

ФГБУ «ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ НАУЧНО-
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ»
(ФГБУ «ГИДРОМЕТЦЕНТР РОССИИ»)

На правах рукописи

Симонов Юрий Андреевич

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

1.6.16 – Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
доктора географических наук

Москва – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕЧНОГО СТОКА	12
1.1 Постановка задачи и методы ее решения	12
1.2 Модели речного стока	20
1.3 Погрешность прогнозов речного стока	29
1.4 Методы коррекции прогнозов речного стока	37
1.5 Эффективность прогнозов речного стока	41
ГЛАВА 2. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕЧНОГО СТОКА МЕТОДОМ ЭКСТРАПОЛЯЦИИ ГИДРОГРАФА	53
2.1 Метод экстраполяции гидрографа	53
2.2 Возможности прогнозирования стока рек России методом экстраполяции гидрографа .	61
2.3 Краткосрочное и среднесрочное прогнозирование уровней воды в речных створах бассейна Тобола	71
2.4 Краткосрочное и среднесрочное прогнозирование стока рек бассейна Дона и притока воды в Цимлянское водохранилище	79
ГЛАВА 3. КРАТКОСРОЧНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕЧНОГО СТОКА НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ HBV-96 И СИСТЕМЫ COSMO-RU	90
3.1 Расчет среднесуточных расходов воды на реках России с использованием модели формирования стока HBV-96	90
3.2 Возможности использования системы COSMO-RU при краткосрочном прогнозировании стока рек России	98
3.3 Краткосрочное прогнозирование стока рек России с использованием модели HBV-96 и системы COSMO-RU	109
3.4 Краткосрочное прогнозирование стока рек бассейна Камы	114
ГЛАВА 4. ВОЗМОЖНОСТИ ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕЧНОГО СТОКА	122
4.1 Неопределенность метеорологических элементов в период заблаговременности долгосрочных прогнозов речного стока	122
4.2 Неопределенность пространственной изменчивости характеристик формирования речного стока	129
4.3 Долгосрочное прогнозирование характеристик весеннего стока рек бассейна Тобола ..	136
4.4 Долгосрочное прогнозирование притока воды в Цимлянское водохранилище	145
ГЛАВА 5. СИСТЕМЫ ВЫПУСКА ПРОГНОЗОВ И ИХ ДОВЕДЕНИЯ ДО ПОТРЕБИТЕЛЕЙ	154
5.1 Общие сведения о системах	154

5.2 Структура систем раннего предупреждения.....	163
ГЛАВА 6. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕЧНОГО СТОКА И РАННЕГО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ О ПАВОДКАХ И НАВОДНЕНИЯХ ГИДРОМЕТЦЕНТРА РОССИИ	180
6.1 Система раннего предупреждения на реках бассейна Кубани и Черноморского побережья Краснодарского края	180
6.2 Система раннего предупреждения «ГИС Амур».....	191
6.3 Система раннего предупреждения «ГИС Волга».....	201
6.4 Автоматизированная система выпуска краткосрочных и среднесрочных прогнозов стока рек России	213
СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ	218
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	219
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	221

ВВЕДЕНИЕ

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 [167, 185, 187, 219, 225, 226], 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 ФГБУ «Гидрометцентр России» [21, 74, 76, 77, 108], ФГБУ «Государственный гидрологический институт» [64], ФГБУ «ДВНИГМИ» [50], ФГБУ «Среднесибирское УГМС» [41, 42], кафедры гидрологии суши Географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова [114–116], ФГБУН «Институт географии РАН» [56, 121], 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 ФГБУН «Институт водных проблем РАН» [51, 61, 62, 79, 85, 86]. Доступно большое количество результатов исследований зарубежных авторов, обобщение которых представлено в руководствах ВМО [167, 185, 187].

Таким образом, в диссертационной работе 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 ИВП РАН внедрена 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.

Предмет защиты заключается в разработанных и предлагаемые к реализации научно-методических основ 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 27 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.

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.

ГЛАВА 1. Прогнозирование речного стока

1.1 Постановка задачи и методы ее решения

Заблаговременность прогнозов

Возможности использования схемы получения прогнозов характеристик водного режима рек и водохранилищ определяются их точностью и заблаговременностью. Заблаговременность прогноза равна разности между сроком, к которому прогнозируемая характеристика может быть известна (часы, сутки, конец месяца, сезона, фазы гидрологического режима, квартала), и сроком составления прогноза.

Требуемая заблаговременность прогноза водного режима рек и водохранилищ определяется с учетом времени, необходимого для принятия мер по использованию водных ресурсов и защите от опасных проявлений водного режима. В небольших населенных пунктах достаточно нескольких часов для проведения эвакуации населения из района возможного затопления. Планирование работы комплексных водохозяйственных систем с многолетним и сезонным регулированием стока предусматривает долгосрочное прогнозирование его сезонных, квартальных и месячных величин [34, 121, 139, 168, 171].

Достижимая заблаговременность прогноза речного стока зависит от характера прогнозируемого явления; физико-географических особенностей водосбора; конфигурации сети гидрометеорологических наблюдений; заблаговременности, точности и формы представления метеорологических прогнозов [38, 68, 106, 168, 171, 184, 185].

Скорость и изменчивость процессов, протекающих после даты выпуска прогноза, являются лимитирующими факторами его заблаговременности. Для больших равнинных водосборов с медленным ходом определяющих прогнозируемую величину процессов и относительно небольшим влиянием погодных условий после даты составления прогноза достижимая заблаговременность прогноза может достигать иногда нескольких месяцев. Для малых горных рек с большими уклонами и скоростями склонового и руслового стока заблаговременность может снижаться до нескольких часов [21, 24, 31, 37, 67, 122].

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 [38, 106].

Как правило, долгосрочные прогнозы выпускаются не чаще, чем один раз в месяц, квартал, год. Краткосрочные прогнозы – ежедневно (в некоторых случаях каждые 6 или 12 часов) в течение некоторого периода (месяц, сезон, фаза гидрологического режима, квартал, год).

Для среднесрочных прогнозов возможны две ситуации.

1. Они выпускаются не чаще чем один раз в декаду и отличаются от долгосрочных прогнозов меньшей заблаговременностью.
2. Они выпускаются многократно, как правило, ежедневно в течение определенного периода времени и отличаются от краткосрочных прогнозов большей заблаговременностью.

Прогнозируемые характеристики водного режима рек и водохранилищ

Долгосрочные и некоторые среднесрочные прогнозы речного стока могут составляться для следующих характеристик:

- сезонный, кварталный, месячный и декадный приток воды в водохранилища;
- сезонный, кварталный, месячный и декадный объем или слой речного стока;
- распределение стока реки или притока в водохранилище в течение сезона;
- максимальный расход и уровень воды половодья;
- объем, максимальный расход и уровень воды паводка;
- дата прохождения максимального расхода и уровня воды;
- дата начала основной волны половодья или паводка;
- средние и минимальные месячные и декадные уровни воды на судоходных реках;
- характерные уровни и расходы воды на реках во время весенних и осенних ледовых явлений на крупных реках [104, 106, 191].

В ряде случаев возможно последующее уточнение долгосрочных или среднесрочных прогнозов. Например, для характеристик половодья выпускается уточняющий прогноз после схода основной массы сезонного снежного покрова [91, 104, 106, 139]. Подобные уточнения используют дополнительную информацию, еще неизвестную при составлении основного прогноза. Следовательно, методику получения уточняющего прогноза следует рассматривать как самостоятельную методику, качество которой требует отдельной оценки.

Краткосрочные и некоторые среднесрочные прогнозы могут составляться для следующих характеристик водного режима рек в заданных створах и бокового притока воды в водохранилища:

- средний, максимальный и минимальный расход воды за сутки;
- средний, максимальный и минимальный уровень воды за сутки;
- график изменения расходов и уровней воды в течение определенного периода;
- объем, максимальный расход и уровень воды за паводок;
- объем, максимальный расход и уровень воды за половодье;
- дата начала, прохождения пика и конца половодья;

- объем, максимальный расход и уровень воды паводка;
- дата начала, прохождения пика и конца паводка для малых рек;
- минимальный расход и уровень воды в период летне-осенней межени;
- минимальный уровень и расход воды в период зимней межени;
- минимальный уровень и расход воды в период навигации;
- характерный уровень и расход воды во время весенних ледовых явлений;
- характерный уровень и расход воды во время осенних ледовых явлений [105, 106, 191].

Прогнозы могут выражаться в детерминированной и в вероятностной форме. В первом случае с заданной заблаговременностью оценивается значение ожидаемой характеристики речного стока. Во втором случае оценивается распределение ее вероятностей в зависимости от располагаемой на дату составления прогноза гидрометеорологической информации [24]. Методика получения вероятностной формы выпуска прогноза строится на основе методики получения прогноза в детерминированной форме [38, 106, 135, 136, 167, 176, 179]. Как показано в работе [38] связанные между собой методики получения прогнозов в детерминированной и вероятностной форме за редким исключением имеют одинаковое качество, т.е. заблаговременность и точность. На этом основании в последующем изложении рассматриваются прогнозы водного режима рек и водохранилищ, выражаемые в детерминированной форме.

Методы и методики прогнозирования речного стока

При решении задач гидрологических прогнозов следует различать два понятия: метод и методика прогнозирования.

Под методом понимается общий подход к решению задачи, вытекающий из физической сущности процессов, которые определяют прогнозируемое явление или элемент гидрологического режима. В основе методов прогнозирования характеристик речного стока лежат:

- уравнения водного баланса (для участка реки, части или всего речного бассейна) и теплового баланса (приземного слоя воздуха, снежного покрова, поверхности и почвенного слоя водосбора);
- уравнения, описывающие движение воды по склонам и в русловой сети;
- статистический анализ пространственно-временной изменчивости характеристик стока и метеорологических факторов, их определяющих [68, 104, 105, 121, 139, 146].
- методы прогнозирования речного стока могут реализовываться в виде:
- физико-математических моделей формирования речного стока с распределенными, т.е. изменяющимися в пространстве, параметрами [46, 87, 138, 191];

- концептуальных моделей с сосредоточенными или частично распределенными параметрами [5, 75, 77, 127, 171, 177, 185];
- физико-статистических зависимостей прогнозируемой величины от известных к дате составления прогноза гидрологических и метеорологических факторов, влияющих на ее формирование [38, 104, 105].

Под методикой понимается способ получения прогнозов заданной характеристики водного режима для конкретного речного створа. Методика основана на одном из перечисленных выше методов и выражается схемой получения прогноза. Она отражает особенности водосбора и гидрологического режима реки, объем и качество гидрометеорологической информации, использованной при ее разработке и располагаемой при ее применении, включая прогнозы хода метеорологических элементов в течение периода заблаговременности гидрологического прогноза и способы их усвоения [5, 46, 68, 77, 138, 200].

Применяемые методы прогнозирования

Большинство методов, применяемых для прогнозирования речного стока в системе Росгидромета, изложено в выпусках 1 и 2 «Руководства по гидрологическим прогнозам» 1989 г. [104, 105]. Эти методы используют достижения отечественных и зарубежных гидрологических исследований, и нашли отражение в информационных изданиях ВМО [167, 168, 225, 227, 228].

С учетом специфики водного режима равнинных рек России при долгосрочном прогнозировании речного стока и притока воды в водохранилища главное внимание уделяется долгосрочному прогнозированию весеннего половодья, вызванного ежегодным таянием снежного покрова. При этом важнейшей прогнозируемой характеристикой является слой стока весеннего половодья [104].

Для получения долгосрочных прогнозов слоя стока весеннего половодья с заблаговременностью 2–4 месяца используются различные эмпирические и полуэмпирические формулы, в качестве аргументов которых (предикторов) чаще всего используются известные к дате составления прогноза средние для речного бассейна характеристики приходной и расходной части водного баланса:

- максимальные запасы воды в снежном покрове и ледяной корке;
- предвесенняя влажность метрового слоя почвы;
- глубина ее промерзания.

Для получения этих характеристик используются данные снегомерных маршрутов и наблюдений на метеорологических и агрометеорологических станциях. При осреднении этих

характеристик учитывается ландшафтная структура речного бассейна и, прежде всего, соотношение между площадью открытых и залесённых участков. При отсутствии или недостаточности данных снегомерных маршрутов используется спутниковая информация. При отсутствии данных о влажности почвы используются, например, данные о речном стоке за предзимний период. При отсутствии данных о глубине промерзания почвы используются, например, данные о ходе приземной температуры воздуха в течение зимнего периода [104].

Важнейшими источниками погрешности долгосрочных прогнозов слоя весеннего половодья являются следующие факторы:

1. рассматриваемая в разделе 4.1 неопределенность хода метеорологических элементов в период заблаговременности прогноза, которая делает невозможным учет процессов таяния снежного покрова, выпадения осадков и испарения с поверхности бассейна в течение половодья;

2. рассматриваемая в разделе 4.2 неопределенность пространственной изменчивости характеристик формирования речного стока, которая приводит к неполной адекватности используемых формул получения прогноза;

3. недостаточная репрезентативность используемых предикторов, которая снижает тесноту зависимости от них прогнозируемой величины.

Долгосрочные прогнозы весеннего половодья уточняются среднесрочными прогнозами, основанными на учете запасов воды в русловой сети и о стоке малых рек [104].

При получении долгосрочных прогнозов максимальных расходов и уровней воды за период половодья, как правило, используются их эмпирические зависимости от слоя стока весеннего половодья. В некоторых случаях используются эмпирические зависимости этих характеристик от рассмотренных выше предикторов [104]. Пример успешного применения такого приема для долгосрочного прогнозирования максимальных уровней воды на реках бассейна Тобола дан в разделе 4.3.

Долгосрочный прогноз притока воды в водохранилища за второй квартал с заблаговременностью 3 месяца осуществляется на основе учета отдельно полученных прогнозов весеннего стока его основных притоков. Может использоваться и общая зависимость притока за второй квартал от осредненных по всей территории водосбора водохранилища рассмотренных выше предикторов [104]. Пример успешного применения такого приема для долгосрочного прогнозирования притока воды в Цимлянское водохранилище дан в разделе 4.4.

При прогнозе спада половодья учитываются данные об уже наблюдавшемся максимальном расходе воды половодья и о запасах воды в русловой сети. Прогноз стока за

отдельные месяцы половодья осуществляется по его эмпирическим зависимостям от даты начала половодья, прогноза стока за второй квартал или стока предыдущего месяца [104].

Долгосрочное прогнозирование месячного стока рек и притока воды в водохранилища в течение периода от конца половодья до начала следующего основано на его эмпирических, как правило, линейных зависимостях от оставшихся запасов воды в снежном покрове (для горных рек), от стока и осадков предыдущих месяцев [104]. Пример достаточно успешного долгосрочного прогнозирования месячного притока воды в Цимлянское водохранилище в маловодный период года дан в разделе 4.4.

В методах прогнозирования стока горных рек в той или иной степени учитываются рельеф и высотная зональность климатических и почвенно-ботанических условий. При достаточном количестве наблюдений по всей территории водосбора (редкий случай) осреднение характеристик формирования речного стока выполняется по высотным поясам. В противном случае используется спутниковая информация и все данные об осадках и температуре за период, предшествующий дате составления прогноза. Важнейшим дополнительным источником погрешности прогнозов стока горных рек является отсутствие или недостаточность данных гидрометеорологических наблюдений в наиболее возвышенных частях водосбора [104, 105].

Среди методов краткосрочного прогнозирования стока конкретных рек (прогнозы стока для речных систем не рассматриваются) выделяются две группы методов:

- методы прогнозирования расходов и уровней воды на участках рек;
- методы, основанные на моделях формирования стока относительно малых рек [105].

Среди методов первой группы наиболее давно, широко и часто достаточно успешно применяется метод соответственных уровней. Для практически бесприточного участка реки в нем используются две эмпирические зависимости:

- зависимость уровня воды в нижнем створе от соответствующего ему по фазе водного режима уровня воды в верхнем створе;
- зависимость времени руслового добегания по участку между створами от уровня воды в верхнем створе.

Для приточных участков реки используются дополнительные эмпирические зависимости, позволяющие учесть уровень воды на каждом притоке и время добегания по нему волны паводка [105].

Несмотря на свою простоту, метод соответственных уровней до сих пор остается конкурентоспособным благодаря своему главному достоинству – возможности учитывать возрастание скорости движения воды по речному руслу по мере увеличения расхода, а, следовательно, и уровня воды.

К первой группе относятся и более современные, хотя уже давно применяемые методы, основанные на приближенных уравнениях трансформации паводочных волн. К ним относятся методы оценки кривой добега и, в частности, метод Калинина – Милюкова, метод Маскингам, методы, использующие кривые объемов для участков рек, и методы, использующие систему уравнений Сен-Венана [105].

Среди методов второй группы наибольшее внедрение в нашей стране получила концептуальная водно-балансовая модель формирования талого и дождевого стока Гидрометцентра СССР [105]. Модель является физически обоснованной и хорошо соответствует уровню гидрометеорологической изученности большей части страны. Для бассейнов равнинных рек учитывается их залесённость. Для бассейнов горных рек – высотная поясность. Отдельными блоками модель описывает следующие этапы формирования речного стока:

- формирование и динамика снежного покрова;
- выпадение жидких осадков;
- испарение с поверхности водосбора;
- промерзание и оттаивание почвы;
- динамика почвенной влаги;
- формирование склонового стока;
- трансформация стока в русловой сети.

Обычно модель работает с шагом одни сутки и использует данные о жидких и твердых осадках, температуре приземного слоя воздуха, дефиците влажности воздуха, толщине и плотности снежного покрова.

Широкое использование данной модели в гидрологических прогнозах пока затруднено отсутствием программного обеспечения, необходимого для осуществления автоматизированного запуска модели и оценки ее параметров, что приводит к достаточно трудоемкой работе при разработке методики краткосрочного прогнозирования стока конкретной реки.

Этот недостаток устранен в разработанном автором методе краткосрочного прогнозирования расходов воды на основе шведской концептуальной модели формирования речного стока HBV-96 и оперативной системы численного прогнозирования погоды COSMO-RU. Метод подробно рассмотрен в третьей главе. Он позволяет прогнозировать расходы воды с заблаговременностью 1, 2 и 3 суток для сотен рек в различных регионах России, и внедрен в оперативную практику оперативного гидрологического прогнозирования в рамках автоматизированной системы подготовки и выпуска прогнозов (подробно рассмотрен в главе 6).

Среднесрочное прогнозирование стока малых рек, как правило, осуществляется методами получения долгосрочных прогнозов, а для больших рек – описанными выше методами получения краткосрочных прогнозов [104, 105].

В настоящее время предпринимаются попытки использования методов искусственного интеллекта. Речь идет, прежде всего, об искусственных нейронных сетях. Они включают искусственные нейроны, т.е. узлы, которые с помощью функции активации преобразуют входные сигналы (числовые характеристики гидрометеорологических процессов) в выходные сигналы, которые затем передают последующим узлам. К другим моделям искусственного интеллекта, используемым в гидрологических прогнозах, можно отнести классическое машинное обучение, глубокое обучение, ансамблевые методы, нечеткую логику, экспертные системы и эволюционное моделирование. Важным достоинством этих методов является их способность к использованию постоянно возрастающего набора гидрометеорологических и геофизических данных. Широкое использование в последнее время методов искусственного интеллекта связано с доступностью вычислительных ресурсов и появлением в широком доступе больших массивов гидрометеорологической информации, в том числе спутниковых данных, выходов численных моделей атмосферы и т.д. [181, 204].

Рассмотренные выше методы успешно дополняет разработанный при участии автора метод экстраполяции гидрографа, который внедрен в оперативную практику оперативного гидрологического прогнозирования в рамках автоматизированной системы подготовки и выпуска прогнозов. Данный метод использует только данные гидрометрических наблюдений в прогнозируемом речном створе и позволяет давать удовлетворительные и хорошие прогнозы расходов и уровней воды с заблаговременностью от 1 до 10 суток для сотен рек, бассейны которых расположены практически по всей территории России. Метод экстраполяции гидрографа подробно рассмотрен во второй главе.

В последние годы в связи с ростом вычислительных мощностей и возрастающим объемом исходных гидрометеорологических данных и сопутствующей физико-географической и иной информации в мировой и отечественной практике гидрологических прогнозов все шире используются различные математические модели речного стока. Эти модели описывают процессы формирования склонового стока на водосборе и его трансформации в русловой сети. Они предназначены, прежде всего, для получения краткосрочных, а для крупных рек и среднесрочных прогнозов. Однако использование рассмотренного в разделе 4.1 ансамблевого подхода позволяет использовать их и для долгосрочного прогнозирования речного стока. Краткий обзор современных моделей формирования речного стока предлагается в следующем разделе.

1.2 Модели речного стока

Используемые в оперативных гидрологических прогнозах математические модели формирования речного стока характеризуются большим разнообразием. Они разделяются на типы, в том числе с точки зрения подробности описания стокоформирующих процессов, объектов моделирования, а также видом применения, например, модели непрерывного использования и ориентированные на конкретное событие. В настоящем разделе приводится краткий обзор моделей, нашедших наибольшее распространение в оперативной гидрологии.

В соответствии с используемыми принципами и детальностью описания основных процессов формирования речного стока различают концептуальные и физико-математические модели [105, 168, 185]. В отдельную группу относят эмпирические зависимости, которые не включают в явном виде описание процессов формирования стока. Методики гидрологических прогнозов на основе таких зависимостей рассмотрены в предыдущем разделе. Следует отметить, что четкое разделение моделей затруднено в связи тем, что одни компоненты гидрологической модели могут быть основаны на концептуальном подходе, в то время как другие – на эмпирических зависимостях. Широко используемые в прогнозах речного стока емкостные модели как раз занимают такое промежуточное положение [212]. В отдельный класс выделяют модели перемещения паводковых волн в руслах рек [105, 168, 185].

Концептуальные модели

Модели, основанные на схематизации процессов формирования стока в упрощенном виде (их концептуализации), при приближенном решении и использовании эмпирических зависимостей между их отдельными элементами, получили название концептуальных моделей формирования стока. Такие модели за счет относительной простоты задания входной информации и оптимизации параметров, большинство из которых имеют физический смысл, легкости расчетов нашли широкое применение в практике оперативных прогнозов стока в национальных гидрометеорологических службах различных стран мира [76, 105, 130, 152, 168, 185, 214]. Большое количество концептуальных моделей формирования стока рассмотрено в отчете ВМО. Там же приводится сравнение концептуальных моделей, используемых в практике оперативного гидрологического прогнозирования [227].

Несмотря на разнообразие концептуальных моделей, их структура имеет много общего. Как правило, она включает подмодели, схематизирующие процессы поступления воды на поверхность водосбора (включая динамику снежного покрова), потери стока,

перераспределения влаги в почве, поверхностного, почвенного и подземного притока к русловой сети, а также их преобразование в гидрограф в замыкающем створе. Структура концептуальных моделей на примере структуры модели Гидрометцентра СССР представлена на рисунке 1.1 [76].

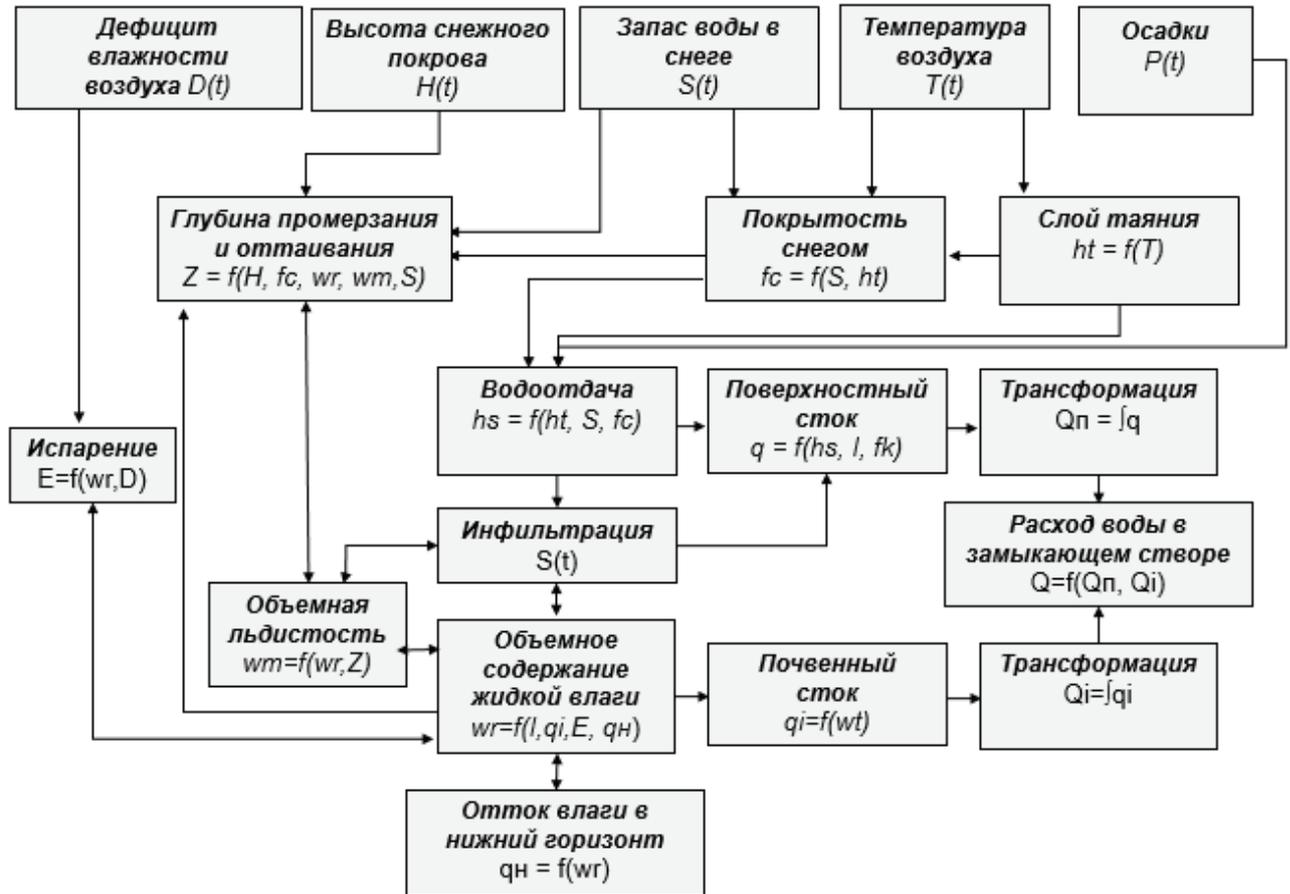


Рисунок 1.1 – Структура концептуальных моделей на примере структуры модели Гидрометцентра СССР [76]

Одной из первых отечественных моделей такого рода, нашедших применение в практике оперативного прогнозирования, является модель формирования талого и дождевого стока Гидрометцентра СССР, разработанная под руководством В.И. Корня и В.А. Бельчикова и внедренная для ряда бассейнов рек европейской территории России [76, 77]. В основу модели положено уравнение водного баланса зоны аэрации, которое решается отдельно для залесённых и открытых участков водосбора. Распределение этих участков по водосбору не учитывалось, а искались некоторые интегральные характеристики отдельно для всех залесённых и всех открытых участков в целом. К отличительным особенностям модели можно отнести [11, 76]:

- отдельный расчет процессов стокообразования для залесённых и открытых участков водосбора;

- параметрическое описание основных процессов формирования, включая параметризацию теплофизических процессов в зоне аэрации;
- учет распределения снежного покрова и глубины промерзания на водосборе;
- расчет инфильтрации с учетом фазового состояния влаги в почве;
- сравнительно небольшое число входных характеристик без детализации их распределения по водосбору, что особенно важно при использовании модели в оперативном прогнозировании.

Структурно модель можно разбить на четыре блока: водный баланс и фазовые переходы в зоне аэрации; расчет элементов водного баланса; оценка доли практически непроницаемых участков водосбора; преобразование поверхностного и почвенного притока к русловой сети в гидрограф в замыкающем створе. Все уравнения, описывающие составляющие баланса, решают независимо для залесённых и открытых участков [76].

Как правило, в основе концептуальных моделей лежит уравнение водного баланса речного бассейна, в котором учитывается изменение запаса воды в слое почвы, количество поступившей воды на поверхность водосбора, суммарное испарение, внутripочвенный и поверхностный сток. Составляющие водного баланса водосбора рассчитываются по физически обоснованным формулам, в качестве аргументов которых используются известные к дате составления прогноза гидрометеорологические характеристики. В частности, в модели Гидрометцентра СССР учитываются данные о жидких и твердых осадках, толщине и плотности снежного покрова, температуре и дефиците влажности воздуха, предзимней влажности почвы [11, 76, 77, 105]. Поверхностный сток преобразуется в гидрограф воды в замыкающем створе речного бассейна с помощью линейной модели и ранее рассчитанный кривой добегания.

В некоторых моделях присутствует схематизация замерзания почвенной влаги и формирования запирающего слоя почвы. Трансформация рассчитываемого слоя стока в расход воды в замыкающем створе выполняется, как правило, с помощью использования подхода единичного гидрографа или интеграла Дюамеля [167]. Следует отметить, что степень детализации описания данных процессов может существенно различаться от модели к модели.

Одной из первых моделей, получившей распространение в оперативной практике, является концептуальная модель формирования стока на водосборе, разработанная под руководством Д.А. Буракова [41, 42]. Она нашла широкое применение в практике оперативного гидрологического прогнозирования на территории речных бассейнов Сибири.

К наиболее распространенным моделям формирования стока в настоящее время относятся модель Шведского гидрометеорологического института HBV и ее

многочисленные модификации (HBV-96, HBV Light и другие) [182, 183], модель гидрометеорологической службы США Sacramento и ее модификации (SAC-SMA, SAC-HT) [138], модель Датского гидравлического института Mike [207], модель инженерного корпуса армии США HEC-HMS [206], а также многие другие. В целом концептуальные модели формирования стока нашли широкое распространение в практике прогнозов речного стока в связи с относительной простотой их использования, что выражается в простоте задания метеорологической входной информации (особенно в случае использования схемы с сосредоточенными параметрами). В рамках настоящего диссертационного исследования используется концептуальная водно-балансовая модель формирования речного стока HBV-96, которая рассматривается в разделе 3.1.

Одним из наиболее важных и трудоёмких аспектов внедрения концептуальных моделей формирования стока является калибровка их параметров в соответствии с выбранным водосбором и набором гидрометеорологической информации. Большинство параметров рассчитываются с помощью автоматической калибровки (оптимизации) с привлечением различных схем оптимизации с использованием данных наблюдений за расходом воды и его модельными значениями. Некоторые параметры могут задаваться априори, т.е. на основе использования их физического смысла и соответственно установленной их зависимости от известных физико-географических и ландшафтных характеристик водосбора.

Принципиальным моментом для концептуальных моделей является характер учета неравномерности входной информации и характеристик водосбора. В большинстве моделей эта неравномерность не учитывается в явном виде, а реальный водосбор заменен неким эквивалентным однородным водосбором с постоянными интегральными характеристиками (модели с сосредоточенными параметрами). Схематизация водосбора при использовании моделей формирования стока с сосредоточенными параметрами представлена на рисунке 1.2 слева.

На рисунке 1.2 по центру показано расширение возможностей концептуальных моделей стока с сосредоточенными параметрами. В этом случае достигается выделение сравнительно однородных частных бассейнов, для каждого из них независимо реализуется модель с сосредоточенными параметрами, а сток в замыкающем створе всего водосбора рассчитывается с использованием различных моделей трансформации паводочных волн. Некоторые концептуальные модели включают элементы моделей с распределенными параметрами. Наиболее часто учитывается неравномерность входных данных, особенно для горных водосборов при расчетах снеготаяния [58, 72, 73, 127, 128, 186]. Во многих концептуальных моделях также явно учитываются условия формирования стока на залесенных и открытых участках водосбора.

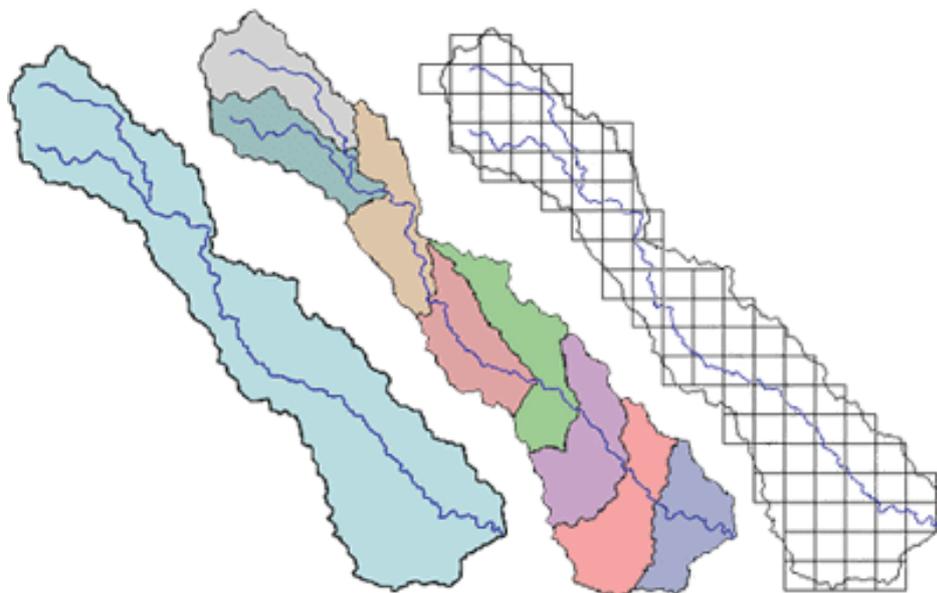


Рисунок 1.2 – Схематизация водосбора при использовании моделей формирования стока с сосредоточенными параметрами (слева), полураспределенными (по центру) и распределенными параметрами (справа) [142]

В ряде концептуальных моделей используется схема с распределенными параметрами, при которой водосбор разбивается на условно однородные элементы либо квадраты, представленные на рисунке 1.2 справа, размер которых зависит от размера и особенностей бассейна, а также от числа станций с измерениями входных данных [219]. Каждому такому элементу могут быть присущи индивидуальные характеристики стокообразования. Следовательно, с увеличением числа однородных элементов заметно увеличивается количество параметров, которые необходимо оценить по ограниченным исходным данным. Основным сдерживающим фактором для использования распределенной схемы является необходимость задания большого массива входной информации, прежде всего, пространственной метеорологической информации (в первую очередь данных об осадках, температуре воздуха и других метеорологических элементов), что во многих случаях является затруднительным. Спутниковая информация применяется в данных целях, но ее использование пока ограничивается в основном информацией о степени покрытости снежным покровом и данными о землепользовании и типах растительности. Кроме того, возникает необходимость задания параметров модели для каждого расчетного элемента, что при условии отсутствия или недостаточности данных наблюдений для каждого расчетного элемента представляет собой сложнейшую проблему [130]. Существует также другой подход к учету неравномерности, основанный на теоретико-вероятностном осреднении [178]. При таком подходе используются функции плотности распределения вероятностей входных данных и характеристик водосбора, например, запасов воды в снеге, глубины промерзания.

Физико-математические модели

Полное использование пространственной информации и подробное описание процессов водного баланса, теплового баланса речного бассейна с помощью уравнений математической физики является характеристикой физико-математических моделей формирования стока на водосборе [51–53, 79, 83, 130, 144, 152]. Используются дифференциальные уравнения математической физики в частных производных для описания основных процессов формирования стока на водосборе: перехвата осадков растительностью, испарения и транспирации, перемещение влаги в слое почво-грунтов, динамика снежного покрова и многие другие процессы. В этом случае процессы описывают с помощью уравнений в частных производных, а неоднородности на водосборе учитывают естественным образом, т.е. эти модели в принципе являются моделями с распределенными параметрами. Большинство параметров физико-математических моделей имеет достаточно четкую физическую интерпретацию. Пример схематизации речного бассейна при использовании физико-математической модели формирования стока с распределенными параметрами дан на рисунке 1.3.

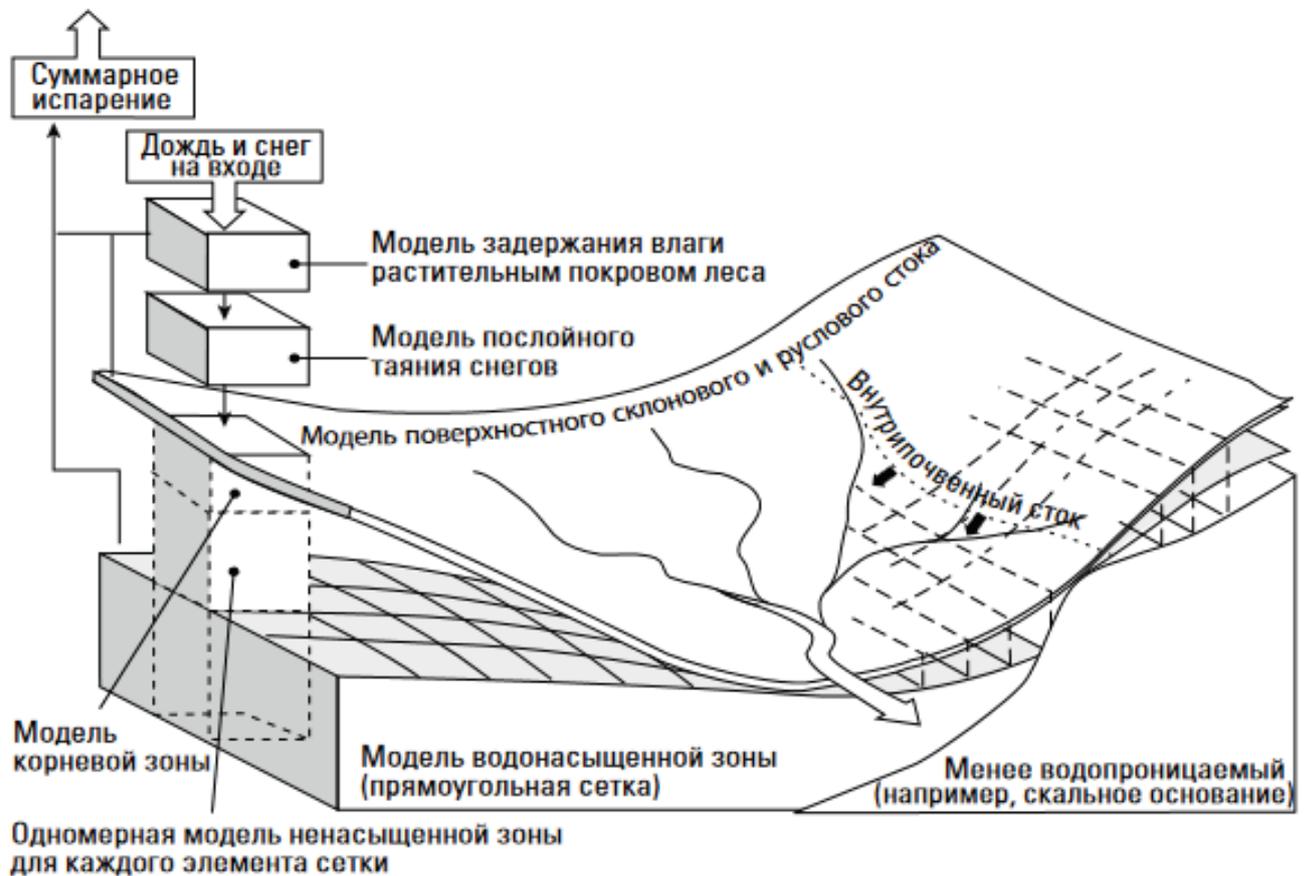


Рисунок 1.3 – Пример схематизации речного бассейна при использовании физико-математической модели формирования стока с распределенными параметрами [167]

Одной из наиболее ярких физико-математических моделей формирования стока, нашедшей широкое применение в практике оперативного гидрологического прогнозирования на территории Российской Федерации и за рубежом, является модель ЕСОМАГ, разработанная специалистами Института водных проблем РАН (ИВП РАН) [191, 192]. Данная модель одной из первых физико-математических моделей формирования стока получила широкое применение для решения как научных, так и практических задач. Модель ЕСОМАГ основана на представлении речного бассейна в виде элементарных водосборов с относительно однородными условиями формирования стока, соединенными отрезками русловой сети. Стокоформирующие процессы на каждом элементарном водосборе описаны с помощью детальных физико-математических моделей, в том числе: однослойной модели снежного покрова, модели термического режима в снеге, мерзлой и талой почве, модели процессов влагопереноса в почве, модели склонового стекания и движения по русловой сети [86, 87]. На основе данной модели с использованием информационно-моделирующего комплекса разработаны региональные гидрологические модели для крупных речных бассейнов, в том числе Волги, Лены и Амура [51, 52, 61, 62]. Другим представителем физико-математических моделей формирования стока на водосборе является модель MIKE SHE [130].

Модели перемещения волн паводков

В отдельный класс моделей часто выделяют модели перемещения паводковых волн в руслах рек, так называемые модели трансформации [105, 168, 185]. Расчетные соотношения этих моделей получаются в результате различного вида упрощений уравнения неразрывности и динамического уравнения потока. В качестве входной информации используются данные о расходах и уровнях воды, а также сопутствующая информация о морфометрических характеристиках русел и речных пойм и других данных. Такие модели призваны смоделировать (рассчитывать) изменение в величине расхода воды, скорости течения и формы гидрографа в одном или нескольких створах вдоль русла реки по мере продвижения волны паводка вниз по течению реки. Модели перемещения волн паводков подразделяются следующим образом:

- модели, не учитывающие в явном виде распластованные волны паводков;
- модели, использующие приближенные уравнения трансформации волны;
- модели, основанные на численном решении уравнений неразрывности и сохранения количества движения, а также его аппроксимации.

Такая классификация соотносится с разделением моделей по степени детальности описания стокоформирующих процессов:

- модели первой группы являются эмпирическими;
- второй группы – концептуальными;
- третьей группы – физико-математическими моделями.

Применение моделей трансформации в оперативной гидрологии нашло широкое применение [9, 10, 105, 129, 148, 149, 157, 209]. В практике оперативных прогнозов наибольшее распространение получили модели первой и второй групп за счет их относительной простоты разработки, внедрения и использования в оперативном режиме, а также отсутствием необходимости задавать большой объем исходной информации для их разработки. Однако, при резких изменениях уровня воды (например, при пусках ГЭС) и большом расплывании паводковых волн, модели, не учитывающие эти факторы, могут оказаться малоэффективными [105]. В данном случае методы второй группы являются хорошим компромиссом.

Модели, основанные на численном решении уравнений Сен-Венана, способны достаточно точно рассчитывать расход воды и уровень воды в искомом створе реки при наличии достаточного ряда гидрометрических данных, информации о поперечных профилях на участке реки и других морфометрических данных о геометрии и поверхности русла и долины реки. Гидродинамические модели могут иметь одномерное, двумерное или трехмерное исполнение (по числу направлений в используемых уравнениях неразрывности и динамическом уравнении). При использовании для прогнозов обычно ограничиваются одномерными моделями, в случае необходимости построения карт затоплений местности в ответственных районах (городских территориях или для пойм и участков речных долин со сложной морфометрией) применяют двумерные и трехмерные модели. В целом, гидродинамические модели существенно более трудоемки для внедрения в оперативную практику и требуют квалифицированных кадров в области информационных технологий и прикладной математики, а также наличие существенных вычислительных ресурсов (особенно в случае использования двумерной и тем более трехмерной модели).

К первой группе моделей перемещения паводковых волн относится достаточно большое количество методов. Например, широко известный «метод соответственных уровней» и его различные модификации, когда наиболее важным является определение времени добегания между входным и выходным створом, применяются различные методы. Также известна модификация метода соответственных уровней с переменным временем добегания в зависимости от высоты волны паводка [22].

Еще одним эмпирическим методом данной группы, особенно широко используемым для приточных участков, является метод изохрон – для отдельных участков реки определяют время руслового добегания, которое наносят на карту речной сети, определяя при этом

линии с одинаковыми значениями времени руслового добегаания, т.н. «изохроны», которые затем используются при построении зависимости расхода (уровня) воды по нескольким створом, расположенным в различных частях бассейна реки с известным временем добегаания [105].

В последние десятилетия, в связи с ростом мощности вычислительной техники, возросла популярность гидродинамических моделей перемещения волн паводков. Как правило, в практике оперативного гидрологического прогнозирования расхода и уровня воды ограничиваются использованием одномерной модели неустановившегося движения воды в русле, которая описывается системой уравнений Сен-Венана и решается численными методами [9, 10, 157].

При использовании такого рода моделей важно определить коэффициент шероховатости, характеризующий сопротивление ложа реки. Корректная оценка граничных и начальных условий при решении уравнений системы Сен-Венана также относится к важным задачам использования гидродинамической модели трансформации волн паводков на практике [167]. Применение данной модели на практике ограничено большим объемом исходной информации, требуемой для адаптации и работы модели в оперативном режиме. В частности, требуется информация о морфометрических характеристиках русла и поймы реки, поперечных профилях (их геометрии) с достаточно частым шагом вдоль течения реки.

В некоторых случаях в оперативной практике речных гидрологических прогнозов прибегают к следующим упрощениям гидродинамической модели:

- «модель диффузионной волны», в случае пренебрежения членами уравнения сохранения движения, отвечающими за изменение притока к участку во времени и за изменение скорости в пространстве;
- «модель кинематической волны», в случае пренебрежения членами уравнения сохранения движения и членом уравнения, отвечающим за силу давления, т.е. уравнение движения трансформируется в уравнения баланса гравитационных сил и силы трения.

Модель диффузионной волны и модель кинематической волны успешно применяются для описания процесса поверхностного склонового стока, а также речных потоков с уклонами водной поверхности, превышающими примерно 0.1% [167]. Модель диффузионной волны применима для речных потоков и с меньшим значением уклона водной поверхности в случае незначительного влияния инерционного члена. Модель кинематической волны получила распространение в практике оперативного прогнозирования в случае сложной и меняющейся морфометрии русла и долины реки, отсутствия детальных сведений о поперечных сечениях потока и в случае аппроксимации реальных условий

участков с однородными условиями стока и участков с морфометрией русла правильной формы.

Большое распространение в оперативной гидрологии, особенно в части краткосрочных прогнозов расходов и уровней воды на реках, получила вторая группа моделей перемещения волн паводков – модели, основанные на приближенных уравнениях трансформации (в зарубежной литературе для данной группы моделей используется термин «hydrologic routing»). Они могут использовать только лишь уравнение неразрывности на рассматриваемом участке реки и допущении наличия однозначной зависимости объема воды на участке от некоторого расхода воды (кривой объемов).

Разнообразие моделей связано с различным видом кривой объемов, для которой используют как линейную, так и нелинейную ее аппроксимацию [105]. Наибольшее распространение на практике получили модели, основанные на линейной аппроксимации, в связи с возможностью получить относительно простые аналитические решения. Одними из наиболее популярных линейных моделей являются метод Калинина-Милюкова и метод Маскингам [105]. В настоящей работе приближенная модель трансформации на основе метода Калинина-Милюкова использована для некоторых участков рек бассейна Волги в системе раннего предупреждения «ГИС Волга», рассматриваемой в разделе 6.3.

Специфика гидрологического прогнозирования предъявляет определенные требования к математическим моделям: они должны включать как можно меньшее число плохо прогнозируемых метеорологических величин, быть не очень чувствительными к погрешностям исходных данных и легко настраиваться при изменении объема входной информации. В связи с этим в прогностической практике в основном обращаются к достаточно гибким концептуальным моделям, а для некоторых задач – к эмпирическим моделям. В последнее десятилетие в следствие роста объема доступной гидрометеорологической информации, включая спутниковую информацию, данные метеорологических радаров, детальных данных реанализа и данных учащенных наблюдений с наблюдательных сетей в ведущих гидрометеорологических службах в практике гидрологических прогнозов распространение получают развитые модели с распределенными параметрами, занимающие промежуточное положение между концептуальными и физико-математическими моделями [105, 122, 168].

1.3 Погрешность прогнозов речного стока

Определение погрешности прогнозов

В 1992 г. Международным институтом прогнозистов (International Institute of Forecasters) был проведен опрос о критериях качества методик прогноза, используемых в

различных областях науки и практики [231]. Были опрошены сотни потребителей прогнозов: ученых, преподавателей, практиков, менеджеров и чиновников. Наиболее важными показателями качества прогнозов были указаны:

- точность прогноза – 90%;
- его заблаговременность – 84%;
- дешевизна получения прогноза – 82%;
- простота составления прогноза – 77%;
- его научная обоснованность – 63%.

Последняя цифра не должна вводить в заблуждение, так как за редким исключением точность прогнозов является наилучшим свидетельством их научной обоснованности.

При заданной заблаговременности прогноза качество методики характеризует ее точность, которая определяется вероятными ошибками получаемых с ее помощью прогнозов. Эти ошибки всегда неизбежны, что вызвано рядом причин.

При большом числе действующих факторов не все из них учитываются схемой прогноза, так как характеристики некоторых из них не измеряются на сети пунктов гидрометеорологических наблюдений. Сами наблюдения всегда содержат погрешности, величина которых может быть весьма значительной и определяется техническими возможностями приборов и самих методик измерений [91, 106, 167]. Наконец, сам метод прогноза и методика его реализации лишь с той или иной степенью точности отражают природные закономерности формирования предсказываемого явления, особенно в условиях, когда метеорологические характеристики за период заблаговременности прогноза неизвестны или известны лишь приближенно.

Статистической оценкой, характеризующей величину вероятных ошибок прогнозов, является их погрешность. В настоящее время факторы, определяющие погрешность прогнозов и ее структуру, достаточно хорошо изучены. Погрешность прогностической методики определяется:

- заблаговременностью прогноза;
- репрезентативностью, объемом и точностью исходных данных;
- распределением наблюдений в пространстве и во времени;
- ролью метеорологических элементов и точностью их прогнозирования;
- спецификой формирования и пространственно-временной изменчивости явления;
- адекватностью и полнотой описания прогнозируемого явления или процесса;
- репрезентативностью предикторов и влиянием неучтенных факторов;
- точностью определения параметров методики прогноза;

- техническими возможностями сбора необходимой информации;
- техническими возможностями составления прогноза и его доведения до пользователей [106, 116, 135, 195, 221].

Во многих случаях необходимость использования метеорологических прогнозов погодных условий на период заблаговременности гидрологического прогноза является его наиболее уязвимым местом [38, 106, 136, 185]. Чтобы разделить погрешности собственно гидрологических и метеорологических прогнозов, в ряде случаев при оценке погрешности прогнозов речного стока предлагается использовать фактически наблюдавшиеся в период заблаговременности метеорологические элементы, используемые при составлении конкретного прогноза – осадки, температуру и влажность воздуха, скорость ветра, а также другие элементы [38, 91, 106, 171, 191].

Определение и анализ погрешности методики гидрологического прогноза представляет очень важный этап ее разработки и последующего оперативного использования. Это обусловлено не только тем, что при заданной заблаговременности погрешность прогноза является важнейшим показателем его практической ценности. Анализ погрешности методики прогноза позволяет выявить ее слабые стороны и наметить пути ее совершенствования. Результаты такого анализа, выполненные для совокупности методик прогноза различных гидрологических характеристик в пределах целого региона, могут определить и обосновать направления по совершенствованию сети гидрологических и метеорологических наблюдений и системы сбора и обработки гидрометеорологической информации [38, 116, 185].

При определении погрешности методики прогнозирования речного стока исходят из того, что в процессе ее последующего применения соотношение между прогнозом характеристики речного стока \tilde{Y} и ее фактическим значением Y сохраняется приблизительно таким же, каким оно было в период гидрометеорологических наблюдений, использованных при построении данной методики. В подавляющем большинстве случаев в отечественной и мировой практике гидрологических прогнозов их погрешность характеризуется математическим ожиданием квадрата ошибки прогноза:

$$S^2 = M[(Y - \tilde{Y})^2]. \quad (1.1)$$

Формула (1.1) полностью соответствует принятому подходу к определению погрешности различных статистических оценок [39, 211, 222]. Отказ от такого показателя сопряжен со значительными трудностями математического характера вплоть до необходимости перестройки аппарата математической статистики. Кроме того, как показано в работе [38] негативный эффект, возникающий при принятии различных

водохозяйственных решений вследствие ошибок используемых прогнозов речного стока, приблизительно пропорционален величине S^2 .

В то же время обоснование наиболее подходящего показателя погрешности конкретной методики прогноза должно учитывать не только возможности получения оценки такого показателя, но и интересы потребителей данного прогноза. В работе [38] приведены примеры более подходящих показателей погрешности прогноза при принятии водохозяйственных решений в условиях прохождения экстремально высоких пиков половодий или паводков, или в условиях экстремально низкой межени. Однако использование иных показателей погрешности прогнозов речного стока оправдано только при разработке методики прогнозирования под конкретного потребителя, поэтому в последующем изложении используется среднеквадратическая погрешность прогноза S , определяемая формулой (1.1).

Для долгосрочных и среднесрочных прогнозов речного стока, выпускаемых один раз в год, формула (1.1) определяет погрешность ежегодного прогноза.

Для краткосрочных и среднесрочных прогнозов, выпускаемых ежедневно в течение периода продолжительностью T суток (месяц, сезон, фаза водного режима, квартал, год), ежедневные прогнозы $\tilde{Y}(t)$ сравниваются с фактическими значениями прогнозируемой величины $Y(t)$ при $t = 1, \dots, T$, и используется их средняя погрешность за этот период:

$$S^2 = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T M \{ [Y(t) - \tilde{Y}(t)]^2 \}. \quad (1.2)$$

Фактическое значение Y содержит ошибку измерения или расчета фактического значения прогнозируемой характеристики речного стока. Сведения о возможных размерах такой ошибки содержатся в работах [59, 67, 80, 123]. В ряде случаев ее вероятные значения могут быть весьма большими. Такая ситуация характерна для определения расходов воды на широких реках с сильно заросшей поймой или на горных реках с интенсивными русловыми процессами и изменяющимися кривыми расходов. Погрешность определения фактического значения прогнозируемой величины является нижним пределом возможного значения погрешности прогноза. Если погрешность методики прогнозирования близка к погрешности определения фактических значений прогнозируемой величины, то это свидетельствует о нецелесообразности дальнейшего совершенствования такой методики [38].

Оценка погрешности прогнозов

Погрешность методики прогнозирования речного стока оценивается на основе статистического анализа ряда ошибок проверочных прогнозов $Y_1 - \tilde{Y}_1, \dots, Y_N - \tilde{Y}_N$. Для

выпускаемых раз в год долгосрочных и среднесрочных прогнозов длина этого ряда n равна числу лет n , для которых определялись ошибки прогнозирования, т.е. $N = n$. Для краткосрочных и среднесрочных прогнозов, выпускаемых ежедневно в течение периода продолжительностью T суток, длина ряда N ошибок проверочных прогнозов в T раз больше числа таких лет, т.е. $N = nT$.

При оценке среднеквадратической погрешности прогноза S или ее квадрата S^2 следует различать проверку методики на зависимом и независимом материале.

При проверке на репрезентативном независимом материале, который образован гидрометеорологической информацией, не использованной при разработке методики и оценке содержащихся в ней параметров, стандартная статистическая оценка величины S^2 является несмещенной, т.е. не дает систематического занижения или завышения.

Такая ситуация возможна при наличии достаточного числа проверочных прогнозов, полученных уже после того, как проверяемая методика была разработана. В этом простейшем случае среднее значение квадрата ошибки прогноза оценивается по формуле:

$$S^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - \tilde{Y}_i)^2. \quad (1.3)$$

При проверке на зависимом материале, который образован гидрометеорологической информацией, использованной при разработке методики и оценке содержащихся в ней параметров, стандартная статистическая оценка величины S^2 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 [38, 39, 135, 180, 196, 221].

Подробное изложение методов оценки погрешности прогнозов и анализ надежности этих методов в различных ситуациях содержатся в работах [38, 39]. В последующем изложении рассматривается применение четырех из них.

Для оценки погрешности выпускаемых один раз в год долгосрочных и среднесрочных прогнозов речного стока целесообразно применение двух методов.

Метод 1

Данный метод является наиболее простым и позволяет оценивать среднеквадратическую погрешность прогноза на зависимом материале по ряду ошибок проверочных прогнозов $Y_1 - \tilde{Y}_1, \dots, Y_n - \tilde{Y}_n$ за n лет, использованных при разработке проверяемой методики. Метод учитывает соотношение между длиной ряда проверочных прогнозов n и числом k оцениваемых параметров формулы получения прогноза. Оценка среднеквадратической погрешности прогноза определяется формулой:

$$S^2 = \frac{(n-1)}{(n-k)(n-k-1)} \sum_{i=1}^n (Y_i - \tilde{Y}_i)^2. \quad (1.4)$$

Формула (1.4) дает несмещенную оценку величины $M[(Y - \tilde{Y})^2]$ при условии, что формула получения прогноза имеет полиномиальный вид, т.е. линейно зависит от оцениваемых параметров. Однако практика применения данного метода показывает, что он дает вполне удовлетворительные результаты практически для любых схем получения долгосрочных и среднесрочных прогнозов речного стока [38].

Метод 2

Данный метод «выбрасываемой точки» (Jackknife Method Дж.В. Тьюки) является универсальным, однако более трудоемким [38, 39, 116, 180, 217]. 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 проверочных прогнозов на независимом материале $Y_i - \tilde{Y}_{(i)}$ при $i = 1, \dots, n$. Полученная методом «выбрасываемой точки» оценка погрешности прогноза определяется формулой:

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \tilde{Y}_{(i)})^2. \quad (1.5)$$

Пример 1

Методика долгосрочного прогнозирования среднего за апрель расхода притока воды в водохранилище Саяно-Шушенской ГЭС с заблаговременностью $\Delta t = 35$ суток разработана в отделе речных гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» при участии Д.А. Буракова [38]. Она основана на линейной статистической зависимости, которая содержит $k = 3$ параметра, определенных по данным многолетних наблюдений за $n = 25$ лет. Метод 1 дал оценку среднеквадратической погрешности прогноза $S = 162 \text{ м}^3/\text{с}$. Метод 2 дал оценку среднеквадратической погрешности прогноза $S = 164 \text{ м}^3/\text{с}$. Таким образом, оба метода дали практически одинаковые результаты.

Для оценки определяемой формулой (1.2) погрешности краткосрочных и среднесрочных прогнозов, выпускаемых ежедневно в течение периода продолжительностью T суток, целесообразно применение двух методов, рассмотренных ниже.

Метод 3

Данный метод (Cross-Validation Method) является наиболее простым и часто используемым [38, 39, 137, 180]. Данные за n лет гидрометеорологических наблюдений разбиваются на обучающий ряд продолжительностью n_o лет и контролирующий ряд продолжительностью $n_k = n - n_o$ лет. Обучающий ряд используется для разработки методики прогнозирования, а контролирующий ряд – для ее проверки. Согласно Методическим указаниям [99] длина обучающего ряда должна составлять не менее 20% длины обучающего ряда. При этом необязательно выделять первые n_o лет наблюдений для формирования обучающего ряда, а последние n_k лет для формирования контролирующего ряда. Если сменить нумерацию лет таким образом, чтобы входящие в контролирующий ряд годы имели номера $i = 1, \dots, n_k$, то полученная методом 3 оценка погрешности прогноза определяется формулой:

$$S^2 = \frac{1}{n_k T} \sum_{i=1}^{n_k} \sum_{t=1}^T [Y_i(t) - \tilde{Y}_i(t)]^2. \quad (1.6)$$

Метод 4

Данный метод является более трудоемким, однако дает более точные результаты. По существу, он является вариантом метода 2 «выбрасываемой точки», предназначенным для оценки погрешности краткосрочных и среднесрочных прогнозов, ежедневно выпускаемых в течение периода продолжительностью T суток. Последовательно исключается каждый год с номером i и по оставшимся наблюдениям за $n - 1$ год строится вариант схемы получения прогноза. Полученные для года с номером i прогнозы $\tilde{Y}_{(i)}(t)$ сравниваются с фактическими значениями $Y_i(t)$ прогнозируемой гидрологической характеристики при $t = 1, \dots, T$. 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 проверочных прогнозов $Y_i - \tilde{Y}_{(i)}$ при $i = 1, \dots, n$ [38]. Полученная методом 4 оценка погрешности прогноза определяется формулой:

$$S^2 = \frac{1}{nT} \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T [Y_i(t) - \tilde{Y}_{(i)}(t)]^2. \quad (1.7)$$

Пример 2

Методика краткосрочного прогнозирования стока рек Черноморского побережья Кавказа с заблаговременностью одни сутки разработана в отделе речных гидрологических

прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России». Она основана на концептуальной модели формирования талого и дождевого стока и предназначена для ежедневного выпуска прогнозов в течение каждого месяца и всего года в целом [34]. Для оценки параметров модели и проверки методики использованы данные гидрологических и метеорологических наблюдений за период с 1994 по 2011 гг. продолжительностью $n = 18$ лет. При оценке погрешности методики методом 3 в качестве обучающего ряда использованы последние три года. В таблице 1.1 для каждого месяца и всего года в целом помещены оценки среднеквадратической погрешности S , м³/с, прогноза расходов воды в створе р. Сочи – г. Сочи, полученные методами 3 и 4.

Таблица 1.1 – Оценки погрешности прогнозов среднесуточных расходов воды в створе р. Сочи – г. Сочи

Метод	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
3	11,4	8,2	11,1	8,8	17,2	12,5	9,7	10,4	9,8	14,5	16,1	15,7	12,1
4	10,4	8,5	10,7	8,6	14,8	12,1	9,2	11,2	8,8	15,3	14,5	16,2	12,0

Приведенные данные показывают, что оба метода дали практически одинаковые результаты.

