. ИФ РИНЦ = 0,74, доля участия 60%.

25. Борщ С.В., Вильфанд Р.М., **Симонов Ю.А.**, Христофоров А.В. Влияние неопределенности метеорологических условий периода заблаговременности на точность долгосрочных прогнозов речного стока // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2022. № 4 (386). С. 36–46. ИФ РИНЦ = 0,74, доля участия 60%.

26. Борщ С.В., **Симонов Ю.А.**, Христофоров А.В., Юмина Н.М. Прогнозирование притока воды в Цимлянское водохранилище // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2022. № 4 (386). С. 47–63. ИФ РИНЦ = 0,74, доля участия 60%.

27. Акилина В.А., Борщ С.В., **Симонов Ю.А.**, Христофоров А.В., Юмина Н.М. Долгосрочное прогнозирование характеристик весеннего стока рек бассейна Тобола // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2022. № 4 (386). С. 64–78. ИФ РИНЦ = 0,74, доля участия 60%.

28. Блинов Д.В., Борщ С.В., Вильфанд Р.М., Колий В.М., Ривин Г.С., Семенова Н.К., **Симонов Ю.А.**, Христофоров А.В., Юмина Н.М. Возможности использования системы COSMO-RU при краткосрочном прогнозировании стока рек России // Метеорология и гидрология. 2023. № 2. С. 5–14. *Переводная версия*: Blinov D.V., Borshch S.V., Vil'fand R.M., Koli V.M., Rivin G.S., Semenova N.K., **Simonov Yu.A.**, Khristoforov A.V., Yumina N.M. System for short-term forecasting of runoff of Russian rivers // Russian Meteorology and Hydrology. 2023. V. 48. № 2. P. 89–96. JIF = 0.70, доля участия 70%.

29. Борщ С.В., Колий В.М., Рысева Е.А., Семенова Н.К., **Симонов Ю.А.**, Христофоров А.В. Методика расчета среднесуточных расходов воды на реках России с использованием модели формирования стока HBV-96 // Метеорология и гидрология. 2023. № 3. С. 47–56. *Переводная версия*: Borshch S.V., Koli V.M., Ryseva E.A., Semenova N.K., **Simonov Yu.A.**, Khristoforov A.V. Methodology for calculating daily streamflow of Russian rivers using the HBV-96 runoff formation model // Russian Meteorology and Hydrology. 2023. V. 48. № 3. P. 221–228. JIF = 0.70, доля участия 70%.

Монография:

Борщ С.В., **Симонов Ю.А.**, Христофоров А.В. Прогнозирование стока рек России. М.: Гидрометцентр России, 2023. 200 с.