Влияние ошибок метеорологических прогнозов

При выпуске краткосрочных и некоторых среднесрочных прогнозов речного стока требуется учет метеорологических элементов в течение периода их заблаговременности. Это достигается путем использования метеорологических прогнозов. С увеличением заблаговременности погрешность таких прогнозов возрастает и может оказаться весьма значительной [88, 200]. В результате погрешность прогноза может оказаться намного больше погрешности расчета, которая получается при использовании фактически наблюдавшихся метеорологических элементов и характеризует качество собственно гидрологического блока методики прогнозирования [87, 168, 185]. Подобные изменения будут тем значительнее, чем больше погрешность прогноза метеорологических элементов и выше их влияние на результаты прогнозирования [38]. Данная проблема подробно рассматривается в главах 3 и 4. В настоящем разделе можно ограничиться одним примером.

Пример 3

В уже упомянутой методике прогнозов стока для рек Черноморского побережья Кавказа с заблаговременностью одни сутки, соответствующие этим суткам слой осадков и

среднесуточная температура приземного слоя воздуха оценивались с помощью оперативной системы численного прогнозирования погоды COSMO-RU. В связи с ошибками метеорологических прогнозов погрешность гидрологического прогнозирования возросла на 10–20% по сравнению с расчетом по фактическим данным об осадках и температуре за предстоящие сутки. В частности, для реки Мзымта у п. Красная Поляна средняя для всего года погрешность расчета, равная $8,6 \text{ м}^3/\text{с}$, возросла до погрешности прогноза, равной $9,9 \text{ м}^3/\text{с}$.

После того, как методика прогнозирования получена, возможна дополнительная коррекция выпускаемых с ее помощью прогнозов с целью устранения отдельных недостатков. Эти недостатки могут быть обусловлены неполной адекватностью модели или статистической зависимости, влиянием неучтенных факторов формирования речного стока и его изменчивости во времени, недостаточными объемом, точностью и репрезентативностью данных наблюдений и ошибками предсказания хода метеорологических элементов в течение периода заблаговременности гидрологического прогноза.

Практика свидетельствует, что дополнительная коррекция может оказаться весьма эффективной [185]. Она не требует значительных затрат времени и средств и при этом может приводить к существенному повышению точности гидрологических прогнозов. В связи с этим в следующем разделе рассматриваются некоторые хорошо зарекомендовавшие себя и предлагаемые к использованию в оперативной практике методы коррекции прогнозов речного стока и притока воды в водохранилища [33].

1.4 Методы коррекции прогнозов речного стока

Коррекция прогнозов методом линейной регрессии

Если проверка методики по обучающей выборке показала, что среднее значение ошибки прогноза $Y - \tilde{Y}$ статистически достоверно отличается от нуля на величину систематической ошибки $\bar{\delta}$, то простейший вариант коррекции состоит в ее устранении путем увеличения прогнозов на эту величину. В данном случае коррекция состоит в переходе от значений \tilde{Y} к значениям $\tilde{Y}_c = \tilde{Y} + \bar{\delta}$.

В качестве более эффективного средства рекомендуется метод линейной регрессии, в котором 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 в виде:

$$\tilde{Y}_C = m(Y) + R \frac{\sigma(Y)}{\sigma(\tilde{Y})} [\tilde{Y} - m(\tilde{Y})]. \quad (1.8)$$

Данное выражение представляет известную в математической статистике формулу линейной регрессии [39].

Скорректированный по формуле (1.8) прогноз \tilde{Y}_C имеет такое же среднее значение $m(Y)$, что и прогнозируемая величина. Следовательно, данный метод коррекции позволяет устранить возможную систематическую ошибку прогноза.

Среднеквадратическое отклонение $\sigma(\tilde{Y}_C)$ скорректированного прогноза равно $R\sigma(Y)$, т.е. оно всегда несколько меньше, чем у прогнозируемой величины. Следовательно, амплитуда вероятных колебаний скорректированного прогноза \tilde{Y}_C меньше, чем у прогнозируемой величины Y . Ее предсказуемость с помощью корректируемой методики характеризуется коэффициентом R . С ростом предсказуемости рассматриваемой гидрологической характеристики этот коэффициент приближается к единице. При этом среднеквадратическое отклонение $R\sigma(Y)$ скорректированного прогноза и амплитуда его вероятных колебаний будут приближаться к среднеквадратическому отклонению $\sigma(Y)$ и амплитуде вероятных колебаний прогнозируемой величины [33]. Таким образом, реализуется выдвинутая лауреатом Нобелевской премии Д. Канеманом идея о том, что чем выше предсказуемость, тем шире должен быть диапазон прогнозов, а в идеальном случае он должен совпасть с диапазоном прогнозируемой величины [176].

Использование предлагаемого варианта коррекции прогнозов позволяет снизить их погрешность. Рассчитанная по аналогии с величиной S среднеквадратическая погрешность S_C скорректированного прогноза \tilde{Y}_C может выражаться формулой:

$$S_C = \sigma(Y)\sqrt{1-R^2}. \quad (1.9)$$

Формула (1.9) показывает, что предлагаемый вариант коррекции всегда снижает погрешность методики прогнозирования, и этот эффект усиливается по мере роста коэффициента корреляции R между прогнозируемой величиной Y и ее прогнозом \tilde{Y} [33].

Пример 4

В отделе речных гидрологических прогнозов ФБГУ «Гидрометцентр России» разработана методика прогнозирования ежедневных расходов воды для рек бассейна Оки в течение всего года с заблаговременностью $\Delta t = 3$ суток. Методика основана на разработанной в Республике Корея концептуальной модели формирования речного стока

DWAT (Dynamic Water Resources Assessment Tool) [177]. Оптимизация параметров модели выполнена по данным гидрометеорологических наблюдений за период с 2010 по 2015 гг., за исключением данных 2013 г., которые использованы для проверки методики на независимом материале. Результаты применения коррекции прогнозов по формуле (1.7) помещены в таблицу 1.2.

Таблица 1.2 – Коррекция прогнозов расхода воды для рек бассейна Оки

Река	Пост	R	$S, \text{ м}^3/\text{с}$	$S_c, \text{ м}^3/\text{с}$
Упа	с. Орлово	0,84	69,2	51,2
Жиздра	г. Козельск	0,80	74,2	58,5
Угра	с. Товарково	0,83	232	188
Ока	г. Калуга	0,93	316	205

Приведенные данные показывают, что коррекция методом линейной регрессии позволяет снизить погрешность прогноза на 19–35%. Столь значительное уточнение методики прогнозирования обусловлено, прежде всего, устранением значительных систематических ошибок, допускаявшихся при прогнозировании расходов воды с помощью модели DWAT.

Коррекция прогнозов методом учета автокорреляции их ошибок

Данный метод широко применяется в отечественной и мировой практике в целях коррекции краткосрочных прогнозов речного стока, которые выпускаются ежедневно на протяжении всего года или определенной фазы водного режима [34, 33, 105, 165]. Идея метода состоит в том, что если к дате $t - \Delta t$ составления прогноза известные результаты прогнозирования демонстрируют завышение или наоборот занижение фактических значений, то составляемый прогноз целесообразно уменьшить или соответственно увеличить. Обоснованность такого приема возрастает, если ошибки предшествующих дате $t - \Delta t$ прогнозов образуют серию отрицательных или положительных значений. Применимость данного подхода обусловлена тем, что если краткосрочные прогнозы характеристики речного стока составляются по одной методике для близких сроков, то для их ошибок, как правило, характерна высокая корреляция [33, 105, 185].

В основе рассматриваемого метода коррекции лежит предположение о том, что в течение достаточно продолжительного периода (месяца, фазы водного режима или всего года) последовательность ошибок $\delta = Y - \tilde{Y}$ ежедневных прогнозов по рассматриваемой

методике описывается моделью стационарного процесса авторегрессии порядка l с нулевым математическим ожиданием. Для обеспечения последнего свойства систематическая ошибка прогнозов должна быть предварительно устранена описанным выше способом.

Такой процесс полностью описывается автокорреляционной функцией $r(\tau)$, которая задает коэффициент корреляции между ошибками прогноза $\delta(t)$ и $\delta(t-\tau)$ для всех целых значений τ . В рамках данной модели ошибка прогноза $\delta(t) = Y(t) - \tilde{Y}(t)$ может предсказываться по формуле:

$$\tilde{\delta}(t) = \sum_{i=1}^l a_i \delta(t - \Delta t - i + \lambda). \quad (1.10)$$

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 $\delta(t - \Delta t - 1)$ [119]. Остальные параметры формулы (1.10) определяются системой уравнений Юла–Уолкера при заданной автокорреляционной функции $r(\tau)$, которая подлежит статистической оценке по ряду проверочных прогнозов. Точность прогноза ошибки $\delta(t)$ определяется множественным коэффициентом корреляции R_l между этой величиной и входящими в формулу (1.10) известными к дате $t - \Delta t$ ошибками прогноза $\delta(t - \Delta t - i + \lambda)$, ..., $\delta(t - \Delta t - i + \lambda)$ [87]. Знак величины $\tilde{\delta}(t)$ определяется преобладанием положительных или отрицательных значений среди этих ошибок. Следовательно, эта величина будет положительной, если близкие к дате $t - \Delta t$ прогнозы были в основном заниженными, и отрицательной, если они были в основном завышенными.

Скорректированный прогноз на дату t определяется формулой:

$$\tilde{Y}_c(t) = \tilde{Y}(t) + \tilde{\delta}(t). \quad (1.11)$$

Среднеквадратическая погрешность скорректированного прогноза равна:

$$S_c = S \sqrt{1 - R_l^2}. \quad (1.12)$$

Формула (1.12) показывает, что чем выше корреляция между ошибками прогноза для близких сроков, тем эффективнее данный метод коррекции. С ростом порядка модели авторегрессии l коэффициент R_l возрастает, однако при этом увеличивается и число подлежащих оценке параметров модели. Оптимальный порядок модели определяется с помощью критерия Акаике, в котором учитывается не только коэффициент R_l , но и соотношение между числом l оцениваемых параметров модели и длиной ряда, по которому оценивается автокорреляционная функция $r(\tau)$ [21, 87].

Пример 6

В целях прогнозирования ежедневных расходов воды реки Коса (правый приток Камы) у с. Коса в течение всего года с заблаговременностью $\Delta t = 1$ сутки использована концептуальная модель формирования стока HBV-96, разработанная в Институте метеорологии и гидрологии Швеции [127, 128]. Получаемые с помощью модели прогнозы предварительно корректировались описанным выше методом линейной регрессии в целях устранения систематической ошибки и уменьшения диапазона их значений. Для калибровки модели и оценки параметров формулы (1.8) использованы данные гидрометеорологических наблюдений за период с 2008 по 2016 гг. Данные за 2017 г. использованы для проверки методики на независимом материале. Среднеквадратическая погрешность прогноза равна $S = 33,2 \text{ м}^3/\text{с}$.

При составлении прогноза для даты t результат прогноза на дату $t-1$ был уже известен, поэтому параметр λ в формуле (1.13) принят равным единице. На основе результата применения критерия Акаике для описания последовательности ошибок ежедневных прогнозов использована модель стационарного процесса авторегрессии первого порядка. Для такой модели единственный параметр a_1 в формуле (1.13) равен коэффициенту корреляции $r(1)$ между ошибками прогноза для соседних суток, который совпадает с коэффициентом R_l в формуле (1.12). В рассматриваемом случае этот коэффициент равен $r(1) = 0,973$.

С учетом формул (1.10) и (1.11) при $\lambda = 1$, $l = 1$ и $\Delta t = 1$ коррекция прогнозов выполнялась следующим образом:

$$\tilde{Y}_c(t) = \tilde{Y}(t) + r(1)[Y(t-1) - \tilde{Y}(t-1)]. \quad (1.13)$$

Рассчитанная по формуле (1.12) среднеквадратическая погрешность скорректированных прогнозов равна $S_c = 7,73 \text{ м}^3/\text{с}$. Таким образом, за счет высокой корреляции между ошибками ежедневного прогноза расходов воды реки Коса с заблаговременностью одни сутки коррекция на основе учета автокорреляции этих ошибок позволила снизить погрешность методики в 4,3 раза.

Приведенные примеры использования рассмотренных вариантов коррекции для повышения точности краткосрочного и долгосрочного прогнозирования речного стока по различным методикам демонстрируют их достаточно высокую эффективность.

1.5 Эффективность прогнозов речного стока

Альтернативные методы прогноза

В отечественной практике прогнозов речного стока эффективность методики прогнозирования оценивается путем сравнения ее погрешности с погрешностью альтернативного прогноза, который основан только на статистическом анализе многолетних данных о самой прогнозируемой характеристике [91, 99].

Для выпускаемых один раз в год долгосрочных прогнозов в качестве такой безусловной альтернативы рассматривается климатический прогноз. Климатический прогноз характеристики речного стока Y выражается ее нормой \bar{Y} , рассчитанной по ряду Y_1, \dots, Y_n данных многолетних наблюдений за n лет. Погрешность такого прогноза принято характеризовать оценкой дисперсии величины Y по формуле:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2. \quad (1.14)$$

Для краткосрочных прогнозов, выпускаемых ежедневно в течение некоторого периода (месяц, сезон, фаза водного режима, квартал, год), в качестве безусловной альтернативы рассматривается инерционный прогноз. При заблаговременности прогноза Δt суток инерционный прогноз $\tilde{Y}_t(t)$ для суток t использует известное на дату его составления значение $Y(t - \Delta t)$ и определяется формулой:

$$\tilde{Y}_t(t) = Y(t - \Delta t) + \bar{\Delta}, \quad (1.15)$$

где $\bar{\Delta}$ вычисляется, как среднее арифметическое ряда $\Delta_1, \dots, \Delta_N$, образованного $N = nT$ наблюдавшимися изменениями рассматриваемой характеристики $Y(t) - Y(t - \Delta t)$ за период заблаговременности прогноза. Оценка погрешности инерционного прогноза определяется формулой:

$$\sigma_{\Delta} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta_i - \bar{\Delta})^2}. \quad (1.16)$$

Для среднесрочных прогнозов речного стока суток выбор между климатическим и инерционным прогнозом определяется соотношением между показателями σ и σ_{Δ} их погрешности: при условии $\sigma > \sigma_{\Delta}$ в качестве альтернативы используется инерционный прогноз; при условии $\sigma < \sigma_{\Delta}$ в качестве альтернативы используется климатический прогноз [38].

Согласно части 1 раздела 3 «Наставления по службе прогнозов» 1962 г. [91], эффективность методики прогнозирования характеризуется отношением S/σ_A , в котором погрешность альтернативного прогноза σ_A равна σ или σ_{Δ} – чем ниже отношение S/σ_A ,

тем выше эффективность прогнозов. В зависимости от этого показателя и числа проверочных прогнозов n методика прогнозирования по своей эффективности относится к одной из трех возможных категорий качества в соответствии с таблицей 1.3.

Таблица 1.3 – Показатели качества методики прогнозирования речного стока

Категория оценки	$N \leq 15$	$15 < N < 25$	$N \geq 25$
хорошая	$S/\sigma_A \leq 0,40$	$S/\sigma_A \leq 0,45$	$S/\sigma_A \leq 0,50$
удовлетворительная	$0,40 < S/\sigma_A \leq 0,70$	$0,45 < S/\sigma_A \leq 0,75$	$0,50 < S/\sigma_A \leq 0,80$
неудовлетворительная	$S/\sigma_A > 0,70$	$S/\sigma_A > 0,75$	$S/\sigma_A > 0,80$

В дополнение к отношению S/σ_A в отечественной практике учитывается оправдываемость прогнозов P , которая равна частоте случаев, когда ошибка прогнозов не превышает допустимую величину $\delta_{\text{доп}} = 0,674 \sigma_A$. В целом, по мере снижения отношения S/σ_A оправдываемость прогнозов P возрастает. В частности, при нормальном распределении ошибок прогноза по проверяемой методике соотношение между этими величинами определяется таблицей 1.4.

Таблица 1.4 – Вероятность допустимых ошибок P при различных значениях S/σ_A

S/σ_A	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$P, \%$	100	99,9	97,5	91	82,5	74	66,5	60	54,5	50

Пример 7

Для рассмотренной в примере 1 методики долгосрочного прогнозирования среднего за апрель расхода притока воды в водохранилище Саяно-Шушенской ГЭС отношение S/σ равно 0,61, а оправдываемость прогнозов P равна 84%. Следовательно, данная методика может быть отнесена к категории удовлетворительных [38].

Пример 8

Для рассмотренной в примере 2 методики краткосрочного прогнозирования стока рек Черноморского побережья Кавказа качество прогнозов оказалось удовлетворительным для всех анализируемых речных створов [34]. В таблице 1.5 для створа р. Сочи – г. Сочи приведены значения показателя эффективности прогнозов S/σ_A и их оправдываемости P .

Таблица 1.5 – Показатели качества прогнозов среднесуточных расходов воды в створе р. Сочи – г. Сочи

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
S/σ_{Δ}	0,58	0,62	0,55	0,63	0,56	0,75	0,72	0,74	0,64	0,64	0,57	0,64	0,65
$P, \%$	79	81	79	84	76	79	85	76	75	73	76	74	78

Удовлетворительное качество прогнозов расходов воды в данном створе демонстрирует рисунок 1.4.

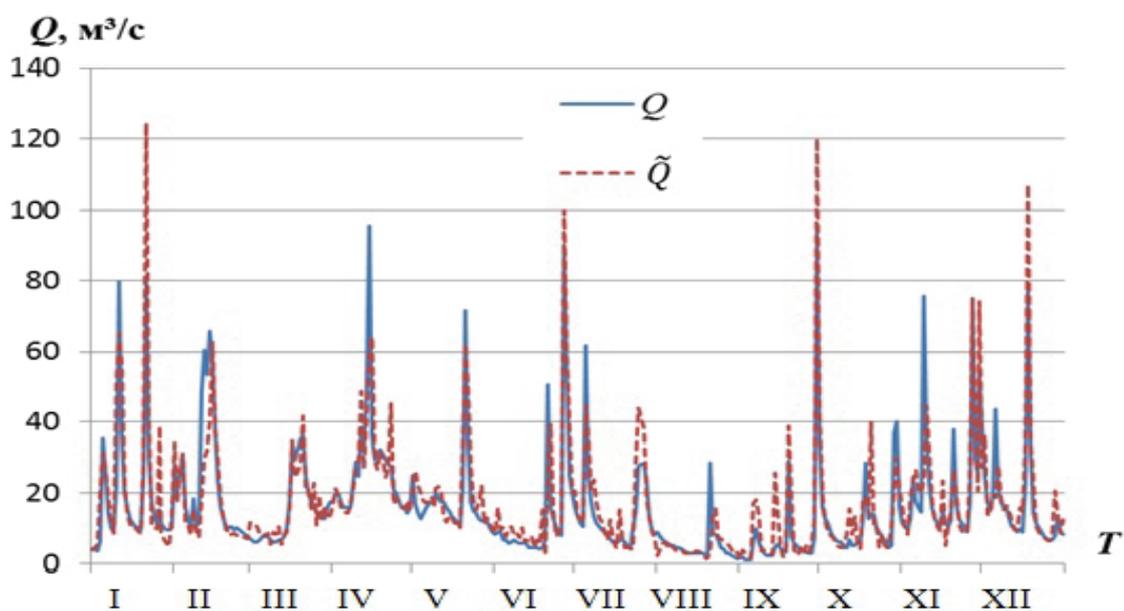


Рисунок 1.4 – Фактический $Q(t)$ и спрогнозированный $\tilde{Q}(t)$ графики колебаний среднесуточных расходов воды в створе р. Сочи – г. Сочи в 2001 г.

Усовершенствованная оценка эффективности методик прогнозирования

Изложенные правила, сформулированные в [91], весьма приближенно решают вопрос о статистической достоверности неравенства $S < \sigma_A$, т.е. преимущества проверяемой методики перед альтернативным прогнозом. В них недостаточно детально учитывается число n проверочных прогнозов и, главное, не учитывается корреляция между ошибками прогноза по проверяемой методике и ошибками альтернативного прогноза. Чем больше эта корреляция, тем выше статистическая достоверность преимущества проверяемой методики перед альтернативным прогнозом при том же значении показателя S/σ_A и длине n ряда проверочных прогнозов.

В целях преодоления указанных недостатков в работах [38, 35] предложен критерий проверки статистической достоверности неравенства $S < \sigma_A$ с учетом продолжительности

ряда проверочных прогнозов N и оценки коэффициента корреляции r между синхронными ошибками прогнозов по проверяемой методике и ошибками альтернативного прогноза. Согласно данному критерию, статистическая достоверность вывода о целесообразности практического применения проверяемой методики возрастает по мере увеличения величин N и r .

На основе данного критерия может быть предложен следующий показатель эффективности методики долгосрочного прогнозирования, для которой $N = n$:

$$K = 0,15n \ln \left[1 + \frac{(\sigma^2 - S^2)^2}{4\sigma^2 S^2 (1 - r^2)} \right]. \quad (1.17)$$

При достаточно большом числе проверочных прогнозов n величина $K/0,15$ приблизительно подчиняется распределению хи-квадрат с одной степенью свободы [38, 35]. При условии $K = 1$ вероятность ошибочного вывода о статистической достоверности неравенства $S < \sigma_A$ приблизительно равна 1%. При условии $K = 0,4$ вероятность ошибочного вывода о статистической достоверности неравенства $S < \sigma_A$ приблизительно равна 10%. На этом основании эффективность методики прогнозирования следует считать хорошей при условии $K \geq 1$, удовлетворительной при условии $0,4 \leq K < 1$ и неудовлетворительной при условии $K < 0,4$.

Определяемый формулой (1.17) показатель следует использовать при отсутствии статистически достоверной автокорреляции в рядах ошибок сравниваемых прогнозов. Данная ситуация характерна при долгосрочном прогнозировании характеристик речного стока. Для рядов ошибок краткосрочных и среднесрочных прогнозов расходов и уровней воды, ежедневно выпускаемых в течение всего года или достаточно продолжительной фазы водного режима, такая автокорреляция может быть весьма значительной [38]. Во избежание чрезмерного усложнения расчетов в этом случае достаточно учитывать коэффициенты корреляции $r_M(1)$ и $r_A(1)$ между ошибками прогноза за смежные сутки по проверяемой методике и по альтернативному методу. Рекомендуется использовать наибольшее по абсолютной величине значение $r(1)$ этих двух коэффициентов автокорреляции. Его статистическая достоверность устанавливается с помощью критерия Андерсона [38, 39].

При наличии статистически достоверной автокорреляции рядов ошибок прогнозов показатель эффективности методики краткосрочного прогнозирования, для которой $N = nT$, следует рассчитывать по более сложной формуле, полученной в предположении о нормальном распределении вероятностей ошибок прогноза и соответствия их последовательностей простейшей модели авторегрессии первого порядка:

$$K = 0,15\{1+(N-1)\left[\frac{1-r^2(1)}{1+r^2(1)}\right]\} \ln\left[1+\frac{(\sigma_{\Delta}^2-S^2)^2}{4\sigma_{\Delta}^2S^2(1-r^2)}\right]. \quad (1.18)$$

При отсутствии такой автокорреляции величину $r(1)$ следует принимать равной нулю. В этом случае формула (1.18) превращается в формулу (1.17).

Пример 9

Для методики прогнозирования ежедневных расходов воды реки Ока у г. Калуга в течение всего года с заблаговременностью 3 суток с использованием моделей DWAT и COSMO-RU показатель эффективности $S/\sigma_{\Delta} = 0,81$ оказался неудовлетворительным. Проверка на независимом материале по данным наблюдений за 2013 г. дала следующие значения погрешности методики и инерционного прогноза: $S = 205 \text{ м}^3/\text{с}$; $\sigma_{\Delta} = 252 \text{ м}^3/\text{с}$. Оценка коэффициента корреляции между синхронными ошибками прогнозов по проверяемой методике и инерционного прогноза равна $r = 0,21$. Коэффициенты автокорреляции рядов ошибок прогноза по проверяемой методике и инерционного прогноза оказались статистически достоверными, практически одинаковыми и равными $r(1) = 0,84$. Рассчитанный по формуле (1.18) показатель K равен 0,48. Следовательно, использование данного статистически более обоснованного показателя эффективности методики прогноза позволяет признать ее удовлетворительной.

Назначение в [91] допустимого предела для ошибок прогнозов $\delta_{\text{доп}} = 0,674 \sigma_A$ обусловлено тем, что при нормальном распределении вероятностей ошибок альтернативного прогноза вероятность допустимой ошибки приближается к 50% с увеличением продолжительности ряда проверочных прогнозов. Исходя из этого, предварительный вывод о достаточно высокой оправдываемости гидрологических прогнозов делается при условии $P \geq 60\%$ [14].

Однако распределению вероятностей ошибок альтернативного прогноза может отличаться от нормального. В связи с этим окончательный вывод о том, что проверяемый метод имеет достаточно высокую оправдываемость прогнозов следует делать при условии, что частота P явно превосходит оправдываемость альтернативного прогноза прогнозов P_A , которая определяется аналогичным образом по ряду ошибок соответствующих ему проверочных прогнозов [38].

Для сравнения этих частот следует применять критерий, в соответствии с которым неравенство $P > P_A$ является статистически достоверным при уровне значимости $\sigma = 5\%$, если выполняется условие:

$$M = \frac{\sqrt{N}(P-P_A)}{\sqrt{P(1-P)+P_A(1-P_A)-2(P_{M,A}-PP_A)}} > 1,64, \quad (1.19)$$

где $P_{M,A}$ – частота случаев, когда ошибки прогноза по проверяемому методу и ошибки альтернативного прогноза являются допустимыми одновременно. При этом все значения частот P , P_A и $P_{M,A}$ в формулу (1.19) следует подставлять не в процентах, в сотых долях [38].

Пример 10

В целях долгосрочного прогнозирования месячного притока воды в Цимлянское водохранилище в течение маловодного периода года использован метод, разработанный в Гидрометцентре России. По результатам его проверки за период с 1985 по 2018 гг. минимальная оправдываемость прогнозов $P = 66\%$ получена для февраля. Оправдываемость используемого в качестве альтернативы климатического прогноза для этого месяца равна $P_A = 53\%$, а частота одновременно допустимых ошибок климатического прогноза и прогноза по проверяемому методу равна $P_{M,A} = 48\%$. При таких частотах $n = 34$ показатель равен $M = 2,11$. Следовательно, условие (1.19) выполняется, неравенство $P > P_A$ является статистически достоверным, а проверяемый метод имеет достаточно высокую оправдываемость прогнозов.

К сожалению, предложенный в работах [38, 35] математически более обоснованный подход к оценке эффективности методик прогнозирования речного стока еще только предполагается быть включенным в новое издание нормативных документов, поэтому в последующем изложении используются действующие «Наставления по службе прогнозов» 1962 г. [91].

Показатель эффективности прогнозов Нэша–Сатклиффа

В настоящее время в большинстве стран мира, а в последние годы и в России используется опубликованный в 1970 г. показатель Нэша–Сатклиффа [194]. Данный показатель вполне подходит для оценки качества модели и в ряде случаев подходит для оценки эффективности применения использующей данную модель методики прогнозирования.

При получении данного показателя анализируется ряд $(Y_1, \tilde{Y}_1), \dots, (Y_N, \tilde{Y}_N)$ фактических значений характеристики речного стока и ее прогнозов. Для краткосрочных прогнозов и некоторых среднесрочных прогнозов, которые выпускаются ежедневно в течение всего года или достаточно продолжительной генетически однородной фазы водного режима, такой ряд может быть получен в результате проверочных прогнозов в течение 2–3 лет. Для долгосрочных прогнозов и некоторых среднесрочных прогнозов, выпускаемых один раз в

год, такой ряд может быть получен только в результате проверочных прогнозов на протяжении многолетнего периода.

Показатель Нэша–Сатклиффа рассчитывается по формуле:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \tilde{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}, \quad (1.20)$$

где \bar{Y} – среднее арифметическое ряда Y_1, \dots, Y_N фактических значений моделируемой характеристики [194]. Данный показатель не превышает единицу, причем равенство $NSE = 1$ достигается при абсолютно точной модели, обеспечивающей совпадение величин Y и \tilde{Y} . Равенство $NSE = 0$ означает, что моделирование является столь же точным, как расчет величины Y по ее среднему значению \bar{Y} . Отрицательные значения NSE свидетельствуют о совершенно неудовлетворительных результатах моделирования.

Применению показателя Нэша–Сатклиффа для оценки эффективности различных гидрологических моделей и свойствам этого показателя посвящено большое количество работ [52, 169, 180, 202]. В работе [190] предлагается следующая классификация качества моделей: модель может считаться хорошей при условии $NSE \geq 0,80$; удовлетворительной при условии $0,36 \leq NSE < 0,80$; неудовлетворительной при условии $NSE < 0,36$.

В основе показателя эффективности модели Нэша–Сатклиффа лежит идея корреляционного отношения К. Пирсона [38, 39]. Он учитывает среднеквадратическую погрешность S оцениваемой методики и погрешность климатического прогноза σ . Пренебрегая незначительным отличием величины $\frac{N}{N-1}$ от единицы, показатель NSE может быть достаточно точно выражен формулой:

$$NSE = 1 - \frac{S^2}{\sigma^2}. \quad (1.21)$$

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 [35, 38]. По аналогии с этим показателем для краткосрочных и некоторых среднесрочных прогнозов, для которых в качестве альтернативы используется инерционный прогноз, в качестве показателя их эффективности можно предложить следующую величину:

$$NSE_{\Delta} = 1 - \frac{S^2}{\sigma_{\Delta}^2}. \quad (1.22)$$

Что же касается показателя Нэша–Сатклиффа, то при его использовании для оценки эффективности таких краткосрочных и среднесрочных прогнозов речного стока могут возникать проблемы, которые можно проиллюстрировать следующими примерами.

Возможна и обратная ситуация, когда использование модели формирования стока с низким значением показателя Нэша–Сатклиффа позволяет получать вполне удовлетворительные прогнозы по показателю S/σ_{Δ} .

Пример 11

В целях краткосрочного и среднесрочного прогнозирования ежедневных расходов воды реки Коса (правый приток Камы) у с. Коса в течение всего года с заблаговременностью от 1 до 10 суток в отделе речных гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» разработана методика, основанная на экстраполяции гидрографа [36]. Для всех указанных значений заблаговременности методика показала удовлетворительную эффективность по сравнению с инерционным прогнозом по показателю S/σ_{Δ} . В частности, даже при заблаговременности 10 суток этот показатель оказался равным $S/\sigma_{\Delta} = 0,76$. В то же время показатель Нэша–Сатклиффа при такой заблаговременности оказался довольно низким ($NSE = 0,47$). Такое сочетание показателей обусловлено тем, что при столь большой заблаговременности среднеквадратическая погрешность инерционного прогноза $\sigma_{\Delta} = 92,2 \text{ м}^3/\text{с}$ уже близка к среднеквадратическому отклонению прогнозируемой величины $\sigma = 96,0 \text{ м}^3/\text{с}$.

Неоднозначность оценки качества прогнозов

Использование отношения S/σ_{Δ} в качестве показателя качества краткосрочных и некоторых среднесрочных прогнозов речного стока также требует определенной осторожности. Согласно работе лауреата Нобелевской премии Д. Канемана, при оценке эффективности какой-либо методики прогнозирования необходимо различать ее верификацию и валидацию. В процессе верификации методики проверяется ее соответствие требованиям разработчика. В процессе валидации методики проверяется ее соответствие требованиям потребителя [131]. В рассматриваемом случае успешность верификации методики прогнозирования речного стока определяется соотношением S/σ_{Δ} и оправдываемостью получаемых с ее помощью прогнозов. Успешность валидации методики целиком определяется мнением потребителя получаемых с ее помощью прогнозов. При этом успешность верификации не гарантирует успешность валидации и наоборот. Данную ситуацию наглядно демонстрирует следующий пример.

Пример 12

Для реки Амур, для которой характерно прохождение приводящих к наводнениям опасно высоких паводков в летне-осенний период, в отделе речных гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» разработана методика краткосрочного прогнозирования уровней воды [22, 132]. Использован классический метод соответственных уровней, который позволяет описывать трансформацию волн паводков на отдельных участках реки [49, 104]. В таблице 1.6 приведены название пункта расположения прогнозируемого речного створа, заблаговременность прогноза Δt суток, коэффициент корреляции R между фактическими значениями уровней воды и их прогнозами, среднеквадратическая погрешность прогнозов S , см, и отношение S/σ_{Δ} .

Таблица 1.6 – Показатели качества прогнозов уровней воды на реке Амур

Пункт	Δt , сутки	R	S , см	S/σ_{Δ}
с. Джалинда	1	0,977	34	0,82
с. Кумара	2	0,994	20	0,79
г. Благовещенск	5	0,996	19	0,81
с. Константиновка	1	0,992	14	0,82
с. Иннокентьевка	2	0,991	17	0,86
с. Нагибово	1	0,996	13	0,95
г. Хабаровск	2	0,997	24	0,88
г. Комсомольск-на-Амуре	3	0,998	11	0,88

За исключением одного случая – для створа р. Амур, с. Кумара – все значения S/σ_{Δ} превышают 0,80, что свидетельствует о неудовлетворительности прогнозов с точки зрения принятых в отечественной практике гидрологического прогнозирования правил. Однако значения коэффициента корреляции R очень высоки и близки к единице. При таких значениях R фактические значения уровней воды незначительно отличаются от прогнозируемых, что демонстрирует рисунок 1.5.

Противоречие, между показателями качества прогнозов R и S/σ_{Δ} обусловлено тем, что при характерном для реки Амур плавном изменении уровней воды в течение всего года и невысокой заблаговременности прогноза $\Delta t = 3$ суток погрешность инерционного прогноза σ_{Δ} по сравнению с величиной S относительно невелика [5, 132].

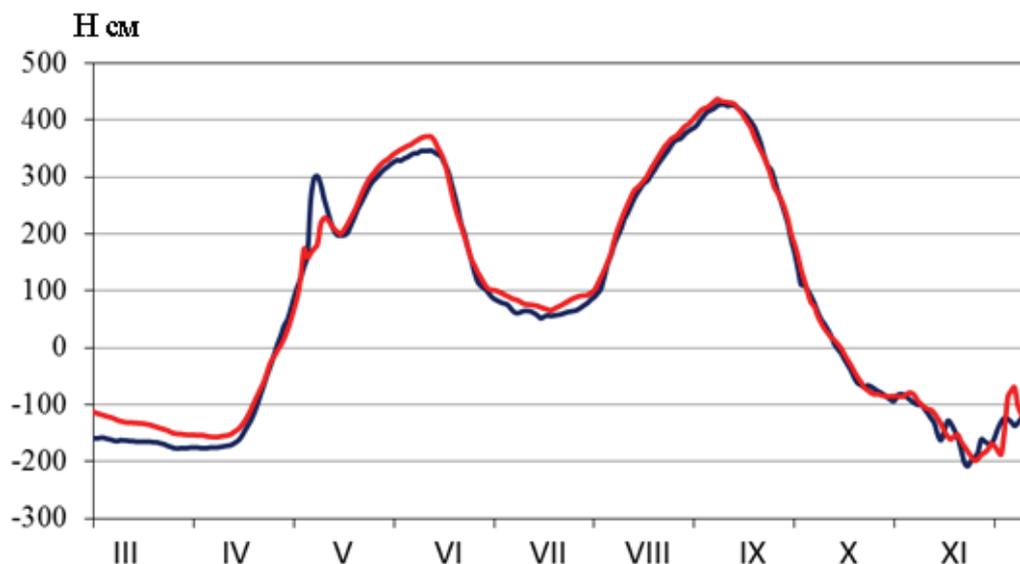


Рисунок 1.5 – Фактический (синим) и спрогнозированный с заблаговременностью $\Delta t = 3$ суток (красным) ход уровней воды в створе р. Амур – г. Комсомольск-на-Амуре в 2010 г.

Несмотря на неудовлетворительные с точки зрения гидрологов–прогнозистов результаты верификации данной методики, она была передана в МЧС, где получила одобрение и используется для предупреждения об угрозе наводнений на реке Амур. Таким образом, при неудовлетворительных результатах верификации методики, ее валидация оказалась вполне успешной.

Таким образом, оценка качества методики прогнозирования речного стока не всегда имеет простое решение. Ни ее теоретическая обоснованность, ни объем используемой гидрометеорологической информации, ни уровень программного обеспечения ее реализации еще не гарантируют высокой оценки ее качества. При этом целесообразно обратить внимание на приведенные в разделе 1.2 показатели качества прогнозов, из которых следует, что качество прогнозов в значительной степени определяется также дешевизной их получения и простотой их составления [231].

С учетом изложенных обстоятельств, при выборе методик прогнозирования речного стока рекомендуется исходить из принципа, сформулированного философом Уильямом Оккамом, согласно которому поиск решений какой-либо научной проблемы следует начинать с простейших вариантов [18, 37]. В целях реализации данного принципа в следующей главе излагается метод получения краткосрочных и среднесрочных прогнозов расходов и уровней воды путем экстраполяции их изменения во времени. Как и рассмотренные выше альтернативные прогнозы, метод экстраполяции гидрографа основан на статистическом анализе данных только о самой прогнозируемой характеристике. Он отличается простотой и минимальной трудоемкостью.

Выводы из главы 1

1. Накопленные в современной гидрологии знания и опыт в области исследования процессов формирования речного стока и получения его прогнозов различной заблаговременности создают достаточную основу для расширения возможностей прогнозирования стока рек России и своевременного доведения прогностической информации до потребителей.

2. Вопрос о целесообразности внедрения той или иной методики прогнозирования речного стока должен решаться после коррекции получаемых прогнозов, статистически обоснованной оценки их погрешности, сравнения с возможностями более простых методов, учета затрат на получение прогнозов и требований их потребителей.

ГЛАВА 2. Прогнозирование речного стока методом экстраполяции гидрографа

2.1 Метод экстраполяции гидрографа

Описание метода

В 2021 г. в отделе речных гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» разработана автоматизированная система подготовки и ежедневного выпуска краткосрочных и среднесрочных прогнозов стока рек России на основе метода экстраполяции гидрографа (подробно описана в главе 6). Основная идея метода состоит в следующем.

Характерный для достаточно крупных равнинных рек плавный ход среднесуточных расходов и уровней воды в течение года дает основание для простейшего варианта их прогнозирования путем экстраполяции гидрографа текущего года. Такая экстраполяция может определять прогноз среднесуточного расхода воды с заблаговременностью Δt суток в виде обобщенного полинома:

$$\underline{Q}(t + \Delta t) = c_0(t) + c_1(t)\varphi_1(\Delta t) + \dots + c_k(t)\varphi_k(\Delta t), \quad (2.1)$$

где $\varphi_1(\Delta t), \dots, \varphi_k(\Delta t)$ – некоторые заданные функции. Например, при $\varphi_1(\Delta t) = \Delta t, \dots, \varphi_k(\Delta t) = (\Delta t)^k$ формула (2.1) означает экстраполяцию гидрографа на Δt суток с помощью многочлена степени k . В частности, при значении $k = 1$ производится линейная экстраполяция, а при значении $k = 2$ – параболическая. В зависимости от даты составления прогноза t входящие в формулу (2.1) коэффициенты $c_0(t), c_1(t), \dots, c_k(t)$ определяются, исходя из предположения о том, что последовательность наблюдавшихся расходов $Q(t), Q(t-1), \dots, Q(t-k)$ для даты составления прогноза и для k предыдущих суток описывается тем же обобщенным полиномом. Данное предположение выражается в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} Q(t-i) = c_0(t) + c_1(t)\varphi_1(-i) + \dots + c_k(t)\varphi_k(-i), \\ i = 0, 1, \dots, k. \end{cases} \quad (2.2)$$

Решение системы (2.2) приводит к тому, что коэффициенты $c_0(t), c_1(t), \dots, c_k(t)$ линейно выражаются через расходы $Q(t), Q(t-1), \dots, Q(t-k)$. После подстановки этих выражений в формулу (2.1) она приобретает вид:

$$\underline{Q}(t + \Delta t) = \sum_{i=0}^k a_i(\Delta t)Q(t-i) + b(\Delta t), \quad (2.3)$$

где $a_0(\Delta t)$, $a_1(\Delta t), \dots, a_k(\Delta t)$ и $b(\Delta t)$ – параметры линейной формулы, зависящие от заблаговременности прогноза Δt и подлежащие оценке по данным гидрологических наблюдений.

Таким образом, экстраполяция гидрографа с помощью любого полинома вида (2.1) приводит к тому, что прогноз $\mathcal{Q}(t + \Delta t)$ выражается в виде линейной комбинации соответствующего дате составления прогноза расхода воды $Q(t)$ и k предыдущих расходов $Q(t-1), \dots, Q(t-k)$. По существу, данный метод использует идею фильтра H . Винера, широко используемого для экстраполяции случайных процессов [37, 222].

Определяемые формулой (2.3) величины $\mathcal{Q}(t + \Delta t)$ могут принимать недопустимо высокие и низкие значения. Недопустимо высокие значения $\mathcal{Q}(t + \Delta t)$ могут возникать при прогнозировании расходов воды на крутом подъеме половодья или паводка. Недопустимо низкие и даже отрицательные значения $\mathcal{Q}(t + \Delta t)$ могут возникать при прогнозировании расходов и уровней воды на крутом спаде половодья или паводка.

Во избежание необоснованно низких и высоких значений прогноза результаты применения формулы (2.3) необходимо корректировать, заменяя такие экстремальные значения $\mathcal{Q}(t + \Delta t)$ допустимым минимумом $\min Q$ или максимумом $\max Q$ [26, 33]. Окончательный прогноз расхода воды выражается формулой:

$$\tilde{Q}(t + \Delta t) = \begin{cases} \min Q, & \text{если } \mathcal{Q}(t + \Delta t) < \min Q; \\ \mathcal{Q}(t + \Delta t), & \text{если } \min Q \leq \mathcal{Q}(t + \Delta t) \leq \max Q; \\ \max Q, & \text{если } \mathcal{Q}(t + \Delta t) > \max Q. \end{cases} \quad (2.4)$$

Обобщенная экстраполяция хода среднесуточных уровней воды приводит к аналогичной формуле, которая выражает прогноз уровня воды $\mathcal{H}(t + \Delta t)$ в виде линейной комбинации известного к дате составления прогноза среднесуточного уровня $H(t)$ и k уровней $H(t-1), \dots, H(t-k)$ за предшествующие сутки:

$$\mathcal{H}(t + \Delta t) = \sum_{i=0}^k a_i(\Delta t) H(t-i) + b(\Delta t). \quad (2.5)$$

Результаты применения формулы (2.5) корректируются аналогичным образом путем замены экстремальных значений $\mathcal{H}(t + \Delta t)$ допустимым минимумом $\min H$ или максимумом $\max H$. Окончательный прогноз расхода воды выражается формулой:

$$\tilde{H}(t + \Delta t) = \begin{cases} \min H, & \text{если } \mathcal{H}(t + \Delta t) < \min H; \\ \mathcal{H}(t + \Delta t), & \text{если } \min H \leq \mathcal{H}(t + \Delta t) \leq \max H; \\ \max H, & \text{если } \mathcal{H}(t + \Delta t) > \max H. \end{cases} \quad (2.6)$$

Данный метод может применяться для краткосрочного или среднесрочного прогнозирования речного стока в течение определенной фазы водного режима или в течение всего года. Он не является чисто формальным, так как учитываемые в формулах (2.3) и (2.5) расходы и уровни воды за $k + 1$ суток косвенно характеризуют поступление талых или дождевых вод, пополнение или истощение почвенной влаги и запасов подземных вод, изменение русловых и пойменных запасов воды и трансформацию волны половодья или паводка в течение предшествующего периода. Возможности использования данного метода подтверждены достаточно успешным его применением для получения краткосрочных прогнозов стока рек бассейна Камского водохранилища [36].

Реализация метода

Метод экстраполяции гидрографа использован для прогнозирования в течение всего года среднесуточных расходов и уровней воды в оборудованных гидрологических постами речных створах, расположенных по всей территории России. Среднесуточные уровни воды прогнозировались для 2776 створов. Расположение анализируемых речных створов на территории РФ представлено на рисунке 2.1. Среднесуточные расходы воды прогнозировались для 2098 створов.

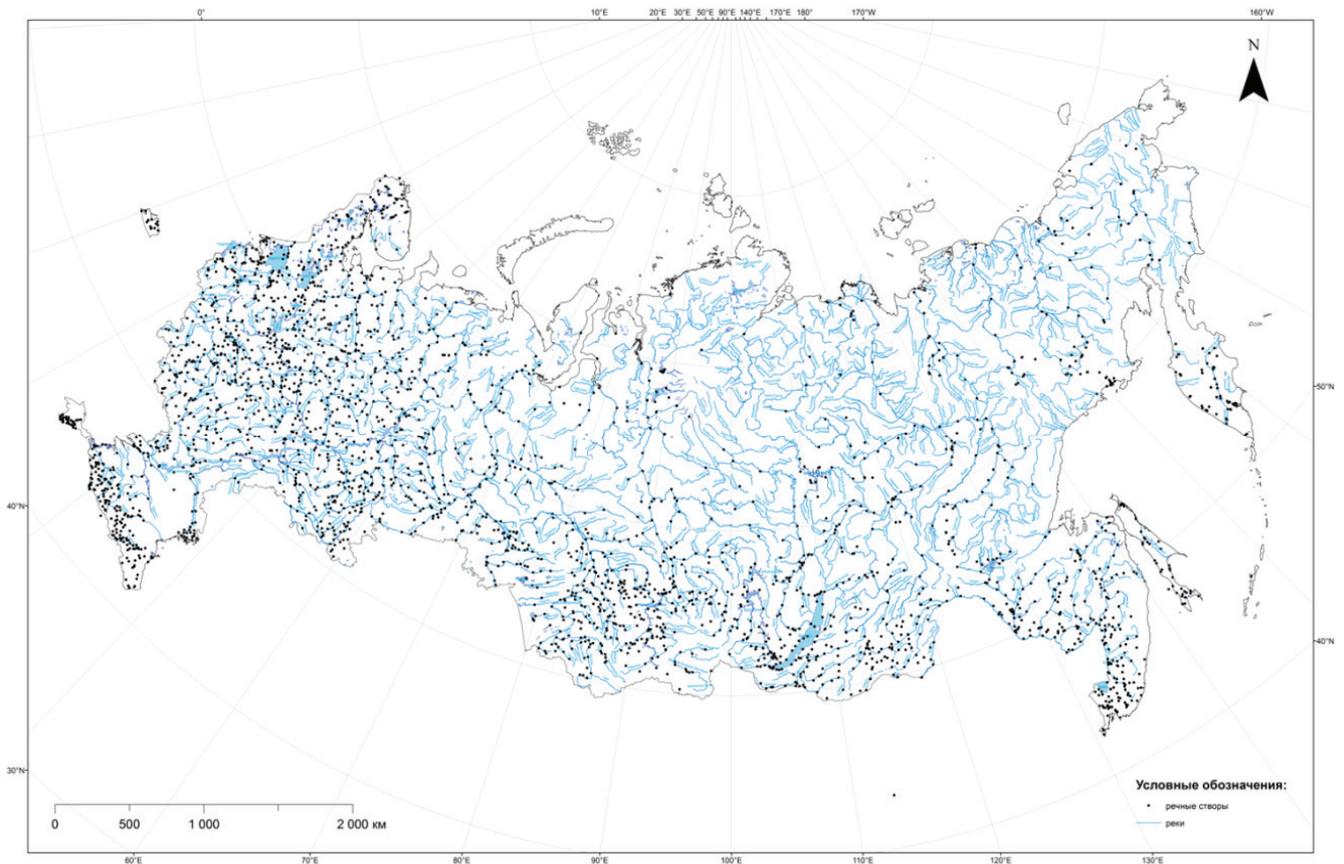


Рисунок 2.1 – Расположение анализируемых речных створов на территории России

При заданной заблаговременности прогноза $\Delta t = 1, \dots, 10$ параметры $a_0(\Delta t), a_1(\Delta t), \dots, a_k(\Delta t)$ и $b(\Delta t)$ формул (2.3) или (2.5) оценивались методом наименьших квадратов по ряду ежедневных гидрологических наблюдений за период с 01.01.2010 по 31.12.2020 гг. Входящие в формулы (2.4) и (2.6) минимальные и максимальные значения расходов и уровней воды определялись по тому же ряду и должны ежегодно пересчитываться по мере поступления новых данных наблюдений.

При каждом значении заблаговременности Δt от 1 до 10 суток для формул (2.3) и (2.5) подбиралось оптимальное число k , при котором среднеквадратическая погрешность прогноза принимает минимальное значение. Анализ показал, что для всех значений заблаговременности прогноза $\Delta t = 1, \dots, 10$ такие оптимальные значения параметра k не превышали 5. На этом основании все прогнозы среднесуточных расходов и уровней воды определялись с помощью формул (2.3) и (2.5) при $k = 5$.

В качестве примера в таблице 2.1 приведены параметры формул (2.3) и (2.4) для получения прогнозов среднесуточных расходов воды в створе на р. Дон у города Серафимович с заблаговременностью $\Delta t = 1, \dots, 10$ суток.

Таблица 2.1 – Параметры формул (2.3) и (2.4) получения прогноза ежедневных расходов воды в створе р. Дон – г. Серафимович

Δt	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	b	$minQ$	$maxQ$
1	1,435	-0,309	-0,082	0,053	-0,048	-0,054	2,21	148	5531
2	1,746	-0,522	-0,068	0,015	-0,065	-0,118	5,48	148	5531
3	1,981	-0,605	-0,129	0,02	-0,169	-0,117	9,41	148	5531
4	2,236	-0,740	-0,143	-0,068	-0,199	-0,116	13,84	148	5531
5	2,462	-0,829	-0,255	-0,099	-0,141	-0,178	18,90	148	5531
6	2,689	-1,007	-0,309	-0,048	-0,128	-0,249	24,57	148	5531
7	2,829	-1,126	-0,282	-0,046	-0,105	-0,335	30,87	148	5531
8	2,898	-1,136	-0,299	-0,044	-0,064	-0,435	37,65	148	5531
9	2,977	-1,168	-0,309	-0,025	-0,050	-0,52	44,75	148	5531
10	3,116	-1,208	-0,315	-0,037	-0,027	-0,658	60,09	148	5531

В целях автоматизации процедуры получения прогнозов и оценки их качества для любого набора речных створов и соответствующих гидрологических постов в отделе речных гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» на языке Python (версия 3.4) разработано программное обеспечение, которое включает следующие этапы:

- считывание и обработка данных, которые могут храниться в одном или в нескольких файлах;
- оценка параметров схемы получения прогноза для каждого речного створа;
- оценка показателей качества получаемых прогнозов;
- создание для каждого створа отдельной директории, в которой сохраняются параметры схемы получения прогноза и показатели его качества;
- создание сводной таблицы с результатами прогнозирования [26].

Верификация прогнозов

Качество краткосрочных и среднесрочных прогнозов среднесуточных расходов и уровней воды оценивалось на независимом материале, т.е. по данным, которые не учитывались при определении параметров формул получения прогноза. С этой целью использована следующая процедура скользящего контроля (Cross-Validation Method), изложенная в разделе 1.3:

- 1) из 11-летнего периода наблюдений исключался первый год;
- 2) данные за оставшиеся 10 лет использовались для оценки параметров схемы получения прогноза;
- 3) полученные оценки подставлялись в формулы (2.3) и (2.4) или (2.5) и (2.6) для прогнозирования расходов или уровней воды в течение исключенного года;
- 4) в результате для исключенного года формировался полученный на независимом материале ряд ошибок прогноза за 365 или (для високосного года) за 366 суток;
- 5) данные за исключенный первый год возвращались, и исключался следующий год;
- 6) после повторения описанной процедуры для всех 11 лет формировался ряд ошибок прогноза длиной $N = 3652$, полученный на независимом материале.

Таким образом, были получены оценки среднеквадратической погрешности прогноза S и его оправдываемости P .

В качестве примера в таблице 2.2 для прогнозов среднесуточных расходов воды в створе р. Дон – г. Серафимович с заблаговременностью $\Delta t = 1, \dots, 10$ суток приведены следующие показатели качества прогнозирования:

- R – коэффициент корреляции между фактическими расходами и их прогнозами;
- S – среднеквадратическая погрешность прогнозов, м³/с;
- σ_{Δ} – среднеквадратическая погрешность инерционных прогнозов, м³/с;
- S/σ_{Δ} – показатель эффективности прогнозов;
- P – оправдываемость прогнозов.

Таблица 2.2 – Показатели качества ежедневных прогнозов расходов воды в створе р. Дон – г. Серафимович

Δt	R	S	σ_{Δ}	S/σ_{Δ}	P
1	0,9995	22,3	38,3	0,58	91%
2	0,998	41,8	72,7	0,58	86%
3	0,996	63,0	106	0,59	85%
4	0,993	84,1	139	0,61	84%
5	0,989	109	171	0,64	84%
6	0,983	134	202	0,66	85%
7	0,975	160	232	0,69	83%
8	0,967	185	260	0,71	84%
9	0,957	209	288	0,72	83%
10	0,937	253	341	0,74	83%

На рисунке 2.2 для этого створа приведены совмещенные графики хода фактических и спрогнозированных с заблаговременностью $\Delta t = 5$ суток расходов воды в 2016 г. Появившиеся на спрогнозированном гидрографе незначительные всплески обусловлены интенсивным ростом расходов воды перед датой составления прогноза.

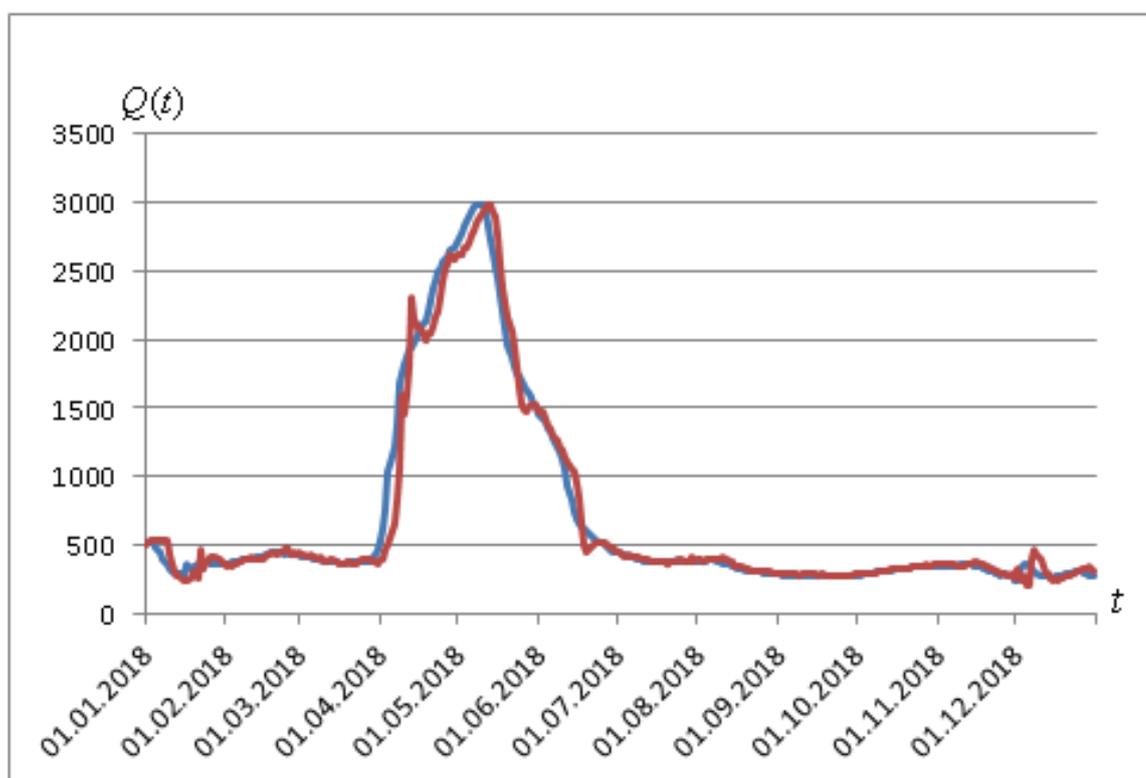


Рисунок 2.2 – Фактические (синим) и спрогнозированные с заблаговременностью $\Delta t = 5$ суток (красным) гидрографы в створе р. Дон – г. Серафимович в 2016 г.

Анализ результатов

Анализ результатов верификации прогнозов расходов и уровней воды в речных створах России позволяет оценить возможности используемого метода экстраполяции гидрографа и внедряемой системы автоматизированной подготовки и выпуска прогнозов.

Эти возможности демонстрирует таблица 2.3, в которой для всех значений заблаговременности Δt от 1 до 10 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 2.3 – 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 в таблице данные показывают, что с заблаговременностью $\Delta t = 1$ сутки удовлетворительные прогнозы расходов воды могут быть получены для 1000 створов, а уровней воды – для 1262 створов; с заблаговременностью $\Delta t = 2$ суток – для 723 и 909 створов соответственно и т.д. При этом в число створов с удовлетворительными прогнозами при заблаговременности Δt входят и створы, для которых получены удовлетворительные прогнозы с большей заблаговременностью.

Обращает на себя внимание, что с максимальной для среднесрочных прогнозов заблаговременностью $\Delta t = 10$ суток расходы воды удовлетворительно прогнозируются для 240 створов, а уровни воды для 223 створов.

Если использовать рассмотренный в разделе 1.5 более совершенный критерий проверки статистической достоверности неравенства $S < \sigma_{\Delta}$, то число случаев хороших и удовлетворительных прогнозов значительно возрастает.

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 [34]. 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 таких рек необходимо использование методов, применяемых для прогнозирования быстроразвивающихся паводков, к примеру, методов, которые основаны на моделировании процессов формирования речного стока.

Для рек с большой площадью и малым уклоном водосбора ход среднесуточных расходов и уровней имеет, как правило, плавный характер, как на рисунке 2.2, 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.

С увеличением заблаговременности прогноза Δt его среднеквадратическая погрешность S всегда возрастает. Растет и погрешность σ_{Δ} инерционного прогноза. В то же время изменение показателя эффективности прогноза S/σ_{Δ} и его оправдываемости P может иметь более сложный характер. Для крупных рек с очень плавным очертанием гидрографов при прогнозировании расходов или уровней воды с небольшой заблаговременностью $\Delta t = 1-3$ суток малая величина S может сочетаться с настолько малой величиной σ_{Δ} , что показатель S/σ_{Δ} может превысить критическое значение 0,80. В то же время при дальнейшем росте заблаговременности Δt прогнозы становятся удовлетворительными. Пример такой ситуации демонстрирует таблица 2.4 с аномальным характером изменения показателя эффективности прогнозов уровней воды в реке Иртыш у города Ханты-Мансийск (площадь водосбора 1 650 000 км²) с ростом их заблаговременности.

Таблица 2.4 – Значения показателя эффективности прогноза уровней воды в створе р. Иртыш – г. Ханты-Мансийск

Δt	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
S/σ_{Δ}	0,83	0,78	0,78	0,77	0,76	0,75	0,75	0,75	0,75	0,74

В связи с этим в предлагаемой работе используется другой показатель качества прогнозирования характеристик речного стока с заблаговременностью Δt – коэффициент корреляции $R(\Delta t)$ между их фактическими и прогнозируемыми значениями. При прогнозировании среднесуточных расходов воды методом экстраполяции гидрографа показатель $R(\Delta t)$ равен множественному коэффициенту корреляции между прогнозируемым расходом воды $Q(t + \Delta t)$ и известными к дате составления прогноза t расходами $Q(t)$, $Q(t-1)$,

..., $Q(t-5)$). Для метода экстраполяции гидрографа квадрат этой величины $R^2(\Delta t)$ равен широко используемому в зарубежной практике моделирования и прогнозирования речного стока показателю Нэша–Сатклиффа [142]. Величина $R(\Delta t)$ всегда снижается с ростом заблаговременности прогноза Δt , а неравенство $R(\Delta t) > 0,9$, как правило, обеспечивает удовлетворительность прогнозов по показателям S/σ_{Δ} и P .

С учетом отмеченных обстоятельств показатель Δ_{max} прогнозируемости стока в конкретном речном створе определяется таким образом, что прогнозы, для которых выполняется условие $R(\Delta t) > 0,9$, могут быть получены при всех значениях заблаговременности Δt , не превышающих величину Δ_{max} .

Из данного определения следует, что при условии $\Delta_{max} = 10$ коэффициент корреляции $R(\Delta t)$ между фактическими значениями расходов воды и их прогнозами превышает величину 0,9 при всех значениях заблаговременности Δt от 1 до 10 суток, что означает удовлетворительность прогнозов среднесуточных расходов воды методом экстраполяции гидрографа при любой рассматриваемой заблаговременности. При условии $\Delta_{max} = 0$ коэффициент корреляции $R(\Delta t)$ оказывается меньше 0,9 даже при заблаговременности одни сутки, что означает неудовлетворительность прогнозов данным методом при любой заблаговременности.

Показатель Δ_{max} можно рассматривать, как максимальную заблаговременность удовлетворительных прогнозов, так как в большинстве случаев его значения незначительно отличаются от аналогичной по сути, но несколько иначе определяемой величины, рассмотренной в работах [26, 36, 37].

При использовании метода экстраполяции гидрографа показатель Δ_{max} в максимально полной степени характеризует плавность изменения расходов воды во времени и возможность его предсказания. Таким образом, он является оригинальной, но весьма важной с практической точки зрения характеристикой водного режима реки. Его главное предназначение – оценка возможностей прогнозировать сток рек России методом экстраполяции гидрографа, которой посвящен следующий раздел настоящей главы.

2.2 Возможности прогнозирования стока рек России методом экстраполяции гидрографа

Показатель прогнозируемости речного стока методом экстраполяции гидрографа

Оценка прогнозируемости стока конкретной реки различными методами в зависимости от характеристик ее водосбора представляет несомненный научный и практический интерес,

так как позволяет заранее ориентироваться на наиболее подходящие методы прогнозирования и отбрасывать заведомо неприемлемые.

Метод экстраполяции гидрографа позволяет получать хорошие и удовлетворительные прогнозы с максимальной заблаговременностью для рек с большой площадью и малым уклоном водосбора. Для таких рек медленное формирование речного стока обеспечивает плавные очертания гидрографа, который можно достаточно точно экстраполировать на значительный промежуток времени. Для рек с малой площадью и большим уклоном водосбора формирование стока происходит быстро, поэтому ход среднесуточных расходов имеет пилообразный характер и его сложно предсказывать с достаточной точностью даже на ближайшие сутки [26].

В современной гидрологии факторы формирования речного стока и особенности его колебаний во времени достаточно хорошо изучены. Ведущими из них являются климат и ландшафтная структура водосбора [66, 68, 146, 166, 171]. Следовательно, учет морфометрических характеристик водосбора конкретной реки при оценке прогнозируемости ее стока методом экстраполяции гидрографа возможен только в пределах достаточно однородного в географическом отношении региона. Решению такой задачи и посвящено настоящее исследование.

Используемые морфометрические характеристики водосборов

При исследовании зависимости показателя Δ_{max} от характеристик соответствующих водосборов использованы данные по 1879 речным створам, расположенным практически по всей территории России.

Особенности гидрографов каждого речного створа определяются режимом выпадения осадков и температуры воздуха, особенностями подстилающей поверхности, формой и размерами водосбора, а также факторами хозяйственной деятельности, влияющими на водный режим реки [105, 168, 185]. Для водосборов, находящихся в одинаковых природных условиях, решающее значение имеют их морфометрические характеристики, которые определяют скорость реакции водосбора на таяние снежного покрова и выпадение жидких осадков. При прочих равных условиях эта скорость определяется временем склонового и руслового добега [68, 146].

С учетом данного обстоятельства среди различных морфометрических характеристик водосбора в качестве основных выбраны его площадь A и средний уклон его поверхности I .

Площадь водосбора характеризует расстояние до замыкающего створа, которое преодолевают талые, дождевые и подземные воды. Кроме того, с увеличением площади водосбора растет число притоков с несинхронными колебаниями водности, и суперпозиция

поступающих в основное русло расходов воды этих притоков сглаживает гидрограф в замыкающем створе. Средний уклон водосбора характеризует скорость поверхностного, внутрипочвенного и подземного стекания воды по склонам и скорость движения воды в русловой сети. Таким образом, при прочих равных условиях плавность изменения расходов воды во времени должна возрастать с увеличением площади водосбора и уменьшением его среднего уклона [68, 171]. Следовательно, с увеличением A и уменьшением I показатель прогнозируемости речного стока методом экстраполяции гидрографа Δ_{max} также должен расти.

В качестве примера на рисунках 2.3 и 2.4 представлены гидрографы 2018 г. для расположенного выше Цимлянского водохранилища створа реки Дон у станции Новогригорьевская и створа его притока второго порядка – р. Ворона у с. Чутановка. Первый водосбор имеет в 37,4 раза большую площадь, в 1,6 раза меньший уклон и значительно более плавные очертания гидрографа. В результате показатель прогнозируемости расходов воды для реки Дон составляет $\Delta_{max} = 10$ суток, а для его притока всего $\Delta_{max} = 1$ сутки.

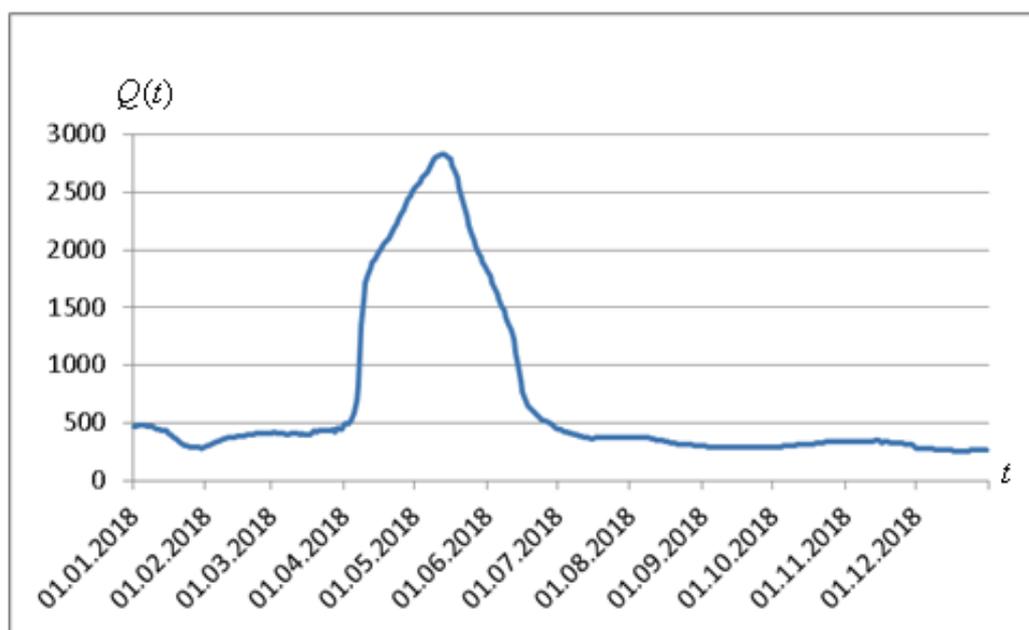


Рисунок 2.3 – Гидрограф 2018 г. в створе р. Дон – ст. Новогригорьевская с характеристиками: $A = 208000 \text{ км}^2$, $I = 0,56 \text{ ‰}$, $\Delta_{max} = 10$ суток

Значения площади водосборов взяты из Перечня действующих постов сети Росгидромета (RU_RIHMI-WDC_2665) [96].

Средний уклон поверхности водосбора рассчитан с помощью цифровой модели рельефа всей территории России с пространственным разрешением 1 км, созданной на основе топографических карт масштаба 1 : 100 000. В качестве замыкающего створа использованы координаты гидрологического поста.

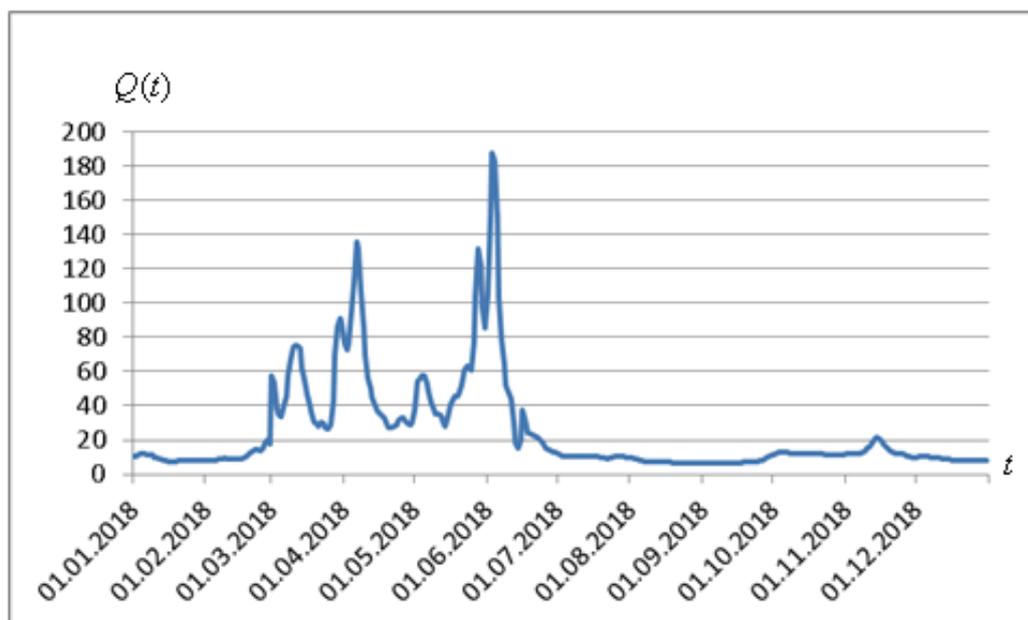


Рисунок 2.4 – Гидрограф 2018 г. в створе р. Ворона – с. Чутановка с характеристиками:
 $A = 5560 \text{ км}^2$, $I = 0,89 \text{ ‰}$, $\Delta_{max} = 10$ суток

В качестве исходных данных использованы данные по 1879 речным створам, расположенным практически по всей территории России. Среди них отсутствуют створы на реках, естественный водный режим которых существенно нарушен водохранилищами, расположенными выше по течению. Для каждого речного створа по данным ежедневных наблюдений была рассчитана максимальная заблаговременность прогноза расходов воды методом экстраполяции гидрографа Δ_{max} и получены значения площади A и среднего уклона поверхности водосбора I .

Среднее для всех этих речных створов значение площади водосбора равно $\bar{A} = 25634 \text{ км}^2$, Относительная изменчивость этой величины характеризуется коэффициентом вариации $Cv(A) = 6,09$. Среднее значение уклона водосбора равно $\bar{I} = 1,96 \text{ ‰}$. Относительная изменчивость этой величины характеризуется коэффициентом вариации $Cv(I) = 1,23$. Таким образом, относительная изменчивость площадей водосборов почти в 5 раз превышает относительную изменчивость их средних уклонов. Уже только это обстоятельство делает площадь водосбора более значимым аргументом при построении эмпирических зависимостей показателя Δ_{max} от характеристик A и I .

В качестве первого приближения анализировалась зависимость показателя прогнозируемости речного стока от площади водосбора A и от среднего уклона его поверхности I для всей территории России по данным всех 1879 речных створов. С этой целью рассматривались различные варианты функции $f(A, I)$, для каждого из которых оценивался коэффициент корреляции r между $f(A, I)$ и показателем Δ_{max} . В качестве

оптимального был выбран вариант $f(A,I)$, для которого коэффициент r принял максимальное значение. Таким оптимальным вариантом оказался логарифм площади водосбора $\ln(A)$. Максимальное значение r оказалось равным 0,50. Теснота зависимости Δ_{max} от $\ln(A)$ оказалась недостаточной для оценки прогнозируемости стока в конкретных речных створах по известным для них значениям A и I . В связи с этим поиск более тесных зависимостей показателя Δ_{max} от оптимального варианта функции $f(A,I)$ производился для относительно однородных в географическом отношении регионов.

Зависимость прогнозируемости речного стока от морфометрических характеристик водосбора для отдельных регионов России

В идеале регион, в котором может использоваться единая для всех входящих в него водосборов и достаточно тесная зависимость показателя прогнозируемости речного Δ_{max} от их площади A и среднего уклона I , должен быть однородным по всем остальным условиям формирования водного режима рек, включая климат, рельеф, ландшафтную структуру, гидрогеологические условия и факторы хозяйственной деятельности. Однако стремление к максимальной географической однородности выделяемого региона вступает в противоречие с необходимостью выделения крупного региона с достаточно большим числом гидрологических постов, данные которых необходимы для построения региональной расчетной зависимости характеристики речного стока (в данном случае показателя Δ_{max}) от морфометрических и других азональных характеристик водосбора [116].

С учетом отмеченных выше обстоятельств, при выделении регионов с единой расчетной зависимостью показателя Δ_{max} от площади A и среднего уклона I , входящих в этот регион водосборов, преследовалась цель добиться, по крайней мере, его относительной географической однородности. Для достижения этой цели учитывалась информация, содержащаяся в Большом географическом атласе России [19]. Использовались полученные различными авторами карты типов водного режима рек СССР и России [48].

Процедура выделения каждого региона включала следующие этапы:

- выделения «ядра», образованного водосборами с достаточно близкими условиями формирования речного стока и его режима;
- предварительное определение оптимального варианта функции $f(A,I)$, имеющей максимальный коэффициент корреляции r с показателем Δ_{max} ;
- добавление соседних водосборов, если представляющие их данные заметно не снижают коэффициент r ;
- уточнение оптимального варианта функции $f(A,I)$ и зависимости от него показателя Δ_{max} ;

– отбрасывание соседних водосборов, если представляющие их данные заметно ухудшают эту зависимость [27].

Отечественный и зарубежный опыт показывает, что, как правило, при разработке автоматизированных систем подготовки и выпуска гидрологических прогнозов используется бассейновый принцип [105, 168, 185]. Исходя из этого, большинство регионов с единой расчетной зависимостью Δ_{max} от A и I являются бассейнами крупных рек.

Регионы, совпадающие с огромными бассейнами Енисея, Лены и Амура не могут считаться относительно однородными в географическом отношении. Однако в условиях характерной для них редкой сети гидрологических постов их дробление приводило к тому, что для некоторых вновь образованных регионов зависимость Δ_{max} от A и I заметно улучшалась, а для других недопустимо ухудшалась

Таким образом, выделено 18 регионов 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 рисунке 2.5. В таблице 2.5 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} [27, 37].

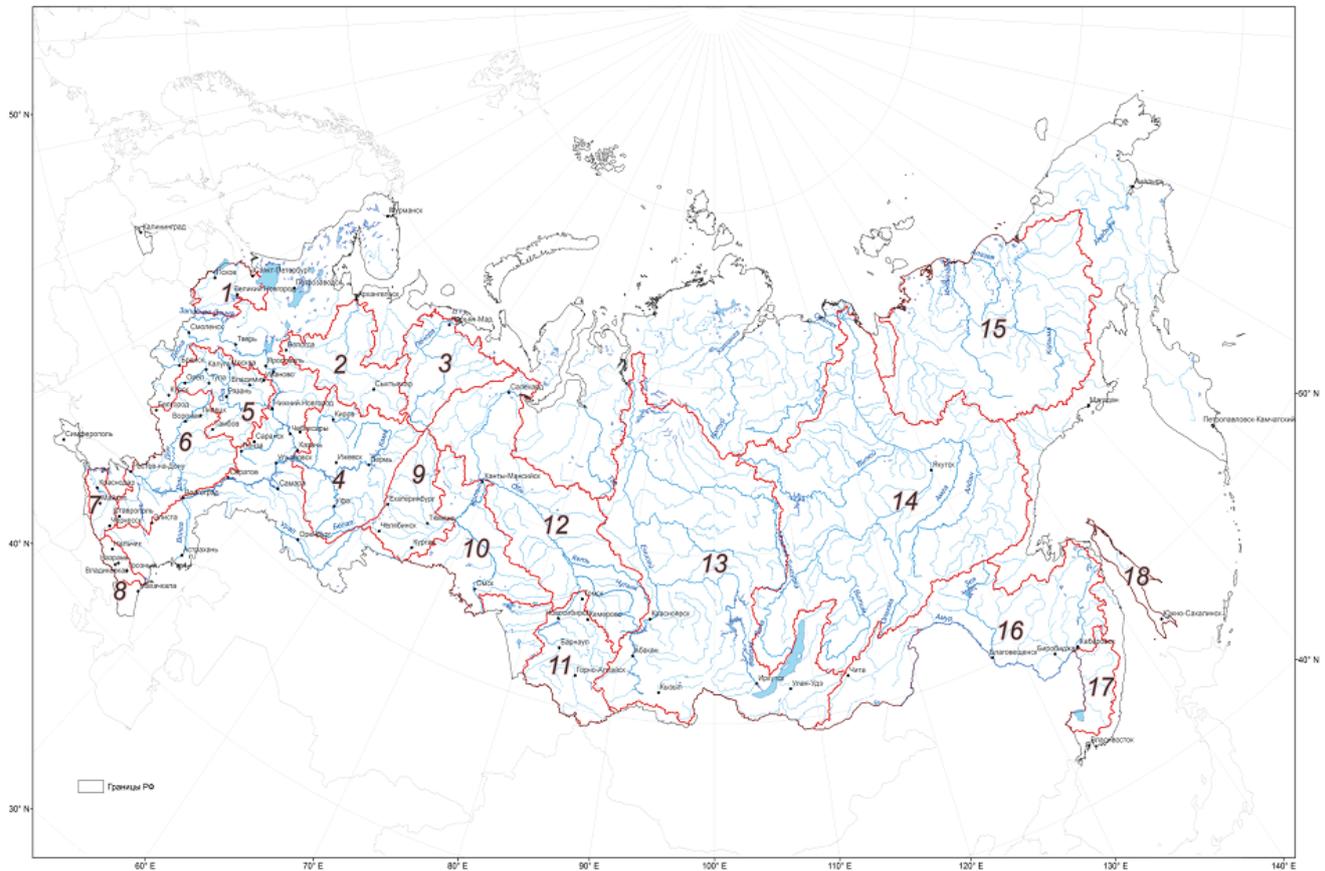


Рисунок 2.5 – Регионы с единой расчетной зависимостью показателя прогнозируемости речного стока от функции морфометрических характеристик $f(A,I)$

Таблица 2.5 – 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

В приведенной таблице обращает на себя внимание, что использование для бассейна Терека в качестве оптимального аргумента $f(A, I) = \ln(A) + 1,3 \ln(I)$ свидетельствует о том, что в данном регионе максимальная заблаговременность удовлетворительных прогнозов Δ_{max} увеличивается с ростом среднего уклона поверхности речного бассейна. Столь неожиданный результат имеет достаточно простое объяснение.

Наибольшие уклоны имеют реки, водосборы которых расположены в основном высоко в горах. Для них преобладает снеговое и ледниковое питание. Оно обеспечивает плавные очертания волны половодья и гидрографа в целом. Наименьшие уклоны имеют реки, водосборы которых расположены в основном на равнине. Для них преобладает дождевое питание. Оно обеспечивает резкие очертания отдельных паводков и пилообразный характер гидрографа в целом [66, 68]. Таким образом, для бассейна Терека средний уклон

поверхности речного бассейна косвенно характеризует расположение водосбора реки и режим ее питания, а он, в свою очередь, определяет особенности очертаний гидрографа и возможности его экстраполяции.

Метод экстраполяции гидрографа применялся для получения прогноза расходов воды с заблаговременностью Δt от 1 до 10 суток. В связи с этим значения показателя Δ_{max} , определяющего максимальную заблаговременность удовлетворительных прогнозов, также ограничены 10 сутками. В результате для многих регионов зависимость этого показателя от морфометрического аргумента $f(A,I)$ становится нелинейной по мере его увеличения и приближения величины Δ_{max} к 10. Это приводит к тому, что коэффициент корреляции r , который характеризует тесноту статистической связи и степень ее линейности, занижает фактическую тесноту зависимости Δ_{max} от аргумента $f(A,I)$. Если бы расходы воды прогнозировались с заблаговременностью более 10 суток, характер этой зависимости имел бы линейный характер во всем диапазоне анализируемых значений и коэффициенты корреляции r были бы больше.

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 ($\Delta_{max} = 0$).

Ниже приводятся примеры подобных расчетов для некоторых регионов России [27].

На рисунке 2.6 представлен график зависимости максимальной заблаговременности удовлетворительных прогнозов Δ_{max} от величины $\ln(A)$, полученный для Северо-Запада России (Ленинградская область, часть Псковской и Новгородской областей).

Данный график позволяет сделать следующие выводы: для речных створов с показателями $\ln(A) > 9$ метод экстраполяции гидрографа позволяет получать удовлетворительные прогнозы расходов воды с заблаговременностью не менее 7 суток; для речных створов с показателями $\ln(A) < 5$ метод экстраполяции гидрографа позволяет получать удовлетворительные прогнозы расходов воды с заблаговременностью не более 2 суток.

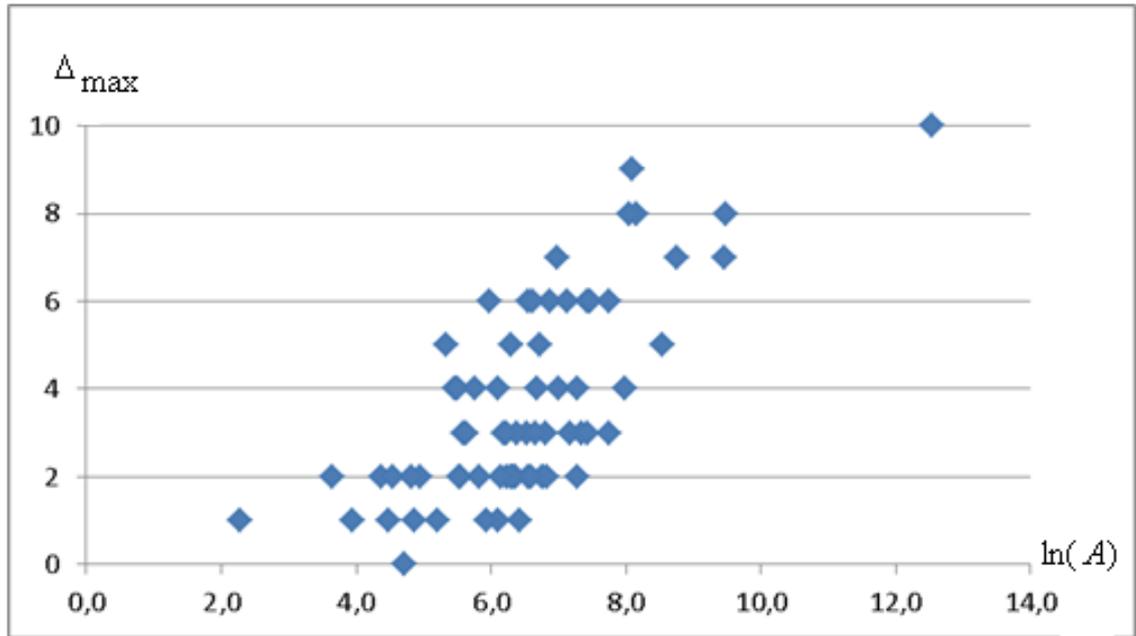


Рисунок 2.6 – График зависимости показателя Δ_{max} от величины $\ln(A)$, полученный для Северо-Запада России

На рисунке 2.7 представлен график зависимости максимальной заблаговременности удовлетворительных прогнозов Δ_{max} от величины $\sqrt{A/I}$, полученный для бассейна Оки.

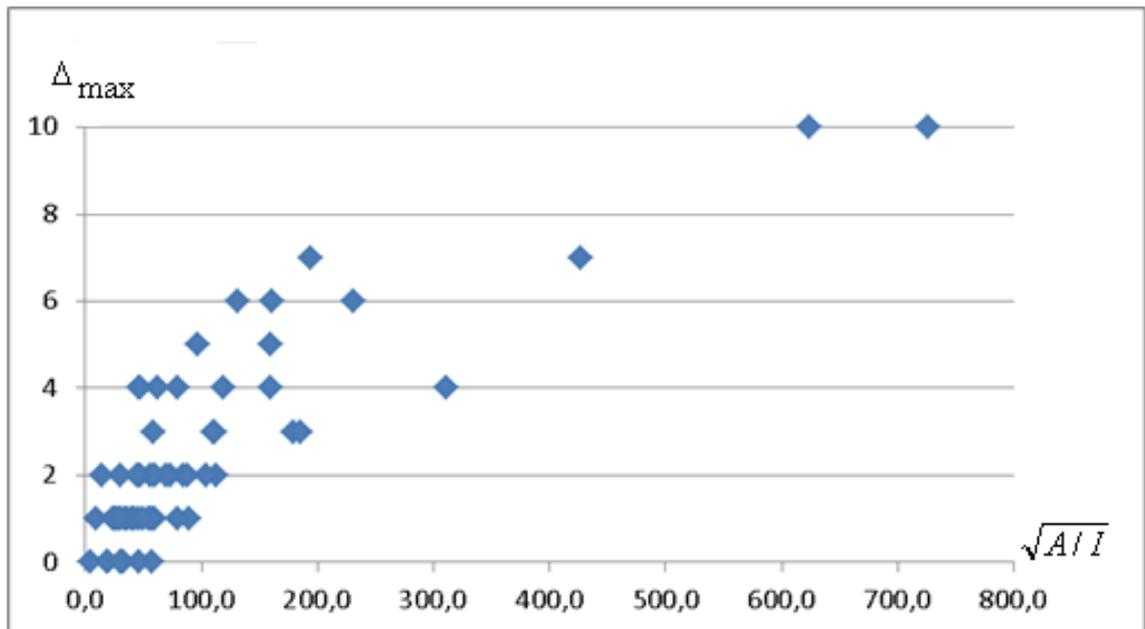


Рисунок 2.7 – График зависимости показателя Δ_{max} от величины $\sqrt{A/I}$, полученный для бассейна Оки

Данный график позволяет сделать следующие выводы: для речных створов с показателями $\sqrt{A/I} > 400$ метод экстраполяции гидрографа позволяет получать

удовлетворительные прогнозы расходов воды с заблаговременностью не менее 7 суток; для речных створов с показателями $\sqrt{A/I} < 50$ метод экстраполяции гидрографа позволяет получать удовлетворительные прогнозы расходов воды с заблаговременностью не более 2 суток.

На рисунке 2.8 представлен график зависимости максимальной заблаговременности удовлетворительных прогнозов Δ_{max} от величины $\ln(A) - 4\ln(I)$, полученный для Северо-Востока России (бассейны Яны, Индигирки, Колымы).

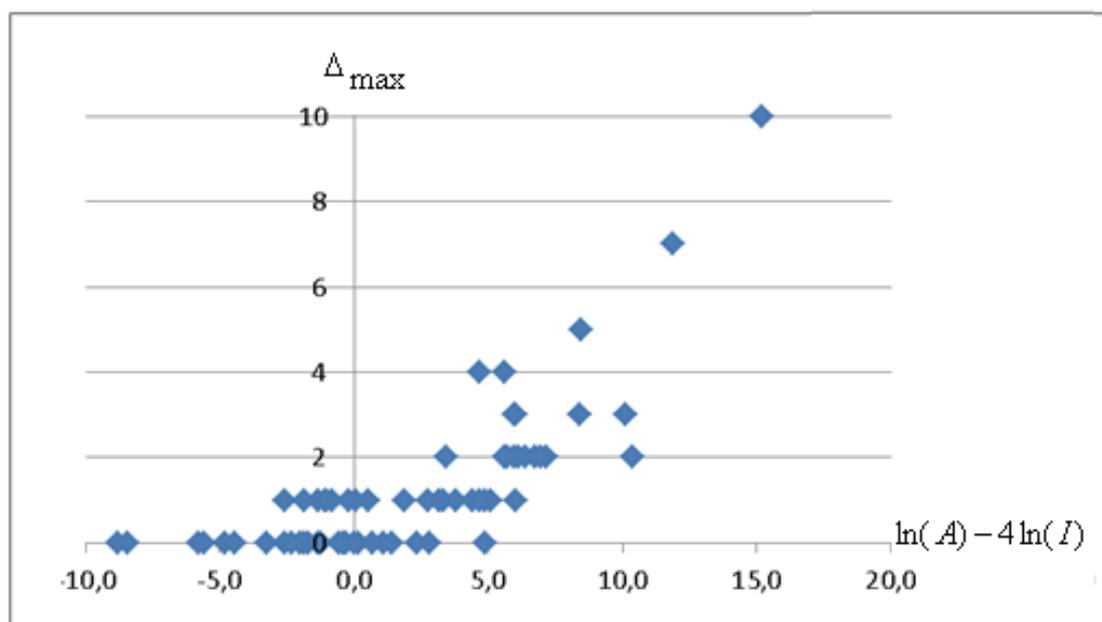


Рисунок 2.8 – График зависимости показателя Δ_{max} от величины $\ln(A) - 4\ln(I)$, полученный для Северо-Востока России

Данный график позволяет сделать следующие выводы: для речных створов с показателями $\ln(A) - 4\ln(I) > 12$ метод экстраполяции гидрографа позволяет получать удовлетворительные прогнозы расходов воды с заблаговременностью не менее 7 суток; для речных створов с показателями $\ln(A) - 4\ln(I) < 5$ метод экстраполяции гидрографа позволяет получать удовлетворительные прогнозы расходов воды с заблаговременностью не более 2 суток.

На рисунке 2.9 представлен график зависимости максимальной заблаговременности удовлетворительных прогнозов Δ_{max} от величины $\ln(A)$, полученный для бассейна Амура.

Данный график позволяет сделать следующие выводы: для речных створов с показателями $\ln(A) > 11$ метод экстраполяции гидрографа позволяет получать удовлетворительные прогнозы расходов воды с заблаговременностью не менее 7 суток; для

речных створов с показателями $\ln(A) < 7$ метод экстраполяции гидрографа позволяет получать удовлетворительные прогнозы расходов воды с заблаговременностью не более суток.

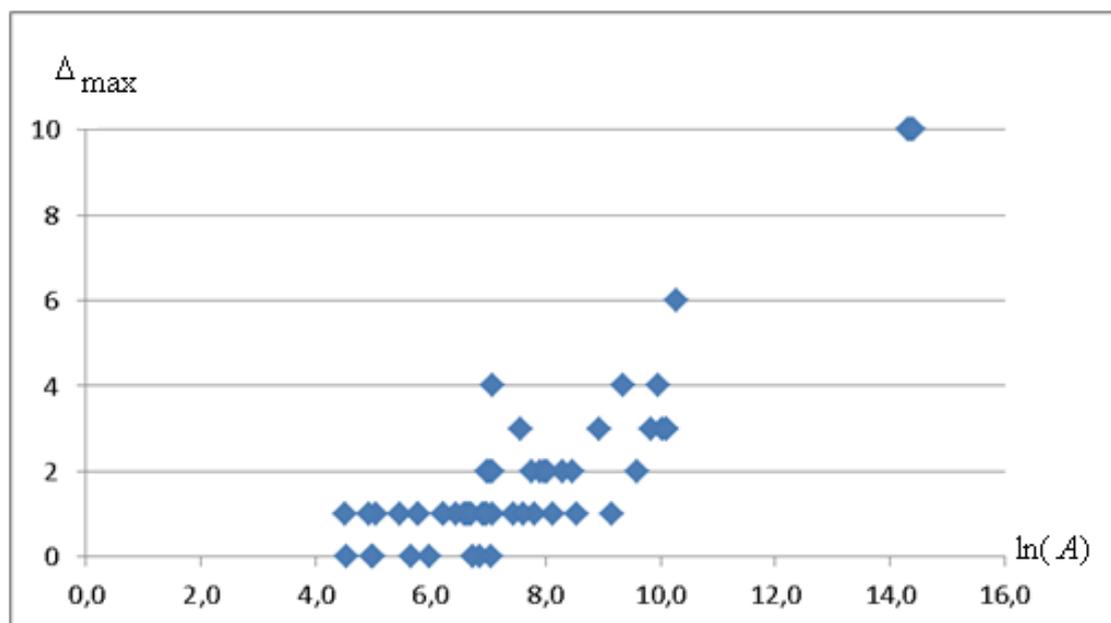


Рисунок 2.9 – График зависимости показателя Δ_{max} от величины $\ln(A)$, полученный для бассейна Амура

Полученные региональные расчетные зависимости позволяют оценить пороговые значения площади и среднего уклона водосбора, за пределами которых возможны удовлетворительные прогнозы с достаточно большой заблаговременностью или, наоборот, только с малой заблаговременностью или невозможны вообще [27, 37].

Примеры использования метода экстраполяции гидрографа для прогнозирования стока рек бассейна Тобола и Дона приведены в следующих разделах.

2.3 Краткосрочное и среднесрочное прогнозирование уровней воды в речных створах бассейна Тобола

Анализируемые речные бассейны

Основанная на методе экстраполяции гидрографа схема получения краткосрочных и среднесрочных прогнозов среднесуточных уровней воды получена для 64 створов, расположенных на р. Тобол и его притоках различных порядков. В таблице 2.6 для этих створов помещены номера гидрологических постов, название реки, пункта и площадь водосбора в км^2 .

Таблица 2.6 – Основные характеристики исследуемых водосборов бассейна Тобола

Номер	Река	Пункт	Площадь	Номер	Река	Пункт	Площадь
12010	Тобол	Звериноголовское	143000	12346	Реж	Ключи	4400
12014	Тобол	Курган	159000	12354	Бобровка	Липовское	101
12017	Тобол	Упорово	177000	12383	Пышма	Богандинское	18600
12018	Тобол	Ялуторовск	241000	12401	Юрмыч	Пышма	935
12022	Тобол	Иевлево	333000	12402	Беляковка	Потаскуева	1700
12040	Уй	Степное	3600	12407	Иска	Велижаны	895
12043	Уй	Троицкий свх.	7660	12412	Тавда	Таборы	74200
12059	Увелька	Красносельское	3620	12413	Тавда	Тавда	81000
12061	Увелька	Карсинский зсх.	5100	12415	Тавда	Н. Тавда	86100
12092	Юргамыш	Пертовское	1950	12417	Лозьва	Першино	6530
12098	Емуртла	Емуртла	3250	12422	Ивдель	Ивдель	2250
12101	Ук	Заводоуковск	917	12430	Сосьва	Денежкино	4390
12115	Исеть	Колюткино	3500	12434	Сосьва	Сосьва	22100
12123	Исеть	Катайск	12800	12435	Сосьва	Гари	23600
12125	Исеть	Шадринск	23400	12476	Вагран	Североуральск	1430
12127	Исеть	Мехонское	52300	12498	Турья	Карпинск	480
12129	Исеть	исетское	56000	12511	Сотрина	Сотрино	403
12136	Решетка	Новоалексеевское	32	12517	Лобва	Лобва	2940
12155	Синара	Верхнеключевское	5000	12528	Карабашка	Карабашка	648
12189	Миасс	Новоандреевка	1830	12554	Тобол	Кокино	172000
12202	Миасс	Каргополье	21400	12606	Бочанка	Заводопетровское	678
12222	Ирюм	Бобылево	778	12611	Сосьва	Морозково	11500
12238	Тура	Санкино	23000	12613	Караталаят	Карталы	659
12239	Тура	Туринск	29000	12614	Кунара	Быкова	380
12240	Тура	туринская сл.	31500	12615	Исеть	Долматово	13100
12244	Тура	Тюмень ЦГМС	58500	12617	Н. Алабуга	Плотниково	456
12248	Тура	Покровское	80200	12620	Суерь	Волосниково	10300
12279	Тагил	Трошкова	7920	12631	Уй	Усть-Уйское	34400
12305	Мугай	Топоркова	1400	12632	Ирбит	Зайково	3320
12315	Ница	Ирбит	17300	12646	Каква	Каквинское	716
12316	Ница	Краснослободское	22000	12651	Пышма	Талица	11200
12320	Нейва	Черемшанка	1860	12652	Нейва	Кировское	5240

Расположение рассматриваемых гидрологических постов и соответствующих им речных створов показано на рисунке 2.10.

Входящие в формулу (2.6) допустимые минимум $minH$ и максимум $maxH$ значений уровня воды определялись по всему имеющемуся для каждого речного створа ряду гидрологических наблюдений.

В целях автоматизации процедуры получения прогнозов и оценки их качества для любого набора речных створов и соответствующих гидрологических постов в отделе речных гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» на языке Python (версия 3.4) разработана компьютерная программа. Она включает следующие этапы:

- считывание и обработка данных, которые могут храниться в одном или в нескольких файлах;
- оценка параметров схемы получения прогноза для каждого речного створа;
- оценка показателей качества получаемых прогнозов;
- создание для каждого створа отдельной директории, в которой сохраняются параметры схемы получения прогноза и показатели его качества;
- создание сводной таблицы с результатами прогнозирования [26].

Следует иметь в виду, что фактическая заблаговременность прогнозов несколько меньше значений $\Delta t = 1, \dots, 10$ на промежуток времени между измерением уровня воды в 20^{00} суток t , необходимым для определения величины $H(t)$, и получением прогноза $\tilde{H}(t+\Delta t)$.

В качестве примера в таблице 2.7 приведены параметры формул (2.5) и (2.6) для получения прогнозов среднесуточных уровней воды в створе на реке Тавда у города Тавда с заблаговременностью $\Delta t = 1, \dots, 10$ суток. Значения коэффициентов $a_1(\Delta t)$, $a_3(\Delta t)$ и $a_4(\Delta t)$ оказались нулевыми вследствие их округления.

Таблица 2.7 – Параметры формул (2.5) и (2.6) получения прогноза среднесуточных уровней воды в створе р. Тавда – г. Тавда

Δt	$a_0(\Delta t)$	$a_1(\Delta t)$	$a_2(\Delta t)$	$a_3(\Delta t)$	$a_4(\Delta t)$	$a_5(\Delta t)$	$b(\Delta t)$	$minH$	$maxH$
1	1,531	0,000	-0,578	0,000	0,000	0,045	0,5	93	883
2	2,010	0,000	-1,091	0,000	0,000	0,076	1,6	93	883
3	2,450	0,000	-1,556	0,000	0,000	0,097	3,0	93	883
4	2,870	0,000	-2,007	0,000	0,000	0,123	4,9	93	883
5	3,274	0,000	-2,450	0,000	0,000	0,154	7,0	93	883
6	3,666	0,000	-2,891	0,000	0,000	0,196	9,5	93	883
7	4,046	0,000	-3,331	0,000	0,000	0,246	12,3	93	883
8	4,401	0,000	-3,745	0,000	0,000	0,296	15,3	93	883
9	4,715	0,000	-4,108	0,000	0,000	0,334	18,7	93	883
10	4,985	0,000	-4,414	0,000	0,000	0,359	22,3	93	883

Верификация прогнозов

Качество краткосрочных и среднесрочных прогнозов среднесуточных уровней воды оценивалось на независимом материале, т.е. по данным, которые не учитывались при определении параметров формул получения прогноза. С этой целью использована следующая процедура скользящего контроля [38].

1. Из 11-летнего периода наблюдений исключался первый год.
2. Данные за оставшиеся 10 лет использовались для оценки параметров схемы получения прогноза.
3. Полученные оценки подставлялись в формулу (2.6) для прогнозирования уровней воды в течение исключенного года.
4. В результате для исключенного года формировался полученный на независимом материале ряд ошибок прогноза за 365 или (для високосного года) за 366 суток.
5. Данные за исключенный первый год возвращались, и исключался следующий год.
6. После повторения описанной процедуры для всех 10 лет формировался ряд ошибок прогноза длиной $N = 3652$, полученный на независимом материале.

В таблице 2.8 для прогнозов среднесуточных уровней воды в створе р. Тавда – г. Тавда с заблаговременностью $\Delta t = 1, \dots, 10$ суток приведены следующие показатели качества прогнозирования:

- S – среднеквадратическая погрешность прогнозов, см;
- σ_{Δ} – среднеквадратическая погрешность инерционных прогнозов, см;
- S/σ_{Δ} – показатель эффективности прогнозов;
- P – оправдываемость прогнозов.

Таблица 2.8 – Показатели качества прогнозов среднесуточных уровней воды в створе р. Тавда – г. Тавда

Δt	S	σ_{Δ}	S/σ_{Δ}	$P, \%$
1	2,8	7,8	0,36	96
2	6,1	15,4	0,40	95
3	10,0	22,8	0,44	94
4	14,0	30,1	0,47	93
5	18,4	37,3	0,49	91
6	22,9	44,3	0,52	90
7	27,5	51,1	0,54	88
8	32,4	57,9	0,56	86
9	37,4	64,4	0,58	85
10	42,6	70,9	0,60	85

Приведенные данные свидетельствуют о том, что для данного речного створа все краткосрочные прогнозы с заблаговременностью 1–5 суток относятся к категории хороших, а среднесрочные прогнозы с заблаговременностью 6–10 суток относятся к категории удовлетворительных.

На рисунке 2.11 для этого створа приведены совмещенные графики хода фактических и спрогнозированных с заблаговременностью $\Delta t = 7$ суток среднесуточных уровней воды в 2018 г. Появившиеся на спрогнозированном гидрографе незначительные всплески обусловлены интенсивным ростом уровней воды перед датой составления прогноза.

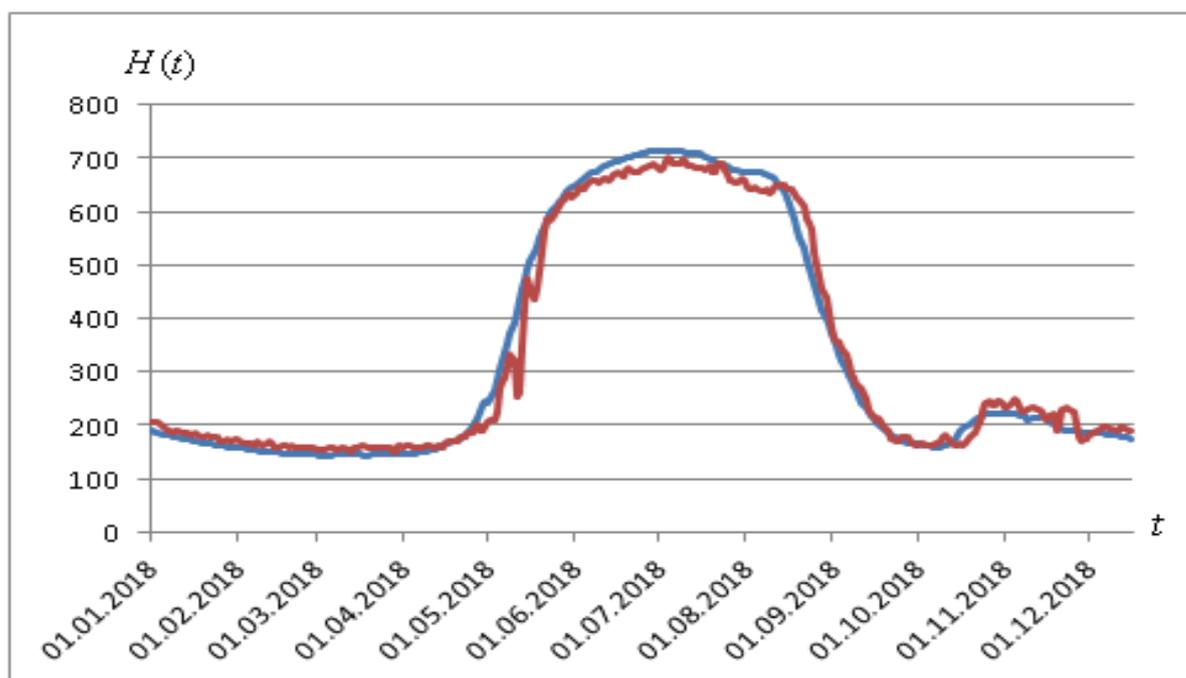


Рисунок 2.11 – Фактический (синим) и спрогнозированный с заблаговременностью $\Delta t = 10$ суток (красным) ход среднесуточных уровней воды в створе р. Тавда – г. Тавда в 2018 г.

Анализ результатов

Для всех случаев, когда соотношение S/σ_{Δ} было меньше 0,80, оправдываемость таких прогнозов P превышала 60%. Следовательно, соотношение S/σ_{Δ} в достаточной степени характеризует удовлетворительность прогнозов уровней воды. В таблице 2.9 помещены значения показателя S/σ_{Δ} прогнозов среднесуточных уровней воды для всех рассматриваемых речных створов бассейна Тобола.

В таблице 2.10 для всех значений заблаговременности Δt от 1 до 10 суток приведено число речных створов M , для которых получены удовлетворительные прогнозы среднесуточных уровней воды с показателями $S/\sigma_{\Delta} < 0,80$ и $P > 60\%$.

Таблица 2.9 – Значения показателя S/σ_{Δ} прогнозов среднесуточных уровней воды при заблаговременности $\Delta t = 1, \dots, 10$ суток

Створ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
12010	0,63	0,68	0,69	0,70	0,70	0,70	0,71	0,73	0,74	0,76
12014	0,62	0,66	0,68	0,70	0,72	0,73	0,75	0,76	0,77	0,78
12017	0,49	0,58	0,65	0,72	0,76	0,80	0,82	0,84	0,85	0,86
12018	0,47	0,54	0,60	0,65	0,69	0,72	0,75	0,77	0,78	0,79
12022	0,42	0,44	0,46	0,49	0,51	0,53	0,55	0,57	0,58	0,60
12040	0,74	0,78	0,82	0,86	0,90	0,91	0,92	0,92	0,92	0,92
12043	0,83	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,90	0,90
12059	0,73	0,78	0,81	0,83	0,85	0,85	0,85	0,84	0,84	0,83
12061	0,91	0,93	0,93	0,92	0,91	0,90	0,89	0,88	0,87	0,86
12092	0,81	0,85	0,87	0,89	0,90	0,91	0,90	0,90	0,90	0,89
12098	0,62	0,74	0,82	0,86	0,88	0,89	0,89	0,88	0,88	0,87
12101	0,84	0,88	0,88	0,87	0,86	0,85	0,84	0,84	0,83	0,83
12115	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,93	0,92	0,92	0,91	0,90
12123	0,82	0,89	0,93	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,93	0,92
12125	0,74	0,81	0,83	0,85	0,86	0,87	0,88	0,89	0,90	0,90
12127	0,53	0,60	0,65	0,70	0,74	0,76	0,78	0,80	0,81	0,82
12129	0,57	0,63	0,67	0,71	0,73	0,76	0,77	0,79	0,80	0,81
12136	0,96	0,96	0,95	0,94	0,94	0,94	0,93	0,92	0,91	0,90
12155	0,80	0,85	0,91	0,93	0,94	0,93	0,92	0,92	0,91	0,90
12189	0,92	0,95	0,96	0,96	0,95	0,95	0,94	0,93	0,93	0,92
12202	0,66	0,73	0,78	0,81	0,83	0,84	0,86	0,87	0,88	0,88
12222	0,74	0,87	0,91	0,91	0,91	0,91	0,90	0,90	0,89	0,88
12238	0,63	0,72	0,77	0,81	0,83	0,85	0,86	0,87	0,87	0,88
12239	0,35	0,44	0,52	0,58	0,63	0,67	0,70	0,72	0,74	0,76
12240	0,30	0,37	0,44	0,50	0,54	0,58	0,61	0,64	0,66	0,67
12244	0,37	0,42	0,46	0,50	0,53	0,56	0,59	0,62	0,64	0,66
12248	0,42	0,45	0,48	0,51	0,53	0,55	0,57	0,59	0,61	0,63
12279	0,81	0,86	0,89	0,90	0,91	0,91	0,91	0,90	0,89	0,89
12305	0,71	0,81	0,86	0,88	0,89	0,90	0,90	0,89	0,89	0,88
12315	0,61	0,70	0,77	0,81	0,84	0,87	0,88	0,88	0,89	0,89
12316	0,43	0,48	0,54	0,58	0,62	0,64	0,67	0,68	0,70	0,71
12320	0,96	0,97	0,97	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,93	0,92
12346	0,84	0,89	0,92	0,93	0,94	0,93	0,93	0,93	0,92	0,92
12354	0,91	0,94	0,95	0,95	0,94	0,93	0,93	0,92	0,91	0,90
12383	0,33	0,37	0,42	0,46	0,49	0,52	0,55	0,57	0,59	0,61
12401	0,74	0,85	0,90	0,92	0,92	0,91	0,91	0,90	0,90	0,89
12402	0,71	0,78	0,83	0,86	0,87	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88
12407	0,75	0,81	0,83	0,84	0,85	0,85	0,86	0,87	0,87	0,87
12412	0,48	0,49	0,50	0,52	0,54	0,57	0,59	0,62	0,64	0,66
12413	0,36	0,40	0,44	0,47	0,49	0,52	0,54	0,56	0,58	0,60
12415	0,42	0,44	0,47	0,50	0,53	0,55	0,57	0,59	0,61	0,62

Продолжение таблицы 2.9

Створ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
12417	0,73	0,84	0,89	0,91	0,92	0,91	0,91	0,91	0,90	0,90
12422	0,86	0,93	0,94	0,94	0,94	0,94	0,93	0,92	0,91	0,91
12430	0,77	0,85	0,89	0,90	0,90	0,90	0,90	0,89	0,88	0,87
12434	0,35	0,44	0,53	0,60	0,66	0,71	0,74	0,77	0,80	0,81
12435	0,37	0,43	0,49	0,55	0,60	0,64	0,68	0,70	0,72	0,74
12476	0,90	0,94	0,95	0,95	0,96	0,95	0,95	0,94	0,94	0,93
12498	0,91	0,94	0,95	0,94	0,93	0,92	0,91	0,91	0,90	0,89
12511	0,66	0,74	0,79	0,83	0,86	0,88	0,88	0,89	0,89	0,89
12517	0,79	0,87	0,90	0,91	0,92	0,91	0,91	0,90	0,90	0,89
12528	0,84	0,89	0,91	0,92	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,92
12554	0,55	0,60	0,64	0,67	0,70	0,73	0,74	0,75	0,76	0,77
12606	0,68	0,78	0,84	0,87	0,90	0,91	0,92	0,93	0,93	0,93
12611	0,50	0,61	0,69	0,75	0,79	0,83	0,85	0,87	0,88	0,89
12613	0,91	0,90	0,89	0,88	0,88	0,88	0,87	0,87	0,86	0,85
12614	0,87	0,91	0,92	0,93	0,93	0,93	0,92	0,91	0,91	0,90
12615	0,87	0,90	0,92	0,94	0,95	0,95	0,94	0,94	0,93	0,93
12617	0,92	0,95	0,95	0,95	0,94	0,93	0,93	0,92	0,91	0,91
12620	0,71	0,84	0,88	0,89	0,89	0,89	0,88	0,87	0,87	0,86
12631	0,67	0,72	0,75	0,77	0,79	0,81	0,82	0,83	0,84	0,85
12632	0,72	0,81	0,87	0,91	0,92	0,92	0,92	0,91	0,90	0,90
12646	0,91	0,95	0,95	0,94	0,93	0,92	0,92	0,91	0,90	0,90
12651	0,72	0,76	0,80	0,83	0,86	0,87	0,88	0,88	0,89	0,89
12652	0,95	0,96	0,96	0,96	0,95	0,94	0,93	0,93	0,92	0,91

Таблица 2.10 – Число речных створов с удовлетворительными прогнозами среднесуточных уровней воды различной заблаговременности

Δt	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
M	42	31	25	21	21	19	18	17	17	15

Таким образом, удовлетворительные прогнозы среднесуточных уровней воды с заблаговременностью 1 сутки получаются для 65,6%, а с максимальной заблаговременностью 10 суток – для 23,4% рассматриваемых речных створов бассейна Тобола.

Как и следовало ожидать, метод экстраполяции гидрографа оказался неприменимым для рек с малой площадью водосбора, сток которых быстро реагирует на таяние снега или на выпадение жидких осадков [101, 122, 166, 168]. Для рек с большой площадью водосбора ход среднесуточных уровней имеет плавный характер, как на рисунке 2.11, поэтому метод экстраполяции гидрографа позволяет давать удовлетворительные прогнозы с достаточно большой заблаговременностью.

На рисунке 2.12 представлена зависимость максимальной заблаговременности удовлетворительных прогнозов Δ_{max} от логарифма площади водосбора $\ln(A)$. Равенство $\Delta_{max}(\Delta t)$ нулю означает, что для данного речного створа прогнозы уровней воды оказались неудовлетворительными даже при заблаговременности 1 сутки.

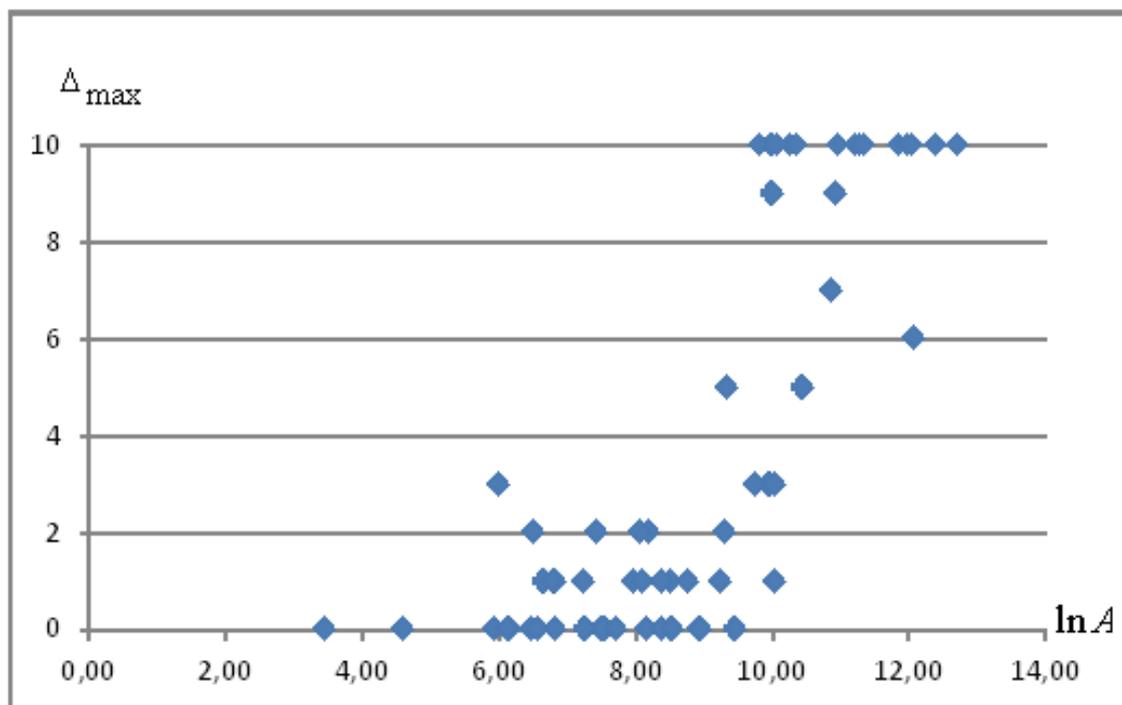


Рисунок 2.12 – Зависимость показателя Δ_{max} от $\ln A$ для бассейна реки Тобол

Данная зависимость показывает, что с ростом площади водосбора максимальная заблаговременность удовлетворительных прогнозов в целом возрастает. Как правило, метод экстраполяции гидрографа не позволяет удовлетворительно прогнозировать среднесуточные уровни воды в речных створах с площадью водосбора менее 5 000 км². Для речных створов бассейна Тобола с площадью водосбора более 50 000 км² данный метод дает удовлетворительные прогнозы с заблаговременностью не менее 5 суток.

2.4 Краткосрочное и среднесрочное прогнозирование стока рек бассейна Дона и притока воды в Цимлянское водохранилище

Постановка задачи и объект исследования

Основанная на методе экстраполяции гидрографа схема получения краткосрочных и среднесрочных прогнозов среднесуточных расходов и уровней воды получена для 18 створов, расположенных на реке Дон и его притоках различных порядков. В таблице 2.11 для

этих створов помещены номера гидрологических постов, значения площади водосбора A , км², длины реки L , км, и среднего уклона реки I , ‰.

Таблица 2.11 – Основные характеристики исследуемых водосборов бассейна Дона

Индекс	Река	Пост	A , км ²	L , км	I , ‰
78004	Дон	г. Задонск	31100	302	0,05
78011	Дон	г. Лиски	69500	588	0,08
78016	Дон	х. Хованский	169000	1066	0,16
78017	Дон	г. Серафимович	204000	1086	0,17
78021	Дон	ст. Новогригорьевская	208000	1212	0,22
78054	Сосна	г. Елец	16300	259	0,24
78082	Воронеж	г. Липецк 2	15300	156	0,41
78087	Воронеж	с. Чертовицкое	21000	301	2,07
78111	Битюг	г. Бобров	7340	290	0,29
78138	Хопер	г. Балашов	14300	384	0,13
78141	Хопер	г. Поворино	19100	542	0,21
78142	Хопер	г. Новохоперск	34800	656	0,32
78146	Хопер	х. Барминский	57300	847	0,90
78164	Ворона	г. Уварово	9890	319	0,56
78202	Медведица	ст. Арчединская	33700	679	0,18
78334	Сев. Донец	г. Белая Калитва	80900	934	1,81
78504	Калитва	х. Погорелое	10500	288	0,28
78623	Сал	х. Балабинка	21000	730	3,48

Расположение рассматриваемых гидрологических постов и соответствующих им речных створов показано на рисунке 2.13.

Решение поставленной задачи основано на данных ежедневных гидрологических наблюдений в указанных речных створах в течение периода с 2010 по 2020 год. С одной стороны, данный период представляется достаточно продолжительным, так как он позволяет использовать ряд из 2922 ежедневных значений среднесуточных расходов и уровней воды для разработки методик их прогнозирования в каждом речном створе. С другой стороны, данный период можно считать однородным по условиям формирования речного стока, включая климат и характер антропогенной нагрузки на территорию бассейна Дона [17, 44, 54, 56, 63].

Прогнозирование среднесуточных расходов воды

При получении прогноза среднесуточных расходов воды использованы формулы (2.3) и (2.4) при $k = 5$. При заданной заблаговременности прогноза $\Delta t = 1, \dots, 10$ параметры $a_0(\Delta t), a_1(\Delta t), \dots, a_5(\Delta t)$ и $b(\Delta t)$ формулы (2.3) определены методом наименьших квадратов по ряду ежедневных гидрологических наблюдений за период с 01.01.2010 по 31.12.2020 гг. С целью определения входящих в формулу (2.4) значений $minQ$ и $maxQ$ для каждого створа анализировались ряды годовых минимумов и годовых максимумов среднесуточных расходов воды за период с 1985 по 2018 гг. с использованием методов математической статистики, изложенных в работе [119]. После успешной проверки статистической однородности и отсутствия автокорреляции для каждого ряда были получены оценки параметров трехпараметрического гамма-распределения.

Допустимый для прогноза минимум $minQ$ определялся, как значение годового минимума среднесуточного расхода воды $Q_{min}(99\%)$, соответствующее вероятности превышения (обеспеченности) 99% и округленное до целой величины в меньшую сторону.

Допустимый для прогноза максимум расхода воды $maxQ$ определялся, как значение годового максимума среднесуточного расхода воды $Q_{max}(1\%)$, соответствующее обеспеченности 1% и округленное до целой величины в большую сторону.

Подобная оценка величин $minQ$ и $maxQ$ гарантирует, что в течение десяти последующих лет использования предлагаемой методики прогнозирования более низкие или более высокие значения расходов воды могут появиться с вероятностью, не превышающей 10%.

В таблице 2.12 для минимальных и максимальных расходов воды помещены оценки среднего значения \bar{Q} , коэффициента вариации Cv , отношения коэффициента асимметрии к коэффициенту вариации Cs / Cv , а также округленного минимального расхода $Q_{min}(99\%)$ обеспеченности 99% и округленного максимального расхода $Q_{max}(1\%)$ обеспеченности 1%.

Для получения оценок качества прогнозов на независимом материале использована описанная в предыдущем разделе процедура скользящего контроля. Анализ этих показателей приводит к следующим выводам.

1. Оправдываемость P всех методик достаточно высокая, закономерно снижается с ростом заблаговременности прогноза и варьирует в пределах от 83 до 98%.
2. Максимальная заблаговременность удовлетворительных по показателям S/σ_{Δ} прогнозов варьирует от 2 до 10 суток и в среднем превышает 6 суток.

В таблице 2.13 помещены значения показателя S/σ_{Δ} для прогнозов среднесуточных расходов воды во всех рассматриваемых речных створах.

Таблица 2.12 – Статистические оценки рядов минимальных и максимальных расходов воды за период с 1985 по 2018 гг.

Река	Пост	\bar{Q}_{\min}	Cv_{\min}	$(\frac{Cs}{Cv})_{\min}$	$Q_{\min}(99\%)$	\bar{Q}_{\max}	Cv_{\max}	$(\frac{Cs}{Cv})_{\max}$	$Q_{\max}(1\%)$
Дон	г. Задонск	67,1	0,23	4	39	1123	0,69	1	3234
Дон	г. Лиски	115	0,18	2,5	70	1263	0,73	2	4420
Дон	х. Хованский	187	0,27	3,5	93	1123	0,55	3	3560
Дон	г. Серафимович	228	0,21	4,5	148	1745	0,57	3,5	5531
Дон	ст. Новогригорьевская	231	0,24	3,5	133	1919	0,48	2,5	5110
Сосна	г. Елец	27,0	0,34	1	6	704	0,68	1	2027
Воронеж	г. Липецк 2	18,1	0,26	1	8	302	0,64	1,5	932
Воронеж	с. Чертовицкое	22,2	0,31	1	9	326	0,67	1	939
Битюг	г. Бобров	4,84	0,32	3	2	134	0,78	1,5	460
Хопер	г. Балашов	15,8	0,24	1	6	364	0,55	2,5	1085
Хопер	г. Поворино	24,9	0,27	2,5	12	429	0,62	4	1450
Хопер	г. Новохоперск	39,2	0,28	2	17	629	0,63	2,5	2200
Хопер	х. Барминский	52,6	0,24	1,5	27	524	0,38	1	1064
Ворона	г. Уварово	13,3	0,42	6	5	252	0,64	2,5	803
Медведица	ст. Арчединская	17,2	0,24	1,5	8	411	0,84	4,5	1747
Сев. Донец	г. Белая Калитва	47,4	0,33	4,5	23	472	0,57	2	1364
Калитва	х. Погорелое	2,68	0,42	2	1	139	0,88	1,5	529
Сал	х. Балабинка	5,26	0,24	1	2	43,0	0,93	2,5	200

Таблица 2.13 – Значения показателя S/σ_{Δ} для прогнозов расходов воды при заблаговременности $\Delta t = 1, \dots, 10$ суток

Река	Пост	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Дон	г. Задонск	0,61	0,75	0,80	–	–	–	–	–	–	–
Дон	г. Лиски	0,53	0,65	0,72	0,76	0,79	–	–	–	–	–
Дон	х. Хованский	0,74	0,72	0,74	0,77	0,79	0,80	–	–	–	–
Дон	г. Серафимович	0,58	0,58	0,59	0,61	0,64	0,66	0,69	0,71	0,72	0,74
Дон	ст. Новогригорьевская	0,72	0,74	0,75	0,75	0,76	0,77	0,78	0,79	0,79	0,79
Сосна	г. Елец	0,66	0,79	–	–	–	–	–	–	–	–
Воронеж	г. Липецк 2	0,58	0,67	0,73	0,79	0,80	–	–	–	–	–
Воронеж	с. Чертовицкое	0,47	0,61	0,67	0,74	0,78	0,80	–	–	–	–
Битюг	г. Бобров	0,46	0,55	0,64	0,74	0,79	–	–	–	–	–
Хопер	г. Балашов	0,49	0,55	0,62	0,67	0,71	0,73	0,75	0,76	0,77	0,78
Хопер	г. Поворино	0,43	0,48	0,56	0,63	0,68	0,71	0,74	0,76	0,77	0,79
Хопер	г. Новохоперск	0,57	0,58	0,59	0,60	0,62	0,64	0,66	0,67	0,69	0,70
Хопер	х. Барминский	0,48	0,55	0,61	0,67	0,72	0,74	0,76	0,78	0,79	0,80
Ворона	г. Уварово	0,38	0,51	0,60	0,66	0,71	0,74	0,76	0,79	–	–
Медведица	ст. Арчединская	0,53	0,61	0,67	0,72	0,76	0,79	–	–	–	–
Сев. Донец	г. Белая Калитва	0,75	0,79	–	–	–	–	–	–	–	–
Калитва	х. Погорелое	0,61	0,68	0,74	0,78	–	–	–	–	–	–
Сал	х. Балабинка	0,46	0,55	0,64	0,71	0,76	0,79	0,80	–	–	–

На рисунке 2.14 для этого створа р. Северский Донец – г. Белая Калитва приведены совмещенные графики хода фактических и спрогнозированных с заблаговременностью $\Delta t = 3$ суток среднесуточных расходов воды в 2018 г.

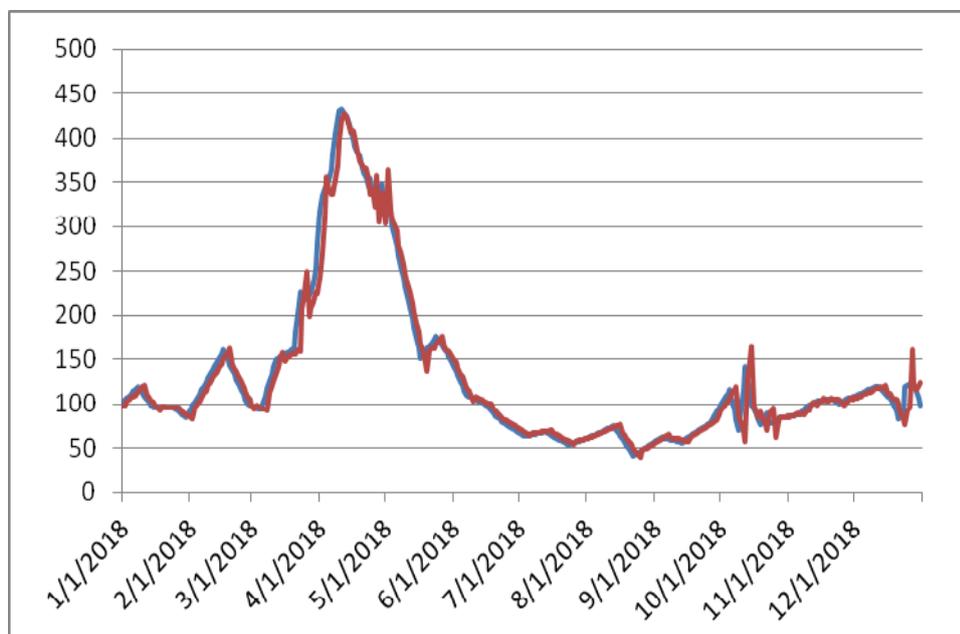


Рисунок 2.14 – Фактические (синим) и спрогнозированные с заблаговременностью $\Delta t = 3$ суток (красным) гидрографы в створе р. Северский Донец – г. Белая Калитва в 2018 г.

Прогнозирование среднесуточных уровней воды

Связь между расходами и уровнями воды может иметь неоднозначный характер, благодаря изменениям формы русла и состояния водной растительности, наличию или отсутствию ледовых явлений и смене фаз водного режима [72, 83, 167]. Это наглядно демонстрирует рисунок 2.15, на котором представлено соотношение между среднесуточными расходами и уровнями воды в створе р. Дон – ст. Новогригорьевская по данным за период с 2010 по 2020 гг.

В связи с указанным обстоятельством методика ежедневного прогнозирования среднесуточных уровней воды разработана на основе метода экстраполяции гидрографа в качестве самостоятельной.

При получении прогноза среднесуточных уровней воды использованы формулы (2.5) и (2.6) при $k = 5$. При заданной заблаговременности прогноза $\Delta t = 1, \dots, 10$ параметры $a_0(\Delta t)$, $a_1(\Delta t), \dots, a_5(\Delta t)$ и $b(\Delta t)$ формулы (2.5) определены методом наименьших квадратов по ряду ежедневных гидрологических наблюдений за период с 01.01.2010 по 31.12.2020 гг.

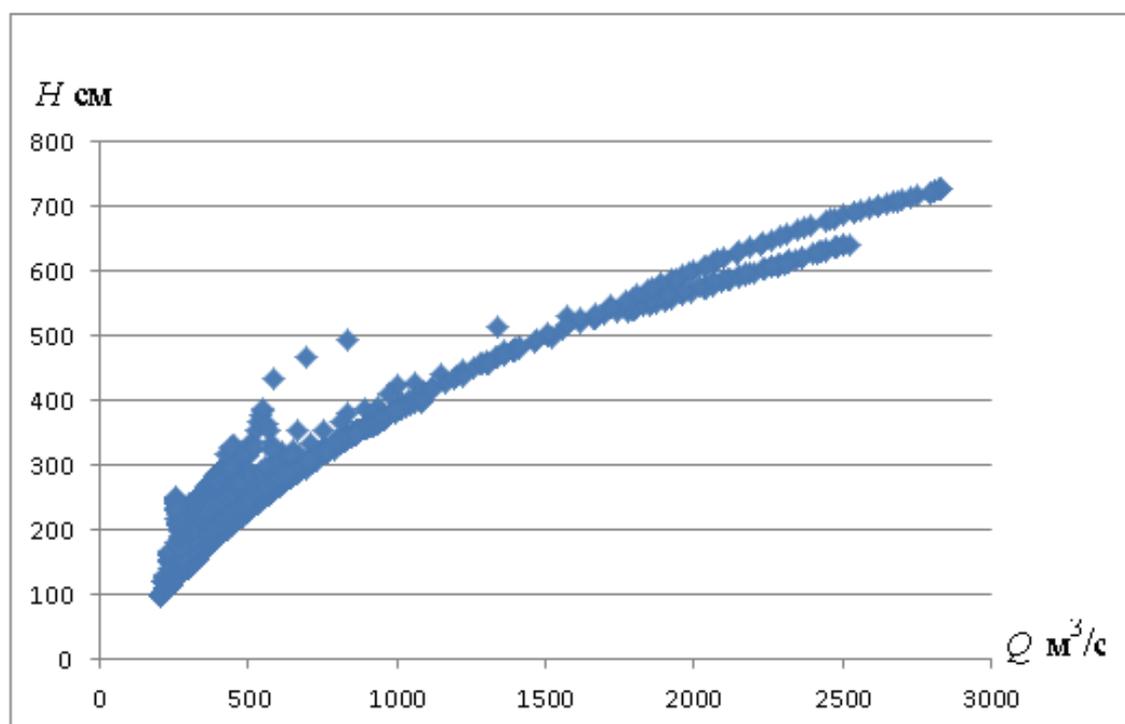


Рисунок 2.15 – Соотношение между среднесуточными расходами и уровнями воды в створе р. Дон – ст. Новогригорьевская по данным за период с 2011 по 2018 гг.

Распределение вероятностей среднесуточных уровней воды отличается от трехпараметрического гамма-распределения. Для некоторых речных створов часто наблюдаются отрицательные значения уровней. В связи с этим для каждого створа в качестве параметра $minH$ формулы (2.6) принимался наименьший член ряда годовых минимумов среднесуточного уровня воды за период с 1985 по 2018 гг., что соответствует их обеспеченности 97%. В качестве параметра $maxH$ формулы (2.6) принимался наибольший член ряда годовых максимумов среднесуточного уровня воды за период с 1985 по 2018 гг., что соответствует их обеспеченности 3%.

Для получения оценок качества прогнозов на независимом материале использована описанная в предыдущем разделе процедура скользящего контроля. Анализ этих показателей приводит к следующим выводам.

1. Оправдываемость P всех методик достаточно высокая, в целом снижается с ростом заблаговременности прогноза и варьирует в пределах от 75 до 98%.
2. Максимальная заблаговременность удовлетворительных по показателям S/σ_{Δ} прогнозов варьирует от 1 до 10 суток и в среднем превышает 5 суток.

В таблице 2.14 помещены значения показателя S/σ_{Δ} для прогнозов среднесуточных уровней воды во всех рассматриваемых речных створах.

Таблица 2.14 – Значения показателя S/σ_{Δ} для прогнозов уровней воды 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	–	–	–

В целом, качество прогнозов уровней несколько ниже качества прогнозов расходов воды. Это обусловлено тем, что благодаря более плавному ходу среднесуточных уровней в течение каждого года они прогнозируются лучше, чем расходы воды. Однако более плавный ход уровней приводит к малым значениям погрешности инерционного прогноза σ_{Δ} , в результате чего показатели S/σ_{Δ} становятся больше, а обеспеченности прогноза P – меньше.

Прогнозирование притока воды в Цимлянское водохранилище

Для получения краткосрочных и среднесрочных прогнозов расходов ежедневного притока воды в Цимлянское водохранилище также был использован метод экстраполяции гидрографа. Использованы формулы (2.3) и (2.4) при $k = 5$. При заданной заблаговременности прогноза $\Delta t = 1, \dots, 10$ параметры $a_0(\Delta t), a_1(\Delta t), \dots, a_5(\Delta t)$ и $b(\Delta t)$ формулы (2.3) определены методом наименьших квадратов по ряду ежедневных гидрологических наблюдений за период с 01.01.2010 по 31.12.2020 гг. С целью определения параметров $\min Q$ и $\max Q$ формулы (2.4) анализировались ряды годовых минимумов и годовых максимумов среднесуточного притока воды в водохранилище за период с 1985 по 2020 гг. с использованием стандартных методов математической статистики [119]. После успешной проверки статистической однородности и отсутствия автокорреляции для каждого

ряда были получены оценки параметров трехпараметрического гамма-распределения. Допустимый для прогноза минимум $minQ$ определялся, как значение среднесуточного расхода воды $Q_{min}(99\%)$, соответствующее вероятности превышения (обеспеченности) 99% и округленное до целой величины в меньшую сторону. Допустимый для прогноза максимум расхода воды $maxQ$ определялся, как значение среднесуточного расхода воды $Q_{max}(1\%)$, соответствующее обеспеченности 1% и округленное до целой величины в большую сторону [37].

Для всех значений заблаговременности прогноза $\Delta t = 1, \dots, 10$ суток параметры формул получения прогноза (2.3) и (2.4) помещены в таблицу 2.15.

Таблица 2.15 – Параметры формул (2.3) и (2.4) получения прогноза ежедневных расходов притока воды в Цимлянское водохранилище

Δt	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	b	$minQ$	$maxQ$
1	1,663	-0,425	-0,309	0,058	0,018	-0,007	1,28	200	2820
2	2,342	-1,013	-0,470	0,095	0,096	-0,057	3,47	200	2820
3	2,882	-1,464	-0,635	0,225	0,013	-0,035	6,51	200	2820
4	3,331	-1,855	-0,693	0,147	0,151	-0,103	10,32	200	2820
5	3,687	-2,096	-0,945	0,262	0,282	-0,221	14,86	200	2820
6	4,039	-2,492	-0,978	0,362	0,372	-0,345	20,01	200	2820
7	4,229	-2,666	-1,028	0,417	0,476	-0,481	25,80	200	2820
8	4,372	-2,793	-1,052	0,505	0,447	-0,545	31,90	200	2820
9	4,483	-2,871	-1,039	0,448	0,542	-0,641	38,34	200	2820
10	4,590	-2,899	-1,167	0,501	0,639	-0,757	45,08	200	2820

Для получения оценок качества прогнозов на независимом материале использована описанная в предыдущем разделе процедура скользящего контроля. Эти оценки помещены в таблицу 2.16.

Таблица 2.16 – Показатели качества прогнозов ежедневного притока воды в Цимлянское водохранилище

Δt	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
S	18,6	38,3	70,7	97,3	115	143	167	192	215	236
S/σ_{Δ}	0,48	0,54	0,60	0,64	0,67	0,69	0,71	0,73	0,74	0,75
$P, \%$	91	89	86	87	86	84	85	84	83	82

Все значения S/σ_{Δ} не превышают 0,80, а оправдываемость P превышает 60%. Следовательно, согласно [91] данная методика может быть признана удовлетворительной.

С точки зрения оптимизации работы Цимлянского гидроузла более важным является ежедневное прогнозирование притока воды за 5 и, тем более, за 10 суток с соответствующей заблаговременностью 5 и 10 суток [6].

Краткосрочный прогноз объема притока в водохранилище за пять суток предлагается выпускать ежедневно одновременно с получением по формулам (2.3) и (2.4) прогнозов среднесуточных расходов притока $\tilde{Q}(t+1), \dots, \tilde{Q}(t+5)$.

Прогноз объема притока воды в Цимлянское водохранилище $\tilde{W}_5(t)$ за последующие пять суток после даты t его выпуска определяется формулой:

$$\tilde{W}_5(t) = 0,0864 \sum_{i=1}^5 \tilde{Q}(t+i). \quad (2.7)$$

Среднесрочный прогноз объема притока в водохранилище за десять суток предлагается выпускать ежедневно одновременно с получением по формулам (2.3) и (2.4) прогнозов среднесуточных расходов притока $\tilde{Q}(t+1), \dots, \tilde{Q}(t+10)$. Измеряемый также в миллионах м³ прогноз $\tilde{W}_{10}(t)$ объема притока воды в Цимлянское водохранилище за последующие десять суток после даты t его выпуска определяется формулой:

$$\tilde{W}_{10}(t) = 0,0864 \sum_{i=1}^{10} \tilde{Q}(t+i). \quad (2.8)$$

Для получения оценок качества прогнозов на независимом материале использована описанная выше процедура скользящего контроля [38]. Эти оценки представлены в таблице 2.17.

Таблица 2.17 – Показатели качества прогнозов объемов притока в Цимлянское водохранилище за 5 и 10 суток

Интервал	S , млн м ³	σ_{Δ} , млн м ³	S/σ_{Δ}	P
5 суток	26,1	69,6	0,38	94%
10 суток	102	245	0,42	92%

Таким образом, предлагаемые методики прогнозирования объемов притока в Цимлянское водохранилище за пять и за десять суток могут быть отнесены к категории хороших [37].

Выводы из главы 2

1. Простота метода экстраполяции гидрографа позволяет использовать его в рамках автоматизированной системы подготовки и выпуска прогнозов среднесуточных расходов воды для 2098 речных створов и среднесуточных уровней воды для 2776 створов, расположенных практически по всей территории России. Заблаговременность прогнозов составляет от 1 до 10 суток. Число речных створов с хорошими и удовлетворительными прогнозами с заблаговременностью 1 сутки равно 1000 для расходов и 1262 для уровней воды. Число речных створов с хорошими и удовлетворительными прогнозами с заблаговременностью 10 суток равно 240 для расходов и 223 для уровней воды.

2. Метод дает наилучшие результаты для достаточно крупных равнинных рек с плавными очертаниями гидрографа. В целях оценки возможностей его применения для территории России выделено 18 районов, для каждого из которых получена достаточно тесная зависимость максимальной заблаговременности хороших и удовлетворительных прогнозов от площади и среднего уклона водосбора.

3. Подробности применения метода экстраполяции гидрографа продемонстрированы на примере предлагаемых методик краткосрочного и среднесрочного прогнозирования стока рек бассейнов Тобола и Дона, а также суточного, пятидневного и декадного притока воды в Цимлянское водохранилище.

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

3.1 Расчет среднесуточных расходов воды на реках России с использованием модели формирования стока HBV-96

Постановка задачи и исходная информация

В 2022 г. в отделе речных гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» разработана автоматизированная система подготовки и ежедневного выпуска краткосрочных прогнозов среднесуточных расходов воды с использованием концептуальной модели формирования речного стока HBV-96 и оперативной системы численного прогнозирования погоды COSMO-RU (подробно описана в главе 6).

В качестве первого приближения разработана использующая модель HBV-96 методика расчета среднесуточных расходов воды, в которой используются фактические значения метеорологических характеристик (осадков, приземной температуры воздуха), а не их прогнозы соответствующей заблаговременности, как это должно быть при прогнозировании речного стока.

В качестве исходной информации при разработке и верификации излагаемой методики расчета использованы данные ежедневных наблюдений за расходами воды, атмосферными осадками и приземной температурой воздуха на сети гидрологических постов и метеорологических станций в течение периода с 01.01.2010 по 31.12.2020 гг.

Данные о среднесуточных расходах воды получены по результатам ежедневных наблюдений на 590 гидрологических постах, расположенных в замыкающих створах каждого речного бассейна. Расположение этих постов показано на рисунке 3.1.

Площадь речных бассейнов варьирует от 1 км² до 2 850 000 км² (Обь) и в среднем равна 71 652 км². Границы речных бассейнов были рассчитаны с использованием геоинформационного программного обеспечения и цифровой модели рельефа (ЦМР), 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. При определении суточного слоя осадков и среднесуточной температуры воздуха на основе срочных наблюдений на каждой метеорологической станции учитывался часовой пояс, в котором она находится. При получении осредненных по территории речного бассейна осадков и температуры воздуха учитывалось расположение относящихся к этому речному

бассейну метеорологических станций. Высота местности не учитывалась, так как для предгорных и горных водосборов имелось не более одной метеостанции.

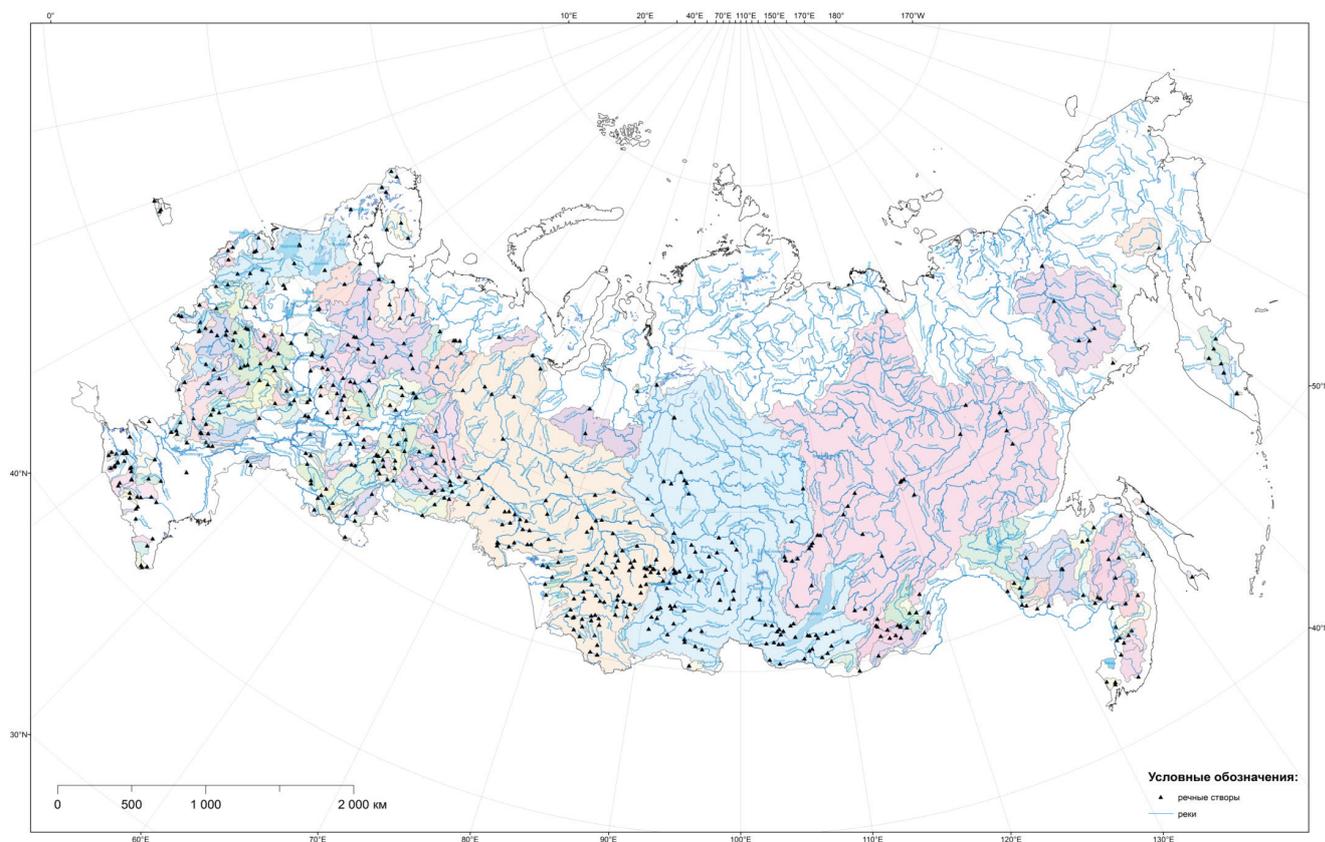


Рисунок 3.1 – Расположение использованных гидрологических постов

Модель формирования речного стока HBV-96

Концептуальная водно-балансовая модель формирования речного стока HBV-96 разработана в Гидрометеорологическом институте Швеции [128, 183]. Теоретические основы модели заложены С. Бергстрёмом в работе [127]. В настоящее время она используется в оперативной практике гидрологических прогнозов более чем в 40 странах мира с различными природными условиями [185]. В частности, модель способна описывать процессы формирования и таяния снежного покрова, поэтому она успешно применяется в расчетах и прогнозах расходов воды в странах с умеренным климатом [108, 150, 197].

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.

Модель состоит из блоков, описывающих основные процессы формирования речного стока: динамику снежного покрова; транспирацию и испарение с поверхности водосбора; динамику почвенной влаги; формирование поверхностного, почвенного и грунтового

склонового стока; поступление стока с различных частей водосбора и трансформацию стока в русловой сети. Модель позволяет учитывать влияние озер и водохранилищ. Для горных водосборов расчет динамики снежного покрова и почвенной влаги производится для каждой высотной зоны [128].

В модели фигурируют 12 параметров, подлежащих оптимизации по данным гидрометеорологических наблюдений.

Блок, описывающий динамику снежного покрова, в качестве параметров содержит:

- температуру, при которой осадки выпадают в виде снега;
- коэффициент стаивания;
- водоудерживающую способность снега;
- температуру, при которой удерживаемая снегом вода замерзает.

Блок, описывающий испарение и транспирацию, в качестве параметра содержит их предельное значение в долях от испаряемости в зависимости от времени года, температуры воздуха, высоты местности, наличия или отсутствия осадков.

Блок, описывающий динамику почвенной влаги, в качестве параметров содержит:

- максимальную влагоемкость почвы;
- максимальное значение инфильтрации;
- параметр пространственного распределения емкости верхнего и нижнего слоя почвы;
- коэффициент истощения верхнего и нижнего слоя почвы.

Блок, определяющий расход воды в замыкающем створе, содержит параметр функции бассейновой трансформации [128, 183].

Оптимизация параметров модели

Для нахождения оптимальных значений параметров модели использована обучающая выборка, образованная данными гидрологических и метеорологических наблюдений за период с 01.01.2010 по 31.12.2016 гг. Данный период можно считать репрезентативным, так как практически для всех рассматриваемых рек в течение этого периода наблюдались многоводные, маловодные и средние по водности годы. Оптимизация параметров модели HBV-96 выполнена с помощью алгоритма перемешивания и эволюции комплексов (выборок) значений параметров SCE-UA [151]. Алгоритм включает следующие этапы.

1. Случайным образом генерируется выборка значений векторов, образованных оцениваемыми параметрами.

2. Производится ранжирование членов выборки по значению целевой функции, т.е. суммы квадратов ошибок расчета.

3. Выполняется процедура разбиения выборки на ряд «комплексов» (перетасовка векторов) и последующая эволюция каждого из комплексов (изменение каждого из векторов по заданному алгоритму).

4. Производится обратное объединение измененных комплексов (после эволюции значений векторов) в единую выборку.

5. Повторяется процедура ранжирования на основе оценки значений целевой функции, перетасовка, разбиение на комплексы, эволюция комплексов.

Цикл процедур повторяется до тех пор, пока не выполняется изначально заданное условие сходимости. Изначальная случайная перетасовка пространства параметров создает предпосылку для поиска глобального оптимума целевой функции без привязки к заранее заданным начальным значениям параметров [151].

Использовано программное обеспечение PEST, которое позволяет производить оптимизацию параметров широкого круга моделей, в том числе при помощи рассматриваемого алгоритма оптимизации [147]. Скорость выполнения оптимизации с помощью данного алгоритма и используемых программных средств составила от 20 до 30 минут при размере обучающей выборки $N = 2557$.

Коррекция моделируемых расходов воды

В целях повышения точности модельных расчетов применен описанный в главе 1 метод коррекции, который учитывает автокорреляцию их ошибок и широко используемый в мировой практике гидрологических прогнозов [21, 79, 121, 137]. Идея метода состоит в том, что если к дате t получения расчетного значения $\mathcal{Q}(t)$ уже известные результаты расчета за предыдущие сутки демонстрируют завышение или наоборот занижение фактических значений среднесуточного расхода воды $Q(t)$, то расчет для этой даты целесообразно уменьшить или соответственно увеличить. Обоснованность такого приема возрастает, если ошибки предшествующих расчетов образуют серию отрицательных или положительных значений, что и было отмечено для подавляющего большинства рассматриваемых речных бассейнов.

Скорректированные расчетные значения среднесуточных расходов воды определяются формулой:

$$\tilde{Q}(t) = \mathcal{Q}(t) + \sum_{i=1}^k a_i [Q(t-i) - \mathcal{Q}(t-i)] + b. \quad (3.1)$$

Дополнительный свободный член b в формуле (3.1) обеспечивает отсутствие систематической ошибки расчета.

При любом заданном значении k оптимальные значения параметров a_1, \dots, a_k и b формулы (3.1) оценивались методом наименьших квадратов, который обеспечивает минимум суммы $\sum_{t=1}^N [Q(t) - \tilde{Q}(t)]^2$ квадратов ошибок расчета за весь предназначенный для калибровки период с 01.01.2010 по 31.12.2016 гг. продолжительностью $N = 2557$ суток.

Оптимальное число k определялось с помощью критерия Акаике, в котором учитывается не только погрешность расчета для калибровочного периода, но и соотношение между числом $k + 1$ оцениваемых параметров и его длиной N [117]. Сравнение полученных таким образом оптимальных значений k для всех 590 речных бассейнов позволило в целях упрощения методики расчета принять для них единое значение $k = 5$.

Использование концептуальной модели формирования речного стока HBV-96 с последующей коррекцией модельных расчетов описанным выше способом составляют основу предлагаемой методики получения среднесуточных расходов воды.

Программное обеспечение методики

Реализация методики расчета среднесуточного расхода воды выполнена на языке программирования Python (версия 3.4) с привлечением программных модулей, таких как Numpy, Pandas, Arcgisscripting, SciPy, Matplotlib. Программное обеспечение включает в себя ряд программ, реализующих следующие расчетные этапы подготовки и информации и выполнения расчетов:

- подготовка исходных гидрометеорологических данных,
- модель формирования стока,
- оптимизация параметров модели,
- коррекция расчетов.

Программа подготовки исходных гидрометеорологических данных основана на использовании модулей и алгоритмов обработки пространственной информации, такой как расположение гидрологических постов и метеорологических станций, ЦМР и пространственной информации о часовых поясах. Разработанная программа для каждого гидрологического поста из рассматриваемого списка осуществляла автоматизированное построение водосбора по данным ЦМР, а также определение метеорологических станций, находящихся в пределах каждого водосбора. С использованием электронного слоя часовых поясов производилось назначение часового пояса для каждой метеорологической станции, пересчет отметок времени срочных наблюдений из Среднего Гринвичского Времени в местное время и расчет среднесуточных значений приземной температуры воздуха и слоя осадков за сутки.

Программа, реализующая модель формирования стока HBV-96, с использованием входного набора оптимальных параметров модели и констант водосбора для каждого расчетного шага времени по данным о приземной температуре воздуха и слое осадков вычисляет расход воды в замыкающем створе водосбора. Структурно программа состоит из подпрограммы запуска, регулирующей режим работы модели, и подпрограмм расчета, описывающих основные расчетные соотношения модели формирования стока HBV-96.

Программа оптимизации модели реализует алгоритм SCE-UA, рассмотренный выше, и осуществляет запуск концептуальной модели, пока не будут найдены оптимальные значения параметров, при которых достигается наилучшее значение критерия качества. В программе заложен алгоритм повторной оптимизации с измененными параметрами оптимизации в случае, если удовлетворительный результат не был достигнут. Данная программа была применена к 590 створам. Продолжительности работы программы автоматизированной оптимизации параметров модели для рассматриваемых водосборов составила около 3 недель с использованием настольного персонального компьютера.

Программа коррекции расчетов, реализует алгоритм коррекции на основе модели авторегрессии ошибок расчета. Программа минимизирует параметры модели коррекции методом наименьших квадратов с использованием выходных расчетных данных модели и наблюдаемых расходов воды.

В целях автоматизации процедуры использования и верификации методики расчета среднесуточных расходов воды для 590 речных бассейнов 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 расчета, показатели его качества и иллюстрирующие работу алгоритма графики; создание сводной таблицы с результатами расчетов.

Верификация расчетов

Для проверки методики на независимом материале использованы данные ежедневных гидрометеорологических наблюдений за период с 01.01.2017 по 31.12.2020 гг. продолжительностью 1461 суток.

Расхождение между фактическими значениями расходов воды $Q(t)$ и их расчетными оценками $\tilde{Q}(t)$ характеризуется рассмотренным в главе 1 показателем эффективности Нэша–Сатклиффа [194].

На первом этапе анализировались ошибки расчета среднесуточных расходов воды с помощью модели HBV-96 непосредственно, без их корректировки. Результаты этого анализа показали, что для многих речных бассейнов даже такой упрощенный вариант методики позволяет давать неплохие результаты. Показатель NSE варьирует от 0,05 до 0,93 и в среднем равен 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%).

В тоже время для большинства речных бассейнов отмечены заметные систематические ошибки расчета и наличие статистически достоверной автокорреляции в рядах ежедневных ошибок расчета, что выражается в образовании серий их положительных или отрицательных значений. Данное обстоятельство свидетельствует о целесообразности использования описанного выше метода коррекции моделируемых значений расходов воды.

На втором этапе анализировались ошибки расчета среднесуточных расходов воды по полноценному варианту методики с использованием модели HBV-96 с последующей коррекцией модельных расчетов. Результаты этого анализа практически для всех речных бассейнов показали отсутствие систематических ошибок расчета и статистически достоверной автокорреляции в рядах ежедневных ошибок расчета. Показатель NSE варьирует от 0,01 до 1,00 и в среднем равен 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%).

Достижимое за счет коррекции уточнение характеризуется отношением среднеквадратической погрешности расчетов до и после ее использования. Для различных речных бассейнов это отношение варьирует от 1,02 до 38,16 и в среднем равно 5,80.

Таким образом, коррекция модельных расчетов является важным элементом предлагаемой методики, так как позволяет повышать их точность в среднем в 5,8 раза.

На рисунке 3.2 приведены совмещенные графики хода фактических и рассчитанных среднесуточных 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 на рисунке 3.2 графики демонстрируют высокое качество расчетов среднесуточных расходов воды по предлагаемой методике – фактические и рассчитанные гидрографы практически совпадают.

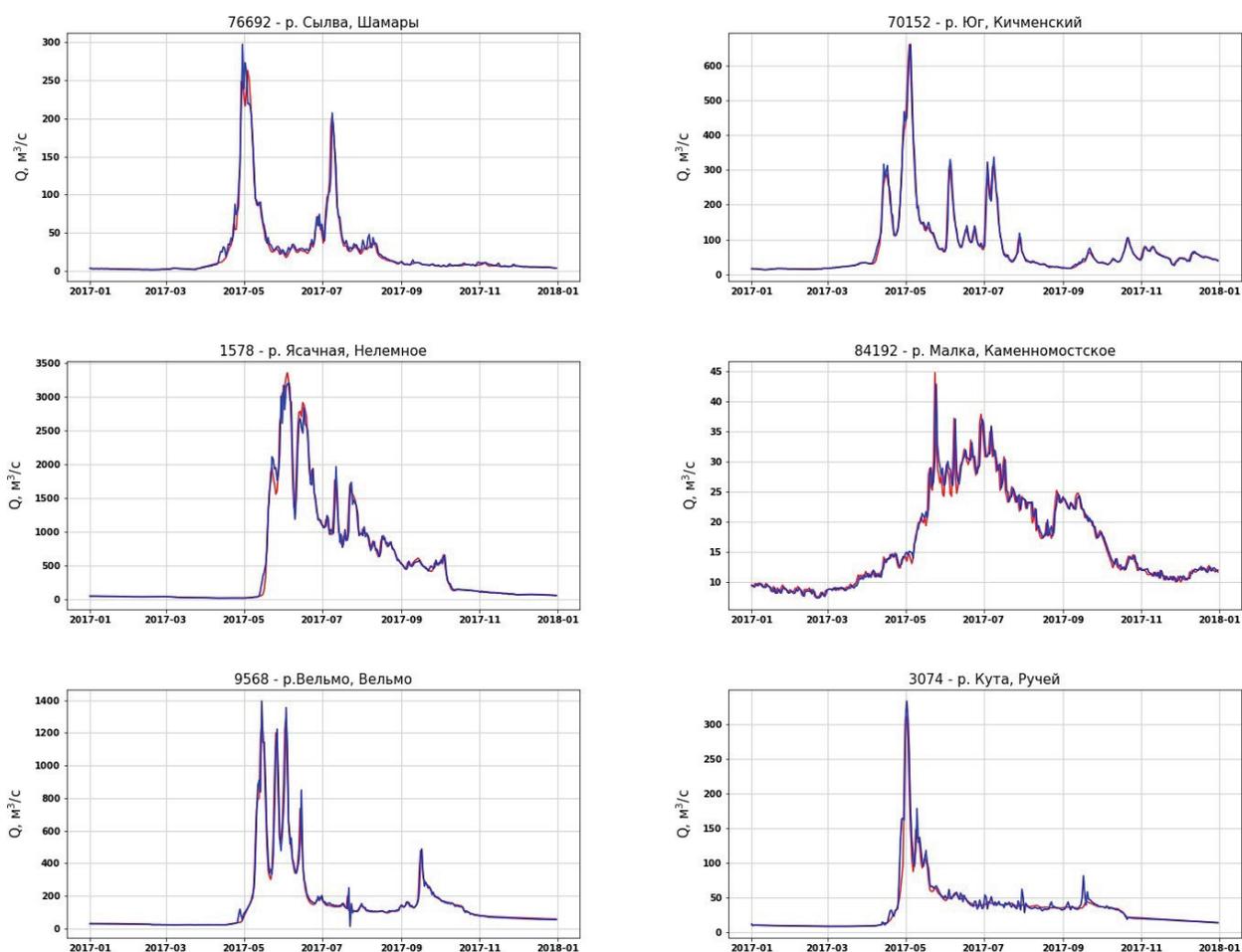


Рисунок 3.2 – Фактические (синим) и рассчитанные (красным) гидрографы 2017 г.

В таблице 3.1 приведены характеристики рассматриваемых рек: индекс гидрологического поста; название реки и пункта наблюдений; регион расположения водосбора реки; площадь водосбора; показатель эффективности Нэша–Сатклиффа до коррекции NSE и после коррекции NSE_C . Данные таблицы 3.1 показывают, что для рек, расположенных в различных регионах России, коррекция расчетов приводит к существенному повышению их точности.

Таблица 3.1 – Характеристики рассматриваемых рек

Индекс	Река	Пункт	Регион	Площадь, км ²	NSE	NSE_C
76692	Сылва	с. Шамары	бассейн Камы	2140	0,865	0,980
1578	Ясачная	с. Нелемное	бассейн Колымы	32000	0,779	0,976
9568	Вельмо	с. Вельмо	бассейн Енисея	11800	0,723	0,973
70152	Юг	г. Кичменский городок	бассейн Сев. Двины	8890	0,663	0,986
84192	Малка	с. Каменноостское	бассейн Терека	1540	0,731	0,965
3074	Кута	п. Ручей	бассейн Лены	11200	0,688	0,967

В целом, полученные результаты дают основание для разработки автоматизированной системы подготовки и выпуска краткосрочных прогнозов стока рек России на основе модели стока HBV-96.

Для оценки ожидаемого хода усваиваемых моделью метеорологических характеристик в течение периода заблаговременности гидрологического прогноза используется разработанная в ФГБУ «Гидрометцентр России» оперативная система регионального краткосрочного численного прогноза погоды COSMO-RU [45]. В связи с этим в следующем разделе оцениваются возможности использования этой системы при краткосрочном прогнозировании стока рек России.

3.2 Возможности использования системы COSMO-RU при краткосрочном прогнозировании стока рек России

Постановка задачи

Для оценки ожидаемого хода усваиваемых моделью метеорологических характеристик в течение периода заблаговременности гидрологического прогноза предлагается использовать разработанную в ФГБУ «Гидрометцентр России» и хорошо себя зарекомендовавшую оперативную систему регионального краткосрочного численного прогноза погоды COSMO-RU [45, 103, 203].

С учетом максимальной заблаговременности метеорологических прогнозов прогноз среднесуточных расходов воды на реках России может выпускаться с заблаговременностью 1, 2 и 3 суток. Качество этих прогнозов определяется с одной стороны возможностями модели HBV-96 и успешностью калибровки ее параметров, а с другой стороны – возможностями использования системы COSMO-RU при краткосрочном прогнозировании стока рек России. Эти возможности определяются качеством получаемых с ее помощью прогнозов осредненных по территории тех же речных бассейнов суточного слоя осадков и среднесуточной температуры воздуха с заблаговременностью 1, 2 и 3 суток.

Краткосрочные прогнозы речного стока с заблаговременностью до 5–6 суток могут выпускаться каждые 6 или 12 часов, но чаще всего, они выпускаются один раз в сутки в 19⁰⁰ по местному времени [105, 185]. Шаг во времени, с которым выпускается прогноз, не имеет принципиального значения, поэтому во избежание неоправданных сложностей и, учитывая существующую практику гидрологического прогнозирования, рассматривается наиболее типичный случай выпуска прогноза один раз в сутки.

С помощью моделей формирования речного стока прогнозируется расход воды Q , м³/с, в заданном речном створе, а прогноз уровня воды H , см, определяется по его зависимости от

расхода. Таким образом, при дате выпуска прогноза t и заблаговременности прогноза Δt суток прогнозируется среднесуточный расход воды $Q(t + \Delta t)$ для даты $t + \Delta t$.

Как уже отмечалось, в основе метода прогнозирования речного стока чаще всего используется одна из концептуальных моделей его формирования со сосредоточенными параметрами. В качестве входной информации такая модель использует осредненные по территории речного бассейна ежедневные значения метеорологических величин, состав которых может различаться, но среди которых практически всегда присутствуют суточный слой осадков P , мм, и среднесуточная температура приземного слоя воздуха $T^\circ\text{C}$ [80, 87, 122, 166]. В связи с этим без потери общности получаемых выводов в дальнейшем рассматриваются только эти две метеорологические величины.

При получении прогноза расхода воды $Q(t + \Delta t)$ уже известными величинами являются слой осадков $P(t)$ и температура воздуха $T(t)$ для даты составления прогноза и значения этих величин $P(t - 1)$, $T(t - 1)$, $P(t - 2)$, $T(t - 2)$ за предыдущие сутки, число которых может быть велико.

Ожидаемый ход метеорологических элементов в течение периода заблаговременности от t до $t + \Delta t$ оценивается их прогнозами, получаемыми, например, с помощью системы краткосрочных прогнозов погоды COSMO-RU. В зависимости от величины Δt заблаговременность таких прогнозов может различаться следующим образом.

При заблаговременности гидрологического прогноза $\Delta t = 1$ сутки необходимы прогнозы $\tilde{P}(t + 1)$ и $\tilde{T}(t + 1)$ с той же заблаговременностью.

При заблаговременности гидрологического прогноза $\Delta t = 2$ суток необходимы прогнозы $\tilde{P}(t + 1)$ и $\tilde{T}(t + 1)$ с заблаговременностью 1 сутки и прогнозы $\tilde{P}(t + 2)$ и $\tilde{T}(t + 2)$ с заблаговременностью 2 суток.

При заблаговременности гидрологического прогноза $\Delta t = 3$ суток необходимы прогнозы $\tilde{P}(t + 1)$ и $\tilde{T}(t + 1)$ с заблаговременностью 1 сутки, прогнозы $\tilde{P}(t + 2)$ и $\tilde{T}(t + 2)$ с заблаговременностью 2 суток и прогнозы $\tilde{P}(t + 3)$ и $\tilde{T}(t + 3)$ с заблаговременностью 3 суток. И так далее. Таким образом, при заблаговременности прогноза речного стока Δt суток необходимо использовать Δt прогнозов, учитываемых моделью метеорологических элементов, с заблаговременностью от 1 до Δt суток.

Как и прогнозы гидрологических характеристик, метеорологические прогнозы неизбежно содержат случайные и систематические ошибки, полное устранение которых пока не представляется возможным [90, 156, 200, 210]. Эти ошибки могут вносить существенный вклад в погрешность прогноза речного стока. Такие ситуации возможны, если прогнозируемые метеорологические величины оказывают заметное влияние на прогноз

речного стока, а содержащиеся в прогнозах этих элементов ошибки достаточно велики [38]. Влияние прогнозируемых метеорологических элементов на величину $Q(t + \Delta t)$ зависит от соотношения между временем реакции водосбора на погодные условия (выпадение осадков, таяние снега) и заблаговременностью прогноза Δt . Если это время меньше заблаговременности прогноза, что характерно для малых горных рек, влияние прогнозируемых метеорологических элементов на расход воды велико и вклад ошибок их прогноза значителен. Если время реакции водосбора намного больше заблаговременности гидрологического прогноза, что характерно для больших равнинных рек, ошибки прогнозирования метеорологических элементов практически не влияют на погрешность прогноза величины $Q(t + \Delta t)$.

Влияние ошибок метеорологических прогнозов на погрешность прогнозов речного стока дает основание для более подробного анализа качества прогнозов суточного слоя осадков и среднесуточной температуры приземного слоя воздуха с помощью системы краткосрочных прогнозов погоды COSMO-RU. Использование этой системы для получения краткосрочных прогнозов стока рек Черноморского побережья Кавказа и бассейна Камы уже дало вполне удовлетворительные результаты [34, 108].

Система краткосрочных прогнозов погоды COSMO-RU

Оперативная система COSMO-RU регионального краткосрочного численного прогноза погоды для территории России и прилегающих регионов разработана в ФГБУ «Гидрометцентр России» и функционирует с 2009 г. В конфигурацию системы входит негидростатическая модель COSMO одноименного консорциума с шагом сетки 7 км [103, 203].

Система полностью соответствует уровню ведущих метеослужб мира, как по показателям успешности прогнозов, так и по примененным технологическим решениям. Оперативные испытания технологии COSMO-RU проведены в ФГБУ «Гидрометцентр России» по существующим в настоящее время нормативам оценок прогнозов погоды и дали основание для ее внедрения в оперативную практику. Продукция COSMO-RU четыре раза в сутки рассылается в подавляющее большинство прогностических центров Росгидромета, являясь одной из наиболее востребованных [102].

Система COSMO-RU позволяет получать прогнозы более 70 метеорологических полей, включающих поля накопленных крупномасштабных и конвективных осадков в виде дождя, снега и температуры воздуха на уровне 2 м от поверхности земли. Прогнозы с заблаговременностью до 78 часов выпускаются четыре раза в сутки в 00, 06, 12 и 18 часов по Всемирному координированному времени [14, 45, 102].

В настоящей работе результаты прогнозирования некоторых метеорологических характеристик анализируются для 2081 метеорологических станций России, расположение которых показано на рисунке 3.3.

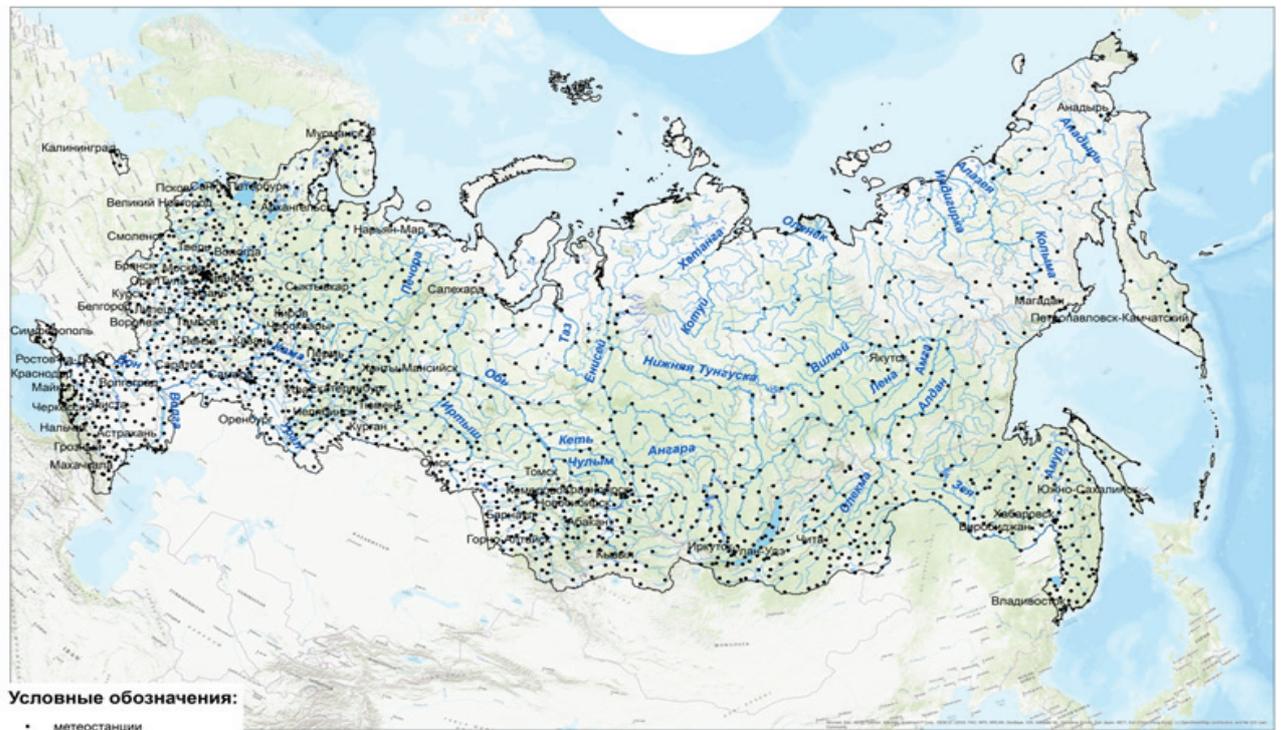


Рисунок 3.3 – Расположение используемых метеостанций

Прогнозируемые с помощью оперативной системы COSMO-RU поля осадков и приземной температуры воздуха интерполировались в точки с координатами используемых метеорологических станций. При получении суточного слоя осадков и среднесуточной температуры воздуха прогнозы соответствующих характеристик рассчитывались с учетом местного времени. В результате для каждой из рассматриваемых метеорологических станций России были получены ряды фактических значений суточного слоя осадков и среднесуточной температуры приземного слоя воздуха и прогнозы этих величин с заблаговременностью 1, 2 и 3 суток за период с 04.07.2013 по 31.12.2020 гг.

Оценка качества метеорологических прогнозов

В современной практике метеорологических прогнозов используется определенный набор оценок их качества [88, 90, 99, 156, 210]. Эти оценки не совпадают с теми, которые применяются в гидрологических прогнозах [38, 91, 99, 166, 190]. С учетом того, что темой исследования является использование системы COSMO-RU при прогнозировании речного стока, качество получаемых с помощью этой системы метеорологических прогнозов оценивается по критериям, принятым в гидрологии.

Для оценки качества получаемых метеорологических прогнозов суточного слоя осадков P , мм, и среднесуточной температуры приземного слоя воздуха $T^{\circ}\text{C}$ их ошибки анализировались за период с 04.07.2013 по 31.12.2020 гг. Длина анализируемых рядов ошибок прогноза равна $N = 2766$.

В таблице 3.2 помещены средние для всех 2081 метеорологических станций значения модуля смещения $|\bar{\delta}|$, частоты отрицательных значений смещения $P(\bar{\delta} < 0)$, среднеквадратической погрешности прогноза S и коэффициента корреляции R между фактическими значениями метеорологических элементов и их прогнозами. Указанные показатели приведены для прогнозов слоя осадков $\tilde{P}(\Delta t)$ и температуры воздуха $\tilde{T}(\Delta t)$ с заблаговременностью $\Delta t = 1, 2, 3$ суток.

Таблица 3.2 – Средние показатели качества прогнозов

	$\tilde{P}(1)$	$\tilde{P}(2)$	$\tilde{P}(3)$	$\tilde{T}(1)$	$\tilde{T}(2)$	$\tilde{T}(3)$
$ \bar{\delta} $	0,32	0,39	0,42	0,56	0,67	0,89
$P(\bar{\delta} < 0)$	78%	90%	91%	39%	31%	22%
S	3,88	4,35	4,77	1,99	2,28	2,65
R	0,594	0,504	0,403	0,987	0,984	0,979

Приведенные показатели позволяют сделать следующие выводы.

1. Все показатели качества прогнозов ухудшаются с ростом их заблаговременности.
2. Значения показателя $|\bar{\delta}|$ свидетельствуют о наличии систематической ошибки прогнозов, которая для температуры воздуха довольно велика и дает существенный вклад в среднеквадратическую погрешность ее прогноза.
3. Значения показателя $P(\bar{\delta} < 0)$ свидетельствуют о том, что в большинстве случаев прогнозы слоя осадков его завышают, а прогнозы температуры воздуха, наоборот, ее занижают.
4. Корреляция между фактическими значениями и их прогнозами для слоя осадков значительно ниже, чем для температуры воздуха. Для слоя осадков величина R заметно убывает с ростом заблаговременности прогноза, а для температуры воздуха изменение этой величины более сглаженное.

Учитывая важную роль показателя R , на рисунке 3.4 представлена карта значений коэффициента корреляции $R_p(1)$ между слоем осадков и его прогнозом с заблаговременностью 1 сутки.



Рисунок 3.4 – Значения коэффициента корреляции $R_p(1)$ между слоем осадков и его прогнозом с заблаговременностью 1 сутки

Карта показывает, что минимальные значения этого коэффициента характерны для горных регионов и для территорий с редкой сетью метеостанций. Распределение значений $R_p(2)$ и $R_p(3)$ дает приблизительно ту же картину, но при более низких значениях этих коэффициентов.

На рисунке 3.5 представлена карта значений коэффициента корреляции $R_T(1)$ между температурой воздуха и ее прогнозом с заблаговременностью 1 сутки.



Рисунок 3.5 – Значения коэффициента корреляции $R_T(1)$ между температурой воздуха и ее прогнозом с заблаговременностью 1 сутки

Карта показывает, что высокие значения коэффициента корреляции $R_T(1)$ характерны для всей территории России за исключением ее крайнего Северо-Востока. Распределение значений $R_T(2)$ и $R_T(3)$ приблизительно аналогично.

Коррекция метеорологических прогнозов

Отмеченные в выводах 1 и 2 недостатки устранены с помощью рассмотренного в главе 1 метода коррекции прогнозов, использующего уравнение линейной регрессии для перехода от первоначальных прогнозов к их скорректированным значениям. Данный метод коррекции позволяет устранить систематические ошибки прогноза и страхует от неоправданно больших и малых значений прогнозов [21]. Для скорректированных прогнозов квадрат этой величины R^2 равен показателю Нэша–Сатклиффа [38].

Эффективность коррекции определяется отношением S/\mathcal{E} среднеквадратических погрешностей прогноза до и после ее применения. Это отношение всегда превосходит единицу и для рассматриваемых метеостанций достигает 10 для слоя осадков и 5,5 для температуры воздуха. В таблице 3.3 помещены 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 3.3 – 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.

На рисунке 3.6 представлено распределение среднеквадратической погрешности $\mathcal{E}_p(1)$ скорректированного прогноза слоя осадков с заблаговременностью 1 сутки по территории России.

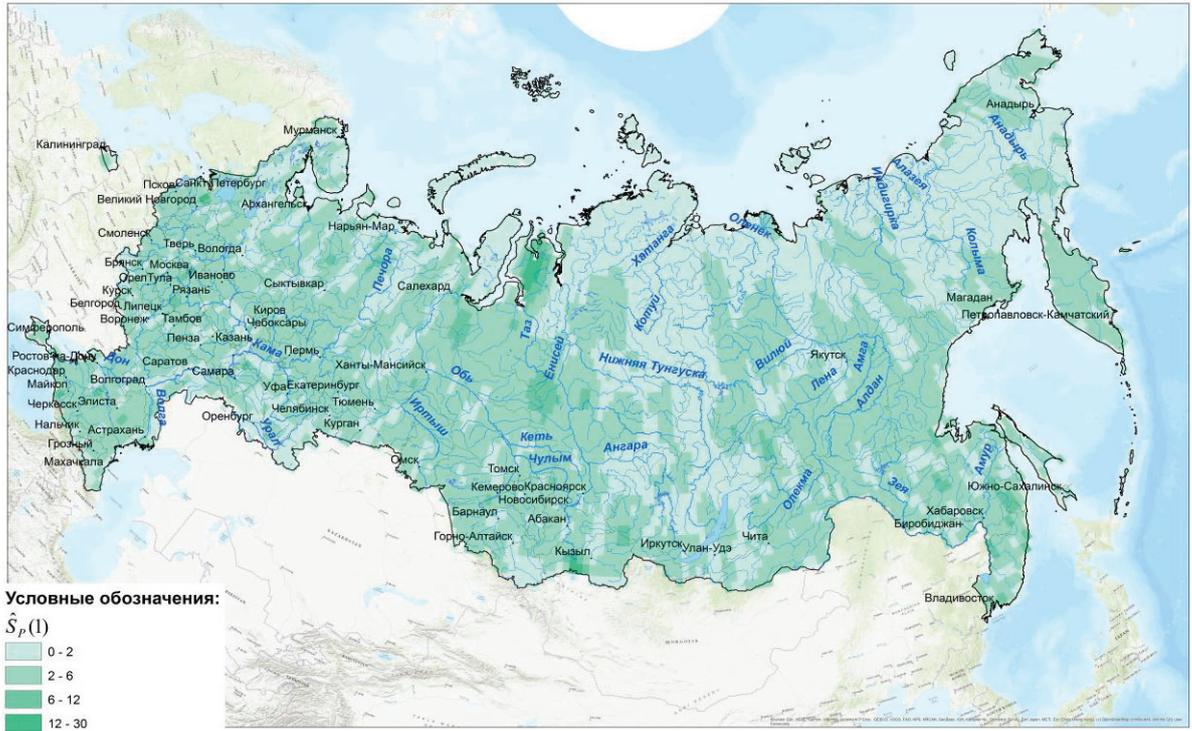


Рисунок 3.6 – Значения среднеквадратической погрешности $\hat{\mathcal{E}}_P(1)$, мм скорректированного прогноза слоя осадков с заблаговременностью 1 сутки

На рисунке 3.7 представлено распределение среднеквадратической погрешности $\hat{\mathcal{E}}_T(1)$ скорректированного прогноза температуры воздуха с заблаговременностью 1 сутки.



Рисунок 3.7 – Значения среднеквадратической погрешности $\hat{\mathcal{E}}_T(1)$, °C скорректированного прогноза температуры воздуха с заблаговременностью 1 сутки

Пространственная изменчивость величин $\xi_p(1)$ и $\xi_T(1)$ носит довольно сложный характер, так как обусловлена распределением по территории России суточных слоев осадков и среднесуточных температур приземного слоя воздуха в различные периоды года и одновременно зависит от неравномерности расположения метеорологических станций.

Осреднение метеорологических прогнозов

Выполненный анализ качества прогнозов суточного слоя осадков и среднесуточной температуры приземного слоя воздуха для отдельных метеостанций представляет интерес, прежде всего, для случая, когда предсказание речного стока основано на использовании физико-математических моделей его формирования с распределенными параметрами, в которых учитывается изменение метеорологических величин по территории водосбора. Более широкое распространение в практике гидрологических прогнозов получили концептуальные модели с сосредоточенными или частично распределенными параметрами, в которых метеорологические величины усредняются по всей территории водосбора или по его отдельным частям [80, 87, 122, 166, 185].

Осреднение метеорологических величин по территории водосбора предполагает и осреднение их прогнозов. В результате происходит частичная взаимная компенсация содержащиеся в этих прогнозах ошибок и, следовательно, повышение точности усредненных по территории водосбора прогнозов метеорологических величин [38, 200, 210].

Описанный эффект будет возрастать по мере увеличения числа расположенных на площади водосбора и соседних территориях метеостанций и снижения пространственной корреляции между ошибками прогнозирования каждой из учитываемых в модели метеорологических величин. Таким образом, при прочих равных условиях качество осредненных по территории водосбора метеорологических прогнозов должно возрастать с увеличением его размеров и, в частности, его площади.

В настоящем разделе рассматриваются результаты осреднения полученных с помощью системы COSMO-RU прогнозов суточного слоя осадков и среднесуточной температуры приземного слоя воздуха по территории 590 речных бассейнов, покрывающих практически всю территорию России. Их площадь варьирует от 14,8 км² до 2 950 000 км² и в среднем составляет 72 201 км². На рисунке 3.8 представлен график зависимости коэффициента корреляции $R_p(1)$ между слоем осадков и его прогнозом с заблаговременностью 1 сутки от логарифма площади водосбора $\ln(A)$. Зависимость статистически достоверна и характеризуется коэффициентом корреляции 0,44. Зависимости коэффициента корреляции между слоем осадков и его прогнозом с заблаговременностью 2 и 3 суток носят аналогичный характер.

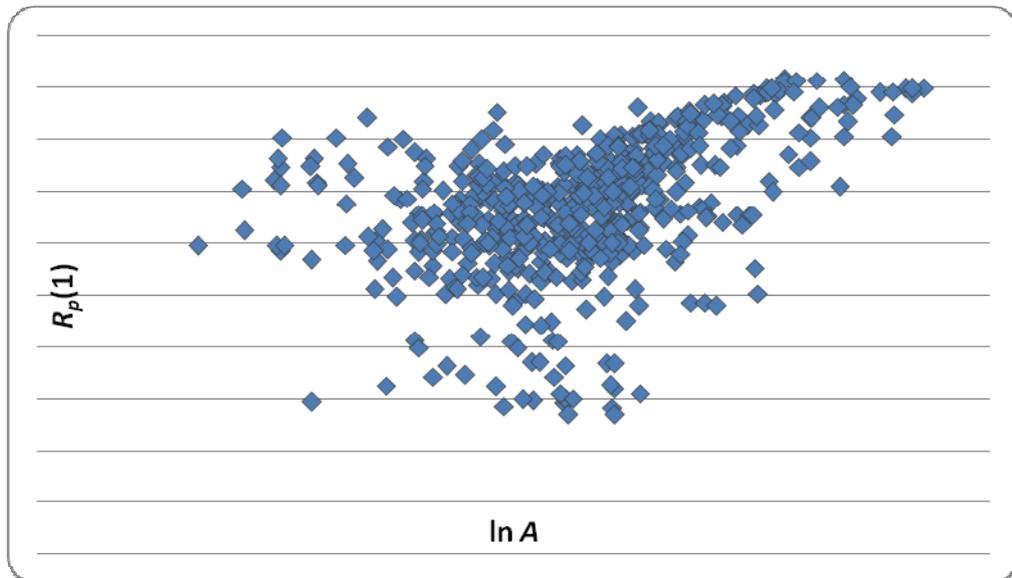


Рисунок 3.8 – Зависимость коэффициента корреляции $R_p(1)$ между слоем осадков и его прогнозом с заблаговременностью 1 сутки от логарифма площади водосбора $\ln(A)$

Расположение точек на представленном графике показывает, что при больших площадях водосбора коэффициент $R_p(1)$ принимает достаточно высокие значения. В частности, среднее значение коэффициента $R_p(1)$ для водосборов с площадью не менее $100\,000\text{ км}^2$ ($\ln(A) = 11,51$) равно 0,812.

В связи с этим рассмотрены три варианта:

- вариант 1 с прогнозированием слоя осадков и температуры воздуха для каждой из 2081 метеорологических станций;
- вариант 2 с прогнозированием этих элементов, осредненных для каждого из 590 речных бассейнов;
- вариант 3 с прогнозированием этих элементов, осредненных для речных бассейнов с площадью не менее $100\,000\text{ км}^2$.

В таблице 3.4 для каждого варианта приведены средние значения коэффициентов корреляции R между фактическим слоем осадков и его прогнозом $\tilde{P}(\Delta t)$ и между фактической температурой воздуха и ее прогнозом $\tilde{T}(\Delta t)$ с заблаговременностью $\Delta t = 1, 2, 3$ суток.

Таблица 3.4 – 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

Приведенные данные наглядно демонстрируют эффект повышения качества метеорологических прогнозов при переходе от точечных значений к осредненным по некоторой территории, и этот эффект возрастает по мере увеличения площади этой территории.

Для оценки качества прогнозов можно воспользоваться широко используемым в мировой практике гидрологического моделирования и прогнозирования показателем Нэша–Сатклиффа, для которого приняты критерии градации качества [38, 166, 190]. В данном случае этот показатель равен величине R^2 , поэтому принятая градация качества прогнозов выглядит следующим образом:

- 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 $R < 0,40$.

Согласно данной градации для речных бассейнов с площадью не менее 100 000 км² качество прогнозов суточного слоя осадков с заблаговременностью 1 сутки и прогнозов среднесуточной температуры воздуха с заблаговременностью 1, 2, 3 суток следует признать хорошим, а качество прогнозов суточного слоя осадков с заблаговременностью 2 и 3 суток следует признать удовлетворительным.

Для решения главной задачи – оценки возможностей использования системы COSMO-RU при краткосрочном прогнозировании стока рек России интерес представляет вариант 2. В целом для всех 590 речных бассейнов качество прогнозов суточного слоя осадков следует признать удовлетворительным, а качество прогнозов среднесуточной температуры воздуха следует признать хорошим.

Разумеется, речь идет о средних значениях используемого показателя качества прогнозов, и для различных речных бассейнов значения этого показателя варьируют в довольно широком диапазоне. Более детальную информацию дает таблица 3.5, в которой для прогнозов слоя осадков $\tilde{P}(\Delta t)$ и температуры воздуха $\tilde{T}(\Delta t)$ с заблаговременностью $\Delta t = 1, 2, 3$ суток приведена частота случаев, когда их качество относится к той или иной категории.

Таблица 3.5 – 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%

Приведенные данные показывают, что прогнозы суточного слоя осадков в основном относятся к категории удовлетворительных. Частота неудовлетворительных прогнозов возрастает с ростом их заблаговременности от 6 до 22%. Что касается прогнозов среднесуточной температуры приземного слоя воздуха, то практически все они относятся к категории хороших.

Полученные результаты дают основание для положительной оценки возможностей использования системы COSMO-RU при краткосрочном прогнозировании стока рек России, методика которого излагается в следующем разделе.

3.3 Краткосрочное прогнозирование стока рек России с использованием модели HBV-96 и системы COSMO-RU

Постановка задачи и исходная информация

Используя концептуальную модель формирования речного стока HBV-96 и систему численного прогноза погоды COSMO-RU методика краткосрочного прогнозирования среднесуточных расходов воды реализована для 546 речных бассейнов с различными условиями формирования стока.

В качестве исходной информации при разработке и верификации излагаемой методики расчета использованы данные ежедневных наблюдений за расходами воды, атмосферными осадками и приземной температурой воздуха на сети гидрологических постов и метеорологических станций в течение периода с 01.01.2010 по 31.12.2020 гг.

Данные о среднесуточных расходах воды получены по результатам ежедневных наблюдений на 546 гидрологических постах, расположенных в замыкающих створах каждого бассейна. Площадь речных бассейнов варьирует от 1 км² до 2 850 000 км² (Обь) и в среднем равна 71 652 км². Границы речных бассейнов были рассчитаны с использованием геоинформационного программного обеспечения и цифровой модели рельефа (ЦМР), 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. При определении суточного слоя осадков и среднесуточной температуры воздуха на основе срочных наблюдений на каждой метеорологической станции учитывался часовой пояс, в котором она находится. При получении осредненных по территории речного бассейна осадков и температуры воздуха учитывалось расположение относящихся к этому речному бассейну метеорологических станций.

Для оценки ожидаемого хода усваиваемых моделью метеорологических характеристик в течение периода заблаговременности гидрологического прогноза использована разработанная в ФГБУ «Гидрометцентр России» оперативная система регионального краткосрочного численного прогноза погоды COSMO-RU, рассмотренная в предыдущем разделе. В целях повышения точности метеорологических прогнозов был применен метод линейной регрессии, который повышает их точность в среднем на 20% для слоя осадков и на 15% для температуры воздуха.

Прогнозируемые с помощью оперативной системы COSMO-RU поля осадков и приземной температуры воздуха интерполировались в точки с координатами используемых метеорологических станций. Метеорологические прогнозы совмещались с данными наблюдений на метеостанциях путем билинейной интерполяции, после чего осуществлялся перевод данных в суточный интервал по времени и осреднение метеорологических наблюдений и прогнозов по территории каждого речного бассейна.

При заблаговременности прогноза расходов воды 1 сутки используемая моделью HBV-96 входная информация содержит получаемые с помощью системы COSMO-RU метеорологические прогнозы осредненных для каждого речного бассейна суточного слоя осадков и среднесуточной температуры воздуха с той же заблаговременностью. При заблаговременности гидрологического прогноза 2 суток используемая моделью входная информация содержит метеорологические прогнозы с заблаговременностью 1 и 2 суток. При заблаговременности гидрологического прогноза 3 суток входная информация содержит метеорологические прогнозы с заблаговременностью 1, 2 и 3 суток.

Известные к дате составления гидрологического прогноза осредненные по территории водосбора ежедневные значения среднесуточной температуры приземного слоя воздуха и суточного слоя осадков и полученные с помощью системы COSMO-RU ожидаемые значения этих метеорологических элементов в течение периода его заблаговременности использовались в качестве входной информации для модели формирования речного стока HBV-96.

Для оценки параметров модели использована обучающая выборка, образованная данными ежедневных гидрологических и метеорологических наблюдений за период с 01.01.2010 по 31.12.2016 гг., т.е. за 2557 суток. Данный период можно считать репрезентативным, так как практически для всех рассматриваемых рек в течение этого периода наблюдались многоводные, маловодные и средние по водности годы.

Оптимальные значения параметров модели находились исходя из минимума суммы квадратов ошибок модельных расчетов, рассчитанной по обучающей выборке. Оптимизация параметров модели HBV-96 выполнена с помощью алгоритма перемешивания и эволюции

комплексов (выборок) значений параметров SCE-UA [151]. Использовано программное обеспечение PEST, которое позволяет производить оптимизацию параметров широкого круга моделей, в том числе при помощи рассматриваемого алгоритма оптимизации [147].

В целях повышения точности прогнозов применен рассмотренный в настоящей главе 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 для 546 речных бассейнов 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.

Верификация методики прогнозирования

Для проверки используемой методики прогнозирования на независимом материале в качестве контрольной выборки использованы данные за период с 01.01.2017 по 31.12.2020 продолжительностью 1451 суток. Для каждого значения заблаговременности $\Delta t = 1, 2, 3$ суток получены оценки среднеквадратической погрешности прогнозов S , ее отношения к погрешности инерционного прогноза S/σ_{Δ} и показатель Нэша–Сатклиффа NSE .

В дополнение к получаемым с помощью данной методики прогнозам с заблаговременностью $\Delta t = 1, 2, 3$ суток, был выполнен расчет среднесуточных расходов при использовании не прогнозируемых, а фактических значений среднесуточной приземной температуры и суточного слоя осадков. Получение подобных модельных расчетов можно интерпретировать, как прогноз нулевой заблаговременности ($\Delta t = 0$).

В таблице 3.6 для расчетов ($\Delta t = 0$) и для прогнозов с заблаговременностью $\Delta t = 1, 2, 3$ суток приведены осредненные по всем 546 речным бассейнам значения показателя NSE Нэша–Сатклиффа для вариантов без коррекции и с коррекцией выходов модели HBV-96.

Таблица 3.6 – Средние значения показателя NSE

	$\Delta t = 0$	$\Delta t = 1$	$\Delta t = 2$	$\Delta t = 3$
Без коррекции	0,680	0,669	0,636	0,621
С коррекцией	0,955	0,891	0,877	0,873

Как и следовало ожидать, для обоих вариантов показатель NSE уменьшается с ростом заблаговременности прогнозов. При этом коррекция позволяет существенно повысить точность расчетов и прогнозов среднесуточных расходов воды. В связи с этим вариант предлагаемой методики с коррекцией выходов модели HBV-96 рассматривается в качестве основного.

Качество прогнозов по предлагаемой методике демонстрирует таблица 3.7, 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 3.7 – 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 в таблице 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 (таблица 3.6), 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.

Если использовать рассмотренный в разделе 1.5 более совершенный критерий проверки статистической достоверности неравенства $S < \sigma_{\Delta}$, то число случаев хороших и удовлетворительных прогнозов значительно возрастает.

На рисунке 3.9 приведены совмещенные графики хода фактических и спрогнозированных с заблаговременностью 2 суток расходов воды для 6 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.

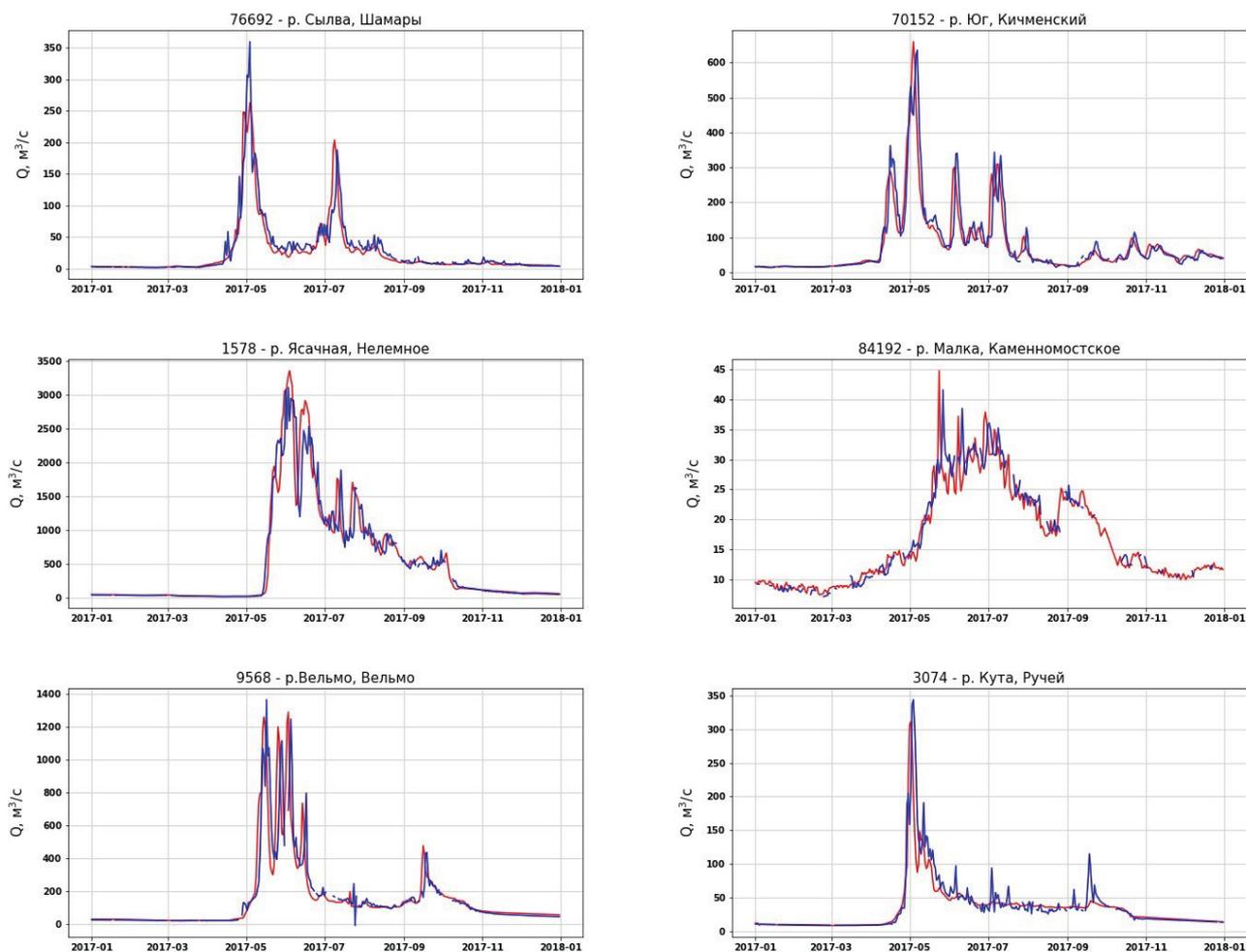


Рисунок 3.9 – Фактические (синим) и спрогнозированные (красным) с заблаговременностью 2 суток гидрографы 2017 года

В таблице 3.8 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 3.8 – 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 [37]. Пример успешного применения данной методики для краткосрочного прогнозирования стока рек бассейна Камы приводится в следующем разделе.

3.4 Краткосрочное прогнозирование стока рек бассейна Камы

Анализируемые речные бассейны

Описанная в предыдущем разделе методика, использующая модель HBV-96 и систему COSMO-RU, реализована для краткосрочного прогнозирования среднесуточных расходов воды на реках бассейна Камы [31]. Выбраны речные бассейны, находящиеся в пределах водосбора Камского водохранилища. Выпуск краткосрочных прогнозов среднесуточных расходов воды в течение всего года и, в особенности, в период формирования и прохождения весеннего половодья и дождевых паводков необходим для предупреждения об опасных и нежелательных гидрологических явлениях в бассейне Камы и для научно обоснованного и эффективного управления работой Камского гидроузла. Расположение данных речных бассейнов показано на рисунке 3.10.

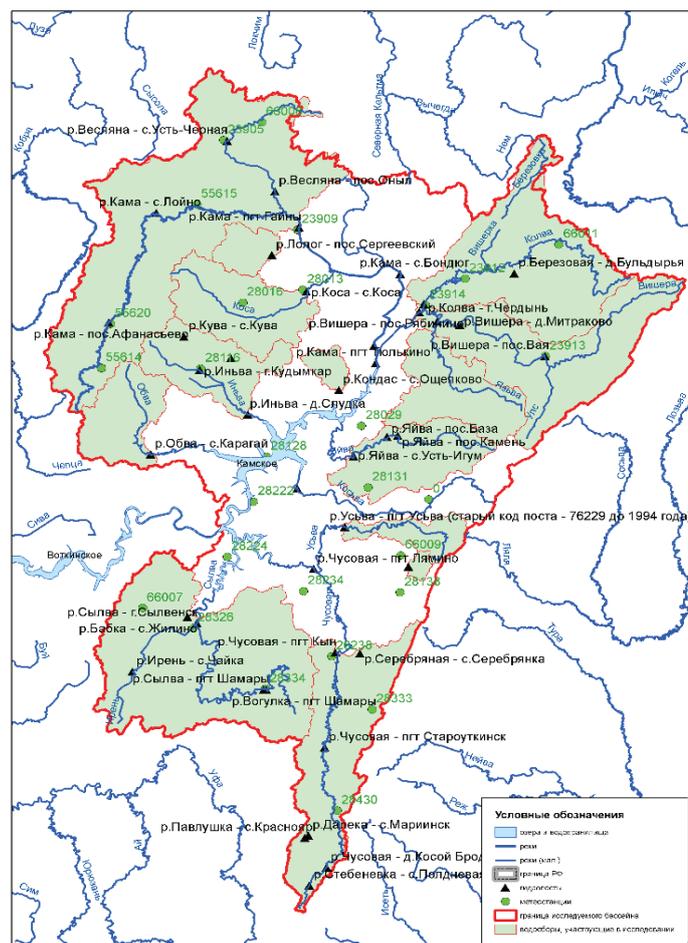


Рисунок 3.10 – Расположение анализируемых речных бассейнов

В таблице 3.9 для всех 9 речных бассейнов приведены: индекс гидрологического поста, название реки, пункта гидрологических наблюдений, площадь водосбора км².

Таблица 3.9 – Сведения об анализируемых речных бассейнах

Индекс	Река	Пункт	Площадь, км ²
76075	Коса	с. Коса	6340
76159	Обва	с. Карагай	4210
76141	Иньва	д. Слудка	5210
76139	Иньва	г. Кудымкар	2050
76700	Кама	с. Лойно	11500
76112	Колва	г. Чердынь	13400
76176	Чусовая	пгт Староуткинск	5450
76701	Сылва	с. Сылвенск	17600
76692	Сылва	пгт. Шамары	2140

В качестве исходной гидрометеорологической информации использованы ежедневные данные о среднесуточных расходах воды в замыкающих створах, среднесуточной приземной температуре воздуха и суточной сумме осадков на сети гидрологических постов и метеорологических станций бассейна Камского водохранилища за 11 лет – с 2010 по 2020 гг.

При получении гидрологических прогнозов для периода их заблаговременности использованы выходные данные метеорологической модели COSMO-RU [102]. Метеорологические прогнозы совмещались с данными наблюдений на метеостанциях путем билинейной интерполяции, после чего осуществлялся перевод данных в суточный интервал по времени и осреднение метеорологических наблюдений и прогнозов по территории каждого речного бассейна.

Верификация прогнозов

Архив гидрометеорологической информации был разделен на обучающую и контрольную выборку. Обучающая выборка, образованная данными за семилетний период с 01.01.2010 по 31.12.2016 гг., использована для построения методики. Контрольная выборка, образованная данными за период с 01.01.2017 по 31.12.2020 гг., использована для оценки качества получаемых прогнозов на независимом материале.

Приведенные в таблице 3.10 значения важнейшего показателя S/σ_{Δ} показывают, что для всех рассматриваемых рек бассейна Камы качество краткосрочных прогнозов среднесуточных расходов воды может быть отнесено к категории удовлетворительных

($0,50 < S/\sigma_{\Delta} \leq 0,80$). Исключение составляют только прогнозы с заблаговременностью 2 и 3 суток в створе р. Сылта – г. Сылтаенск.

Таблица 3.10 – Значения показателя S/σ_{Δ} для методики, использующей модель HBV-96 и систему COSMO-RU

Река	Пункт	$\Delta t = 1$	$\Delta t = 2$	$\Delta t = 3$
Коса	с. Коса	0,54	0,54	0,56
Обва	с. Карагай	0,65	0,67	0,65
Иньва	д. Слудка	0,57	0,65	0,64
Иньва	г. Кудымкар	0,61	0,67	0,65
Кама	с. Лойно	0,43	0,46	0,32
Колва	г. Чердынъ	0,56	0,68	0,73
Чусовая	пгт Староуткинск	0,75	0,78	0,72
Сылта	с. Сылтаенск	0,79	0,83	0,82
Сылта	пгт Шамары	0,63	0,72	0,74

Помимо показателей качества прогнозов S/σ_{Δ} и NSE , анализировались совмещенные графики хода фактических и спрогнозированных среднесуточных расходов воды с заблаговременностью $\Delta t = 1, 2, 3$ суток. Хорошее совпадение этих графиков для всех рассматриваемых речных бассейнов демонстрирует достаточно высокое качество прогнозов. В качестве примера на рисунке 3.11 приведены совмещенные графики хода фактических среднесуточных расходов воды в створе р. Сылта – пгт Шамары в 2017 г. и их прогнозов с заблаговременностью $\Delta t = 2$ суток.



Рисунок 3.11 – Фактические (синим) и спрогнозированные с заблаговременностью 2 суток (красным) гидрографы 2017 г. в створе р. Сылта – пгт Шамары

Влияние ошибок метеорологических прогнозов

Негативное влияние ошибок прогнозирования метеорологических элементов на качество прогнозов речного стока, основанных на различных моделях его формирования, является хорошо известным фактом [38, 87, 185]. С увеличением заблаговременности прогноза это влияние усиливается, так как неизбежные ошибки метеорологических прогнозов при этом возрастают и могут быть весьма значительными [200]. Увеличение погрешности прогнозов речного стока будет тем значительнее, чем больше погрешность прогноза учитываемых в модели метеорологических характеристик и выше их влияние на результаты гидрологического моделирования и последующего прогнозирования [38, 35].

Указанная закономерность справедлива и для методики прогнозирования среднесуточных расходов воды на реках бассейна Камы, использующей модель формирования речного стока HBV-96, так как в этой методике для периода заблаговременности гидрологического прогноза используются полученные с помощью метеорологической модели COSMO-RU ожидаемые значения среднесуточной приземной температуры и суточного слоя осадков, осредненные по территории водосбора. Эти значения содержат вероятные ошибки, которые не только увеличиваются с ростом заблаговременности прогноза, но и накапливаются. В частности, при заблаговременности прогноза расходов воды 2 суток используемая моделью входная информация содержит метеорологические прогнозы с заблаговременностью 1 и 2 суток, а при заблаговременности прогноза расходов воды 3 суток входная информация содержит метеорологические прогнозы с заблаговременностью 1, 2 и 3 суток.

В целях оценки влияния ошибок метеорологических прогнозов для методики прогнозирования среднесуточных расходов воды на реках бассейна Камы на основе моделей HBV-96 и COSMO-RU предлагается следующий прием.

В дополнение к получаемым с помощью данной методики прогнозам с заблаговременностью $\Delta t = 1, 2, 3$ суток, был выполнен расчет среднесуточных расходов при использовании не прогнозируемых, а фактических значений среднесуточной приземной температуры и суточного слоя осадков. Получение подобных модельных расчетов можно интерпретировать, как прогноз нулевой заблаговременности ($\Delta t = 0$). В таблице 3.11 для рассматриваемых речных бассейнов приведены значения показателя $NSE(\Delta t)$ Нэша–Сатклиффа для прогнозов среднесуточных расходов воды различной заблаговременности Δt , включая значение $\Delta t = 0$, что соответствует их расчету.

Близкие к единице значения показателя $NSE(\Delta t)$ свидетельствуют о высоком качестве моделирования с помощью HBV-96 и коррекции среднесуточных расходов воды. Снижение

этих показателей с увеличением заблаговременности прогноза Δt отражает влияние ошибок метеорологического прогноза с помощью модели COSMO-RU.

Таблица 3.11 – Значения показателя $NSE(\Delta t)$ для прогнозов различной заблаговременности Δt

Река	Пункт	$\Delta t = 0$	$\Delta t = 1$	$\Delta t = 2$	$\Delta t = 3$
Коса	с. Коса	0,998	0,997	0,988	0,973
Обва	с. Карагай	0,993	0,991	0,976	0,937
Иньва	д. Слудка	0,994	0,994	0,973	0,941
Иньва	г. Кудымкар	0,984	0,983	0,928	0,873
Кама	с. Лойно	0,999	0,997	0,988	0,975
Колва	г. Чердынь	0,997	0,996	0,978	0,950
Чусовая	пгт Староуткинск	0,976	0,973	0,912	0,862
Сылва	с. Сылвенск	0,994	0,992	0,960	0,920
Сылва	пгт Шамары	0,980	0,979	0,921	0,955

Ухудшение качества прогнозирования с ростом его заблаговременности характеризуется отношением $U(\Delta t)$ среднеквадратической погрешности $S(\Delta t)$ прогнозов среднесуточных расходов воды с заблаговременностью Δt к среднеквадратической погрешности их расчета $S(0)$. Это отношение определяется формулой:

$$U(\Delta t) = \frac{S(\Delta t)}{S(0)} = \sqrt{\frac{1 - NSE(\Delta t)}{1 - NSE(0)}}. \quad (3.2)$$

Значения данного отношения приведены в таблице 3.12.

Таблица 3.12 – Значения отношения $U(\Delta t)$ для прогнозов различной заблаговременности Δt

Река	Пункт	$\Delta t = 1$	$\Delta t = 2$	$\Delta t = 3$
Коса	с. Коса	1,17	2,35	3,52
Обва	с. Карагай	1,13	1,85	3,00
Иньва	д. Слудка	1,02	2,16	3,19
Иньва	г. Кудымкар	1,03	2,13	2,83
Кама	с. Лойно	1,73	3,46	5,00
Колва	г. Чердынь	1,18	2,77	4,18
Чусовая	пгт Староуткинск	1,07	1,93	2,42
Сылва	с. Сылвенск	1,19	2,65	3,75
Сылва	пгт Шамары	1,03	1,99	1,51

Данные таблицы 3.12 показывают, что для всех рассматриваемых речных бассейнов отношение $U(\Delta t)$ увеличивается с ростом заблаговременности прогноза Δt от 1 до 3 суток. В среднем отношение равно 1,17 для прогнозов с заблаговременностью 1 сутки, 2,25 для прогнозов с заблаговременностью 2 суток и 3,27 для прогнозов с заблаговременностью 3 суток.

Таким образом, негативная роль ошибок метеорологических прогнозов при их заблаговременности одни сутки относительно невелика. Погрешность прогнозов расхода воды с заблаговременностью двое суток превышает погрешность прогнозов с суточной заблаговременностью в среднем в 1,9 раза, а с заблаговременностью 3 суток – почти в 2,8 раза. Столь стремительный рост среднеквадратической погрешности прогнозов с увеличением их заблаговременности не обязательно приводит к снижению их эффективности по сравнению с инерционным прогнозом, так как его погрешность также растет.

Сравнение методик прогнозирования

Помимо рассматриваемой методики, основанной на модели HBV-96 и системе COSMO-RU, для получения краткосрочных прогнозов среднесуточных расходов воды в тех же речных створах бассейна Камы был использован рассмотренный в предыдущей главе метод экстраполяции гидрографа. Получаемые этим методом прогнозы проверялись по той же контрольной выборке, образованной ежедневными гидрологическими наблюдениями за период с 01.01.2017 по 31.12.2020 гг.

Для сравниваемых методик значения показателя S/σ_{Δ} при заблаговременности прогнозов $\Delta t = 1, 2, 3$ суток приведены в таблицах 3.10 и 3.13.

Таблица 3.13 – Значения показателя S/σ_{Δ} для прогнозов, полученных методом экстраполяции гидрографа

Река	Пункт	$\Delta t = 1$	$\Delta t = 2$	$\Delta t = 3$
Коса	с. Коса	0,47	0,49	0,54
Обва	с. Карагай	0,80	0,81	0,85
Иньва	д. Слудка	0,63	0,72	0,77
Иньва	г. Кудымкар	0,62	0,77	0,85
Кама	с. Лойно	0,56	0,63	0,67
Колва	г. Чердынь	0,49	0,65	0,76
Чусовая	пгт Староуткинск	0,78	0,89	0,92
Сылва	с. Сылвенск	0,80	0,86	0,88
Сылва	пгт Шамары	0,53	0,69	0,77

Приведенные в таблицах показатели качества свидетельствуют о том, что сравниваемые методики дают в основном удовлетворительные и в ряде случаев хорошие результаты.

Для первой методики, основанной на модели HBV-96 и системе COSMO-RU, неудовлетворительными оказались 2 варианта прогноза, т.е. из 27 вариантов прогноза удовлетворительными и хорошими оказались 25 вариантов – 92,6%.

Для второй методики, использующей метод экстраполяции гидрографа, неудовлетворительными оказались 7 вариантов прогноза, т.е. из 27 вариантов прогноза удовлетворительными и хорошими оказались 20 вариантов – 74,1%.

Преимущество первой методики выражается и другим показателем – она оказалась точнее для 6 речных бассейнов при заблаговременности одни сутки, для тех же 6 речных бассейнов при заблаговременности двое суток и для 8 речных бассейнов при заблаговременности трое суток. В целом из 27 прогнозов первая методика оказалась точнее второй в 20 случаях – 74%.

Возрастающее преимущество первой методики по мере увеличения заблаговременности прогноза проявляется и в том, что ее погрешность в среднем оказалась меньше в 1,03 раза при заблаговременности одни сутки, в 1,09 раза при заблаговременности двое суток и в 1,26 раза при заблаговременности трое суток.

Таким образом, для краткосрочного прогнозирования стока рек бассейна Камы использование модели его формирования HBV-96 в сочетании с метеорологической моделью COSMO-RU и последующей коррекцией получаемых прогнозов в целом дает более точные результаты, чем метод экстраполяции гидрографа. Однако следует иметь в виду, что реализация этого метода требует несопоставимо меньших затрат времени и труда, что обеспечивает его конкурентоспособность.

Выводы из главы 3

1. Предлагаемая методика расчета ежедневных расходов воды на основе концептуальной модели формирования речного стока HBV-96 и с использованием коррекции получаемых с ее помощью значений показала достаточно хорошие результаты для 586 водосборов, расположенных практически по всей территории России в различных природных условиях.

2. Выполненный для 2081 метеорологических станций России анализ качества прогнозирования суточного слоя осадков и среднесуточной температуры приземного слоя воздуха, полученных с помощью оперативной системы регионального краткосрочного численного прогноза погоды COSMO-RU, дал в целом удовлетворительные результаты для

осадков и хорошие для температуры. Коррекция выходов данной системы и их осреднение по территории речных бассейнов существенно повышают точность прогнозов метеорологических характеристик, предназначенных для использования в модели формирования речного стока HBV-96.

3. Проверка предлагаемой методики краткосрочного прогнозирования среднесуточных расходов воды на основе модели HBV-96 и системы COSMO-RU дала в целом удовлетворительные результаты. Из расположенных практически по всей территории России 546 речных бассейнов хорошие и удовлетворительные прогнозы по предлагаемой методике могут быть получены с заблаговременностью 1 суток для 62% бассейнов, с заблаговременностью 2 суток – для 65%, с заблаговременностью 3 суток – для 88%.

4. 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.

5. Использование модели HBV-96 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

4.1 Неопределенность метеорологических элементов в период заблаговременности долгосрочных прогнозов речного стока

Постановка задачи

Большинство используемых в настоящее время методов долгосрочного прогнозирования речного стока пока основаны на его физико-статистических зависимостях от известных к дате составления прогноза характеристик гидрологических и метеорологических факторов [104, 167]. В последние десятилетия все шире используются различные физико-математические модели формирования речного стока с распределенными, т.е. изменяющимися в пространстве параметрами и концептуальные модели с сосредоточенными или частично распределенными параметрами [80, 87, 122, 127, 166, 177].

Погрешность долгосрочных прогнозов речного стока определяется:

- ошибками в исходных данных (погрешность в измерениях, анализе и расчете исходной информации);
- репрезентативностью и объемом исходных данных;
- адекватностью и полнотой описания процессов формирования речного стока;
- точностью определения параметров методики прогноза;
- ролью метеорологических элементов и неопределенностью их хода в течение заблаговременности прогноза [37, 38, 80, 166, 167].

По мере увеличения технических возможностей получения гидрометеорологической информации и внедрения все более совершенных моделей формирования речного стока неопределенность хода метеорологических элементов в течение заблаговременности прогноза становится ведущим фактором, определяющим качество прогнозирования речного стока [38, 80, 122, 106].

Современные достижения в области сверхдолгосрочного прогнозирования метеорологических характеристик пока не дают оснований для их регулярного использования в долгосрочных прогнозах речного стока [156, 200]. В связи с этим использование моделей формирования речного стока в долгосрочных прогнозах его характеристик сопровождается применением ансамблевого подхода, который предусматривает учет наблюдавшихся в прошлом сценариев хода метеорологических элементов в течение периода заблаговременности гидрологического прогноза [80, 87, 166].

Данный подход представляется вполне оправданным, однако он может вносить весомый вклад в погрешность долгосрочных прогнозов речного стока. Оценке вклада этой метеорологической составляющей в погрешность прогноза речного стока и посвящен настоящий раздел.

Оценка влияния неопределенности хода метеорологических характеристик

Рассматривается ситуация, когда для долгосрочного прогнозирования характеристики речного стока Y используется модель его формирования. Как правило, модель описывает процессы формирования речного стока с шагом в одни сутки и на входе усваивает ежедневные гидрометеорологические данные. На первом этапе выходом модели являются среднесуточные расходы воды в замыкающем створе речного бассейна, а на втором этапе по этим расходам рассчитывается прогнозируемая характеристика речного стока [80, 87, 122, 166]. Модель усваивает образующие вектор Z известные к дате составления прогноза гидрометеорологические характеристики и образующие вектор X метеорологические характеристики, которые описывают погодные условия в течение периода заблаговременности прогноза, например, ход осадков и температуры воздуха. Получаемое с помощью модели значение прогнозируемой характеристики речного стока определяется функцией $M(Z, X)$, которая выражается в неявном виде, но известна после калибровки модели. По результатам наблюдений за n лет для каждого года с номером i известны значения прогнозируемой характеристики Y_i и компоненты векторов Z_i и X_i при $i = 1, \dots, n$.

Чтобы исключить влияние неопределенности хода метеорологических элементов в течение периода заблаговременности прогноза для каждого года с номером i необходимо получить модельный расчет $M(Z_i, X_i)$ при известных для этого года значениях векторов Z_i и X_i . Качество самой модели характеризует среднеквадратическая погрешность модельных расчетов:

$$S_M = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Y_i - M(Z_i, X_i)]^2}. \quad (4.1)$$

Прогноз \tilde{Y}_i для года с номером i получается с применением ансамблевого подхода. Из возможно более продолжительного ряда X_1, \dots, X_N , берутся все значения, кроме X_i , подставляются в модель и полученные результаты усредняются:

$$\tilde{Y}_i = \frac{1}{N-1} \left[\sum_{j=1}^N M(Z_i, X_j) - M(Z_i, X_i) \right]. \quad (4.2)$$

Замечание 1

Необходимость в применении ансамблевого подхода возникает в случае, когда зависимость выхода модели, т.е. величины $M(Z, X)$ от компонент вектора X носит

нелинейный характер. В противном случае процедура получения прогноза существенно упрощается, и прогноз определяется формулой:

$$\tilde{Y}_i = M(Z_i, \bar{X}_i), \quad (4.3)$$

где \bar{X}_i – среднее арифметическое всех векторов X_1, \dots, X_N за исключением вектора X_i .

Среднеквадратическая погрешность прогноза определяется по формуле:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \tilde{Y}_i)^2}. \quad (4.4)$$

Замечание 2

При проверке расчетов и прогнозов на зависимом материале, который был использован для оценки параметров модели, формулы (4.1) и (4.4) дают заниженные значения оценок среднеквадратической погрешности расчета и прогноза, и такое занижение тем значительнее, чем больше число оцениваемых параметров [38]. Однако следует иметь в виду, что, как правило, оценка этих параметров выполняется на основе ежедневных данных гидрологических и метеорологических наблюдений в течение всего года. Следовательно, продолжительность рядов этих наблюдений с учетом високосных лет в среднем составляет n умноженное на 365,25, что многократно больше обычно используемого числа оцениваемых параметров модели и схемы корректировки ее выходов. С учетом указанного обстоятельства систематическими ошибками оценок S_M и S можно пренебречь.

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:

$$S_{met}^2 = S^2 - S_M^2. \quad (4.5)$$

Замечание 3

Если модельный расчет линейно зависит от компонент вектора X и отсутствует корреляция между ошибкой модельного расчета и этими компонентами, то отношение S_{met} / σ равно множественному коэффициенту корреляции прогнозируемой величины от компонент вектора X при заданном значении вектора Z . Таким образом, дополнительное увеличение погрешности прогноза зависит от степени влияния на прогнозируемую величину характеристик погодных условий в период его заблаговременности [24].

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

$$f = (S_{met}^2 / S^2) * 100\%, \quad (4.6)$$

которая может варьировать от 0 до 100%.

Замечание 4

Степень влияния неопределенности хода метеорологических характеристик в период заблаговременности гидрологического прогноза на его погрешность зависит не только от климатических условий речного бассейна, но и от особенностей применяемой методики. В частности, если используемая в методике прогноза модель формирования стока позволяет настолько точно рассчитывать его прогнозируемую характеристику, что погрешность модельных расчетов S_M практически равна нулю, то определяемый формулами (5) и (6) показатель f будет практически равным 100% при любых климатических условиях речного бассейна [24].

Примеры оценки влияния неопределенности метеорологических характеристик

Ниже приводятся примеры оценки метеорологической составляющей погрешности долгосрочных прогнозов речного стока, основанных на различных моделях формирования речного стока и использующих ансамблевый подход. Для каждой методики приводятся следующие показатели:

- рассчитанная по формуле (4.4) среднеквадратическая погрешность прогноза S ;
- рассчитанная по формуле (4.1) среднеквадратическая погрешность модельных расчетов S_M ;
- рассчитанный по формуле (4.5) показатель S_{met} ;
- рассчитанный по формуле (4.6) показатель влияния неопределенности хода метеорологических характеристик в течение периода заблаговременности прогноза f .

Пример 1

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 [25]. Использован ансамбль сценариев хода метеорологических элементов в период заблаговременности прогноза, который получен по данным наблюдений с 1967 по 2014 гг., т.е. $N = 48$. Проверочные прогнозы выполнены по данным наблюдений с 1982 по 2014 гг., т.е. $n = 33$ [35]. В таблице 4.1 приведены показатели качества расчетов и прогнозов весеннего притока воды в Чебоксарское водохранилище.

Приведенные в таблице 4.1 данные 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 во конце [69].

Таблица 4.1 – 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%

Пример 2

В ФГБУ «Гидрометцентр России» разработана методика долгосрочного прогнозирования среднемесячных расходов воды на реках бассейна Оки в течение маловодного периода года. В основе методики лежит южнокорейская концептуальная модель *DWAT* [177]. При разработке и проверке методики учитывались ежедневные данные гидрометеорологических наблюдений за период с 2005 по 2021 гг. Ансамбль сценариев хода метеорологических элементов в течение периода заблаговременности прогноза брался за те же годы, т.е. $n = N = 17$. В таблице 4.2 приведены показатели качества расчетов и прогнозов среднемесячных расходов воды в створе р. Ока – г. Калуга в течение маловодного периода с июля по март следующего года. В целях повышения надежности этих показателей приводятся их осредненные значения для всего маловодного периода, а также отдельно для осени и зимы.

Таблица 4.2 – Показатели качества расчетов и прогнозов среднемесячных расходов воды в створе р. Ока – г. Калуга

Период	S	S_M	S_{met}	f
маловодный	45,8	38,0	25,5	31%
осень	35,0	28,5	20,3	34%
зима	46,5	40,2	20,5	26%

Показатель f значительно ниже, чем в предыдущем случае. Это объясняется достаточно устойчивым спадом расходов воды в результате истощения запасов воды в речном бассейне, накопленных в период половодья. В период заблаговременности прогноза (один месяц) устойчивость спада нарушается выпадением осадков в виде дождя и быстро тающего снега, а

также температурным режимом, определяющим начало и конец зимы, а также возможные оттепели [80]. Значения показателя f указывают на то, что для бассейна Оки неопределенность выпадения осадков осенью оказывает большее влияние на погрешность прогнозов, чем неопределенность температурного режима зимой.

Пример 3

По заказу Уральского УГМС в ФГБУ «Гидрометцентр России» разработана методика долгосрочного прогнозирования среднемесячных расходов воды на реках бассейна Камы в течение зимнего периода. В основе методики лежит шведская концептуальная модель HBV-96 [127, 108]. При разработке и проверке методики учитывались ежедневные данные гидрометеорологических наблюдений за период с 2002 по 2020 гг. Ансамбль сценариев хода метеорологических элементов в течение периода заблаговременности прогноза брался за те же годы, т.е. $n = N = 19$. В таблице 4.3 приведены показатели качества расчетов и прогнозов среднемесячных расходов воды в створе р. Вишера у пос. Рябиново с декабря (XII) по февраль (II) следующего года.

Таблица 4.3 – Показатели качества расчетов и прогнозов среднемесячных расходов воды в створе р. Вишера у пос. Рябиново

Месяц	S	S_M	S_{met}	f
XII	38,4	22,7	31,0	65%
I	22,3	16,4	15,1	46%
II	17,8	11,7	13,4	57%

Показатель f незначительно изменяется от месяца к месяцу. Он существенно выше аналогичного показателя для бассейна Оки в зимний период ($f = 0,26$) при отсутствии явных причин климатического характера, так в бассейне Камы зима более суровая и оттепели практически отсутствуют [24]. В данном случае причина кроется в относительно меньшей погрешности модельных расчетов (см. Замечание 4).

Пример 4

В ФГБУ «Гидрометцентр России» на основе модели HBV-96 разработана система методик долгосрочного прогнозирования среднемесячных расходов воды на реках бассейна Тобола в течение маловодного периода с июля (VII) по февраль (II) следующего года и среднего расхода стока половодья за второй квартал. При разработке и проверке методик использованы данные ежедневных гидрометеорологических наблюдений за период с 2000 по 2021 гг. Ансамбль сценариев хода метеорологических элементов в течение периода заблаговременности прогнозов брался за те же годы, т.е. $n = N = 22$. В таблице 4.4 приведены

показатели качества расчетов и прогнозов указанных характеристик в створе р. Тобол – г. Курган.

Таблица 4.4 – Показатели качества расчетов и прогнозов среднемесячных и среднеквартальных расходов воды в створе р. Тобол – г. Курган

	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III	2 квартал
S	2,93	3,60	7,07	1,37	1,04	0,82	0,73	0,60	0,59	48,6
S_M	2,03	1,98	3,02	1,02	0,89	0,64	0,64	0,47	0,47	32,9
S_{met}	2,12	3,01	6,39	0,92	0,54	0,51	0,35	0,37	0,35	35,8
f	52%	70%	82%	45%	27%	38%	22%	38%	35%	54%

Показатель f принимает наиболее высокие значения для прогнозов стока за август и сентябрь, когда спад водности реки может прерываться дождевыми паводками. Минимальные значения он принимает в холодный период года с ноября по март, когда река Тобол покрыта льдом [101].

Пример 5

В ФГБУ «Гидрометцентр России» для бассейна Дона разработана аналогичная система методик долгосрочного прогнозирования среднемесячных расходов воды в течение маловодного периода и среднего расхода стока за второй квартал. Данные ежедневных гидрометеорологических наблюдений за период с 2000 по 2021 гг. использовались для разработки и проверки методик, а также для получения ансамбля сценариев хода метеорологических элементов в течение периода заблаговременности прогнозов. В таблице 4.5 приведены показатели качества расчетов и прогнозов указанных характеристик в створе р. Дон – г. Серафимович.

Таблица 4.5 – Показатели качества расчетов и прогнозов среднемесячных и среднеквартальных расходов воды в створе р. Дон – г. Серафимович

	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	2 квартал
S	48,2	31,8	29,4	29,8	44,7	57,8	87,9	62,6	177
S_M	35,4	25,9	22,9	26,4	29,9	31,9	47,2	33,1	105
S_{met}	32,6	18,5	18,4	13,8	33,3	48,1	74,1	53,1	142
f	46%	34%	39%	21%	55%	69%	71%	72%	65%

На р. Дон половодье начинается в марте, поэтому этот месяц не включен в маловодный период. В последние десятилетия в зимние месяцы все чаще наблюдаются оттепели, которые приводят к тому, что спад водности реки прерывается поступлением талых вод в русловую

сеть [63]. Неопределенность хода влияющих на речной сток метеорологических элементов в эти месяцы максимальна и возрастает от декабря к февралю. Паводки в летне-осенние месяцы незначительны, поэтому неопределенность хода метеорологических элементов в эти месяцы минимальна. Помещенные в таблицу 4.5 значения показателя f достаточно хорошо отражают отмеченные особенности формирования стока реки Дон.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Предлагаемая оценка f влияния неопределенности хода метеорологических элементов в период заблаговременности гидрологического прогноза на его погрешность в достаточной степени согласуется с условиями формирования стока рассматриваемых рек.

2. 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%.

3. 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 [37].

4.2 Неопределенность пространственной изменчивости характеристик формирования речного стока

При разработке общих методов и конкретных методик долгосрочного прогнозирования стока рек и притока воды в водохранилища одну из главных проблем составляет неопределенность пространственно-временной изменчивости характеристик его формирования. Приемы частичного устранения этой неопределенности предусматривают осреднение вероятных колебаний этих характеристик в течение периода заблаговременности прогноза или их распределения по территории водосбора.

Осреднение вероятных колебаний характеристик формирования речного стока в период заблаговременности прогноза широко используется при долгосрочном прогнозировании месячного стока рек или притока воды в водохранилища в маловодный период года. В частности, осреднение возможных отклонений от предполагаемого экспоненциального спада водности после прохождения волны половодья приводит к известной линейной формуле получения прогноза характеристики месячного стока или притока в зависимости от аналогичной характеристики за предыдущий месяц [104]. Пример достаточно успешной реализации такого подхода для долгосрочного прогнозирования месячного притока воды в Цимлянское водохранилище приведен в работе [37].

При долгосрочном прогнозировании стока весеннего половодья не менее важную роль играет осреднение характеристик формирования речного стока по территории водосбора. В связи с этим необходимо обратить внимание на одно важное в методическом отношении обстоятельство.

Осреднение характеристик процессов формирования речного стока в пространстве приводит к трансформации физически обоснованных формул, описывающих процессы формирования речного стока и используемых в современных физико-математических моделях. Подобную трансформацию демонстрируют следующие примеры.

Пример 1

Рассмотрим последствия пространственного осреднения процесса склонового стока. В каждой точке водосбора расход воды поверхностного и внутрисочвенного 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. В каждой точке водосбора эти величины связаны физически обоснованным соотношением:

$$q = q(h, p) = \begin{cases} \text{если } h \leq p; \\ h - p, & \text{если } h > p. \end{cases} \quad (4.7)$$

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:

$$\bar{q} = \int_0^{\infty} \int_p^{\infty} (h - p) f(h, p) dh dp. \quad (4.8)$$

При различных вариантах определения функции $f(h, p)$ получаются следующие результаты.

1. Пусть расход поступления воды h постоянен для всего водосбора и, следовательно, равен своему среднему значению \bar{h} . Пространственное распределение расхода потерь p описывается показательным распределением со средним значением \bar{p} . Тогда уравнение (4.7) трансформируется в предложенную Е.Г. Поповым формулу:

$$\bar{q} = \bar{h} - \bar{p} \left(1 - e^{-\frac{\bar{h}}{\bar{p}}}\right). \quad (4.9)$$

2. Пусть расход потерь p постоянен для всего водосбора и, следовательно, равен своему среднему значению \bar{p} . Пространственное распределение расхода поступления воды

h описывается показательным распределением со средним значением \bar{h} . Тогда уравнение (4.7) трансформируется в формулу:

$$\bar{q} = \bar{h} e^{-\frac{\bar{p}}{\bar{h}}}. \quad (4.10)$$

3. Пусть пространственное распределение расхода поступления воды h и расхода потерь p не зависят друг от друга и описываются показательным распределением со средними значениями \bar{h} и \bar{p} соответственно. Тогда уравнение (4.7) трансформируется в формулу:

$$\bar{q} = \frac{\bar{h}}{1 + \frac{\bar{p}}{\bar{h}}}. \quad (4.11)$$

Пример 1 демонстрирует, что при различных вариантах пространственного распределения расхода поступления воды и расхода потерь общий характер зависимости среднего для всего водосбора расхода воды склонового стока \bar{q} от средних значений этих величин \bar{h} и \bar{p} такой же, как и у определяемой уравнением (4.7) зависимости q от величин h и p в каждой точке водосбора. Однако в каждом конкретном случае зависимость \bar{q} от величин \bar{h} и \bar{p} определяется формулой, принципиально отличающейся от определяемого физикой рассматриваемого явления теоретического уравнения (4.7).

Пример 2

Предположим, что при описании одного из процессов формирования речного стока и в соответствующем блоке физико-математической его модели характеристики X, Y и Z связаны физически обоснованной формулой $Y = g(X, Z)$. При этом на момент составления прогноза величина X известна, а величина Z – нет. В результате осреднения теоретической формулы по вероятным значениям неизвестной величины Z она трансформируется следующим образом:

$$Y = \bar{g}(X) = \int_{-\infty}^{\infty} g(X, Z) f(Z | X) dZ, \quad (4.12)$$

где $f(Z | X)$ – условная плотность распределения вероятностей величины Z при заданном значении X . Если исходная теоретическая функция имеет вид $g(X, Z) = a(X)b(Z)$, то в результате осреднения характер зависимости Y только от X при фиксированном значении Y сохранится, так как будет описываться функцией $\bar{g}(X) = \bar{b}a(X)$. Характер зависимости Y от X сохранится и в случае, когда функция $g(X, Z)$ является линейной комбинацией функций

вида $a(X)b(Z)$. Во всех остальных случаях характер зависимости Y от X в теоретической формуле $Y = g(X, Z)$ и в осредненной формуле $Y = \bar{g}(X)$ будут различными.

Возвращаясь к первому примеру, рассмотрим зависимость среднего для всего водосбора расхода воды склонового стока \bar{q} от средних значений расхода поступления воды на его поверхность \bar{h} и расхода потерь на испарение, поверхностное задержание, восполнение запасов воды в почве и отток влаги в нижележащие слои грунта \bar{p} . В качестве величин X, Y и Z рассматриваются характеристики половодья \bar{h} , \bar{q} и \bar{p} .

Предположим, что зависимость $\bar{q} = g(\bar{h}, \bar{p})$ определяется формулой (4.10), которая соответствует постоянному для всего водосбора расходу потерь \bar{p} и показательному пространственному распределению расхода поступления воды на его поверхность со средним значением \bar{h} . При отсутствии данных о состоянии почвенного покрова и грунтов к началу половодья и при отсутствии прогноза его ожидаемого изменения в период заблаговременности прогноза величина средних по водосбору потерь \bar{p} является неизвестной и, следовательно, должна рассматриваться, как случайная.

1. При нормальном распределении вероятностей этой величины с математическим ожиданием m_p и дисперсией D_p формулы (4.9) и (4.11) приводят к зависимости среднего для всего водосбора расхода воды склонового стока \bar{q} от среднего расхода поступления воды на его поверхность \bar{h} , которая имеет следующий вид:

$$\bar{q} = \frac{\bar{h}}{\sqrt{2\pi D_p}} \text{Exp}\left(-\frac{2m_p \bar{h} - D_p}{\bar{h}^2}\right). \quad (4.13)$$

где Exp – обозначение экспоненциальной функции.

2. При показательном распределении вероятностей величины \bar{p} с математическим ожиданием m_p формулы (4.10) и (4.12) приводят к зависимости среднего для всего водосбора расхода воды склонового стока \bar{q} от среднего расхода поступления воды на его поверхность \bar{h} , которая имеет следующий вид:

$$\bar{q} = \frac{\bar{h}}{1 + \frac{m_p}{\bar{h}}}. \quad (4.14)$$

Пример 2 демонстрирует, что при различных вариантах распределения вероятностей возможных значение расхода потерь общий характер зависимости среднего для всего водосбора расхода воды склонового стока \bar{q} от среднего значения расхода поступления воды на его поверхность \bar{h} остается таким же, как и в исходной формуле (4.10). Однако в

каждом конкретном случае зависимость \bar{q} от величины \bar{h} определяется формулой, принципиально отличающейся от исходного соотношения (4.10).

Влияние пространственной изменчивости характеристик речного стока учитывается путем их усреднения. Применение для этой цели различных вариантов распределения вероятностей для учета этой изменчивости приводит к трансформации физически обоснованных формул, описывающих процессы формирования талого и дождевого стока. Выбор таких вариантов основан не на теории пространственно-временной изменчивости речного стока и его факторов, а на сложившихся традициях и опыте их применения в гидрологических прогнозах. Каждый вариант аналитического описания распределения характеристик условий формирования речного стока в пространстве или их изменчивости во времени основан на некоторой статистической гипотезе, которую нельзя доказать, а можно лишь проверить ее непротиворечивость данным наблюдений [106]. Таким образом, попытки устранения неопределенности пространственно-временной изменчивости приводит к исчезновению физически обоснованных формул, описывающих процессы формирования талого и дождевого стока в отдельной точке водосбора и в конкретный момент времени. Остаются только связи между имеющимися на дату составления прогноза характеристиками ожидаемого половодья. Общий вид этих зависимостей соответствует исходным теоретическим формулам, однако они отражают специфику конкретного водосбора и располагаемой гидрометеорологической информации, на основе статистического анализа которой и должны оцениваться.

Проблемы с использованием физически обоснованных формул, описывающих процессы формирования речного стока, могут быть обусловлены не только неопределенностью некоторых характеристик этих процессов, но недостатком информации о постоянных для водосбора факторах. К таким факторам относятся рельеф, почвенный и растительный покров, гидрогеологические условия, форма строения и гидравлические характеристики русла основной реки, ее притоков и временных водотоков.

Например, даже в концептуальных моделях формирования речного стока, предназначенных для краткосрочного прогнозирования расходов и уровней воды на реках в условиях достаточно точного прогнозирования метеорологических элементов на период заблаговременности прогноза, именно нехватка информации о гидравлических характеристиках русловой сети вынуждает отказаться от системы уравнений Сен-Венана. Для описания процесса трансформации склонового и руслового стока используется интеграл Дюамеля, который связывает изменение во времени расхода воды в замыкающем створе $Q(t)$ и среднего для всего водосбора расхода воды склонового стока $\bar{q}(t)$ формулой:

$$Q(t) = \int_0^t \bar{q}(t-\tau)K(\tau)d\tau, \quad (4.15)$$

где функция $K(\tau)$ описывает кривую добегания. За $t=0$ обычно принимается начало половодья [79, 80]. Формула (4.15) соответствует «генетической формуле стока и в простейшем виде выражает одновременность добегания до замыкающего створа склонового и руслового стока с различных частей бассейна. С математической точки зрения формула (4.15) означает, что функция $Q(t)$ выражается через функцию $\bar{q}(t)$ с помощью стационарного линейного оператора при условии, что $Q(t)$ не зависит от $\bar{q}(t)$ при $\tau > t$. В ряде случаев в правую часть формулы (4.15) добавляется расход воды грунтового стока (базисного) $Q_{sp}(t)$ из глубоких водоносных горизонтов [3, 13, 29, 33, 50]. Для небольших горных рек такое решение вызывает ряд обоснованных возражений, так как линейность данного оператора означает постоянство времени бассейнового добегания при прохождении паводков любой высоты. Кроме того, интеграл Дюамеля не учитывает возникновение подпора в узлах слияния. Тем не менее, использованию формулы (4.15) редко удается найти альтернативу [46, 73, 77, 80, 227].

Изложенные выше причины в достаточной степени обосновывают эмпирический подход к разработке общих методов и конкретных методик долгосрочного прогнозирования элементов водного режима рек и притока воды в водохранилища. Уравнение водного баланса и информация о различных процессах, определяющих формирование и режим талого и дождевого стока, учитываются косвенно – для обоснования состава предикторов и общего вида прогностической зависимости. В конечном итоге формулы или графики, определяющие способ получения прогноза для конкретного водосбора, являются результатом статистического анализа данных многолетних гидрологических и метеорологических наблюдений.

Наглядной иллюстрацией сказанного служит принятый подход к долгосрочному прогнозированию важнейшей характеристики водного режима – объема, среднего расхода воды или слоя стока Y за период половодья. Уравнение водного баланса и информация о процессах формирования талого и дождевого стока определяют общий характер зависимости величины Y от слоя поступления воды на поверхность речного бассейна X и слоя потерь талого и дождевого стока E . Эта зависимость описывается схематическим графиком, представленным на рисунке 4.1 [105].

Для равнинных рек с преобладанием внутрипочвенного подпертого и подвешенного склонового стока показатель потерь стока половодья p определяется в зависимости от различных характеристик влажности почвы и степени ее промерзания. Для горных рек с

преобладанием подпертого поверхностного и контактного склонового стока роль показателя X накопившихся к началу половодья запасов воды в снежном покрове и осадков за период половодья является доминирующей. Запасы воды в снежном покрове на горных склонах определяют не только основную часть поступления воды на поверхность водосбора, но и потери талого стока на испарение. Роль потерь на поверхностное задержание невелика. Потери талого стока на восполнение запасов воды в почве и отток влаги в нижележащие слои грунта при «провальном» поступлении талых вод в слой рыхлых отложений также косвенно характеризуется показателем запасов воды в снеге. В результате для таких горных водосборов показатель потерь стока половодья E может приниматься постоянным, а представленный на рисунке 4.1 схематический график может определяться одной линией [4, 105].

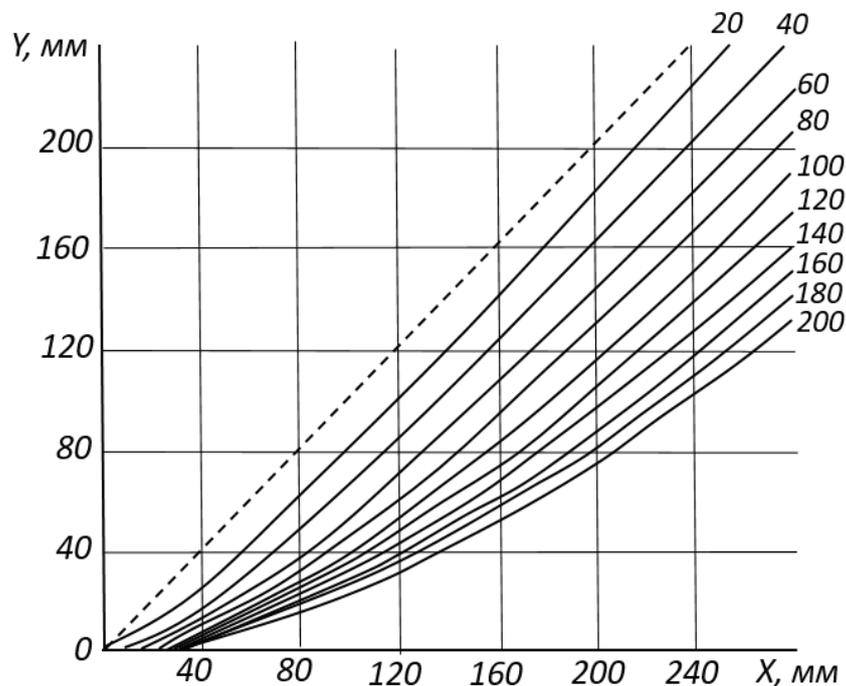


Рисунок 4.1 – Схематический график зависимости слоя стока половодья Y от слоя поступления воды X и потерь талого и дождевого стока E

Таким образом, неопределенность пространственной изменчивости характеристик формирования речного стока приводит к тому, что содержащиеся в схемах получения его долгосрочных прогнозов физически обоснованные теоретические и полу теоретические формулы превращаются в чисто эмпирические. При получении этих формул необходимо учитывать статистические свойства гидрометеорологической информации, располагаемой к дате составления долгосрочного прогноза речного стока, и рассмотренные в разделах 4.1 и 4.2 факторы, ограничивающие возможности долгосрочного прогнозирования. Желательно, чтобы схема прогнозирования могла использоваться в рамках автоматизированной системы

подготовки и выпуска прогнозов, а входящие в нее параметры могли без особого труда переоцениваться с учетом происходящих климатических и антропогенных изменений условий формирования речного стока [37].

Примеры достаточно успешной реализации такого подхода представлены в следующих разделах.

4.3 Долгосрочное прогнозирование характеристик весеннего стока рек бассейна Тобола

Постановка задачи

Вызванное таянием снежного покрова весеннее половодье является характерной фазой водного режима большинства рек России, включая реки бассейна Тобола. Объем или слой стока за период весеннего половодья или за какой-либо жестко обозначенный интервал времени, например, за второй квартал является практически очень важной гидрологической характеристикой. Ее прогноз с достаточными заблаговременностью и точностью позволяет определить эффективный режим сработки и наполнения водохранилищ в предвесенний и весенний периоды, а также использование водных ресурсов в последующие месяцы. Не менее важной характеристикой является максимальный уровень воды за период весеннего половодья в заданном речном створе, прогноз которого определяет вероятные зоны затопления прилегающих к этому створу территорий и необходим для организации мероприятий по защите населения и хозяйственных объектов [104, 185].

В течение многих лет исследование процессов формирования весеннего половодья находится в центре внимания мировой и, прежде всего, отечественной гидрологии [76, 79, 87, 104, 143, 146, 166, 185]. В настоящее время эти процессы можно считать достаточно хорошо изученными, поэтому точность долгосрочных прогнозов характеристик весеннего половодья определяется уровнем гидрометеорологической изученности конкретного речного бассейна и лимитируется неопределенностью хода метеорологических элементов в течение заблаговременности прогноза, который составляется перед началом весеннего половодья [40, 168].

Методы, применяемые в отечественной оперативной практике долгосрочного прогнозирования стока весеннего половодья, отражены в Выпуске 1 «Руководства по гидрологическим прогнозам», изданном в 1989 г. [104]. В основном такие прогнозы реализуются с помощью физико-статистических зависимостей прогнозируемой величины от известных к дате составления прогноза характеристик факторов весеннего половодья [38, 104, 168].

Эти зависимости должны уточняться по мере накопления данных гидрометеорологических наблюдений и происходящих климатических и антропогенных изменений условий формирования стока весеннего половодья. Причем могут уточняться не только параметры этих зависимостей, но их вид и состав используемых в них предикторов. Одновременно должна расширяться сфера применения подобных зависимостей для прогнозирования стока весеннего половодья все большего количества рек. В связи с этим для рек бассейна Тобола в отделе речных гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» разработаны методики долгосрочного прогнозирования характеристик их весеннего стока [1].

Общие сведения о рассматриваемых водосборах

Река Тобол берет начало в Оренбургской области на границе восточных отрогов Южного Урала и Тургайской Столовой страны, далее течет по территории Республики Казахстан. Среднее и нижнее течение реки расположено в пределах Западно-Сибирской равнины. Крупнейшие притоки слева – Уй, Исеть, Тура, Тавда, справа – Убаган [101].

Сток малых рек зарегулирован прудами и водохранилищами сезонного регулирования. Наиболее крупными являются Аргазинское водохранилище на р. Миасс, Белоярское на р. Пышма и Исетское на р. Исеть. На территории Казахстана сток Верхнего Тобола зарегулирован каскадом водохранилищ – Желкуарским, Верхнетобольским, Каратамарским, Сергеевским и Амангельдинским [40].

Питание рек бассейна Тобола в основном снеговое, вниз по течению возрастает доля дождевого питания. Половодье длится с 1-й половины апреля до середины июня в верховьях и до начала августа в низовьях. Замерзает в низовьях в конце октября – ноябре, в верховьях – в ноябре, вскрывается во 2-й половине апреля – 1-й половине мая. Основной сток (от 50% до 75%) приходится на весеннее половодье. Именно в этот период наблюдаются максимальные уровни воды [40, 101]. Характерными особенностями формирования половодья на реках бассейна Тобола являются достаточно глубокое промерзание почвы за счет низких зимних температур и наличие относительно больших постоянно бессточных площадей, обусловленных плоским рельефом [106].

Методики долгосрочного прогнозирования слоя стока за второй квартал и максимального уровня воды для 7 рек бассейна Тобола основаны на данных многолетних гидрометеорологических наблюдений за период с 1968 по 2021 гг. В таблицу 4.6 для этих створов помещены номера соответствующих гидрологических постов, название реки и пункта, площадь водосбора, норма слоя стока за второй квартал \bar{Y}_{II} мм и его коэффициент вариации C_V .

Таблица 4.6 – Основные характеристики исследуемых водосборов

Индекс	Река	Пункт	Площадь, км ²	\bar{Y}_{II} , мм	C_v
12014	Тобол	г. Курган	159000	6,22	0,96
12043	Уй	п. Плодовый	7660	28,4	0,68
12127	Исеть	с. Мехонское	52300	27,5	0,69
12239	Тура	г. Туринск	29000	99,2	0,39
12315	Ница	г. Ирбит	17300	67,9	0,46
12412	Тавда	с. Таборы	74200	98,3	0,32
12611	Сосьва	с. Морозково	11500	123,7	0,25

Заниженное значение слоя стока за второй квартал в створе р. Тобол – г. Курган вызвано заполнением водохранилищ на территории Казахстана в весенний период.

Выбор водосборов обусловлен запросами ФГБУ «Уральское УГМС» на разработку методики долгосрочного прогнозирования весеннего стока и стремлением учесть сам Тобол и его основные притоки.

Расположение рассматриваемых гидрологических постов и соответствующих им речных створов показано на рисунке 2.10. В таблице 4.7 для рассматриваемых водосборов представлено осредненное за многолетний период распределение стока по месяцам в процентах от объема годового стока.

Таблица 4.7 – Внутригодовое распределение месячного стока

Река	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Тобол	2%	2%	2%	25%	40%	9%	5%	4%	3%	3%	3%	2%
Уй	1%	1%	3%	55%	14%	6%	5%	5%	3%	3%	2%	1%
Исеть	3%	3%	3%	30%	20%	10%	7%	6%	5%	5%	5%	3%
Тура	2%	1%	2%	12%	34%	16%	8%	7%	6%	6%	4%	2%
Ница	2%	2%	3%	28%	23%	10%	7%	6%	5%	6%	4%	3%
Тавда	2%	1%	1%	5%	22%	24%	15%	8%	7%	7%	5%	3%
Сосьва	2%	2%	2%	9%	28%	17%	10%	8%	8%	7%	4%	3%

Приведенные данные показывают, что на второй квартал, в течение которого проходит весеннее половодье, приходится от 50 до 75% годового стока.

Долгосрочное прогнозирование слоя речного стока за второй квартал

В современной гидрологии процессы формирования стока половодья достаточно хорошо изучены и описываются различными физико-математическими и концептуальными моделями [76, 87, 104, 143, 146, 166]. Эти модели широко используются в краткосрочных прогнозах речного стока, однако при его долгосрочном прогнозировании возникают проблемы, связанные с неопределенностью хода метеорологических элементов в течение периода заблаговременности прогноза и отсутствием необходимых гидрометеорологических наблюдений [79, 87, 104, 168]. В связи с этим для долгосрочного прогнозирования характеристик стока весеннего половодья применяются различные эмпирические формулы, реализующие физико-статистический подход [38, 104, 185].

Для рассматриваемого региона слой талого и дождевого стока за период половодья Y , мм, рекомендуется выражать формулой:

$$Y = \alpha [X - E(U)] \operatorname{th}[X / E(U)], \quad (4.16)$$

где α – параметр, учитывающий долю бессточных площадей в бассейне;

X , мм, – слой поступившей на поверхность бассейна воды за счет таяния снега и выпадения осадков за период половодья;

th – знак гиперболического тангенса;

$E(U)$, мм, – свободная емкость бассейна, которая определяет потери весеннего стока и является функцией от показателя предшествующего увлажнения водосбора U . При отсутствии непосредственно измеренных данных о влажности почвы накануне начала половодья используются различные варианты определения показателя U и функции $E(U)$ [104].

В частности, в качестве показателя предшествующего увлажнения U Д.А. Бураковым предложено использовать слой стока за период с сентября по ноябрь предшествующего года за вычетом его минимального наблюдавшегося значения, а для расчета свободной емкости бассейна была предложена формула:

$$E(U) = E_{\max} - A \lg(U + 1), \quad (4.17)$$

Параметры α , E_{\max} и A – подлежат оценке по данным многолетних гидрометеорологических наблюдений для каждого конкретного речного бассейна [29, 30].

Суммарный слой стока половодья Y_n определяется путем прибавления к величине Y слоя базисного стока, определяемого по минимальным расходам воды предвесеннего периода. Слой стока за второй квартал Y_{II} определяется по его линейной и, как правило, весьма тесной зависимости от величины Y_n [104].

Формулы (4.16), (4.17) и подобные им являются физически обоснованными и в целом хорошо зарекомендовавшими себя на практике, однако они не исчерпывают возможности

получения прогноза характеристик весеннего стока. В целях повышения эффективности подготовки и выпуска прогнозов желательно, чтобы используемая эмпирическая формула обладала следующими дополнительными свойствами:

- 1) она должна адекватно описывать зависимость прогнозируемой величины от используемых предикторов в реально наблюдаемом диапазоне их вероятных значений;
- 2) эта зависимость должна быть достаточно тесной;
- 3) содержащиеся в ней параметры должны максимально просто оцениваться по многолетнему ряду гидрометеорологических наблюдений.

С учетом данного обстоятельства на основе статистического анализа располагаемых для рассматриваемых речных бассейнов данных многолетних гидрометеорологических наблюдений и оценки применимости различных формул прогнозирования слоя стока за второй квартал Y_{II} , мм, был выбран вариант, в котором используются следующие предикторы:

- S_{\max} , мм – полученный по результатам снегомерных маршрутов и осредненный по территории водосбора максимальный запас воды в снежном покрове, известный к дате составления прогноза 25 марта и характеризующий поступление талых вод на поверхность водосбора;
- $\ln(Q_{XI})$ – логарифм среднего расхода воды за ноябрь предыдущего года, характеризующий предзимнее увлажнение водосбора;
- Q_{III} , м³/с – средний расход воды за месяц, предшествующий дате выпуска прогноза, фактически – мартовский сток, и характеризующий базисный сток перед началом половодья.

В реально наблюдаемом диапазоне вероятных значений слоя стока за второй квартал и используемых предикторов зависимость Y_{II} от S_{\max} , $\ln(Q_{XI})$ и Q_{III} носит линейный характер, поэтому предлагаемая формула получения долгосрочного прогноза \tilde{Y}_{II} слоя стока за второй квартал имеет вид:

$$\tilde{Y}_{II} = a_0 + a_1 S_{\max} + a_2 \ln(Q_{XI}) + a_3 Q_{III}. \quad (4.18)$$

Параметры формулы (4.18) оценивались методом наименьших квадратов по ряду фигурирующих в ней переменных за период с 1968 по 2021 гг. продолжительностью $n = 54$ года [1]. В течение этого периода в бассейне Тобола не произошло значительных климатических изменений условий формирования половодья, а антропогенная нагрузка стабилизировалась [40]. Для всех рассматриваемых речных створов значения этих параметров приведены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Значения параметров формулы (4.18)

Река	a_0	a_1	a_2	a_3
Тобол	-4,80	-0,04	3,61	0,07
Уй	-0,65	0,16	17,34	0,18
Исеть	-76,0	0,18	22,05	0,21
Тура	-76,0	0,8	16,57	0,70
Ница	-74,4	0,52	28,17	0,16
Тавда	-83,4	0,77	17,25	-0,05
Сосьва	-35,8	0,38	26,59	0,61

При использовании формулы (4.18) необходимо иметь в виду, что в редких случаях, когда прогнозируемое значение \tilde{Y}_{II} оказывается отрицательным, его следует заменять нулем.

Долгосрочное прогнозирование максимального уровня воды за период половодья

Для получения прогноза максимального уровня воды H_{\max} , см, за период весеннего половодья используется его зависимость от слоя стока половодья Y_n , мм, или слоя стока за второй квартал Y_{II} , мм. Эта зависимость часто бывает нелинейной, что затрудняет ее применение [104, 167]. Пример такой зависимости представлен на рисунке 4.2.

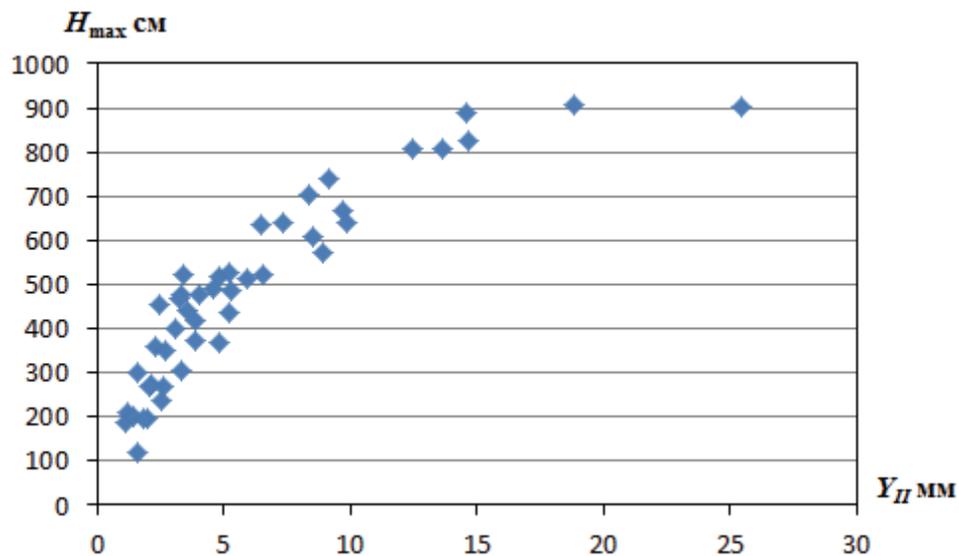


Рисунок 4.2 – Зависимость максимального уровня воды H_{\max} от слоя стока за второй квартал Y_{II} в створе р. Тобол – г. Курган

Следует, однако, заметить, что при прогнозировании максимальных уровней воды используются не фактические значения слоя стока за половодье или за второй квартал, а их прогнозы. Содержащиеся в этих прогнозах ошибки увеличивают разброс точек на графике.

Этот разброс маскирует особенности этого графика и, в частности, его нелинейность. В результате зависимость максимального уровня воды от прогноза слоя стока выравнивается. Пример такого эффекта представлен на рисунке 4.3.

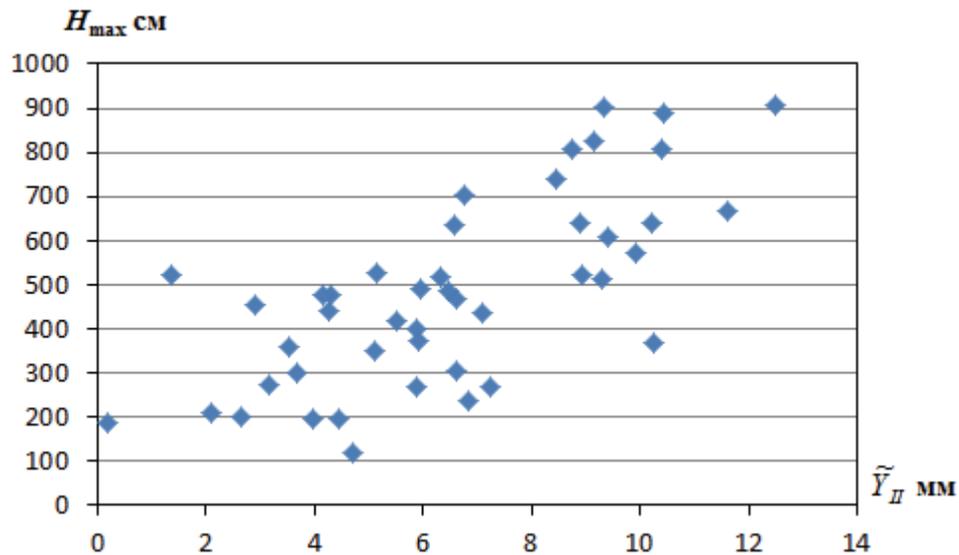


Рисунок 4.3 – Зависимость максимального уровня воды H_{max} от прогноза по формуле (4.18) слоя стока за второй квартал \tilde{Y}_{II} в створе р. Тобол – г. Курган

Приблизительно линейный характер зависимости максимального уровня воды H_{max} от прогноза по формуле (4.18) слоя стока за второй квартал \tilde{Y}_{II} приводит к линейному виду зависимости максимального уровня воды за период половодья H_{max} от предикторов S_{max} , $\ln(Q_{XI})$ и Q_{III} . Это позволяет предложить следующую формулу получения долгосрочного прогноза \tilde{H}_{max} :

$$\tilde{H}_{max} = b_0 + b_1 S_{max} + b_2 \ln(Q_{XI}) + b_3 Q_{III}. \quad (4.19)$$

Максимальные уровни весеннего половодья на реках бассейна Тобола наблюдаются в апреле и мае [40, 101]. Следовательно, прогноз \tilde{H}_{max} по формуле (4.19) может быть получен 25 марта, когда значения всех предикторов уже известны. Параметры формулы (4.19) также оценивались методом наименьших квадратов по ряду фигурирующих в ней переменных за период с 1968 по 2021 гг. [1]. Для всех рассматриваемых речных створов значения этих параметров приведены в таблице 4.9.

Верификация методик прогнозирования

В целях верификации предлагаемых методик фактические значения слоя стока за второй квартал Y_{II} и максимального уровня воды H_{max} сравнивались с их прогнозами \tilde{Y}_2 и \tilde{H}_{max} . Анализировался ряд ошибок проверочных прогнозов за период с 1968 по 2021 гг.

продолжительностью $n = 54$ года. Для всех рассматриваемых речных бассейнов средние значения ошибок проверочных прогнозов по предлагаемым методикам оказались равными нулю, т.е. методики не дают систематических ошибок прогноза.

Таблица 4.9 – Значения параметров формулы (4.19)

Река	b_0	b_1	b_2	b_3
Тобол	-62,0	-0,93	172,36	0,49
Уй	247,9	0,10	133,62	-6,97
Исеть	246,3	-0,08	7,95	4,74
Тура	-213	3,58	109,74	0,95
Ница	178,8	1,47	110,46	-1,78
Тавда	75,3	2,56	86,39	-0,50
Сосьва	283,0	1,08	54,50	4,95

Проверка выполнялась на зависимом материале, который использовался при оценке параметров формул (4.18) и (4.19). В целях получения несмещенных оценок среднеквадратической погрешности прогноза S по обеим методикам использовался рассмотренный в разделе 1.2 первой главы метод 1, в котором учитывается соотношение между длиной ряда проверочных прогнозов $n = 54$ и числом $k = 4$ оцениваемых параметров формул (4.18) и (4.19) [1, 38].

Согласно [91] эффективность каждой методики оценивалась соотношением S/σ среднеквадратической погрешности получаемых с ее помощью прогнозов к погрешности климатического прогноза [18].

В таблице 4.10 приведены следующие показатели качества прогнозов слоя стока за второй квартал:

- коэффициент корреляции R между фактическими значениями и их прогнозами;
- среднеквадратическая погрешность прогноза S мм;
- показатель эффективности прогноза S/σ ;
- оправдываемость прогноза P , равная частоте случаев, когда абсолютные значения ошибок прогноза не превышали значение допустимой ошибки $0,674\sigma$.

Приведенные показатели свидетельствуют о том, что для всех рассматриваемых бассейнов долгосрочные прогнозы слоя стока за второй квартал по предлагаемой методике могут быть отнесены к категории удовлетворительных или хороших (р. Тобол).

В таблице 4.11 приведены аналогичные показатели качества прогнозов максимального уровня воды за период половодья.

Таблица 4.10 – Показатели качества прогнозов слоя стока за второй квартал

Река	R	S	S/σ	$P, \%$
Тобол	0,73	2,4	0,43	83
Уй	0,69	14,6	0,71	67
Исеть	0,77	14,0	0,72	77
Тура	0,82	22,3	0,57	75
Ница	0,83	17,3	0,56	71
Тавда	0,75	21,3	0,67	86
Сосьва	0,68	24,1	0,73	68

Таблица 4.11 – Показатели качества прогнозов максимального уровня воды за период половодья

Река	R	S	S/σ	$P, \%$
Тобол	0,75	143	0,61	69
Уй	0,71	82,7	0,71	68
Исеть	0,68	73,8	0,73	71
Тура	0,86	86,1	0,51	88
Ница	0,81	55,5	0,55	80
Тавда	0,73	78,2	0,67	66
Сосьва	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.

В целях демонстрации эффективности предлагаемой методики долгосрочного прогнозирования максимального уровня воды показатели ее качества для бассейна р. Тобол у г. Курган сравниваются с аналогичными показателями методики, разработанной в ФГБУ «Уральское УГМС» на основе рекомендаций, содержащихся в «Руководстве по гидрологическим прогнозам» [104]. Методика включает предварительное получение прогноза слоя весеннего половодья в зависимости от осредненных по территории водосбора максимальных запасов воды в снеге, осадков и температуры воздуха с третьей декады июля по дату установления снежного покрова предыдущего года. Для получения прогноза максимальных уровней воды используется их эмпирическая зависимость от значений слоя весеннего половодья.

Статистический анализ ряда ошибок прогноза по методике ФГБУ «Уральское УГМС» дал следующие результаты:

- 1) среднее значение ошибки прогноза равно 85,4 см;
- 2) среднеквадратическая погрешность прогноза равна $S = 183$ см;
- 3) отношение среднеквадратической погрешности прогноза к стандартному отклонению прогнозируемой величины равно $S/\sigma = 0,78$;
- 4) оправдываемость прогнозов равна $P = 61\%$.

Согласно [91] исходная методика также может быть признана удовлетворительной, однако, она завышает максимальные уровни воды на 85,4 см, погрешность ее прогнозов значительно больше, а оправдываемость меньше, чем у предлагаемой методики [1].

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.

4.4 Долгосрочное прогнозирование притока воды в Цимлянское водохранилище

Общие сведения

Цимлянское водохранилище на реке Дон заполнено в 1953 г., имеет полезный объем 11,5 км³ и осуществляет многолетнее регулирование в интересах судоходства, ирригации и гидроэнергетики. Площадь водосбора в створе Цимлянского гидроузла составляет 255 000 км² [100].

Приток воды в водохранилище определяется по данным наблюдений на гидрологических постах и уточняется расчетами водного баланса. Река Дон дает около 94% притока воды в Цимлянское водохранилище. В течение всего года за исключением пика весеннего половодья ежедневные данные о расходах этого притока рассчитываются по данным гидрологического поста р. Дон – г. Калач-на-Дону, имеющего водосборную площадь 222 000 км². В весенний период, когда данный пост находится в зоне подпора, ежедневные данные о расходах притока р. Дон в водохранилище рассчитываются по данным гидрологического поста р. Дон – ст. Новогригорьевская, который расположен в 52 км выше и имеет водосборную площадь 208 000 км². Боковой приток дает около 6% притока. Боковая водосборная площадь Цимлянского водохранилища от плотины до г. Калач-на-Дону составляет 28 048 км². Для вычисления ежедневного бокового притока используются данные гидрометрических постов на реках Чир, Аксенец и Цимла, впадающих с правого берега водохранилища, и рек Иловля, Аксай Есауловский, Аксай Курмоярский, Тишанка и Панышинка, впадающих с левого берега [82].

Краткосрочные с заблаговременностью 1–5 суток, среднесрочные с заблаговременностью 6–12 суток и долгосрочные прогнозы притока воды в Цимлянское водохранилище за различные интервалы времени от суток до квартала необходимы для обеспечения обоснованного режима его наполнения и сработки. Они позволяют снизить вероятность нежелательного повышения уровня воды в водохранилище и возникновения дефицита воды в его нижнем бьефе [6].

В связи с имевшими в последние десятилетия значительными климатическими и антропогенными изменениями условий формирования притока воды в Цимлянское водохранилище разработанные ранее методики его прогнозирования устарели и уже не имеют требуемой точности. В связи с этим в настоящей статье предлагаются новые методики, основанные на предоставленной Северо-Кавказским УГМС гидрометеорологической информации за последние десятилетия.

Климатические и антропогенные изменения водного режима притока в Цимлянское водохранилище

До начала 1930-х гг. XX века условия формирования стока р. Дон и его притоков незначительно отличались от естественных. Доля снегового питания составляла 70%, дождевого – менее 10%, подземного – около 20%. Было характерно высокое половодье и низкая межень в остальное время года. Осенние паводки были выражены слабо, летние – крайне редки [54, 100].

В течение последних десятилетий в бассейне р. Дон отмечается потепление климата и увеличение его влажности. В наибольшей степени потепление климата повлияло на среднюю температуру воздуха холодного периода с ноября по март, которая возросла более чем на 2°C. Повышение температуры холодного периода сопровождается увеличением суммы положительных температур за холодный период, частоты и продолжительности оттепелей. За последние сорок лет устойчивый переход к отрицательным температурам воздуха стал происходить позже в среднем на 10 суток. Средние даты начала пятидневного безморозного периода сместились в сторону более ранних чисел на 12 суток. Таким образом, зима стала короче, позже начинаться и раньше заканчиваться. За этот же период годовая сумма осадков возросла на 3%, при этом сумма осадков за холодный период возросла на 11%. Благодаря участвующимся оттепелям, статистически достоверного увеличения запасов воды в снежном покрове на конец февраля пока не обнаружено [44, 63].

Антропогенная нагрузка в бассейне Дона оценивается, как очень высокая. До начала 1990-х гг. она имела тенденцию к увеличению, в последующие десять лет она снизилась, для последних двадцати лет характерна стабилизация [8, 17, 56].

Прямое воздействие на речной сток оказывают безвозвратный забор воды на орошение, промышленное и коммунально-бытовое водоснабжение, а также строительство прудов, водохранилищ и каналов. Безвозвратный забор воды превышал 5 млн м³/год, за последние тридцать лет он снизился до 3 млн м³/год [44, 63].

Регулирование речного стока в бассейне Дона осуществляется 48 крупными водохранилищами, включая Цимлянское и около 12 тысячами прудов и малых водохранилищ. Переброска стока происходит благодаря Волго-Донскому каналу, расположенному выше Цимлянского водохранилища [8, 17, 63].

К косвенным факторам хозяйственной деятельности, оказывающим влияние на условия формирования стока рек бассейна Дона, относятся агротехнические мероприятия, которые в целом приводят к его снижению, и урбанизация территории, приводящая к его незначительному увеличению [8].

Под влиянием климатических и антропогенных факторов произошло снижение годового стока реки Дон и изменчивости его многолетних колебаний. Сравнение первой (1911–1966 гг.) и второй (1967–2021 гг.) половин этого периода показало, что среднее значение расхода воды снизилось с 664 до 563 м³/с, а коэффициент вариации годового стока снизился с 0,40 до 0,29. Согласно стандартным критериям однородности, изложенным в работе [39], приведенные изменения являются статистически достоверными.

Более значительным оказалось выравнивание внутригодового распределения стока реки Дон и его притоков [54, 56, 63]. Это наглядно демонстрируют данные таблицы 4.12, в которой приведены относительные значения месячного притока воды к створу Цимлянской ГЭС, осредненные для десятилетних периодов с 1911 по 1920 и с 2012 по 2021 гг.

Таблица 4.12 – Относительные значения месячного притока воды к створу Цимлянской ГЭС

Период, гг.	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1911–1920	2,5%	3,3%	9,4%	41,6%	24,4%	4,5%	2,9%	2,6%	2,1%	2,2%	2,3%	2,3%
2012–2021	5,6%	5,6%	9,4%	19,8%	19,3%	9,3%	5,8%	4,8%	4,4%	4,7%	5,7%	5,7%

Приведенные данные показывают, что доля стока половодья с марта по май снизилась, более чем в полтора раза с 75,4 до 48,5%, в то время как доля меженного стока возросла более чем в два раза с 24,6 до 51,5%.

Начиная с 1970-х гг., благодаря участвовавшим оттепелям и зяблевой вспашке объем стока половодья снизился на 30–40%, а его максимальные расходы снизились на 40–60%. Практически на всех реках бассейна начало половодья и дата прохождения его максимума в среднем сместились на 7–12 дней в сторону более ранних значений. В то же время окончание половодья стало запаздывать в среднем на 5–10 дней. Таким образом, продолжительность

более низкого половодья увеличилась на 10–20 дней. Сравнение первой и второй половин периода наблюдений показало, что среднее значение апрельского расхода воды снизилось с 2 613 до 1 595 м³/с, а коэффициент вариации апрельского стока снизился с 0,61 до 0,46. Произошло также существенное увеличение подземного питания рек бассейна Дона и, как результат, значительное увеличение летне-осеннего и зимнего стока на 40–70%. Среднее значение сентябрьского расхода воды возросло с 204 до 273 м³/с [63]. Отмеченные изменения также являются статистически достоверными [44, 63].

Анализ климатических и антропогенных изменений водного режима рек бассейна Дона приводит к следующим выводам.

1. Методики прогнозирования характеристик притока воды в Цимлянское водохранилище, разработанные при его проектировании и в первые десятилетия его работы, следует признать устаревшими и не соответствующими современным условиям.

2. Уточнение этих методик и разработка новых должны опираться на данные гидрометеорологических наблюдений только за последние десятилетия.

Долгосрочное прогнозирование месячного притока воды в Цимлянское водохранилище в маловодный период года

С учетом климатических особенностей и водного режима рек водосбора Цимлянского водохранилища маловодный период года может начинаться и заканчиваться раньше или позже в зависимости от погодных условий конкретного года, но в среднем он длится с июня по февраль следующего года. По окончании основной волны весеннего половодья происходит спад притока воды в Цимлянское водохранилище в течение летних месяцев, вызванный истощением запасов подземных вод. В осенние и зимние месяцы, как правило, наблюдается повышение притока за счет выпадения жидких осадков и частых зимних оттепелей [63, 100]. В таблице 4.13 приведены характеристики притока воды в водохранилище в течение маловодного периода: среднемесячный расход воды \bar{Q} м³/с, коэффициент вариации среднемесячных расходов воды C_v и коэффициент корреляции R между средним расходом каждого месяца и средним расходом предыдущего месяца. При этом для января учитывался средний расход декабря предшествующего года.

Таблица 4.13 – Характеристики притока воды в течение маловодного периода

Месяцы	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II
\bar{Q} м ³ /с	558	369	309	294	332	372	358	383	397
C_v	0,41	0,25	0,23	0,20	0,19	0,23	0,29	0,30	0,25
R	0,81	0,77	0,92	0,90	0,82	0,86	0,90	0,79	0,75

Современная теория прогнозирования речного стока в меженный период опирается на достаточно хорошо изученные факторы его формирования и пространственно-временной изменчивости. Как правило, возможности долгосрочного прогнозирования меженного стока ограничиваются уровнем гидрометеорологической изученности водосбора. Эти ограничения возникают при недостаточно развитой сети гидрометрических наблюдений для оценки русловых запасов воды, сети гидрогеологических наблюдений для оценки состояния подземных вод и сети метеорологических наблюдений для оценки возможного талого и дождевого стока в начале и в конце меженного периода [104, 168].

Для получения долгосрочного прогноза среднемесячного расхода притока воды в Цимлянское водохранилище в маловодный период года используется традиционный метод, основанный на достаточно высокой корреляции между средними расходами воды смежных месяцев [37]. В зависимости от среднемесячного расхода воды предыдущего месяца Q_{i-1} прогноз среднего за последующий месяц расхода воды определяется по формуле:

$$\tilde{Q}_i = a_i Q_{i-1} + b_i. \quad (4.20)$$

Для каждого месяца маловодного периода параметры формулы получения прогноза оценивались методом наименьших квадратов на основе рядов среднемесячных расходов притока воды в водохранилище за период с 1985 по 2021 гг. Для прогноза январского стока 1985 г. использовался средний расход декабря 1984 г. Параметры формулы (4.20) для каждого месяца маловодного периода года помещены в таблицу 4.14.

Таблица 4.14 – Параметры формулы (4.20) получения прогноза среднемесячных расходов притока в Цимлянское водохранилище в маловодный период года

Месяцы	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II
a_i	0,248	0,300	0,727	0,745	0,883	1,147	1,084	0,862	0,657
b_i	226	201	40,7	64,2	72,3	-8,77	-45,6	75,2	145,4

Для каждого месяца маловодного периода с номером i проверка предлагаемой методики выполнена по ряду $Q_{i,1} - \tilde{Q}_{i,1}, \dots, Q_{i,n} - \tilde{Q}_{i,n}$ ошибок проверочных прогнозов продолжительностью $n = 36$ для января и $n = 37$ для остальных месяцев маловодного периода. Предварительная оценка среднеквадратической погрешности прогноза рассчитывалась по формуле:

$$\mathcal{E}_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (Q_{i,j} - \tilde{Q}_{i,j})^2}, \quad (4.21)$$

Полученная на зависимом материале, данная оценка систематически занижает погрешность прогноза. В соответствии с рекомендациями работы [38] данный недостаток устраняется путем перехода к несмещенной оценке

$$S_i = \mathfrak{E}_i\left(\frac{n}{n-m}\right), \quad (4.22)$$

где m – число оцениваемых параметров, в данном случае равное $m = 2$.

В целях оценки эффективности предлагаемой методики в качестве альтернативы использован климатический прогноз, который для месяца с номером i выражается нормой \bar{Q}_i прогнозируемой величины, рассчитанной по ряду $Q_{i,1}, \dots, Q_{i,n}$. Погрешность климатического прогноза принято характеризовать стандартным отклонением этого ряда:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (Q_{i,j} - \bar{Q}_i)^2}. \quad (4.23)$$

Для каждого месяца вывод о применимости методики прогнозирования основан на соотношении S_i / σ_i : методика считается хорошей при $S_i / \sigma_i \leq 0,50$, удовлетворительной при $0,50 < S_i / \sigma_i \leq 0,80$ и неудовлетворительной при $S_i / \sigma_i > 0,80$ [63].

В таблице 4.15 для каждого месяца с номером i маловодного периода помещены следующие показатели качества прогнозов:

- среднеквадратическая погрешность прогноза S_i м³/с;
- показатель эффективности прогноза S_i / σ_i ;
- оправдываемость прогноза P_i , равная частоте случаев, когда абсолютные значения ошибок прогноза не превышали значение допустимой ошибки $0,674 \sigma_i$.

Таблица 4.15 – Показатели качества предлагаемой методики прогнозирования среднемесячных расходов притока в Цимлянское водохранилище в маловодный период года

Месяцы	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II
S_i	137	58,7	27,4	26,3	37,5	43,4	46,4	70,5	67,6
S_i / σ_i	0,59	0,65	0,39	0,45	0,59	0,51	0,45	0,62	0,68
P_i	82%	82%	91%	85%	85%	91%	88%	76%	68%

Приведенные показатели свидетельствуют о том, что предлагаемая методика позволяет получать хорошие и удовлетворительные долгосрочные прогнозы месячного притока воды в Цимлянское водохранилище в маловодный период года [26].

Долгосрочное прогнозирование весеннего притока воды в Цимлянское водохранилище

Вызванное таянием снежного покрова весеннее половодье в бассейне реки Дон является основной фазой водного режима, в течение которой проходит от 40% до 70% годового стока. Основная волна половодья наблюдается в апреле и мае, а в июне идет ее спад. Половодье часто происходит в виде двух волн. Первая возникает за счёт поступления в русло талых вод из нижней части бассейна, а вторая образуется водами, поступающими с верхнего Дона. Иногда, при запаздывании снеготаяния в нижней части бассейна, обе волны сливаются и половодье становится более высоким, но менее продолжительным [100].

Ежегодное долгосрочное прогнозирование слоя весеннего половодья для рек бассейна Дона выполняется в конце февраля каждого года Северо-Кавказским УГМС и Гидрометцентром России по методике В.Д. Комарова, разработанной в 60-е годы прошлого века. В качестве предикторов используются осредненные по территории водосбора максимальный запас воды в снежном покрове, запас воды в ледяной корке, запас влаги в метровом слое почвы за четыре предзимних месяца, максимальная глубина промерзания почвы [72, 104].

При прогнозировании слоя весеннего притока в Цимлянское водохранилище используется долгосрочный прогноз $\bar{F}_{нов}$ поверхностной составляющей слоя весеннего половодья в створе р. Дон – г. Серафимович. Долгосрочный прогноз подземной составляющей слоя весеннего половодья в этом же створе $\bar{F}_{подз}$ определяется по минимальному расходу воды за предшествующую зиму. Тесная зависимость между объемом притока воды в Цимлянское водохранилище за второй квартал и слоем стока весеннего половодья в створе р. Дон – г. Серафимович с коэффициентом корреляции 0,98 позволяет прогнозировать объем притока воды в водохранилище за второй квартал по формуле:

$$\bar{W}_{II} = 0,24(\bar{F}_{нов} + \bar{F}_{подз}). \quad (4.24)$$

С учетом рассмотренных выше климатических и антропогенных изменений условий формирования стока рек бассейна Дона предлагается методика долгосрочного прогнозирования объема притока в Цимлянское водохранилище за второй квартал. Методика основана на данных гидрометеорологических наблюдений за период с 1985 по 2021 гг. При составлении прогноза в конце марта осредненный по территории водосбора слой осадков за этот месяц X_{III} уже практически известен и может быть учтен в качестве дополнительного предиктора [37]. Формула получения прогноза имеет вид:

$$\tilde{W}_{II} = 0,78 \bar{W}_{II} + 0,08 X_{III} - 0,24. \quad (4.25)$$

Рассмотренные выше показатели качества прежней (прогноз \bar{W}_{II}) и предлагаемой (прогноз \tilde{W}_{II}) методик для периода с 1985 по 2018 гг. приведены в таблице 4.16.

Таблица 4.16 – Показатели качества прогнозов притока воды в Цимлянское водохранилище за второй квартал

Прогноз	S	S/σ	P
\tilde{W}_{II}	2,74	0,77	73%
\tilde{W}_{II}	2,17	0,64	83%

Приведенные в таблице 4.16 данные свидетельствуют о том, что обе методики дают удовлетворительные прогнозы, но предлагаемая методика точнее прежней на 20%.

Прогнозирование месячного притока в Цимлянское водохранилище за второй квартал

Для получения долгосрочного прогноза объема W_i км³ притока воды в Цимлянское водохранилище за отдельные месяцы второго квартала, т.е. за апрель, май, июнь с соответствующими номерами $i = 4, 5, 6$, в качестве предикторов могут быть использованы предварительно полученный по формуле (4.25) прогноз \tilde{W}_{II} притока за весь второй квартал и объем притока W_{i-1} за предыдущий месяц [37]. С учетом данного обстоятельства долгосрочный прогноз \tilde{W}_i объема притока за месяц с номером i предлагается определять с помощью простейшей линейной формулы:

$$\tilde{W}_i = a \tilde{W}_{II} + b W_{i-1} + c. \quad (4.26)$$

Для каждого месяца с номерами $i = 4, 5, 6$ параметры формулы (4.26), полученные методом наименьших квадратов по рядам значений W_i , \tilde{W}_{II} и W_{i-1} при $i = 4, 5, 6$ за период с 1985 по 2018 гг., помещены в таблицу 4.17.

Таблица 4.17 – Параметры формулы (4.26) получения долгосрочного прогноза месячного притока в Цимлянское водохранилище

Месяц	i	a	b	c
апрель	4	0,35	0,13	0,54
май	5	0,36	0,25	-0,36
июнь	6	-0,05	0,30	0,79

В таблице 4.18 для каждого месяца второго квартала помещены значения среднеквадратической погрешности прогнозов S , км³; показателя эффективности прогнозов S/σ и оправдываемости прогнозов P .

Приведенные в таблице 4.18 показатели качества прогнозов свидетельствуют о том, что предлагаемая методика долгосрочного прогнозирования объема месячного притока в

Цимлянское водохранилище для всех месяцев второго квартала может быть отнесена к категории удовлетворительных [37].

Таблица 4.18 – Показатели качества прогнозов месячного объема притока воды в Цимлянское водохранилище

Месяц	S	S/σ	P
апрель	1,25	0,74	79%
май	1,45	0,72	68%
июнь	0,35	0,59	81%

Выводы из главы 4

1. Неопределенность хода метеорологических элементов в период заблаговременности долгосрочных прогнозов речного стока может вносить существенный вклад в их погрешность. В рассмотренных пяти примерах этот вклад варьирует от 54 до 79% для прогнозов стока половодья и от 21 до 82% для прогнозов месячного стока маловодного периода.

2. Неопределенность пространственной изменчивости характеристик формирования речного стока приводит к тому, что лежащие в основе схем получения его долгосрочных прогнозов физически обоснованные теоретические формулы превращаются в чисто эмпирические.

3. При получении этих формул необходимо учитывать статистические свойства располагаемой гидрометеорологической информации, перспективу их использования в рамках автоматизированной системы подготовки и выпуска прогнозов, а также возможность учета климатических и антропогенных изменений условий формирования речного стока.

4. Предлагаемые методики долгосрочного прогнозирования стока за второй квартал и максимального уровня воды за период половодья для рек бассейна Тобола и долгосрочного прогнозирования месячного притока воды в Цимлянское водохранилище в маловодный период года и притока воды за второй квартал дают примеры достаточно успешного применения такого подхода.

ГЛАВА 5. Системы выпуска прогнозов и их доведения до потребителей

5.1 Общие сведения о системах

Системы раннего предупреждения

Среди систем подготовки, выпуска прогнозов речного стока и их доведения до всех заинтересованных потребителей наибольшего внимания заслуживают системы раннего предупреждения о паводках и наводнениях (СРП). Задача совершенствования таких систем, их методических основ, повышения надежности и увеличения заблаговременности выпускаемых прогнозов напрямую связана с растущими потребностями населения и отраслей экономики, занимающихся использованием водных ресурсов, водных путей и эксплуатацией водохозяйственных систем. В условиях роста количества и интенсивности опасных природных явлений, задача совершенствования системы гидрологического прогнозирования становится не только актуальной, но и жизненно важной для широкого круга потребителей прогностической продукции.

Вопросы предупреждения об опасных природных явлениях, в том числе о прохождении опасных паводков и наводнений на реках, находятся в приоритете у Национальных гидрометеорологических служб (НГМС), а также различных международных организаций, в том числе ВМО, Управления ООН по уменьшению опасности бедствий, отделения по уменьшению риска бедствий Всемирного Банка. Например, в Сендайской рамочной программе по уменьшению риска бедствий приводятся четыре приоритетных направления и семь глобальных целевых задач по существенному снижению риска бедствий, которые непосредственно связаны с развитием СРП о паводках и наводнениях в НГМС [107].

В 2019 г. ВМО, ЮНЕСКО, Управлением ООН по уменьшению опасности бедствий, а также другими партнерами, была проведена вторая Конференция по заблаговременному предупреждению о многих опасных явлениях. Итоги данной конференции легли в основу концепции по созданию СРП о многих опасных явлениях, согласно которым выделяется 4 приоритета при создании таких систем:

- информация о рисках бедствий;
- обнаружение, мониторинг, анализ и прогнозирование опасных явлений и их возможных последствий;
- распространение предупреждений и коммуникация
- возможности обеспечения готовности и реагирования [109].

Схематично направления СРП о многих опасных явлениях представлены на рисунке 5.1.



Рисунок 5.1 – Схема направлений СРП о многих опасных явлениях [15]

Инициатива ООН «Ранние предупреждения для всех» и план действий ВМО в рамках данной инициативы рассмотрен и утвержден Всемирным метеорологическим конгрессом в 2021 г. С целью поддержки НГМС по созданию СРП о многих опасных явлениях ВМО предпринимает следующие усилия: развитие Глобальной системы по предупреждению (ГМАС), создание Руководства по быстроразвивающимся паводкам с глобальным покрытием, внедрение системы прогнозирования наводнений в прибрежной зоне, а также Ассоциированной программы по управлению паводками и многие другие инициативы [47, 59]. Для достижения данной цели работают постоянные комитеты и исследовательские группы технических комиссий ВМО, в том числе Постоянный комитет по гидрологическому обслуживанию (ПК-ГИД) Комиссии по обслуживанию и применениям в областях погоды, климата, воды и соответствующих областях окружающей среды (СЕРКОМ), а также постоянный комитет по уменьшению рисков бедствий и группы экспертов в области создания систем раннего предупреждения о многих опасных явлениях, а также группа экспертов по созданию Глобальной системы по предупреждению. Кроме того, на второй сессии СЕРКОМ, прошедшей в период с 17 по 21 октября 2022 г. в штаб-квартире ВМО в

Швейцарии (г. Женева) было одобрено создание дорожной карты по развитию «СРП для всех» для адресного решения инициативы, выдвинутой Генеральным Секретарём ООН Антонио Гутьерешем (URL: <https://public.wmo.int/en/media/press-release/%E2%80%8Bearly-warning-systems-must-protect-everyone-within-five-years>).

Системы раннего предупреждения о паводках и наводнениях рассматриваются как компонент СРП о многих опасных явлениях. Согласно последним исследованиям, выполненным в рамках постоянного комитета по гидрологическому обслуживанию ВМО в данной области, наибольший эффект от таких систем достигается при так называемом рассмотрении данных систем как сквозных систем, т.е. когда система охватывает все компоненты процесса выпуска предупреждений, их доведения до пользователей и дальнейшие действия по принятию решений и реагированию на угрозу формирования опасных паводков. Схематично СРП о паводках и наводнениях представлена на рисунке 5.2 и включает в себя компоненты по сбору оперативных данных, моделированию и прогнозированию, выпуску штормовых предупреждений, поддержке принятия решений и реагированию [193, 225]. Важно отметить наличие обратной связи в системах сквозного типа, которая постоянно приводит к обзору системы и ее улучшению. Таким образом, можно говорить также о системе замкнутого цикла применительно к сквозным системам раннего предупреждения об угрозе формирования паводков и наводнений на реках.



Рисунок 5.2 – Компоненты систем раннего предупреждения о наводнениях [225]

Сквозную систему раннего предупреждения о паводках и наводнениях можно условно разделить на две функциональные составляющие:

- непосредственно процесс подготовки и выпуска прогнозов характеристик паводков и выпуск штормовых предупреждений, куда входят процессы сбора оперативных данных, моделирование, прогнозирование и непосредственно выпуск и доведение штормовых предупреждений, т.е. непосредственно система гидрологических прогнозов;
- принятие решений и реагирование на угрозу развития паводковой обстановки.

Как правило, за первую часть отвечает Национальная гидрометеорологическая служба, на территории Российской Федерации за систему гидрологического прогнозирования отвечает Росгидромет (в лице УГМС Росгидромета и ФГБУ «Гидрометцентр России»); за вторую часть отвечает Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (МЧС России). При этом в процессе поддержки принятия решений принимает участие и Росгидромет.

В данной главе речь пойдет о первой части СРП как компоненты сквозных систем раннего предупреждения о паводках и наводнениях, включающей в себя задачи получения и обработки исходной гидрометеорологической информации, моделирования, выпуска гидрологических прогнозов, подготовки, выпуска и доведения штормовых предупреждений до конечных пользователей.

Заблаговременность систем может быть совершенно разная – от сверхкраткосрочных прогнозов и предупреждений, например, об угрозе формирования быстроразвивающегося паводка, до долгосрочных прогнозов и климатических проекций изменения водных ресурсов или определенной характеристики стока.

Как известно, ВМО является ведущей организацией ООН в области гидрометеорологии, основные задачи которой является международная координация и сотрудничество в области метеорологии, гидрологии, климата и окружающей среды. Членами ВМО являются национальные гидрометеорологические службы (НГМС). Основная задача ВМО – осуществление поддержки деятельности НГМС в области сбора и обмена гидрометеорологической информацией, развитие потенциала в области исследований для улучшения гидрометеорологического обслуживания потребителей. Одними из основных рабочих органов ВМО является две Технические комиссии – по инфраструктуре (ИНФКОМ) и по предоставлению обслуживания (СЕРКОМ). В рамках СЕРКОМ существует Постоянный комитет по гидрологическому обслуживанию (ПК-ГИД), состоящий из 20 членов, председателем которого является Ю.А. Симонов (ФГБУ «Гидрометцентр России»). Цель ПК-ГИД заключается в поддержке НГМС в области развития потенциала для обеспечения гидрологического обслуживания потребителей в плане паводков и наводнений, засух и маловодья, поддержки принятия решений в области водных ресурсов и т.д. (URL: <https://community.wmo.int/activity-areas/sercom/sc-hyd>).

Одним из основных направлений работы ПК-ГИД является разработка нормативного материала, механизмов для оценки и усовершенствования потенциала в области СРП о паводках и наводнениях различного генезиса, в том числе быстроразвивающихся паводков, половодий, городских наводнений и т.д. В частности, в рамках создания сообщества

практиков по гидрологическому прогнозированию размещено руководство по оценке существующей СРП о паводках и наводнениях НГМС [33], которое позволяет оценить все компоненты СРП – от сбора и обработки исходных данных и сопутствующей информации до применимости метеорологической продукции, гидрологических моделей, подсистемы визуализации прогностической продукции и доведению ее до конечных пользователей. Данное руководство внедрено в виде оценочного инструмента (таблицы формата excel), которое содержит различные вопросы о СРП, варианты ответов и соответственно оценки, позволяющие получить представление о том, какой компонент (подсистему) СРП необходимо улучшить для достижения наилучшего результата.

Другим примером улучшения потенциала для НГМС в плане развития СРП является такое направление деятельности ПК-ГИД, как Инициатива по прогнозированию паводков. Данная Инициатива включает в себя развитие и внедрение СРП ВМО таких как Руководство по прогнозированию паводков или СРП по прибрежным наводнениям. Также последним видом деятельности является создание руководства по интеграции отдельных СРП в единую СРП о многих опасных явлениях (СРПМОЯ). В частности, на второй сессии Технической комиссии СЕРКОМ в октябре 2022 г. была рассмотрена концепция создания СРПМОЯ, разработанная совместно специалистами в области снижения риска бедствий и членами ПК-ГИД. В концепции рассмотрены основные положения о создании СРПМОЯ, в том числе технические компоненты, взаимосвязи между ними, вопросы управления такими системами, технической поддержки и т.д. Дальнейший этап будет включать написание руководства по разработке и внедрению СРПМОЯ на уровне НГМС при поддержке экспертов ВМО.

Безусловно, одной из важнейших инициатив ПК-ГИД в области СРП является разработка и ввод в эксплуатацию сайта Сообщества практиков в области гидрологического прогнозирования (URL: <https://www.floodmanagement.info/e2e-ews-ff-community-of-practice-area>). Он представляет собой веб-страницу с различными материалами, которые позволят НГМС повысить их способности по прогнозированию паводков. В частности, в рамках Сообщества на сайте размещены рекомендуемые ПК-ГИД методы и модели, которые могут быть использованы в качестве основы для методики прогнозирования (рекомендуемые методы и модели имеют открытый код, доказали свою применимость в области оперативного прогнозирования, имеют руководство пользователя и т.д.). Также на сайте размещено рекомендуемое программное обеспечение (так называемые платформы) для увязки потоков входной информации с гидрометеорологической наблюдательной сети с гидрологическими моделями и системой визуализации результатов прогнозирования. Другим видом продукции Сообщества являются многочисленные Руководства ВМО по разработке и внедрению методов гидрологического прогнозирования.

Работа над развитием системы (руководства) по быстроразвивающимся паводкам FFGS/WGC (Flash Flood Guidance System with Global Coverage), в частности разработка Стратегии устойчивого функционирования и развития данной системы, является также одной из приоритетных задач комитета по гидрологическому обслуживанию. В рамках этой задачи происходит модернизация различных компонент программы FFGS/WGC таких как, например, придание модульной структуры функциональной системе, разработка аналитической системы прогноза быстроразвивающихся паводков (AFFGS), в которой можно менять и встраивать различные части кода и подмодели, создание новой стратегии в области повышения потенциала НГМС, в том числе путем дополнительных обучающих курсов и т.д.

Таким образом, можно резюмировать, что ПК-ГИД ВМО вносит существенный вклад в разработку концепции, а также непосредственно создание, внедрение и поддержку СРП о паводках и наводнениях для НГМС. Страны-члены ВМО в лице НГМС имели возможность оценить функционал сайта Сообщества практиков в области гидрологического прогнозирования и высоко оценивают доступные материалы. Данное сообщество находится в постоянном развитии и пополнении материалами в области развития СРП о паводках и наводнениях.

Руководство по быстроразвивающимся паводкам

Одна из наиболее современных систем раннего предупреждения о прохождении паводков является система (руководство) по быстроразвивающимся паводкам с глобальным охватом FFGS/WGC (URL: <https://public.wmo.int/en/projects/ffgs>). Данная система была впервые внедрена в 2004 г, а начиная с 2007 г. развивается как совместная программа ВМО в сотрудничестве с Центром гидрологических исследований, Агентством США по международному развитию и Национальному управлению океанических и атмосферных исследований США (Национальная служба погоды). Система предоставляет руководство гидрологам-прогнозидам и синоптикам, необходимое для формулирования и выпуска своевременных штормовых предупреждений о формировании быстроразвивающихся паводков на небольших речных бассейнах [162]. Она была разработана и создана в Центре гидрологических исследований на основе результатов исследований быстроразвивающихся паводков, которые произошли в течение 90-х годов XX-го века. Важными техническими элементами FFGS/WGC являются разработка и использование спутниковых и радарных количественных оценок осадков (включая алгоритм поправки на погрешность измерений), конфигурация и реализация мезомасштабных моделей численного прогнозирования погоды для целей прогноза осадков с высоким разрешением, а также использование

гидрологической модели формирования стока на водосборе для определения влажности почвы, прогноза быстроразвивающихся паводков и угрозы их формирования для бассейнов площадью не более 150–200 км² (в случае наличия входных данных высокого пространственного разрешения площадь бассейнов может составлять 20–75 км²). Помимо поля прогнозов осадков, система позволяет НМГС использовать синоптический прогноз для внесения поправок во входные данные.

Система раннего предупреждения о быстроразвивающихся паводках FFGS/WGC имеет ряд взаимосвязанных компонентов, показанных на рисунке 5.3. Основные компоненты включают сбор данных, передачу данных в прогностический центр НМГС, обеспечение качества и контроль качества данных, внедрение метеорологических моделей и гидрологических моделей, выпуск прогностической продукции и штормовых предупреждений об угрозе возникновения быстроразвивающихся паводков, распространение прогнозов и предупреждений пользователям.

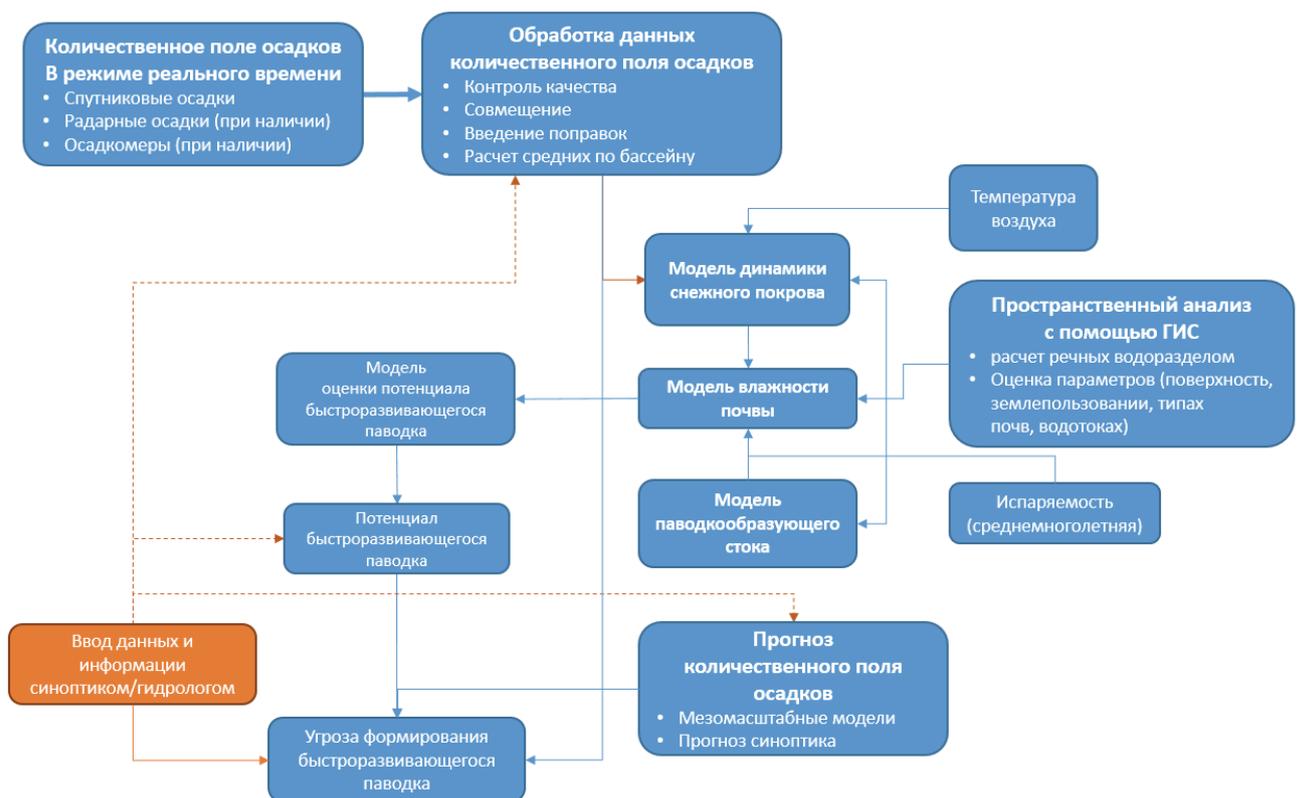


Рисунок 5.3 – Схема компонентов системы FFGS/WGC

В 2019 г. была проведена оценка функционирования системы FFGS/WGC техническими экспертами ВМО – Ю.А. Симоновым (Российская Федерация), К. Барретом (США) и М.-У. Куирно (Аргентина). На основе выводов данной независимой оценки [124], а также основных положений глобальной конференции по усовершенствованию программы FFGS, под руководством Постоянного комитета по гидрологическому обслуживанию ВМО

разработана концепция Устойчивого развития руководства по прогнозированию быстроразвивающихся паводков с глобальным охватом FFGS/WGC, утвержденная Всемирным Метеорологическим Конгрессом в октябре 2021 года [224]. В соответствие с данной Концепцией предлагается ряд мероприятий по дальнейшему развитию и усовершенствованию данной программы, в том числе по созданию новой модульной архитектуры системы, которая позволит пользователям (специалистам НГМС) вносить изменения или дополнения к компонентам системы.

Система раннего предупреждения о наводнениях в прибрежной зоне

Наводнения в прибрежной зоне происходят в сочетании деятельности штормовых нагонов, волнения и речных наводнений. По оценкам ООН за последние 200 лет в связи с такого рода наводнениями утонули не менее 2.6 млн человек [145]. В связи с этим внедрение СРП о наводнениях в прибрежной зоне является крайне актуальной задачей. Совместная Техническая комиссия по океанографии и морской метеорологии и Комиссией ВМО по гидрологии решили работать вместе, чтобы поддержать НГМС в части развития таких систем. В 2009 г. был инициирован Демонстрационный проект прогнозирования прибрежных наводнений [230] для усиления безопасности прибрежных сообществ за счет внедрения системы прогнозирования и предупреждения на национальном и региональном уровнях.

Основное внимание в рамках данной СРП уделяется раннему предупреждению в прибрежной зоне, которая подвержена влиянию тропических циклонов и штормовых нагонов, волн, приливов и паводков на реках. Демонстрационный проект предназначен для поддержки НГМС в разработке и оперативном использовании прогностической продукции. Комитет управления Демонстрационным проектом включает в себя группу экспертов в области гидрологии, морской метеорологии и океанографии под председательством Ю.А. Симонова (Российская Федерация) и В. Свейла (Канада).

В 2018 г. был выполнен независимый обзор Демонстрационного проекта [124], в результате которого получена тщательная оценка инновационной концепции СРП с различными выводами и рекомендациями. Обзор подтвердил, что региональные проекты успешно продемонстрировали способность СРП эффективно поддерживать НГМС в выпуске прогнозов и предупреждений о прибрежных затоплениях. Было бы также полезно расширить внедрение СРП на возможно большее количество стран. В ответ на рекомендации выполненного обзора в 2022 г. эксперты ВМО Ю.А. Симонов и Р. Кантерфорд разработали Руководство по системам раннего предупреждения наводнений в прибрежной зоне [226]. В основе структуры руководства приводится десять этапов создания системы раннего предупреждения о наводнениях в прибрежной зоне.

1. Проведение оценки риска на национальном уровне.
2. Проведение встречи всех задействованных институтов, включая пользователей продукции и доноров.
3. Проведение технической оценки существующих компонент системы раннего предупреждения.
4. Проверка подсистемы доведения штормовых предупреждений о прибрежных наводнениях до пользователей.
5. Привлечение организаций-доноров.
6. Создание управляющей группы проекта, включая установление связей с региональными центрами продукции ВМО.
7. Укрепление всех компонент системы раннего предупреждения с учетом ранее выработанного плана внедрения проекта.
8. Проверка Системы раннего предупреждения в квазиоперативном режиме.
9. Обеспечение обучения всем компонентам СРП.
10. Проведение оценки функционирования СРП в оперативном режиме.

По каждому из вышеперечисленных этапов внедрения в Руководстве представлена детальная информация. Технически же СРП о наводнениях в прибрежной зоне основана на функционировании ряда моделей, в том числе: численной модели атмосферы, модели нагонов и волнения, гидрологической модели формирования стока, а также модели трансформации паводка по руслу реки с учетом динамической связи последней с моделью нагонов. Данная цепочка последовательных действий и взаимосвязи между компонентами расчетной системы показана на рисунке 5.4 [226].

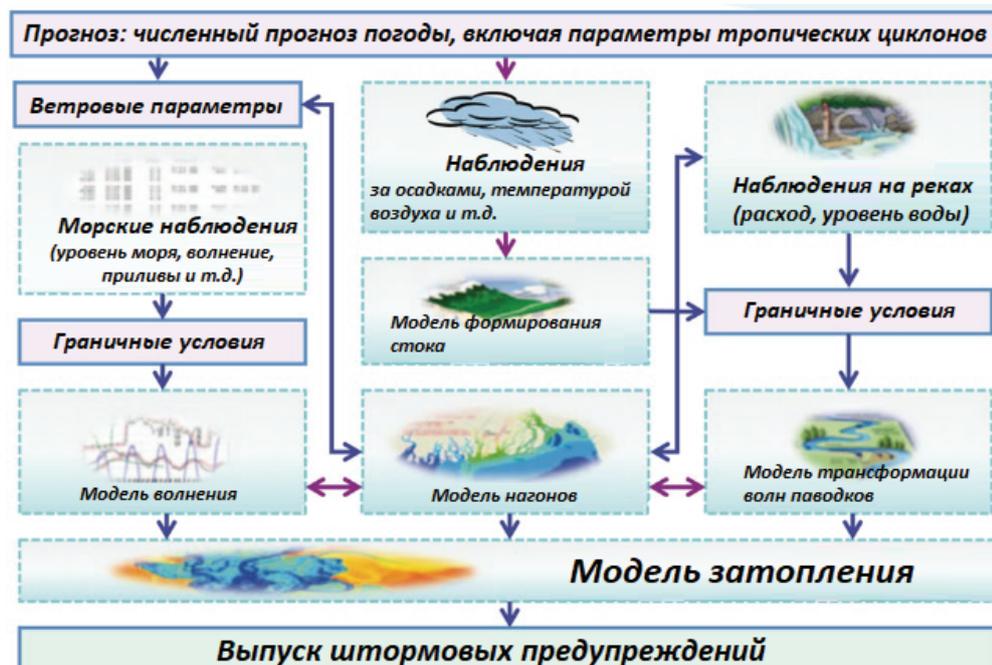


Рисунок 5.4 – Диаграмма расчетных блоков модели наводнений в прибрежной зоне

Выходной продукцией СРП о прибрежных наводнениях являются карты затоплений с различной вероятностью превышения. На основе данной продукции специалист НГМС принимает решение о выпуске штормового предупреждения о наводнении в прибрежной зоне.

5.2 Структура систем раннего предупреждения

Общие положения

Современные системы раннего предупреждения должны быть основаны на последних достижениях в сфере информационных технологий. Они должны включать системы управления базами данных, программные средства автоматизации методик прогнозирования паводков и технологии доведения и визуализации прогнозов и предупреждений. Кроме того, СРП должны иметь широкие функциональные возможности по систематизации типов информационной продукции, автоматической поддержке электронных каталогов базы данных, ведению метаданных с подробным описанием каталогов и т.д. В них должна быть реализована высокая степень безопасности на трех уровнях: создание учетных записей пользователей (логин и пароль) на уровне базы данных, веб-сервисов и веб-приложений; дополнительная защита данных обеспечивается через веб-адаптер веб-сервера. Как правило, базовая технология СРП включает три основных компонента:

- 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.

Общая структурная схема модернизированной технологии СРП подготовки и доведения до пользователей выходной продукции представлена на рисунке 5.5. Следует отметить, что отмеченная на данном рисунке схема лишь в общем виде показывает процедуру составления и выпуска прогнозов и их доведения до конечных пользователей. Каждый из представленных блоков состоит из ряда процессов, например, подготовка данных

начинается с их приема, раскодировки, 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. Основные этапы процесса составления выпуска краткосрочного гидрологического прогноза показаны на рисунке 5.5.



Рисунок 5.5 – Основные этапы процесса составления выпуска краткосрочного гидрологического прогноза

Информационная основа

Информационной основой для выпуска прогнозов и визуализации прогностической продукции в рамках СРП и последующего ее доведения до конечных пользователей являются оперативные данные наблюдений (гидрология, синоптика, снегомерные съемки, агрометеорология) и прогнозов (метеорологические прогнозы, гидрологические прогнозы). Соответственно, в технологии выпуска прогнозов важную роль играют аспекты, связанные с хранением и обработкой больших объемов оперативной информации. Значимыми являются

вопросы, связанные с надежностью и удобством различных процедур, в частности, их обновления, извлечения и т.д. В отечественной практике использования баз данных основные моменты регламентируются ГОСТ [59]. Кроме того, существует международный стандарт ИСО/МЭК ТО 10032:2003 «Информационная технология. Эталонная модель управления данными», разработанный Международной организацией по стандартизации (ИСО).

Ядром информационной основы является база данных (БД), которая помимо непосредственно данных должна быть снабжена программными средствами ее управления (размещения данных, архивирования, перезаписи и т.д.), поэтому чаще всего базу данных такого рода называют СУБД. Тип базы данных (например, реляционная, сетевая, иерархическая) необходимо определить из требований, предъявляемых к ней со стороны подсистем вычислений и визуализации, а также исходя из типа и набора самих гидрометеорологических данных. Для обеспечения максимального эффекта от автоматизации СРП рекомендуется использование БД реляционного типа (связанные таблицы по определённому общему признаку под управлением языка программирования SQL) из-за ее совместимости с ГИС и облегченным доступом для программы обработки информации. В случае создания оперативной гидрометеорологической БД таким общим полем является индекс пункта наблюдений (поста или станции), уникальной характеристики для конкретного пункта наблюдений. Это позволяет установить на основе общих значений связь, или соединение, между оперативной таблицей и соответствующим слоем пространственных данных, содержащим значения кода (индекса) и пространственные координаты станций и постов.

В качестве иллюстрации на рисунке 5.6 для «ГИС Волга» (описана в подразделе 5.3) дано графическое представление связей в оперативной реляционной базе данных между таблицами с оперативными данными гидрологических наблюдений (слева вверху), данными о ледовых явлениях (слева внизу) и таблицей со справочными данными (справа) 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 как в настольной версии ГИС (например, в ArcGIS Desktop или QGIS), так и с применением серверных ГИС и веб-технологий.

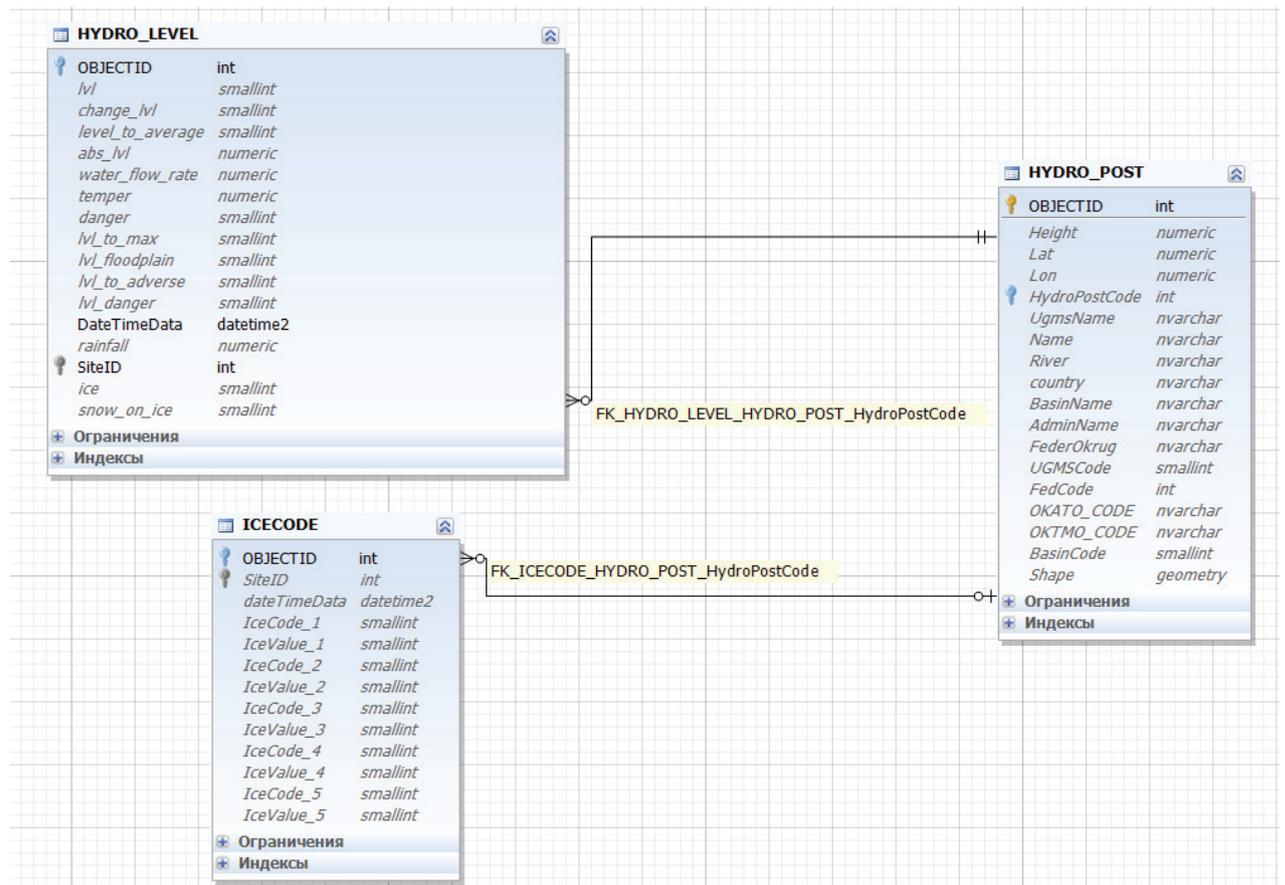


Рисунок 5.6 – Графическое представление связей в оперативной реляционной базе данных

В настоящий момент существует ряд программных продуктов, позволяющих создать базу данных и обеспечить автоматизацию различных процессов ее управления (сохранение, архивация, доступ к данным, сортировка и т.д.): MSSQL, Oracle, MySQL, PostgreSQL и другие. Из перечисленных программных продуктов MSSQL и Oracle являются коммерческим программным обеспечением, остальные – в открытом доступе. В рамках создания и внедрения БД должно 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.).

Запись значений гидрометеорологических элементов в базу данных может быть осуществлена с помощью программных средств, созданных с использованием языка программирования Python (с использованием модуля pymssql, в случае использования программных средств MSSQL), или C++ с соответствующей библиотекой, позволяющей редактировать таблицы баз данных MSSQL. Такие программные средства, запускаемые по

расписанию, будут способствовать автоматизированному обновлению информации в реляционной базе данных.

Функционал модуля `rumssql` позволяет с помощью программ-скриптов, составленных на языке Python, осуществлять доступ к БД под управлением MS SQL Server и производить требуемые операции над таблицами БД (выборка данных, запись данных в таблицу, обновление данных) с использованием синтаксиса и выражений языка T-SQL. В свою очередь, запуск Python-программ осуществляется в автоматизированном режиме по расписанию, что служит решением задачи автоматизированного пополнения реляционной базы гидрометеорологических данных для бассейна рассматриваемой реки. Использование языка программирования Python также удобно в связи с его широкой интеграцией в геоинформационные среды (например, в среду ArcGIS), в связке с которой предполагается работа систем управления базой данных, а также в целом широкого распространения данного языка в научной и оперативной деятельности НГМС.

Необходимо также разработать отдельные Python-программы для расчетов ряда гидрометеорологических характеристик, не измеряемых непосредственно. С помощью подобных программ автоматически производится выборка исходных данных для расчетов из таблиц базы данных, расчет «на лету» и запись в требуемую целевую оперативную таблицу. Например, класс опасности фактической гидрологической обстановки на гидрологических постах определяется в зависимости от положения наблюдаемого уровня воды на посту относительно его критических отметок (выход воды на пойму, отметки неблагоприятного и опасного явлений). Соответственно, программа расчета класса опасности каждый раз за текущую дату и срок наблюдений выбирает для каждого поста в бассейне реки значение уровня воды из оперативной таблицы, значения критических отметок из «справочной» таблицы; выполняет математическое сравнение этих величин; в зависимости от результата устанавливает значение класса опасности (0 – отсутствуют критерии опасности; 2 – нет затоплений; 3 – превышена отметка поймы; 4 – превышена отметка НЯ; 5 – превышена отметка ОЯ); вносит запись в таблицу с данными оперативных гидрологических наблюдений на реках. Таким образом, комплекс специально разработанных программных средств на языке Python с использованием функционала модуля `rumssql` служит эффективным решением задачи автоматизированного пополнения реляционных баз данных под управлением MS SQL оперативными данными по бассейну рассматриваемой реки.

Программные средства управления базой данных условно можно подразделить на несколько категорий:

1. прикладные средства, создаваемые разработчиками приложений баз данных при реализации своих предметных областей;

2. средства администрирования баз данных, которые, как правило, входят в комплект дистрибутива каждой конкретной системы управления базами данных, например, для MS SQL Server это могут быть: проприетарная клиентская среда разработки с использованием графического интерфейса пользователя – SSMS; проприетарный язык программирования TransactSQL (T-SQL), и другие программные средства;

3. средства, входящие в состав программного обеспечения третьих фирм, в частности, такими высокоуровневыми средствами могут выступать:

- клиентские среды разработки на базе графического пользовательского интерфейса, например, DbForge Studio;
- языки и среды программирования, например, Python;
- интегрированные дистрибутивы, например, Anaconda;
- ГИС-оболочки для работы с пространственными типами данных, например, ArcGIS;

4. средства, входящие в состав нижележащего программного обеспечения, которым обычно является уровень операционной системы (так называемые «системные средства»);

5. средства сетевого администрирования.

Автоматизация работы приложений системы управления базами данных в рамках СРП может осуществляться несколькими способами: либо сценарий детерминированного запуска на локальном сервере, либо сценарий детерминированного запуска на удаленном сервере; либо же с использованием стандартного планировщика заданий операционной системы Windows (в случае использования данной операционной системы).

Подготовка входной гидрометеорологической информации

Одним из ключевых этапов автоматизации расчета выпуска прогноза является подготовка входной гидрометеорологической информации, заключающаяся в загрузке данных из базы данных за определенный период времени (наблюдения и прогноз), обработка данных для получения требуемого вида для организации входа в гидрологическую модель. Реализация такого этапа зависит от типа используемой гидрологической модели и соответственно от типа требуемой исходной гидрометеорологической информации. Например, для краткосрочных прогнозов при использовании концептуальной модели формирования стока на водосборе как правило требуются данные о температуре воздуха, осадках за несколько предшествующих суток, осредненных по расчетному речному водосбору, а также прогноз температуры воздуха и осадков на несколько суток вперед. Для осуществления коррекции прогноза расхода (уровня) воды требуются также данные наблюдений и предшествующих прогнозов для анализа ошибок прогнозов на

предшествующих временных интервалах. В случае долгосрочного прогноза максимального уровня весеннего половодья требуется выборка информации по снегомерным маршрутам, их обработка и осреднение в рамках расчетных водосборов исследуемого речного бассейна, а также обработка информации по влажности почвы и глубине ее промерзания. При прочих равных условиях, подготовка исходной информации для долгосрочного прогноза является более трудоемкой, чем для краткосрочного-среднесрочного прогноза.

Заслуживает внимания подготовка информации в случае отсутствия данных наблюдений или метеорологических прогнозов. В таких случаях применяются различные методы и алгоритмы заполнения пропусков в случае пропуска данных наблюдений и метеорологических прогнозов, в частности при недоступности выхода определенной метеорологической модели следует использовать выходы другой метеорологической модели или прогнозы с предыдущего срока выпуска метеорологической модели. В случае отсутствия данных гидрологических наблюдений иногда используют модельные расчеты для данного временного шага, выполненные с использованием фактической метеорологической информации. В случае пропуска метеорологических данных наблюдений допускается на данный временной интервал в качестве входа задать значения последнего метеорологического прогноза искомого метеорологического элемента. Основное правило должно заключаться в том, что на вход гидрологической модели должна подаваться информация без пропусков в данных.

После подготовки исходной информации и приведения ее в требуемый формат следует автоматизировать запуск гидрологической модели в требуемом режиме (оперативный выпуск прогнозов) с указанием, где считывать переменные состояния модели, соответствующие дате и времени выпуска прогноза, а также где расположена информация о параметрах и константах модели для расчетного речного водосбора. После непосредственного модельного расчета прогностического значения необходимо произвести его проверку и сохранение по требуемому формату для дальнейшей работы программы коррекции прогноза и сохранения результатов в базу данных.

Важным аспектом процесса автоматизации расчета гидрологического прогноза является наличие выдачи промежуточных результатов и их запись в текстовый файл, к которому, при необходимости можно обратиться для выяснения причин не корректного расчета величин. Также важным является наличие специально программы, «следящей» за ходом выполнения расчетов и за результатом и выдающим статистическую информацию о том, для скольких гидрологических постов (водосборов, элементарных элементов водосбора) из общего количества произошел расчет и выдача данной информации оператору системы, производящему ее обслуживание.

Принцип автоматизированных систем подготовки и выпуска краткосрочных и среднесрочных прогнозов заключается в непрерывности выпуска прогноза и постоянного учета всей поступающей гидрометеорологической информации – как данных наблюдений, так и метеорологического прогноза. Время выпуска прогноза определяется, во-первых, производственной необходимостью, т.е. стремлением как можно раньше выпустить прогноз для принятия защитных мер в случае развития сложной паводковой ситуации, а, во-вторых, временем поступления входной гидрометеорологической информации, необходимой для методики выпуска прогноза. Поскольку первое требование достаточно тривиально, ниже остановимся на рассмотрении второго требования.

Как было показано выше, для выпуска автоматизированного оперативного краткосрочного и среднесрочного прогноза расхода (уровня) с использованием метода экстраполяции и/или модели формирования стока на водосборе воды требуются данные гидрометрических наблюдений на гидрологических станциях и постах, данные наблюдений за приземной температурой воздуха и суммой осадков, а также численный прогноз приземной температуры воздуха и осадков. Метеорологические наблюдения выполняются во всемирном координированном времени (ВСВ). При этом наблюдения за приземной температурой воздуха производятся каждые 3 часа в синоптические сроки (0^{00} , 3^{00} , 6^{00} , 9^{00} , 12^{00} , 15^{00} , 18^{00} , 21^{00} ВСВ), осадки же измеряются за 12-часовой период и передаются два раза в сутки в сроки, которые зависят от принадлежности станции к одной из пяти Метеозон Российской Федерации, показанных на рисунке 5.7. Например, для Метеозоны №1 (запад и центр европейской территории России) сумма осадков измеряется и передается в срок 18^{00} и 6^{00} ВСВ за периоды с 06^{00} до 18^{00} и с 18^{00} до 06^{00} , соответственно (код для оперативной передачи данных приземных метеорологических наблюдений с сети станций Росгидромета – КН-01 SYNOP).

Сроки измерения осадков в метеорологических зонах Российской Федерации регламентируются кодом КН-01 SYNOP следующим образом:

- Метеозона РФ № 1 дневная 06^{00} – 18^{00} (срок 18^{00}), ночная 18^{00} – 06^{00} (срок 06^{00});
- Метеозона РФ № 2 дневная 03^{00} – 15^{00} (срок 15^{00}), ночная 15^{00} – 03^{00} (срок 03^{00});
- Метеозона РФ № 3 дневная 00^{00} – 12^{00} (срок 12^{00}), ночная 12^{00} – 00^{00} (срок 00^{00});
- Метеозона РФ № 4 дневная 21^{00} – 09^{00} (срок 09^{00}), ночная 09^{00} – 21^{00} (срок 21^{00});
- Метеозона РФ № 5 дневная 18^{00} – 06^{00} (срок 06^{00}), ночная 06^{00} – 18^{00} (срок 18^{00}).

Метеорологический прогноз обычно рассчитывается четыре раза в сутки в 0^{00} , 6^{00} , 12^{00} , 18^{00} ВСВ, фактически же прогноз готов спустя некоторое время после этих сроков, например, прогностические поля метеорологических элементов системы краткосрочного

негидростатического прогноза погоды COSMO-RU [102, 103] на всю территорию Российской Федерации готовы спустя примерно 4 часа, т.е. в сроки около 4^{00} , 10^{00} , 16^{00} и 22^{00} ВСВ.

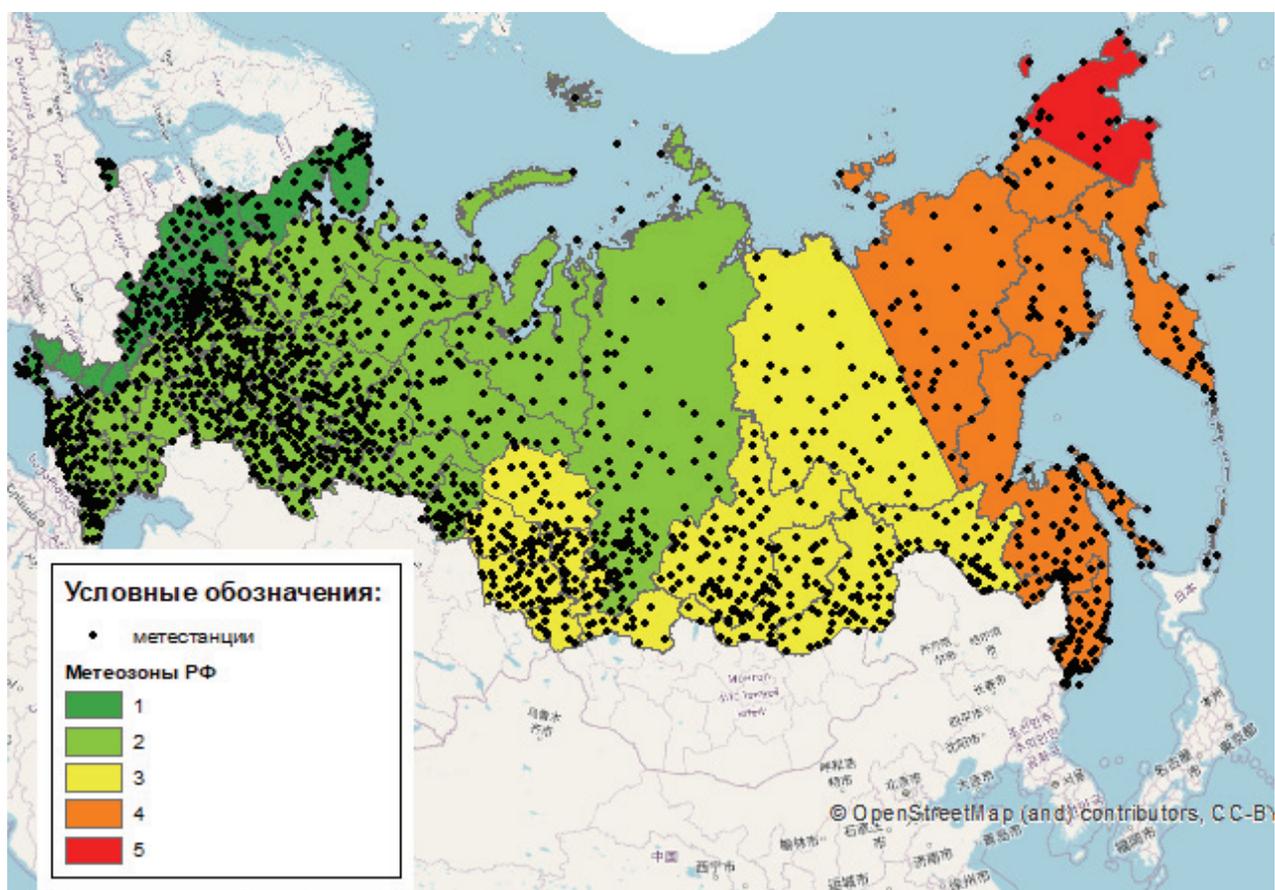


Рисунок 5.7 – Расположение Метеозон Российской Федерации согласно коду для оперативной передачи данных приземных метеорологических наблюдений с сети станций Росгидромета

Гидрологические наблюдения производятся в сроках местного времени – в 8^{00} и 20^{00} . При наличии автоматизированного гидрологического комплекса (АГК) или в периоды высокой водности наблюдения производятся с более частой дискретностью по времени.

В разделе рассматривается традиционный случай, когда гидрологические наблюдения за уровнем воды производятся стандартные наблюдения в два срока (8^{00} и 20^{00} местного времени), затем в оперативно-производственных подразделениях Управлений по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (УГМС Росгидромета) производится расчет ежедневных расходов воды и передаётся в информационную систему в районе 9^{00} – 9^{30} местного времени. Примерный график поступления информации, необходимой для выпуска краткосрочных и среднесрочных гидрологических прогнозов для центральной части европейской территории России представлен на рисунке 5.8.



Рисунок 5.8 – График поступления гидрометеорологической информации в информационную систему для центральной части европейской территории России (время МСК)

Поступление информации, требуемой для выпуска оперативных гидрологических прогнозов, необходимо учитывать при планировании времени выпуска прогноза и расчетного шага по времени используемой гидрологической модели. Например, в случае центральной части европейской территории Российской Федерации при использовании метода экстраполяции гидрографа требуемой входной информацией являются среднесуточные уровни (или ежедневные расходы) воды, принимаемые как среднее арифметическое между значениями двух сроков наблюдений (8^{00} и 20^{00}). Фактически данная информация поступает в информационную сеть с небольшой задержкой (около 9^{00} – 9^{30} МСК и 21^{00} и 21^{30} МСК, соответственно). В связи с этим выпуск оперативных гидрологических прогнозов выпускается, как только поступает вечернее наблюдение – т.е. около 21^{00} – 21^{30} МСК. Следует отметить, что требования оперативной гидрологии заключается в учете всего нового массива поступающей информации, в связи с этим дополнительный прогноз выпускается сразу после поступления в информационную сеть утренних наблюдений – т.е. в районе 9^{00} – 9^{30} МСК.

В случае использования модели формирования стока в качестве входной гидрометеорологической информации используется наблюдения за приземной температурой воздуха и суммой осадков, прогноз данных метеорологических элементов, а также в случае использования алгоритма коррекции выхода – наблюдения за уровнем (расходом) воды на гидрологическом посту, для которого составляется прогноз.

Как показано в разделе 1.4, коррекция выхода существенно улучшает качество краткосрочных прогнозов, в связи с этим время подготовки и выпуска прогноза с использованием модели формирования стока также привязано к времени поступления информации о гидрологических наблюдениях в информационную систему – т.е. к периодам 9^{00} – 9^{30} МСК и 21^{00} – 21^{30} МСК. При этом используется самый последний выпуск

метеорологического прогноза, т.е. прогноз сроков 00⁰⁰ и 12⁰⁰ ВСВ, доступный в информационной системе в 07⁰⁰ и 19⁰⁰ МСК, соответственно (рисунок 5.8). Для организации бесшовного метеорологического входа в момент выпуска гидрологического прогноза фактические данные по температуре воздуха и суммам осадков совмещаются с последним выпуском метеорологического прогноза данных величин.

Помимо данных сроков выпуска прогнозов, следует осуществлять подготовку и выпуск прогноза в «промежуточные» сроки, т.е., когда доступен метеорологический прогноз от сроков 06⁰⁰ и 18⁰⁰ ВСВ (доступный в 13⁰⁰ МСК и 01⁰⁰ МСК, соответственно). Данный выпуск прогнозов позволяет учесть возможные изменения в метеорологическом прогнозе, что особенно актуально в предгорных и горных районах.

Данный пример отражает сроки выпуска прогноза для центральных районов европейской территории России. Для востока европейской территории России, Западной и Восточной Сибири, Дальнего Востока выбираются другие сроки выпуска прогноза с учетом времени поступления гидрометеорологической информации. Например, для среднего течения реки Амур на территории Хабаровского края время ВСВ+10, т.е. выпуск метеорологического прогноза сроков 00⁰⁰, 06⁰⁰, 12⁰⁰ и 18⁰⁰ по местному времени происходит в 10⁰⁰, 16⁰⁰, 22⁰⁰ и 04⁰⁰ ХАБ, если принять во внимание, что время счета метеорологического прогноза составляет 3 часа, то в информационной сети метеорологический прогноз появляется в 13⁰⁰, 19⁰⁰, 01⁰⁰ и 07⁰⁰ местного времени. Наблюдения за осадками на метеорологических станциях Хабаровского края (Метеозона № 4) производится в сроки 09⁰⁰ и 21⁰⁰ ВСВ (19⁰⁰ и 07⁰⁰ ХАБ) за периоды 21⁰⁰-09⁰⁰ ВСВ (07⁰⁰-19⁰⁰ ХАБ) и 09⁰⁰-21⁰⁰ ВСВ (19⁰⁰-07⁰⁰ ХАБ), соответственно.

Система автоматизированного краткосрочного и среднесрочного прогноза настроена на постоянное функционирование и круглосуточный выпуск прогнозов. В связи с этим одним из основных требований устойчивой работы системы является наличие исходной гидрометеорологической информации без пропусков. Вместе с тем, исключить пропуски в исходных данных, включая наблюдения или метеорологический прогноз, полностью нельзя, в связи с этим в используемом подходе применяются следующие алгоритмы заполнения пропусков в случае их наличия.

Отсутствие данных наблюдений на гидрологических постах за уровнем воды и соответственно расчет ежедневного расхода воды приводит к снижению точности краткосрочных прогнозов в случае использования модели формирования стока. В случае же использования метода экстраполяции гидрографа выпуск прогноза становится невозможным в связи с необходимостью задания данных наблюдений за уровнем (расходом) воды. Для

заполнения возможного пропуска в данных наблюдениях используется последний прогноз уровня (расхода) воды для искомого гидрологического поста на дату выпуска прогноза.

В случае отсутствия метеорологической информации используются следующие подходы. В случае отсутствия метеорологического прогноза за определенный срок выпуска допустимо использовать метеорологический прогноз другой численной модели (например, в случае непоступления прогноза COSMO-RU используется метеорологический прогноз других метеорологических моделей. В случае непоступления фактической информации за определённый срок используется выходы метеорологической модели для заполнения пропусков искомым метеорологическим станциям за требуемые сроки наблюдений.

В автоматизированной системе предусмотрен функционал и программное обеспечение, передающее администратору системы информацию о непоступления определенного вида входной информации, поскольку это является нежелательной ситуацией, которая в целом негативно влияет на качество выпуска оперативных гидрологических прогнозов.

Получение и выпуск прогноза

В последние годы в связи с модернизацией наблюдательной сети и появлением доступа к данным учащенных наблюдений, а также площадных оценок поля осадков с радарных данных и метеорологических прогнозов произошел значительный рост объема исходной гидрометеорологической информации – увеличилась как частота наблюдений, так и объем передаваемой информации. Качественный скачок технического оснащения положительно повлиял на скорость расчета и детализацию прогностической метеорологической информации. В настоящий момент гидрологам-прогнозидам доступны прогностические поля метеорологических элементов в сетке с пространственным шагом до 500 м, рассчитываемые до четырех раз в сутки. Кроме того, как правило, доступны прогнозы нескольких прогностических центров (а также ансамблевые прогнозы), что позволяет формировать ансамбль метеорологического входа в методики гидрологических прогнозов. Рост технического и программного оснащение гидрометеорологических служб привел к более высоким требованиям, предъявляемым к качеству и частоте выпуска краткосрочных прогнозов – в настоящее время ведущие гидрометеорологические службы мира осуществляют круглосуточный выпуск краткосрочных прогнозов, основанных на усвоении всего массива имеющейся исходной информации (наблюдения, данные метеорологических радаров, метеорологический прогноз) несколько раз в сутки. После каждого выпуска прогнозов производится глубокий анализ прогностической информации с построением финальных прогностических продуктов картографического, графического и текстового формата.

В связи с вышесказанным в современных условиях осуществлять составление и выпуск краткосрочных гидрологических прогнозов в ручном режиме за редким исключением не представляется возможным. Разработка и внедрение в оперативную деятельность автоматизированного выпуска краткосрочных прогнозов является адекватным ответом на растущие требования к точности, надежности краткосрочных прогнозов паводкового стока, а также составу и виду прогностической продукции.

Вследствие этого автоматизация процесса расчета и выпуска прогнозов расходов (уровней) воды является одной из ключевых задач оперативного прогноза паводков и соответственно является основной компонентой СРП о паводках и наводнениях [23, 60, 82, 123, 137].

Автоматизация процесса выпуска прогноза как правило заключается в подготовке исходной гидрометеорологической информации для методики прогноза путем обращения к оперативным базам данных и их последующей обработке, непосредственного запуска методики или модели, обработки выходного результата, запуска методики коррекции прогноза (в случае наличия таковой), а также запись результата прогноза в базу данных для ее последующей визуализации и доведения до пользователя.

Программная 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 HBV-96, а также модели трансформации расходов воды на участках рек [108], реализованные на языке программирования Python (версия 3.4). Программное обеспечение, автоматизирующее выпуск краткосрочных прогнозов с помощью модели HBV `runhmv.py` сформировано с использованием языка программирования Python 3.4, 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.

Доведение продукции до пользователей

Для эффективного оперативного обеспечения потребителей фактической и прогностической информацией СРП 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 единой информационной среде (сети Internet) географическую, гидрологическую, метеорологическую, синоптическую, спутниковую геопространственную информацию. Как показывает международная практика гидрологического прогнозирования, в том числе в части реализации Инициативы по Прогнозированию Паводков ВМО [185], опыт ведущих зарубежных гидрометеорологических служб в области гидрологического мониторинга и прогнозирования, а также опыт ФГБУ "Гидрометцентр России" по разработке и внедрению автоматизированных бассейновых систем гидрологического мониторинга и прогнозирования для бассейнов крупных рек («ГИС Амур», «ГИС Волга», «ГИС Гидрология» и другие системы). Именно в части доведения продукции до пользователей с помощью ГИС и веб-технологий по итогам международной конференции пользователей ESRI (Сан-Диего, Калифорния, США) система «ГИС Амур» [113], реализованная в ФГБУ «Гидрометцентр России» была признана «Проектом 2015 года», а Гидрометцентр России и НИЦ «Планета» (организации – разработчики системы) были удостоены высшей награды за особые достижения в области применения геоинформационных технологий – Special Achievement in GIS (SAG Award 2015).

Программные средства доведения продукции СРП до пользователей включают в себя две основные компоненты:

- ГИС-компонент, включающий управление ГИС-серверами и автоматизированными рабочими местами (АРМ), предназначенными для расчетов и прогнозов характеристик паводков, а также подготовки фактической и прогностической информации (серверные и корпоративные ГИС);
- веб-компонент, заключающийся во взаимодействии с пользователями (веб-сервер с веб-приложением).

Для создания компоненты доведения прогнозов до пользователей СРП рекомендуется выбрать платформу промышленного образца в серверном и настольном исполнении. Компонент подсистемы должен состоять минимум из 2-х ГИС-серверов, объединенных в кластер, и 3-х автоматизированных рабочих мест (АРМ). АРМы предназначены для наполнения и коррекции данных общего характера о бассейне рассматриваемой реки или района (например, сведений о гидрологических постах, топографической и гидрографической информации и др.), наполнения базы данных фактической информацией об уровнях и расходах воды на гидрологических постах, вычисления прогнозов уровня воды на гидрологических постах. АРМы гидролога должны быть оснащены программным обеспечением ГИС настольного исполнения с дополнительными модулями усовершенствованной геообработки, например, ArcGIS for Desktop и модулями Spatial

Analyst, Geostatistical Analyst, 3D Analyst и др., в случае использования ГИС от ESRI. Они могут быть объединены в корпоративную сеть и иметь управление с ГИС-сервера. Основная функция ГИС-сервера заключается в создании веб-сервисов гидрологической, метеорологической, синоптической фактической и прогностической информации на основе упорядоченных данных, хранящихся в БД, а также оптимизация и управление этими сервисами. Кроме того, ГИС-серверы отвечают за разграничение доступа пользователей к данным. С целью равномерного распределения нагрузки между ГИС-серверами при одновременном обращении большого количества пользователей (около 200 пользователей), а также поддержания бесперебойной работы подсистемы при выходе одного из серверов из строя, ГИС-серверы рекомендуется объединить в кластер.

Компонент взаимодействия с пользователями (компонент веб-) рекомендуется выполнять в виде веб-приложения, которое можно разместить в одном из оперативно-прогностических подразделений исследуемого бассейна реки. Основная функция компонента состоит в объединении сервисов, действующих в разных оперативно-прогностических подразделениях Национальной гидрометеорологической службы на основе графического интерфейса, с помощью которого пользователям предоставляется доступ для визуализации и анализа всей имеющейся прогностической информации. Ниже представлены основные возможности Веб-приложения, доступные для пользователей в режиме реального времени, которые рекомендуется предусмотреть в рамках разработки блока визуализации и доведения до пользователей продукции СРП о паводках и наводнениях.

В веб-приложении должна быть реализована возможность просмотра всей наблюдающейся или спрогнозированной паводковой информации – уровня воды, тенденции уровня воды, превышения критических отметок, класса опасности гидрологической обстановки, площади затоплений, влажности почвы и других гидрометеорологических характеристик.

Помимо просмотра, рекомендуется предусмотреть возможность доступа к информации с учетом разнообразных выборок (по времени, по пространству и другим критериям), которую можно легко экспортировать для ее последующего анализа в сторонних приложениях. Помимо представления оперативной гидрометеорологической информации, веб-приложение должно позволять пользователю выбирать картографическую основу (например, картографическую подложку ArcGIS Online, мультимасштабную карту Росреестра, карту Bing Maps и др.), на основе которой можно визуализировать различные виды гидрометеорологической информации.

Интерфейс должен позволять отображать на картографической основе все гидрологические посты, метеорологические станции, ГЭС и другие объекты, а также

получать фактические и прогностические значения с этих постов, представленные в виде графиков и таблиц, оформлять выходные результаты в электронном и печатном видах. Интерфейс должен также предусматривать комплексирование различных видов гидрологической, метеорологической, синоптической, спутниковой информации, представленной в векторном и растровом видах. При комплексировании может быть разработан и использован инструментарий «шторка», «уровень прозрачности», «уровень контрастности» и др.

Графический интерфейс веб-компоненты подсистемы рекомендуется разрабатывать на языке программирования JavaScript с использованием технологии API для используемого программного обеспечения ГИС, что даст возможность пользователю запускать веб-приложение на любых медиа-носителях (компьютерах, планшетах, смартфонах и др.), имеющих выход в интернет, без установки дополнительных программ. Компьютерный код приложения может быть написан с использованием открытого программного кода, например, JavaScript Viewer for ArcGIS и Hard Cider с рядом уже реализованных модулей и функций. В результате веб-приложение будет работать во всех наиболее популярных программах для просмотра интернет-страниц (браузерах): Internet Explorer, Mozilla Firefox, Google Chrome, Yandex, Opera. Разработанное таким образом веб-приложение позволит пользователям в кратчайшие сроки получить доступ ко всему массиву гидрометеорологической информации и таким образом сформировать впечатление о складывающейся и прогностической гидрологической обстановке в рамках системы раннего предупреждения. Функционал приложения позволит провести анализ информации, ее комплексирование для формирования выходной продукции в текстовом, картографическом, графическом видах [37].

Выводы из главы 5

1. В настоящее время оперативные прогнозы речного стока реализуются в виде автоматизированных систем выпуска прогнозов, а также доведения прогностической продукции до пользователей. Только в рамках данных систем с помощью современного программного обеспечения достигается максимальная эффективность от использования гидрологических моделей путем осуществления автоматизации всех процессов, их совмещения с системами управления базами оперативных данных, а также с современными ГИС и веб-средствами формирования прогностической продукции и ее доведения до пользователей.

2. Структура автоматизированных систем выпуска прогнозов и их доведения до пользователей состоит, как правило, из трех крупных компонентов. Информационный

компонент отвечает за прием, обработку и подготовку всего массива требуемой гидрометеорологической информации от различных источников данных (наземной сети наблюдений, спутниковых систем, метеорологических прогнозов). Компонент выпуска прогнозов включает автоматизированные средства запуска гидрологических моделей, а также обработку их выходной продукции, включая применение метода коррекции прогнозов. Компонент доведения прогностической продукции до пользователей на основе современных ГИС и веб-технологий предоставляет доступ пользователям к прогностической продукции в режиме реального времени с помощью веб-приложения.

3. При реализации автоматизированных систем выпуска прогнозов для крупных речных бассейнов следует учитывать большую площадь бассейнов, что выражается в разном времени наблюдений за различными гидрометеорологическими элементами, а также требуемое время выпуска гидрологического прогноза для различных прогностических пунктов бассейна реки.

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

В настоящее время системы раннего предупреждения (СРП) о паводках и наводнениях являются атрибутом любой развитой Национальной гидрометеорологической службы, например, [131, 164, 185]. Важнейшей задачей на современном этапе развития системы гидрологических прогнозов Росгидромета является создание эффективной и надежной СРП о паводках и наводнениях на территории крупных речных бассейнов с целью обеспечения потребителей качественной, своевременной и доступной информацией о сложившихся и ожидаемых гидрологических условиях. В последние годы произошел качественный скачок в информационном, научном и техническом обеспечении гидрологических прогнозов – стали доступны данные учащенных наблюдений, площадные оценки осадков, детальные метеорологические прогнозы. Также используются усовершенствованные методики прогнозирования, основанные на применении математических моделей формирования стока на водосборе; появились новые программные средства представления прогнозов с использованием ГИС-технологий. В связи с этим выпуск гидрологических прогнозов в оперативном режиме представляется крайне сложной в технологическом плане задачей, которую возможно сделать более эффективной и надежной с помощью внедрения автоматизированных систем выпуска гидрологических прогнозов.

В ФГБУ «Гидрометцентр России» в последние годы ведется активная работа по разработке, внедрению и дальнейшей поддержке автоматизированных систем выпуска гидрологических прогнозов для крупных речных бассейнов страны. Разработка выполняется с учетом рекомендаций ВМО, а также опыта разработки подобных систем в ведущих зарубежных национальных гидрометеорологических службах, в том числе США, Франции, Великобритании, Швеции, Польши и других стран. Ниже приводится описание СРП, разработанных при участии автора в ФГБУ «Гидрометцентр России».

6.1 Система раннего предупреждения на реках бассейна Кубани и Черноморского побережья Краснодарского края

Общие сведения о системе

Одной из первых систем раннего предупреждения, разработанной в Гидрометцентре России является система паводков на реках бассейна Кубани и реках Черноморского

побережья России, разработанная в 2012 г. при участии автора [21, 34]. В рамках данной системы в автоматизированной форме происходит наполнение баз данных оперативной гидрометеорологической информации, осуществляется запуск методик краткосрочного прогноза уровня (расхода) воды на гидрологических постах рек Кубани и основных рек Черноморского побережья, а также визуализация прогностической информации и ее доведение до пользователей в табличном, цифровом и графическом видах. Бассейны рассматриваемых рек являются одними из наиболее неблагоприятных районов с точки зрения ущерба в связи с прохождением опасных паводков. Так, согласно результатам работ по оценкам ущербов от наводнений [23, 64] бассейн р. Кубань занимает ведущее место по удельному ущербу от наводнений на единицу площади – в несколько раз превышая данный показатель по рекам Северного Кавказа в целом и на порядок превышая среднее значение по территории России.

Для снижения ущерба от наводнений на реках Кубани и Черноморского побережья Краснодарского края в ФГБУ «Гидрометцентр России» была разработана система краткосрочных гидрологических прогнозов расходов и уровней воды. Основная задача разработки данной системы заключалась в информационно-прогностической основе для оперативных подразделений Росгидромета с целью повышения уровня предупрежденности экстренных служб, администраций и населения о возможном прохождении паводков. Устойчивость работы системы прогнозов достигается ее автоматизацией – прогноз выпускается без участия человека ежедневно вечером с заблаговременностью трех суток. Прогностические данные автоматически передаются в оперативно-прогностическое подразделение Росгидромета, в чью зону ответственности входит р. Кубань и реки Черноморского побережья Краснодарского края.

Информационное обеспечение прогнозов

В рамках рассматриваемой системы подготовка и выпуск прогнозов выполняются на основе данных о расходе воды, температуре воздуха и атмосферных осадках. Задание входной метеорологической информации на период заблаговременности гидрологического прогноза осуществляется путём усвоения прогностической информации, предоставляемой метеорологическими моделями, функционирующими в Гидрометцентре России и в других прогностических центрах. Расчёты в системе прогнозирования производятся с шагом по времени, равным одним календарным суткам. Для прогноза расходов воды на реках Кубани использовались прогностические поля приземной температуры воздуха и осадков

следующих численных моделей атмосферы: гидродинамическая неадиабатическая региональная модель прогноза основных метеорологических величин «REGION», система краткосрочного негидростатического прогноза погоды COSMO-RU [45, 102], выходы глобальных моделей Национального центра прогнозирования состояния окружающей среды (NCEP) США и метеорологической службы Великобритании (UKMO). Результаты испытаний метеорологических моделей, прогноз которых используется при выпуске оперативных краткосрочных прогнозов расхода воды на реках Кубани, приводятся в ряде работ [7, 102]. Рассмотрение эффективности прогнозирования по оперативным метеорологическим моделям позволяют считать, что прогнозы температурного режима имеют точность, достаточную для использования в системе гидрологического прогнозирования – среднеквадратические ошибки прогноза температуры воздуха моделей REGION, COSMO, NCEP и UKMO на 24, 48 и 72 ч не превышают 2.3°C, 2.5°C и 2.7°C [102]. В наибольшей степени успешность прогнозирования паводков в бассейне Кубани определяется надёжностью прогноза атмосферных осадков. Прежде всего это относится к теплому периоду года. Сравнительная оценка успешности прогнозов осадков за период с апреля по сентябрь 2011 г. для Европейской территории России представлена в работе [7]. В ней показано, что в целом численный прогноз факта выпадения осадков является вполне успешным по всем рассмотренным моделям. Критерий Пирси-Обухова принимает значения в диапазоне 0,48–0,59 для различных величин заблаговременности. Прогноз считается практически значимым при значении критерия более 0,30.

Прогностические значения метеорологических элементов в узлах регулярных сеток интерполируются в точки расположения метеорологических станций. При этом используется алгоритм билинейной интерполяции. Таким путём выполняется в оперативном режиме задание для всех 27 метеостанций прогнозных значений метеорологических элементов (приземная температура, сумма осадков и некоторые другие метеорологические параметры), являющихся входными переменными для расчётов гидрологических величин.

Информационное обеспечение автоматизированной системы гидрологического прогнозирования основано на использовании специально разработанной оперативной базы данных RIVR, функционирующей и поддерживаемой в рамках автоматизированной системы обработки оперативной информации Гидрометцентра России [67, 110, 111]. В базе данных RIVR размещается весь объем раскодированной гидрометеорологической информации по бассейну Кубани, а также прогностические поля метеорологических элементов используемых метеорологических моделей и выпускаемые гидрологические прогнозы.

Гидрологические модели

Бассейн р. Кубань и водосборы рек черноморского побережья отличаются рядом особенностей, которые необходимо учитывать при разработке методов краткосрочного прогнозирования расходов (уровней) воды. Наиболее существенной из них является присущая горным водосборам зависимость природных условий от высоты местности. Это приводит к тому, что в различных высотных зонах горного водосбора складываются существенно различные условия формирования стока. Например, с точки зрения растительности, почвенного покрова, климатических параметров на одном склоне горного хребта процесс формирования стока может соответствовать условиям, характерным для природных зон от субтропической до арктической. Кроме того, скорость отдачи воды в русловую сеть горного водосбора составляет от нескольких минут от начала выпадения осадков. В разработанной для автоматизированной системе краткосрочных прогнозов реализованы два подхода к прогнозированию расходов воды. Один основан на использовании физико-статистических зависимостей характеристик паводочного стока от метеорологических и гидрологических факторов, второй, – на использовании концептуальной модели формирования стока в горных водосборах бассейна р. Кубань.

Физико-статистические зависимости характеристик паводочного стока от факторов формирования паводков использовались для прогнозирования стока дождевых паводков в створах по всему бассейну Кубани, а также для рек побережья Краснодарского края [12, 13]. Методики прогноза разрабатывались индивидуально для каждого притока Кубани, соотносясь с гидрометеорологическими и физико-географическими условиями в их бассейнах. Для определения коэффициентов прогностических уравнений применен единый метод – решение обратных задач по входным и выходным данным с помощью метода наименьших квадратов. Учитывая, что большое число включаемых в прогностические уравнения переменных приводит, как правило, к неустойчивым результатам, в уравнения включались не более трех независимых переменных. Эти переменные были представлены комбинациями средних по бассейнам температур воздуха, осадками и расходами воды в день составления прогнозов. В рамках разработанной системы прогнозы расходов воды с использованием физико-статистических зависимостей выпускаются в период с мая по октябрь для 10 гидрологических створов в пределах бассейна Кубани.

Методика прогнозирования расходов и уровней воды для восьми гидрологических створов рек Черноморского побережья Кавказа основана на оценке характерного для формирования паводков избыточного слоя поступления воды на поверхность водосбора. В следствие оптимизации прогностической схемы, основанной на упрощении модели

формирования стока, прогноз среднесуточного расхода воды получен по формуле полиномиального вида зависимости среднесуточного расхода воды от фактического расхода воды за предшествующие сутки и на дату выпуска прогноза, а также комбинации фактических и прогностических температур воздуха и сумм осадков на метеорологических станциях рассматриваемых водосборов [13]. Помимо методики прогноза среднесуточного расхода воды в детерминированной форме была разработана и внедрена в практику оперативного гидрологического прогнозирования методика вероятностного прогноза максимальных расходов и уровней воды с заблаговременностью одни сутки [12, 13].

Краткосрочные прогнозы расходов воды рек бассейна Кубани, расположенных выше Краснодарского водохранилища, основаны на модели формирования тало-дождевого стока в горном водосборе [21, 32]. Водосборы рек этого района характеризуются большим диапазоном высотных отметок и включают как высоко расположенные области, в том числе ледники и области вечных снегов, так и участки среднегорья и предгорий. Для таких бассейнов описание процесса формирования стока не может быть выполнено сразу для всей их площади и представляется обязательным её разбиение на некоторое количество высотных зон. Границами таких высотных зон являются изогипсы. Разность высотных отметок изогипс, ограничивающих высотную зону, принималась равной 0,2 км. Для выполнения расчётов, для всех высотных зон рассматриваемых бассейнов должны быть известны их площади, а также площади частей зон, занимаемые ледниками и покрытые лесом. Площади и другие морфометрические характеристики высотных зон (уклон, средняя высота, экспозиция и т.д.) определялись на основе цифровой модели рельефа с шагом 100 м в программном обеспечении ГИС. Распределение площадей ледников по высотным зонам определялось по данным Каталога ледников, а площадей, покрытых лесом, – по литературным данным. Отметим, что в существующей версии модели формирования стока некоторые из морфометрических характеристик не используются. Всего для рассматриваемой территории прогнозирование расходов воды по концептуальной модели осуществляется для 12 створов [21]. Для описания распределения осадков по территории горного водосбора обычно применяется нелинейная (квадратичная) зависимость величины выпадающих осадков от высоты. Процедура учёта информации о фактическом значении расхода воды обычно именуется «коррекцией рассчитанных значений», параметры которой были определены из условия наилучшего соответствия фактических и прогнозных значений расхода воды. После того, как были определены оптимальные значения параметров расчёта, выполнялось определение значений параметров коррекции. Параметры коррекции находились для трёх значений заблаговременности прогноза: 1, 2 и 3 суток.

Структура автоматизированной системы прогнозов

Автоматизация процесса выпуска краткосрочных гидрологических прогнозов расходов (уровней) воды на реках бассейна Кубани одна из первых в практике Гидрометцентра России. Система была разработана в операционной среде Linux (SuSe Linux) с использованием языков программирования Python (версия 2.6) и Fortran90, а также языка командной оболочки Korn Shell (ksh). Использован функционал стандартной библиотеки Python, а также дополнительных модулей NumPy, SciPy и Pandas [187]. На языке Python сформирован сценарий автоматизированного расчета и выпуска прогнозов для рек бассейна Кубани OPER_KUB, а также модули первичной обработки гидрометеорологической информации и постобработки гидрологических прогнозов. Система краткосрочного прогноза расходов воды на реках бассейна Кубани состоит из следующих структурных компонент, отображенных на рисунке 6.1:

- блок подготовки исходных данных для выпуска краткосрочных гидрологических прогнозов, содержащий модули чтения данных из оперативной базы данных RIVR (обращение к макетам данных наблюдений SYNOPKUB, HYDROKUB, а также к макетам метеорологического прогноза RGINTKUB, LNINTKUB, NCINTKUB и EKINTKUB), модуль проверки и подготовки данных для расчетного интервала времени, модуль распределения метеорологических факторов (приземной температуры воздуха и сумм осадков) по высотным зонам горных водосборов притоков;
- блок расчета и прогноза расходов воды для горных водосборов бассейна, который содержит модуль расчета расходов воды по концептуальной гидрологической модели на основе фактической метеорологической информации и модуль прогнозов на основе прогностических полей метеорологических моделей;
- блок прогноза расходов воды на основе физико-статистических зависимостей;
- блок постобработки гидрологических прогнозов, включающий модуль обработки результирующих файлов с целью их последующей визуализации в ГИС, распространения по сети Интернет и размещения в оперативную базу Гидрометцентра России.

В первую очередь производится выборка наблюдаемых данных о температуре воздуха, осадках с сети синоптических станций, а также данных об уровне и расходе воды с сети гидрологических постов бассейна р. Кубань и рек Черноморского побережья Краснодарского края из оперативной базы данных RIVR (рисунок 6.1). С этой целью сценарий обращается к программам `dwnld_mo.out`, `dwnld_ho.out` и `dwnld_mf.out`, сформированным на языке Fortran90.



Рисунок 6.1 – Схема автоматизированной системы краткосрочных гидрологических прогнозов для рек бассейна Кубани

Программы выполняют обращение к макетам оперативной базы данных RIVR, содержащих данные метеорологических и гидрологических наблюдений: SYNOPKUB, HYDROKUB, соответственно. Далее программы обращаются к макетам RGINTKUB, LNINTKUB, NCINTKUB и EKINTKUB, содержащих данные метеорологических прогнозов моделей REGION, COSMO, NCEP и UKMO, интерполированных в точки метеорологических станций бассейна Кубани и рек бассейна Черного моря. Обращение к удаленной базе происходит со следующими аргументами: элемент, даты загрузки, регион, файл с индексами метеорологических станций (гидрологических постов). В результате работы программы выборки данных формируются 12 текстовых файлов (формат CSV, разделитель – точка с запятой):

- 4 файла содержат данные наблюдений наземной сети метеорологических станций и гидрологических постов (температура воздуха, сумма атмосферных осадков, расход и уровень воды);
- 8 файлов содержат метеорологический прогноз температуры воздуха и суммы осадков по четырем используемым моделям (выбирается последний поступивший прогноз в базу RIVR).

После выборки данных сценарий KUB_OPER переходит к этапу обработки исходных данных. Программы обработки данных fact_rgrer.py и mf_rgrer.py сформированы на языке Python. Данные программы производят контроль качества исходной информации, заполнение пропусков, а также приведение данных к расчетным интервалам времени. В настоящий момент расчетный интервал времени составляет 24 ч (календарные сутки ЦМР). Далее программа выполняет распределение метеорологических величин по высотным зонам расчетных водосборов. В результате работы формируются 12 текстовых файлов с проверенными и приведенными в требуемый вид исходными гидрометеорологическими данными, а также с приведенными к высотным зонам значениями фактических и прогностических метеорологических величин.

Выпуск краткосрочного прогноза расходов воды для гидрологических постов бассейна Кубани и рек черноморского побережья осуществляется в 9-10 и 21-10 МСК. Этому предшествует процедура расчета начальных условий для выпуска прогноза, которая заключается в расчете расходов воды с помощью концептуальной модели с максимальным имеющейся на данный момент синоптической и гидрологической информации. В ходе расчета расхода воды с помощью концептуальной модели формируются необходимые переменные состояния модели для пространственных элементов горных водосборов (ландшафтная часть высотной зоны) на дату выпуска прогноза:

- переменные модели динамики снежного покрова;
- переменные, характеризующие содержание талой, дождевой и ледниковой влаги;
- переменные коррекции рассчитанных значений расхода воды.

Вышеуказанные данные являются начальными условиями для выпуска прогноза расходов воды на реках Кубани и черноморского побережья. С учетом обновленных переменных состояния и метеорологического прогноза производится расчет прогноза расходов воды. Прогноз считается с заблаговременностью до 72 часов. Модель формирования стока оформлена в виде программы на языке Fortran90.

Прогноз по физико-статистическим зависимостям формируется сразу после расчета прогноза с помощью концептуальной модели формирования стока на водосборе.

В заключительной части сценарий OPER_KUB обращается к программам, выполняющим постобработку рассчитанных прогнозов расхода воды. В постобработку в настоящий момент входят такие процедуры как отбор файлов с прогнозом, их форматирование с целью рассылки потребителям прогнозов по сети интернет. Также производится подготовка прогностических данных для их визуализации в среде ГИС. Размещение в оперативную базу данных Гидрометцентра России и их визуализация на интернет сайте Гидрометцентра является одной из первостепенных задач в области

постобработки результатов прогнозов на данный момент. Сценарий OPER_KUB установлен на персональной ЭВМ, находящейся в локальной сети ФГБУ «Гидрометцентр России», а также имеющей доступ к удаленной оперативной базе данных RIVR.

Доведение прогнозов до пользователей

Программной основой автоматизированной визуализации послужил программный пакет Python (версия 2.6), дополненный модулями обработки массивов, работы с временными рядами данных, а также модулем визуализации. Для выполнения построения карт, отражающих наблюдаемую и прогнозируемую гидрологическую обстановку, был использован функционал настольной ГИС ArcGIS 10.0 for Desktop Advanced, дополненной модулем расширенной обработки пространственных данных Spatial Analyst. Особенностью данной ГИС является наличие модуля ArcPy, который является пакетом языка программирования Python [127, 159]. Программный пакет ArcPy обеспечивает доступ к инструментам геообработки, входящим в состав стандартных наборов инструментов, устанавливаемых вместе с ГИС, и поддерживается различными модулями (файлы Python, содержащие функции и классы), включая модуль картографирования ГИС (arcpy.mapping). Его наличие послужило ключевым фактором в разработке технологии автоматизированной визуализации краткосрочных гидрологических прогнозов путем разработки модуля визуализации в среде Python и встраиванием его в технологическую линию автоматизированного выпуска прогнозов.

Исходными данными для построения графической и картографической информации явились фактические и спрогнозированные расходы воды, соответствующие критическим уровням (отметка поймы, отметка неблагоприятного и опасного явлений). Картографической основой послужили электронные слои пространственных данных векторного формата, входящих в базу геоданных ГИС-проекта: гидрографическая сеть, населенные пункты, элементы рельефа земной поверхности.

Средства автоматизированной визуализации гидрологических прогнозов ГИС применяются на заключительном этапе работы автоматизированной оперативной системы краткосрочного гидрологического прогнозирования с целью предоставления выходной продукции конечным потребителям в наиболее наглядном и информативном виде. Такой задаче отвечают следующие виды выходной продукции:

- сводная таблица с результатами прогнозирования;
- гидрографы расходов воды;
- карты наблюдаемой и прогнозируемой гидрологической ситуации.

Исходные данные гидрологической обстановки и гидрологического прогноза содержатся в оперативной базе данных ФГБУ «Гидрометцентр России» RIVR. Технологическая цепочка обработки выходных данных автоматизированной системы краткосрочных гидрологических прогнозов заключается в следующем. На персональной ЭВМ, находящейся в локальной сети ФГБУ «Гидрометцентр России» и имеющей доступ к удаленной оперативной базе данных ФГБУ «Гидрометцентр России» (СУБД RIVR), установлены программы, осуществляющие подготовку исходных данных, а также визуализацию в среде ГИС и рассылку информации пользователям по сети Интернет. Работа программ выполняется сразу после оперативного счета прогноза (9³⁰ и 21³⁰ МСК).

Блок обработки прогнозов начинает функционирование с чтения результатов краткосрочных гидрологических прогнозов расходов (уровней) воды автоматизированной системы прогнозирования и данных гидрологических наблюдений, размещенных в макетах удаленной базы данных RIVR (при помощи программ, сформированных на языке программирования Fortran90). Затем производится обработка файлов с фактической и прогностической гидрологической информацией за текущую дату (дату выпуска прогноза) для формирования таблиц в формате *CSV*. В результате формируются пять таблиц: четыре таблицы с прогностическими данными, рассчитанными по выходным данным четырех метеорологических численных моделей (региональная модель ФГБУ «Гидрометцентр России», мезомасштабная модель COSMO-RU модель национального центра природных исследований США, модель метеорологического бюро Великобритании) и сводная таблица. На выходе системы формируется таблица в текстовом формате, содержащая средние по ансамблю гидрологических моделей спрогнозированные величины расходов воды.

Автоматизация построения гидрографов осуществляется с использованием функционала библиотеки Matplotlib языка программирования Python, предназначенной для визуализации данных двумерной графикой. Для гидрологических постов строятся гидрографы расходов воды: фактических – за пять предшествующих суток, включая дату выпуска прогноза, и прогнозируемых – по каждому из четырех вариантов гидрологического прогноза на даты, соответствующие заблаговременностям прогноза. Примеры гидрографов приведены на рисунке 6.2. Построенные графики сохраняются в формате изображения (PNG).

Карты представляют собой визуализацию двух видов прогнозов – ансамблевого и категориального. Прогнозируемые величины расходов воды на гидрологических постах отображаются в цифровом виде – отображается среднее значение ансамбля. Визуализация

категорийного прогноза заключается в заливке символа гидрологического поста. Выполняется заливка различными цветами в соответствии с положением расходов воды относительно их критических значений, т.е. в категориях превышения/непревышения характерных отметок (отметок выхода воды на пойму, достижения неблагоприятного и опасного явлений). Зеленым цветом отображаются посты, где прогнозируемая величина расхода воды ниже расходов, соответствующих уровню поймы (т.е. прогнозируется отсутствие затопления). Желтым цветом – посты, где прогнозируемая величина расхода воды выше величины расхода, соответствующего превышению отметки поймы; оранжевым цветом – посты, где прогнозируется превышение расхода, соответствующего отметке неблагоприятного явления (НЯ); красным (самый высокий уровень опасности) – посты, где прогнозируется превышение расхода, соответствующего отметке опасного явления (ОЯ). Также предусмотрен белый цвет заливки, означающий отсутствие значений характерных расходов воды для данного створа. Пример такой карты приведен на рисунке 6.3.

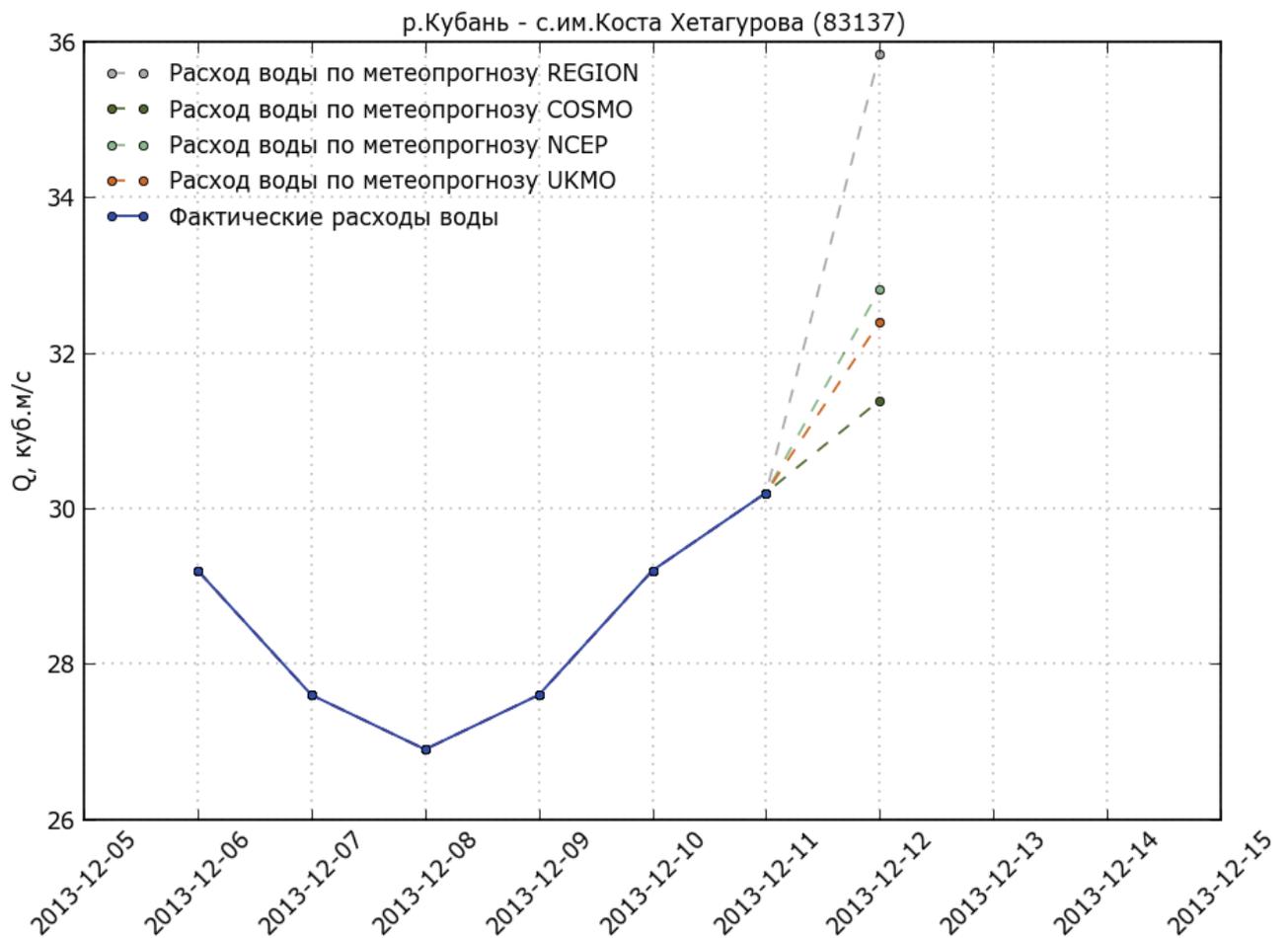


Рисунок 6.2 – Пример гидрографа для створа р. Кубань – свх. им. Коста-Хетагурова (дата выпуска прогноза 11 декабря 2013 г.)

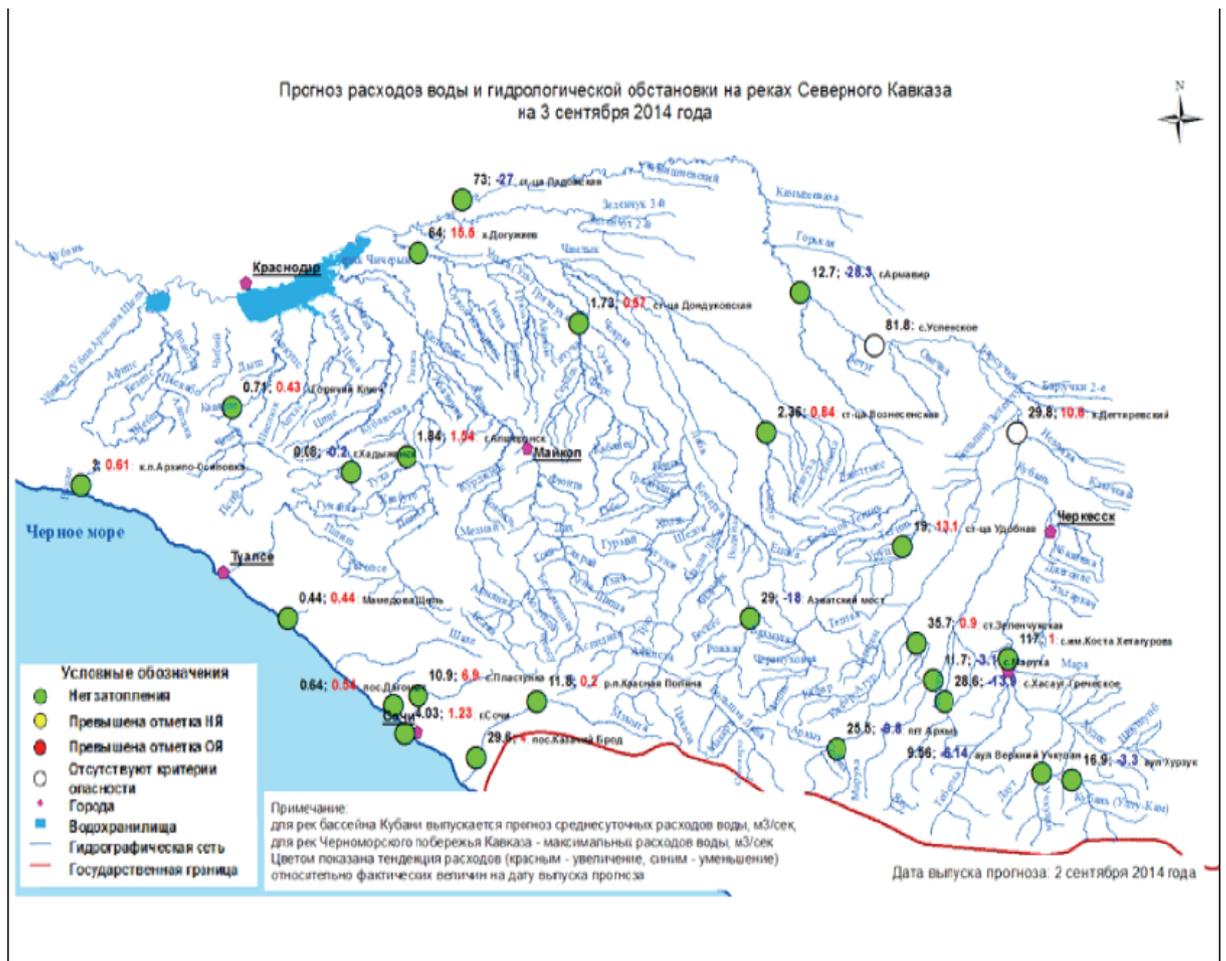


Рисунок 6.3 – Карта прогноза гидрологической обстановки в бассейне р. Кубань и на реках Черноморского побережья Кавказа

Полученное изображение представляет собой карту прогнозируемой гидрологической обстановки на соответствующую заблаговременности дату. На заключительном этапе работы программы `mk_table.py` осуществляется архивация в формате ZIP файлов таблиц и изображений, созданных на предыдущих этапах работы программы в срок запуска программы. В сжатом виде размер архива составляет около 4 МБ. Время работы программы составляет около 4 минут. Выходная продукция автоматизированной системы краткосрочных прогнозов ежедневно дважды в сутки в автоматизированном режиме направляется потребителям прогнозов с использованием сети Интернет.

6.2 Система раннего предупреждения «ГИС Амур»

Общие сведения о системе

В рамках технического проекта восстановления, модернизации и развития гидрометеорологической сети наблюдений и системы гидрологического прогнозирования в бассейне р. Амур после катастрофического паводка на реке летом-осенью 2013 г. [112]

специалистами Гидрометцентра России при участии автора и НИЦ "Планета" была разработана система мониторинга, прогнозирования и раннего оповещения о наводнениях «ГИС Амур». Система автоматизированного краткосрочного прогнозирования и мониторинга наводнений на р. Амур состоит из трех крупных подсистем – информационного обеспечения, расчета и прогнозирования, подготовки и доведения выходной прогностической и информационно-аналитической продукции до пользователей. Подобная структура системы прогнозирования успешно зарекомендовала себя в практике оперативного гидрологического прогнозирования зарубежных гидрометеорологических служб.

Информационная подсистема состоит из системы управления бассейновой базой гидрометеорологических данных, разработанной в Гидрометцентре России, и функционирующей в рамках автоматизированной системы обработки оперативной информации АСООИ Гидрометцентра России [67]. В режиме реального времени в базу данных поступает большой объем гидрометеорологической информации с сети наблюдений Росгидромета, прогностические поля метеорологических величин (рассчитываемых в Гидрометцентре России, а также поступающих по сети глобального обмена данными). Информационная подсистема является основой для расчета и выпуска гидрологических прогнозов, а также для последующей визуализации данных гидрометеорологического мониторинга и прогнозирования. Вычислительным ядром системы «ГИС Амур» является подсистема гидрологических расчетов и прогнозов. Для основного русла рек Амур и Зея реализована методика краткосрочного прогноза среднесуточных уровней воды с заблаговременностью до 6 суток. [22]. Данная методика основана на использовании метода соответственных уровней с переменным временем добегания. Для краткосрочного прогноза суточного объема притока воды к водохранилищу Зейской ГЭС разработана и внедрена методика прогноза, основанная на использовании математической модели формирования стока на водосборе водохранилища [20]. Функционирование подсистемы гидрологических прогнозов обеспечивается постоянным взаимодействием с информационной подсистемой – требуемые исходные данные для гидрологических прогнозов отбираются из оперативной бассейновой базы гидрометеорологических данных. В качестве входной информации при выпуске прогнозов используются данные наблюдений на сети гидрологических постов и метеорологических станций, а также метеорологические прогнозы четырех метеорологических моделей: COSMO (Гидрометцентр России, [45]), JMA (Японское метеорологическое агентство), NCEP (Национальный центр по прогнозированию окружающей среды США), UKMO (Метеорологическая служба Великобритании). Заблаговременность прогноза суточного притока воды в водохранилище составляет до 4

суток. Методики прогнозов реализованы в виде автоматизированных программных средств при помощи языков программирования Python и Fortran 90. После завершения всех расчетов выходная информация (результаты прогнозов) записывается в оперативную базу данных. Реализация всего программного комплекса осуществлена в операционной среде Linux на АСООИ серверах Гидрометцентра России. Выполнение расчетного блока происходит в автоматизированном режиме в рамках оперативной технологии АСООИ Гидрометцентра России [110, 111].

Подсистема подготовки и доведения выходной продукции до пользователей

Для оперативного обеспечения потребителей фактической и прогностической информацией была разработана подсистема подготовки и визуализации информации о гидрологической обстановке в бассейне р. Амур. Подсистема реализована на основе ГИС- и веб-технологий, что позволяет визуализировать и интегрировать в сети Интернет географическую, гидрологическую, метеорологическую, синоптическую, спутниковую геопространственную информацию. Разработанная подсистема (постоянное место эксплуатации Главный вычислительный центр Росгидромета) 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, поступающей по системе международного обмена EARS (EUMETSAT Advanced Retransmission Service), выполняются в Европейском центре НИЦ «Планета». Сибирский центр НИЦ «Планета» используется как резервный, когда по каким-либо причинам спутниковые данные не могут быть приняты Дальневосточным центром.

Подсистема имеет широкие функциональные возможности по систематизации типов информационной продукции, автоматической поддержке электронных каталогов базы данных, ведению метаданных с подробным описанием каталогов и т.д. В ней реализованы высокая степень безопасности на трех уровнях (паролирование на уровне базы данных, веб-сервисов, веб-приложений); дополнительная защита данным обеспечивается через веб-адаптер веб-сервера.

Подсистема включает следующие компоненты:

- компонент базы данных (БД), предназначенный для управления, поддержки и ведения массивов гидрометеорологической информации;
- ГИС-компонентов для управления ГИС-серверами и автоматизированными рабочими местами (АРМ), 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).

Структурная схема подсистемы подготовки и доведения до пользователей выходной продукции представлена на рисунке 6.4.

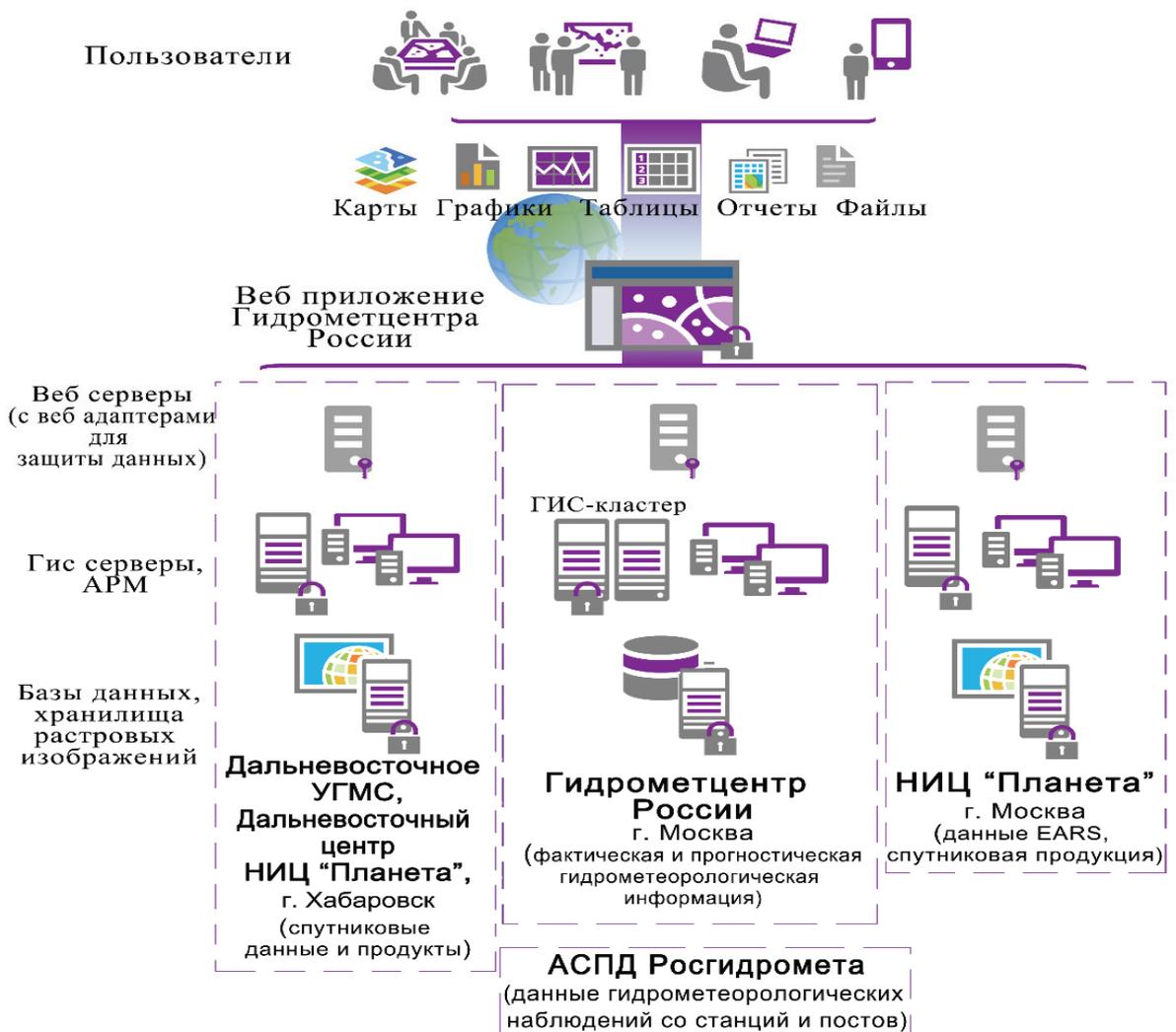


Рисунок 6.4 – Структурная схема подсистемы подготовки и доведения до потребителей выходной продукции системы раннего предупреждения «ГИС Амур» [132]

Компонент БД реализован на основе системы управления базами данных (СУБД) промышленного уровня MS SQL Server-2012. Данная модель СУБД была выбрана в связи с ее широкими возможностями работы с большими объемами информации в ГИС и веб-системах, выполненных на платформе ArcGIS. Структурно компонент содержит три базы данных: основная БД с оперативной гидрометеорологической информацией, с сети наблюдений и метеорологическим прогнозом, а также две БД со спутниковой информацией.

Основная БД, территориально расположенная в Гидрометцентре России, включает в себя следующую оперативно пополняемую информацию: данные наблюдений на гидрологических постах; данные наблюдений на метеорологических станциях (основные метеорологические величины, получаемые в синоптические сроки); данные наблюдений и расчета характеристик водохранилища Зейской ГЭС; прогноз уровня воды на гидрологических постах; прогноз притока воды к водохранилищу Зейской ГЭС; метеорологические прогнозы; справочную информацию о гидрологических постах, метеорологических станциях, реках, водохранилищах и частных водосборах бассейна р. Амур. Кроме того, в БД содержатся данные наблюдений с сети гидрологических станций и постов бассейна р. Амур, включая данные наблюдений за уровнем воды на р. Сунгари, которые поступают по сети Росгидромета от Дальневосточного УГМС.

Следует отметить, что на большинстве гидрологических постов процесс получения данных гидрометеорологических измерений производится вручную специалистом-гидрологом и от момента измерения гидрометеорологической величины до ее попадания в базу данных системы «ГИС Амур» он занимает от 1,5 до 2 часов.

Базы данных спутниковой информации находятся в Дальневосточном и Европейском центрах НИЦ «Планета». БД Дальневосточного центра включает спутниковые данные, принимаемые в зоне радиовидимости на собственные приемные средства. К ним относятся данные космических аппаратов «Метеор-М» № 1 и № 2, «Канопус-В» № 1, «Ресурс-П» № 1 и № 2, «Landsat 8», «Terra/Aqua», а также созданная по этим данным спутниковая информационная продукция: карты зон затопления в бассейне р. Амур, карты типов и границ распространения снежного покрова Дальневосточного региона. В БД Европейского центра находится цифровая модель рельефа с разрешением 15 м по вертикали, а также спутниковые данные, получаемые с космического аппарата радиолокационного зондирования «Sentinel 1» и спутниковая продукция, получаемая по системе международного обмена EARS: карты относительной влажности почвы в бассейне р. Амур и карты приводного ветра в Амурском заливе Охотского моря. Для спутниковой информации в подсистеме отведено отдельное файловое хранилище, в котором находятся данные в растровом формате, в базе данных содержатся только метаданные и ссылки на саму информацию.

Наполнение БД информацией происходит автоматически, для чего были реализованы программные средства на языке программирования Python. ГИС-компонент управления ГИС-серверами и автоматизированными рабочими местами реализован на платформе промышленного уровня ArcGIS (ESRI) в серверном и настольном исполнении. ГИС-компонент гидрометеорологической информации состоит из двух ГИС-серверов и трех

автоматизированных рабочих мест (АРМ) гидролога. АРМ гидролога предназначен для разработки и поддержки БД фактической информации об уровнях и расходах воды на гидрологических постах, проведения предварительных расчетов и вычислений прогнозов уровня воды на гидрологических постах. АРМ гидролога оснащены программным обеспечением ArcGIS for Advanced (ArcInfo) и дополнительными модулями Spatial Analyst, Geostatistical Analyst, 3DAnalyst и др. Они объединены в корпоративную сеть и имеют управление с ГИС-сервера. Основная функция ГИС-сервера заключается в создании веб-сервисов гидрологической, метеорологической, синоптической фактической и прогностической информации на основе упорядоченных данных, хранящихся в БД, а также в оптимизации и управлении этими сервисами. Кроме того, ГИС-серверы обеспечивают разграничение доступа к данным между гидрологами, имеющими свою зону ответственности. ГИС-серверы оснащены программным обеспечением ArcGIS for Server Advanced. С целью равномерного распределения нагрузки между ГИС-серверами при одновременном обращении большого числа пользователей (около 200), а также для поддержания бесперебойной работы подсистемы при выходе из строя одного из серверов, ГИС-серверы объединены в кластер.

Компонент взаимодействия с пользователями (веб-компонент), выполненный в виде веб-приложения, находится на веб-сервере Гидрометцентра России. Его основная функция состоит в объединении сервисов, действующих в разных подразделениях Росгидромета (Гидрометцентр России, Дальневосточный и Европейский центры НИЦ «Планета», Дальневосточное УГМС), на основе графического интерфейса, с помощью которого пользователям предоставляется возможность визуализации и анализа всей имеющейся гидрометеорологической информации в бассейне р. Амур.

Графический интерфейс веб-приложения разрабатывался с учетом специфики системы «ГИС Амур», предоставления пользователям широких возможностей и удобства для работы. В приложении реализована возможность просмотра всей наблюдаемой или прогнозируемой гидрометеорологической информации – уровня воды, его тенденции, превышения критических отметок, класса опасности гидрологической обстановки (рисунок 6.5), данных метеорологических наблюдений, метеорологического прогноза, площади затоплений, влажности почвы и многих других гидрометеорологических величин (число слоев представлено в правой части рисунка 6.5). Помимо просмотра, существует возможность доступа к информации в текстовом виде, которую можно легко экспортировать для последующего анализа в сторонних программных средствах [22, 113, 132].

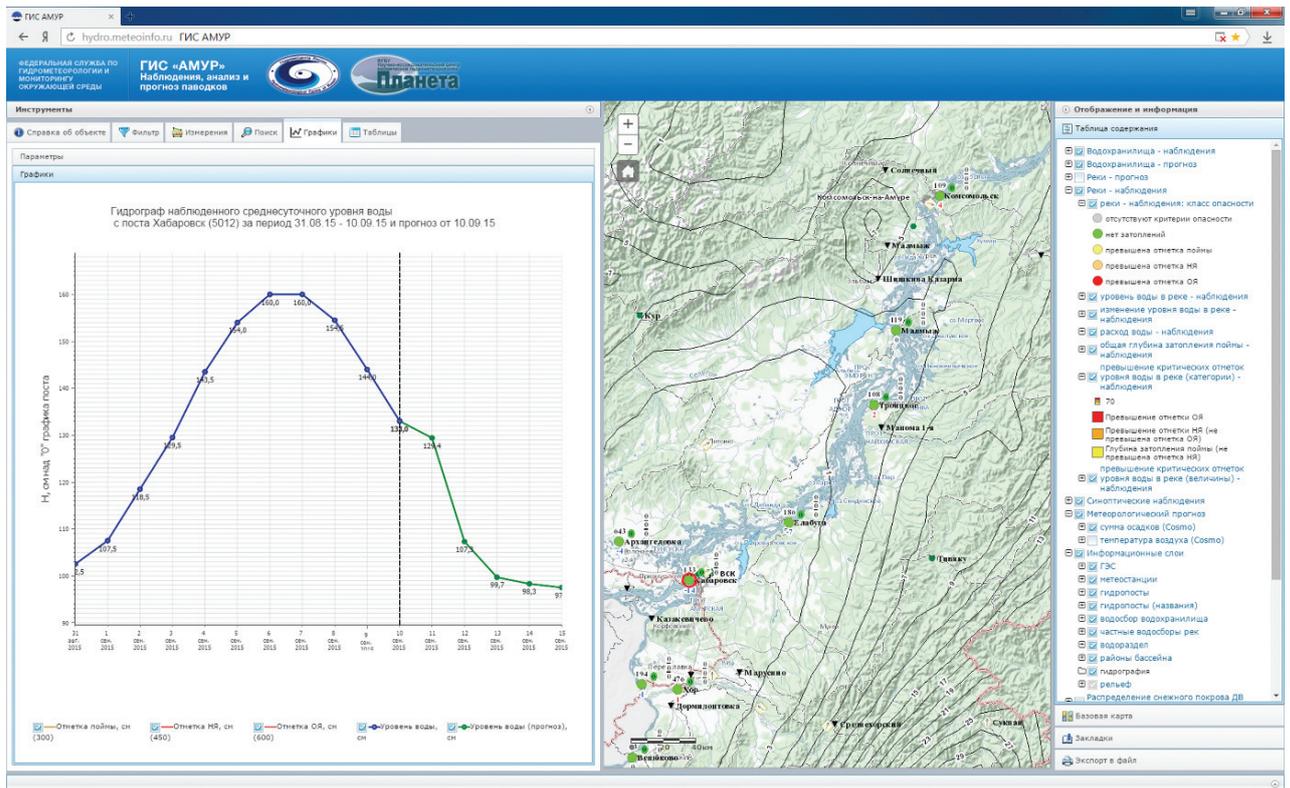


Рисунок 6.5 – Пример представления прогностической продукции в рамках системы раннего предупреждения «ГИС Амур»

В приложении предусмотрены широкие возможности для выборки гидрометеорологической информации по ряду критериев: времени (дате, сроку наблюдений или выпуска прогноза); принадлежности к гидрологическому посту или метеорологической станции; территориальному признаку (субъектам Российской Федерации, районам бассейна р. Амур, принадлежности к УГМС, принадлежности к отдельным притокам и произвольной области); заданным критериям, например, повышение уровня воды на 1 м и более.

Правила работы с системой

При первом запуске интерфейса на экране монитора отображается наиболее актуальная на текущую дату информация о гидрологической обстановке в бассейне р. Амур, что освобождает пользователя от лишних операций по поиску нужной информации. В интерфейсе широко представлен блок графического анализа информации. В частности, на типовом графике изменения уровня воды на гидрологическом посту можно отобразить временной ход фактических значений уровня воды, плавно переходящих в прогностические. На рисунке 6.5 представлен комплексный гидрограф уровня воды в г. Хабаровск (фактические данные наблюдений представлены линией синего цвета, прогноз – зеленого цвета).

Предусмотрена возможность проверки точности прогнозов, при этом осуществляется графическое совмещение фактических и прогностических данных об уровне воды (рисунок 6.6). Неблагоприятные гидрологические явления отображаются на картах затопления речных пойм, построенных по спутниковым данным (рисунок 6.7). Для гидрологического поста Зейского водохранилища имеется возможность проведения комплексного графического анализа изменения фактических и прогностических данных о притоке и сбросе воды (рисунок 6.8), при этом данные прогноза этих параметров рассчитываются по разным моделям. В графическом интерфейсе реализована возможность воспроизведения поперечного профиля уровня воды на некоторых гидрологических постах, что дает возможность оценить расход воды. Кроме того, с помощью графического интерфейса можно комбинировать спутниковые данные с наземной гидрологической информацией.

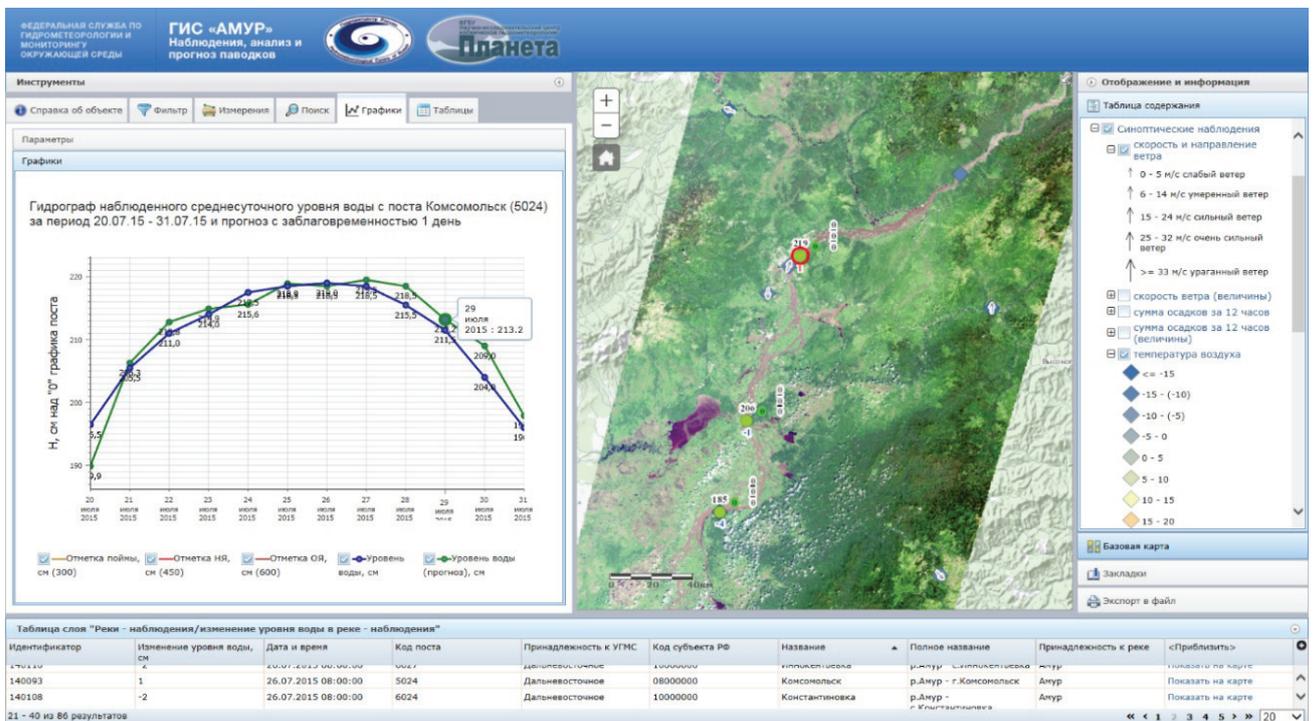


Рисунок 6.6 – Прогностические и фактические значения уровня воды у г. Комсомольск-на-Амуре

Помимо представления оперативной гидрометеорологической информации, веб-приложение позволяет пользователю выбирать картографическую основу (например, картографическую подложку ArcGIS Online, мультимасштабную карту Росреестра, карту Bing Maps и др.), на основе которой можно отображать разные виды гидрометеорологической информации. Интерфейс позволяет отображать на картографической основе все гидрологические посты, метеорологические станции, ГЭС и

другие объекты, расположенные в бассейне р. Амур, или выборочно по отдельным притокам, получать не только фактические значения с этих постов, но и прогностические с учетом заданной заблаговременности. Результаты могут быть представлены в виде графиков, таблиц и анимации либо оформлены в электронном и печатном видах. Интерфейс предусматривает комплексирование разных видов гидрологической, метеорологической, синоптической, спутниковой информации, представленной в векторном и растровом видах. При комплексировании используется инструментарий – вертикальная или горизонтальная «шторка», «уровень прозрачности», «уровень контрастности» и др. Графический интерфейс веб-компонента подсистемы выполнен на языке программирования *JavaScript* с использованием технологии API for ArcGIS, что дает возможность пользователю запускать веб-приложение на любых медиа носителях (компьютерах, планшетах, смартфонах и др.), имеющих выход в Интернет, без установки дополнительных программ. При этом компьютерный код приложения был написан с использованием открытого программного кода JavaScript Viewer for ArcGIS (Esri) и Hard Cider (bt fou). Веб-приложение работает во всех основных просмотревых системах Интернет-страниц (браузерах): Internet Explorer версии 6 и выше, Mozilla Firefox, Google Chrome, Yandex, Opera, Safari и др. [113, 132].

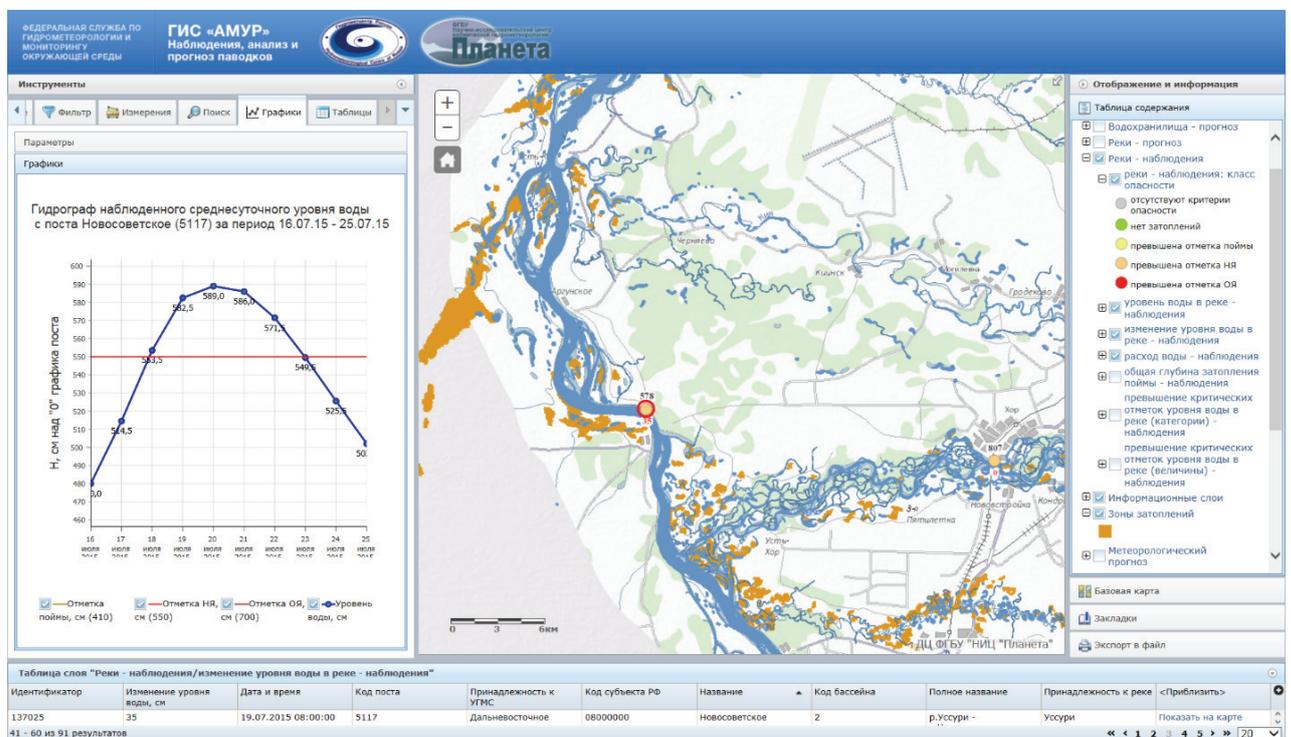


Рисунок 6.7 – Визуализация зон затоплений пойм р. Амур с помощью спутниковой информации

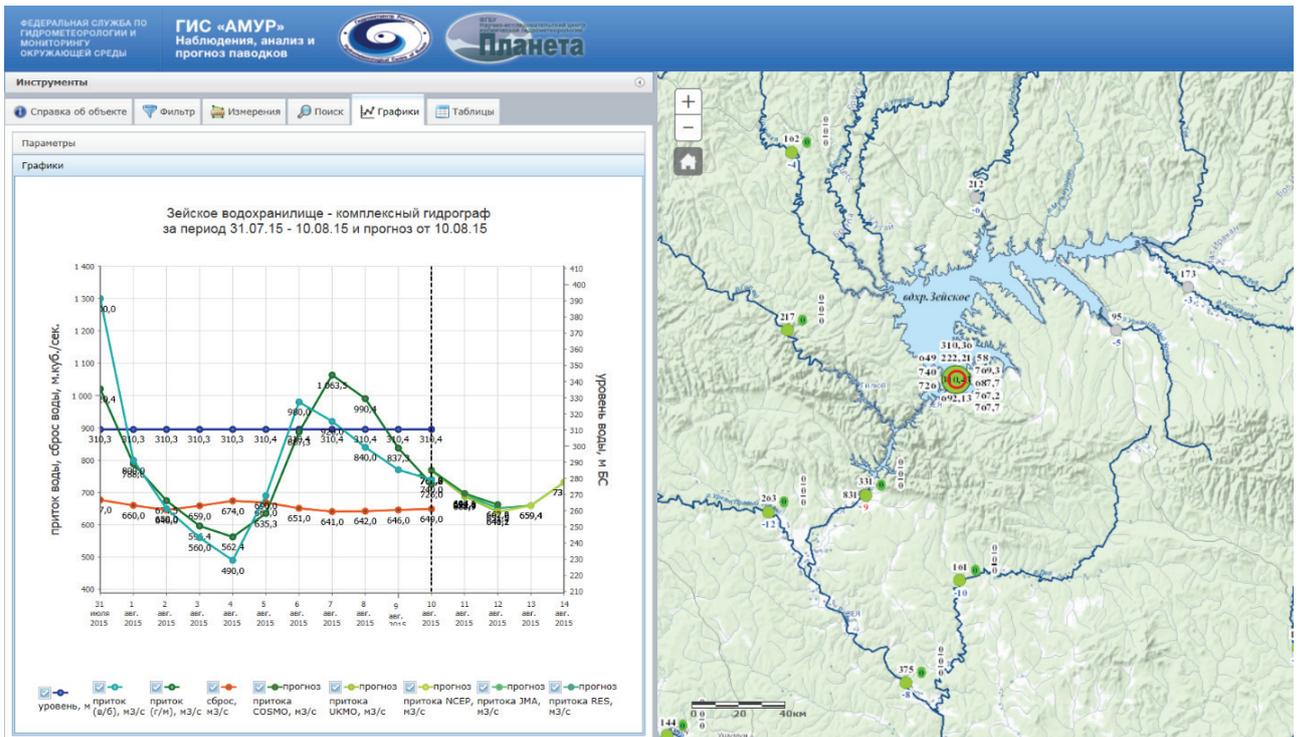


Рисунок 6.8 – Визуализация в «ГИС Амур» фактической и прогностической гидрологической обстановки на Зейском водохранилище

Система мониторинга, прогнозирования и раннего оповещения «ГИС Амур» основана на использовании гидрометеорологической информации: данных наблюдений с гидрологических постов и метеорологических станций, расчетов и прогнозов гидрологической обстановки, спутниковых данных высокого и среднего разрешения, а также спутниковой информационной продукции, полученной на основе обработки этих данных. «ГИС Амур» является территориально распределенной системой. Ее основные компоненты находятся в Гидрометцентре России, спутниковые компоненты в виде готовых веб-картографических сервисов поставляют Европейский (информация, поступающая по системе EARS) и Дальневосточный (принимающий спутниковые данные) центры НИЦ «Планета», Сибирский центр НИЦ «Планета» является резервным поставщиком спутниковых данных.

В целях увеличения периодичности поступления в систему «ГИС Амур» данных с гидрологических постов с двух до восьми раз в сутки, а в случаях экстремальных ситуаций до ежеминутной, необходимо продолжить работы по оснащению гидрологической сети спутниковыми радиотерминалами, осуществляющими сбор и передачу данных через геостационарные космические аппараты: метеорологический «Электро-Л» № 1 и связной «Луч-5В». В настоящее время спутниковыми радиотерминалами оснащены 20 гидрологических постов в бассейне р. Амур.

Система «ГИС Амур» разработана на основе ГИС и веб-технологий, имеет большую степень надежности и безопасности, обладает повышенным быстродействием. В ходе

оперативной эксплуатации весной–летом 2015 г. «ГИС Амур» продемонстрировала высокую эффективность работы: точность и надежность прогнозирования, оперативность доведения продукции до конечных пользователей, широкое разнообразие типов и форматов выходной продукции, что позволяет использовать ее в качестве прототипа при развитии подобных систем для других крупных бассейнов рек Российской Федерации.

Система «ГИС Амур» ориентирована на широкий круг пользователей, в том числе на органы исполнительной власти. Система позволяет в режиме, близком к реальному времени, получать доступ ко всему массиву гидрометеорологической информации в бассейне р. Амур, что способствует принятию правильных и своевременных решений, нацеленных на минимизацию ущерба от прохождения паводков.

Защищены права интеллектуальной собственности на программное обеспечение основных составляющих системы «ГИС Амур», в том числе на подсистему доведения фактической и прогностической гидрометеорологической продукции в бассейне р. Амур до конечных пользователей с помощью ГИС и веб-технологий.

Ведущим мировым центром по геоинформационным технологиям ESRI (Environmental Systems Research Institute), система «ГИС Амур» была объявлена «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 (SAG Award 2015).

6.3 Система раннего предупреждения «ГИС Волга»

Общие сведения о системе

В 2018 г. была разработана и введена в эксплуатацию автоматизированная система выпуска среднесрочных прогнозов по бассейну Волги – «ГИС Волга» [133], созданная специалистами Гидрометцентра России (ответственный исполнитель – Ю.А. Симонов) в рамках проекта «Модернизация и техническое перевооружение учреждений и организаций Росгидромета – 2». Разработка системы в бассейне Волги по сути представляла из себя модернизацию базовой технологии гидрологического прогнозирования, включая краткосрочные и долгосрочные прогнозы водного режима, а также прогнозы ледового режима в бассейне Волги. В первую очередь была создана и внедрена в автоматизированную работу (автоматизированное пополнение данными, их последующая обработка) база данных гидрометеорологической информации, выполняющая роль информационной компоненты базовых технологий гидрологического прогнозирования в рамках данной системы автоматизированных прогнозов.

В методической части была автоматизирована методика прогноза среднесуточных значений расхода и уровня воды для периода весеннего половодья и летне-осеннего паводкового периода на реках бассейна Волги, основанная как на моделях формирования стока (Гидрометцентра России и НВУ-96), так и на основе экстраполяции гидрографа и методики приближенной трансформации паводковой волны. Созданы средства представления выходной прогностической продукции с помощью программных средств ГИС. Разработана графическая форма представления гидрографа и внутригодового хода уровней воды, отображающего как наблюдаемые, так и прогностические данные, которая включает отметки поймы, неблагоприятных и опасных отметок уровня воды для быстрого понимания гидрологической обстановки на рассматриваемом гидрологическом посту.

База данных

В качестве информационной основы системы «ГИС Волга» была создана и внедрена в автоматизированную работу база данных гидрометеорологической информации, выполняющая роль информационной компоненты базовых технологий гидрологического прогнозирования. База данных системы содержит два вида информации: атрибутивную информацию о гидрометеорологических элементах, которые записываются в базу данных, пунктах сети гидрометеорологических наблюдений и т.д.; оперативно обновляемую гидрометеорологическую информацию. Атрибутивная информация включает в себя информацию о гидрометеорологических элементах, которые записываются в базу данных, пунктах сети гидрологических, метеорологических, агрометеорологических и снегомерных наблюдений. Помимо атрибутивной информации база данных содержит оперативную информацию, которая поступает в базу данных в автоматизированном режиме.

При проектировании базы данных для бассейна Волги было согласовано с территориальными учреждениями количество и расположение гидрометеорологических станций и постов, состав и режим производства наблюдений. Важными характеристиками прогностической части разработанной базы данных являются таблицы, содержащие прогностические значения расходов (уровней) воды на прогностических гидрологических постах бассейна Волги. При разработке базы данных было учтено количество гидрологических створов, а также водохранилищ, по которым планируется разработать методики краткосрочных гидрологических прогнозов в будущем.

Для управления базой данных была разработана базовая технология обработки гидрометеорологической информации, которая включает в себя следующие программные средства: программные средства загрузки требуемой гидрометеорологической информации из оперативной базы данных; программные средства обработки информации согласно

требованиям методики гидрологического прогнозирования; программные средства выдачи результатов в требуемом формате; программные средства сохранения полученных результатов. Разработанная база данных наполнена информацией о статистических характеристиках прогнозируемых величин (средние, минимальные и максимальные значения). Кроме того, в базу данных были помещены среднесезонные характеристики в характеристиках снежного покрова, а также агрометеорологических характеристиках с целью дальнейшего анализа складывающейся и прогнозируемой обстановки на территории речных бассейнов Волги.

Методики краткосрочного и среднесрочного прогноза

В рамках системы «ГИС Волга» автоматизировано несколько методов и моделей для выпуска краткосрочных и среднесрочных прогнозов расходов (уровней) воды на основных гидрологических постах речной сети Волги. Для расчета расходов воды в замыкающих гидрометрических створах участков рек, ограниченных одним или несколькими входными створами, в которых ведутся наблюдения за расходами или уровнями воды, использована линейная модель трансформации с сосредоточенным боковым притоком [105]. Эта модель достаточно известна и широко применяется на практике и основана на использовании так называемых «кривых добегания» для каждого учитываемого в прогностической схеме входного створа расчетного участка. Кривая добегания описывает трансформацию расходов воды в процессе движения водных масс от входного до замыкающего створа.

Для верхних звеньев гидрологической сети (т.н. «концевых» водосборов) применены несколько концептуальных моделей формирования стока. Прежде всего использована модель формирования стока Гидрометцентра России («модель Гидрометцентра СССР»), основанная на учете теплофизических процессов, происходящих в зоне аэрации и на поверхности водосбора, отдельно для его лесной и полевой частей [11, 76, 77]. Благодаря этому она может быть использована для непрерывного расчета талого, дождевого и тало-дождевого стока. С математической точки зрения модель представляет собой систему алгебраических выражений, являющихся либо эмпирическими зависимостями, либо решениями дифференциальных уравнений, полученными при некоторых упрощающих предположениях. Модель позволяет производить непрерывный расчет следующих процессов: поступления воды на поверхность почвы, промерзания и оттаивания почвы, потерь на инфильтрацию и испарение, задержания воды на поверхности водосбора, оттока влаги в нижележащий слой почвы, поверхностного и почвенного притока, трансформации поверхностного и почвенного притока. Модель хорошо зарекомендовала себя в практике оперативных гидрологических прогнозов и была использована на ряде речных бассейнов европейской территории России, в том числе для рек бассейна Волги [76, 77].

Модель формирования стока включает ряд параметров, которые могут меняться для различных водосборов. Так как многие параметры интегрально отражают водопоглотительные свойства водосбора, надежно оценить их значения по измерениям трудно. Поэтому часть параметров задается с помощью справочных материалов и литературных источников, а часть определяется в результате физико-географического анализа различных обобщенных данных, а также эмпирических зависимостей для рассматриваемого региона. Параметры, отражающие в основном зональные особенности, определяют по данным о водно-физических характеристиках почв, а также по имеющимся эмпирическим зависимостям. Для определения не измеряемых параметров используются процедуры оптимизации. Помимо параметров требовалось задать значения констант, характеризующих условия формирования весеннего половодья в каждом рассматриваемом году: предпаvoudный расход воды, дата начала снеготаяния в расчетном водосборе (в сутках от начала расчетного года модели формирования стока), значения максимальных снегозапасов и характеристика осеннего увлажнения отдельно для лесной и полевой составляющих каждого из районов. Детальное описание модели, схема определения параметров и констант с учетом физико-географических особенностей конкретного водосбора и исходной информации содержится в ряде опубликованных работ [76,77].

Для некоторых водосборов бассейна Камы применена модель формирования стока на водосборе НВУ [127,128] представляет собой модель типа "осадки-сток", основанную на концептуальном описании гидрологических процессов на масштабе водосбора. Описание модели и основных характеристик ее адаптации для водосборов Камы представлено в главе 3.

На базе рассмотренных моделей формирования стока в бассейне Волги для ряда водных объектов разработаны методы краткосрочного прогноза расходов и уровней воды, которые входят как составляющие части в единую прогностическую систему. В частности, реализован выпуск краткосрочных прогнозов для речных систем Оки, Вятки, Костромы, Унжи и Ветлуги. При реализации рассматриваемых моделей формирования речного стока использована только стандартная сеть информационных гидрологических и метеорологических станций и постов. Гидрологическая информация включает ежедневные данные о расходах и уровнях воды. В состав метеорологических данных, необходимых для работы моделей, входят сведения о ежедневных осадках, температуре и дефиците влажности воздуха, а также сведения о высоте и запасах воды в снежном покрове. Привлекаются также сведения о датах схода снега в поле и в лесу. Для задания параметров модели формирования талого, дождевого и смешанного стока и выбора констант использованы данные гидрофизических характеристик почв бассейна, а также обобщенные гидрологические характеристики рек.

В качестве входной информации при выпуске прогнозов используются данные наблюдений на сети гидрологических постов и метеорологических станций, а также метеорологические прогнозы четырех метеорологических моделей: COSMO (Гидрометцентр России [14]), NCEP (Национальный центр по прогнозированию окружающей среды США), UKMO (Метеорологическая служба Великобритании). Заблаговременность прогноза суточного притока воды в водохранилище составляет до 4 суток. Методики прогнозов реализованы в виде автоматизированных программных средств при помощи языков программирования Python и Fortran 90. После завершения всех расчетов выходная информация (результаты прогнозов) записывается в оперативную базу данных. Реализация всего программного комплекса осуществлена в операционной среде Linux на АСОИИ серверах Гидрометцентра России. Выполнение расчетного блока происходит в автоматизированном режиме в рамках оперативной технологии АСОИИ Гидрометцентра России [67, 110, 111].

Для ряда гидрологических створов бассейна Волги использована схема краткосрочного и среднесрочного прогноза расхода и уровня воды, на основе предложенной А.В. Христофоровым модели экстраполяции гидрографа [36]. Данный подход является одним из наиболее эффективных для рек с плавными очертаниями гидрографа расходов (уровней) воды и использован для среднего и нижнего течения рек-притоков Волги. Несомненными сильными сторонами данной методики является относительно небольшой объем требуемой исходной информации (данные о ежесуточных расходах и уровнях воды), простота и скорость вычислений, а также во многих случаях высокое качество оперативных прогнозов расходов (уровней) воды с заблаговременностью до десяти суток.

Разработанные методики краткосрочного и среднесрочного прогноза расходов и уровней воды для речных систем Оки, Вятки, Костромы, Унжи и Ветлуги были верифицированы с использованием гидрометеорологической информации за 2011-2015 годы. Необходимым условием подготовки прогнозов по этим методикам является наличие гидрологических данных, а также в случае моделей формирования стока – данных синоптических наблюдений, данных о запасах воды в снежном покрове и в ледяной корке с сети снегомерных маршрутов. Как известно, наибольшее распространение и состав наблюдений сети наблюдался в 80-х годах прошлого столетия. После 1985 года количественный состав наблюдательных сетей Росгидромета уменьшался. В бассейнах рассматриваемых рек уменьшилось количество информации со снегомерных маршрутов и гидрологических постов. В связи с этим разработанные методики краткосрочных прогнозов, основанные на использовании моделей формирования стока на водосборе, были адаптированы под существующую в настоящее время гидрометеорологическую информацию, поступающую с наблюдательной сети станций и постов Росгидромета.

Автоматизация методик прогнозирования

Методики краткосрочного и среднесрочного прогнозирования расходов (уровней) воды на реках бассейна Волги реализованы в виде программных средств, реализующих используемые модели формирования тало-дождевого стока, трансформационные модели и модель экстраполяции гидрографа. Ниже приводятся основные аспекты автоматизации данных методик.

Выпуск краткосрочных прогнозов уровней (расходов) воды на гидрологических створах речных систем Оки, Костромы, Унжи, Ветлуги, и Вятки осуществляется с помощью разработанных программных средств, реализующих модель формирования тало-дождевого стока Гидрометцентра России. В состав программных средств входит исполняемая программа `hmc.exe`. В качестве единственного аргумента данной программы выступает так называемый файл входного потока `input.par`, в котором указывается вся необходимая информация для программы: расчетные створы, параметры модели, характеристики водосборов, ежедневные данные наблюдений, а также метеорологического прогноза. Файл входного потока реализован таким образом, что на каждую речную систему требуется один файл, который должен содержать всю входную информацию по всем расчетным створам данной речной системы. Таким образом, автоматизация процесса выпуска прогнозов заключалась в автоматизации процесса формирования файла `input.par`, запуска программы `hmc.exe`, а также обработки выходной информации с модельным прогнозом для всех прогностических створов бассейна Волги. Был сформирован файл `runHMC.py`, который выполняет все необходимые действия для автоматизированного запуска программ модели НМС.

Выпуск прогнозов с помощью программы `runHMC.py` производится четыре раза в сутки после поступления метеорологического прогноза в базу данных (00⁰⁰, 06⁰⁰, 12⁰⁰, 18⁰⁰ ВСВ). Метеорологический прогноз далее «сшивается» с наблюдениями на метеорологических станциях и приводятся к временному шагу модели – 1 сутки. Программа попеременно запускается с входными файлами, содержащими наблюдения, совмещенные с метеорологическим прогнозом следующих численных моделей атмосферы: COSMO-RU, NCEP, EXETER. Информация в результирующих файлах записывается с помощью программы `wriehmcdb.py` в реляционную БД для бассейна Волги. Заблаговременность гидрологических прогнозов, выпускаемых с помощью программы `runHMC.py` зависит от заблаговременности метеорологического прогноза. Так, например, при использовании прогностической метеорологической информации модели COSMO-RU заблаговременность составляет трое суток.

Для выпуска краткосрочных прогнозов расходов (уровней) воды для рек бассейна Камы выше Камского водохранилища использована рассмотренная в главе 3 модель HBV-96, а также модели трансформации расходов воды на участках рек. Были также созданы программные средства, автоматизирующие выпуск прогнозов с помощью данных моделей, т.е. автоматизирующие работу моделей, их связь с базой данных, содержащей исходную гидрометеорологическую информацию, а также запись прогнозов в удаленную базу данных. Программное обеспечение, автоматизирующее выпуск краткосрочных прогнозов с помощью модели HBV-96 `runhmv.py` сформировано с использованием языка программирования Python 3.4, а также его внешних модулей. При запуске программы осуществляется поиск исходных файлов с необходимой гидрометеорологической информацией, формирование входного файла для модели, запуск модели, обработка финального результата (прогноза). Следует отметить, что вся входная информация (параметры модели формирования стока для расчетных водосборов) уже помещена в файл `runhmv.py`.

Краткосрочный и среднесрочный прогноз уровней (расходов) воды на остальных гидрологических постах бассейна Волги выполнен на основе модели трансформации и метода экстраполяции гидрографов. Файлы с программным кодом, реализующим выпуск моделей трансформации и экстраполяции, имеют название `runtr.py` и `runextr.py`, соответственно.

Веб-приложение пользователя

Для оперативного обеспечения потребителей фактической и прогностической информацией модернизирована технология доведения прогностической продукции до конечных пользователей модернизированной технологии доведения продукции до конечных пользователей, включающая основные этапы подготовки, визуализации, анализа и распространения информации о гидрологической обстановке в бассейне р. Волга. Технология реализована на основе использования геоинформационных и веб-технологий, что позволяет визуализировать и интегрировать в единой информационной среде географическую, гидрологическую, метеорологическую, синоптическую, спутниковую геопространственную информацию. Технология реализована на серверном оборудовании ФГБУ «Гидрометцентр России», а также частично на серверном оборудовании ФГБУ «ГВЦ Росгидромета» (в части счета метеорологических прогнозов), постоянное место эксплуатации серверного оборудования – ФГБУ «Главный вычислительный центр Росгидромета». Технология подготовки и доведения выходной продукции до пользователей имеет широкие функциональные возможности по систематизации типов информационной

продукции, автоматической поддержке электронных каталогов базы данных, ведению метаданных с подробным описанием каталогов и т.д. В ней реализованы высокая степень безопасности на трех уровнях: создание учетных записей пользователей (логин и пароль) на уровне базы данных, веб-сервисов и веб-приложений; дополнительная защита данным обеспечивается через веб-адаптер веб-сервера. Технология включает следующие компоненты:

- компонент базы данных (БД), предназначенный для управления, поддержки и ведения массивов гидрометеорологической информации;
- ГИС-компонент для управления ГИС-серверами и автоматизированными рабочими местами (АРМ), предназначенными для расчетов и прогнозов гидрометеорологических параметров, а также для подготовки фактической и прогностической информации (серверные и корпоративные ГИС);
- веб-компоненты для взаимодействия с пользователями (веб-сервер с веб-приложением). Структура рассматриваемой технологии подготовки и доведения до пользователей выходной продукции схожа с технологией, использованной для создания веб-приложения системы «ГИС Амур», и представлена на рисунке 6.4.

Компонент БД реализован на основе системы управления базами данных (СУБД) промышленного уровня MS SQL Server-2012. Данная модель СУБД была выбрана в связи с ее широкими возможностями работы с большими объемами информации в ГИС и веб-системах, выполненных на платформе ArcGIS. Кроме того, СУБД MS SQL Server-2012 широко используется в ФГБУ «Гидрометцентр России» (а также в других НИУ Росгидромета), в связи с чем накоплен значительный опыт по ее эксплуатации и осуществлению технической поддержки и администрированию. База данных содержит оперативную гидрометеорологическую информацию с сети наблюдений, полученных по линии АСПД Росгидромета, а также гидрологические прогнозы, рассчитанные на сервере гидрологических расчетов и прогнозов. Информация в базе данных хранится в векторном и растровом виде. В целях оптимизации и повышения быстродействия работы технологии было реализовано следующее решение: в базу данных были занесены заранее созданные векторные слои с объектами наблюдаемой территории (в данном случае для наземных данных – местоположение и символьное отображение гидрологических постов, метеорологических станций и др., а также атрибутивная информация, содержащая общие сведения об объекте). Векторные слои объектов были связаны с таблицами, в которых содержатся постоянно обновляемые данные о наблюдаемых и прогнозируемых гидрологических величинах, и другими характеристиками. Такая схема построения базы

данных позволяет отображать готовые объекты векторного слоя и необходимую фактическую или прогностическую информацию (связанную с объектами) из таблиц. Это позволяет не затрачивать дополнительное время на построение метрики объектов при их визуализации, как это реализовано в большинстве технологий отображения данных в веб-сервисах, включая, все свободно распространяемое программное обеспечение. При этом также выполнена оптимизация запросов данных в БД: на экране монитора пользователя из базы данных запрашиваются только те данные, которые находятся в пределах района интереса, объекты, находящиеся за пределами района интереса и, соответственно, вне экрана монитора пользователя, не задействованы.

Отдельные виды продукции хранятся в системе не только в значениях, но и дополняются изолиниями и заливкой. Для оптимизации отображения данных и быстродействия работы технологии одновременно с вводом значений в базу происходит их перерасчет и преобразование с помощью АРМ-расчет из значений в узлах сетки в изолинии и заливку. Это позволяет при запросе пользователя к БД не затрачивать время на расчеты и построение изолиний и заливки, а загрузить уже готовые виды продуктов. Наполнение БД информацией, включая работу АРМ-расчет, происходит автоматически, для чего были реализованы программные средства на языке программирования Python.

Веб-приложение «ГИС Волга» позволяет пользователю выполнять разнообразные действия, в том числе: просмотр гидрометеорологической информации, ее фильтрация, выборка по времени и пространственному охвату, построение графической продукции, осуществление экспорта оперативной информации в различные форматы и др. (рисунок 6.9). Основная задача веб-приложения — обеспечить пользователю системы понятный, удобный и легкий доступ ко всем ресурсам модернизированных базовых технологий гидрологического прогнозирования в бассейне Волги. В веб-приложении предусмотрена возможность проверки точности прогнозов, при этом осуществляется графическое совмещение фактических и прогностических данных об уровне воды. Неблагоприятные гидрологические явления отображаются на картах затопления речных пойм, построенных по спутниковым данным с помощью водного индекса. Кроме того, с помощью графического интерфейса можно комбинировать спутниковые данные с наземной гидрологической информацией. Графический интерфейс веб-компонента подсистемы выполнен на языке программирования JavaScript с использованием технологии API for ArcGIS, что дает возможность пользователю запускать веб-приложение на любых медиа носителях (компьютерах, планшетах, смартфонах и др.), имеющих выход в Интернет, без установки дополнительных программ.

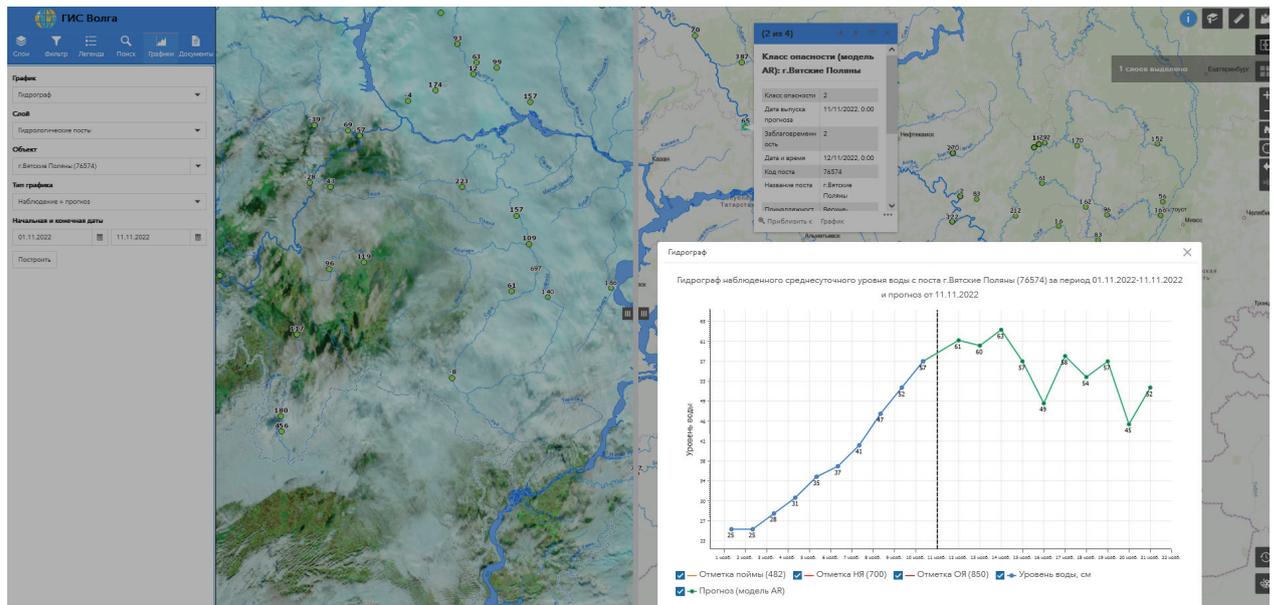


Рисунок 6.9 – Вид веб-приложения системы раннего предупреждения «ГИС Волга»

В этом веб-приложении предусмотрены широкие возможности для выборки гидрометеорологической информации по ряду критериев: времени (дате, сроку наблюдений или выпуска прогноза), принадлежности к гидрологическому посту или метеорологической станции, территориальному признаку (субъектам Российской Федерации, районам бассейна р. Волга, принадлежности к УГМС Росгидромета, принадлежности к отдельным притокам и произвольной области), заданным критериям, например, повышение уровня воды на 1 м.

Графический интерфейс веб-приложения разрабатывался с учетом специфики «ГИС Волга», предоставления пользователям широких возможностей и удобства для работы. В приложении реализована возможность просмотра всей наблюдаемой или прогнозируемой гидрометеорологической информации – уровня воды, его тенденции, превышения критических отметок, класса опасности гидрологической обстановки, данных метеорологических наблюдений, метеорологического прогноза, площади затоплений и многих других гидрометеорологических величин. Помимо просмотра, существует возможность доступа к информации в текстовом виде, которую можно легко экспортировать для последующего анализа в сторонних программных средствах.

В приложении предусмотрены широкие возможности для выборки гидрометеорологической информации по ряду критериев: времени (дате, сроку наблюдений или выпуска прогноза), принадлежности к гидрологическому посту или метеорологической станции, территориальному признаку (субъектам Российской Федерации, районам бассейна р. Волга, принадлежности к УГМС, принадлежности к отдельным притокам и произвольной области), заданным критериям (например, уровень воды выше 1 м и др.).

Правила работы с системой

При первом запуске интерфейса на экране монитора отображается наиболее актуальная на текущую дату и время информация о гидрологической обстановке в бассейне р. Волга, что освобождает пользователя от лишних операций по поиску информации. В интерфейсе широко представлен блок графического анализа информации. В частности, на типовом графике изменения уровня воды на гидрологическом посту можно отобразить временной ход фактических значений уровня воды и прогностических (рисунок 6.10).

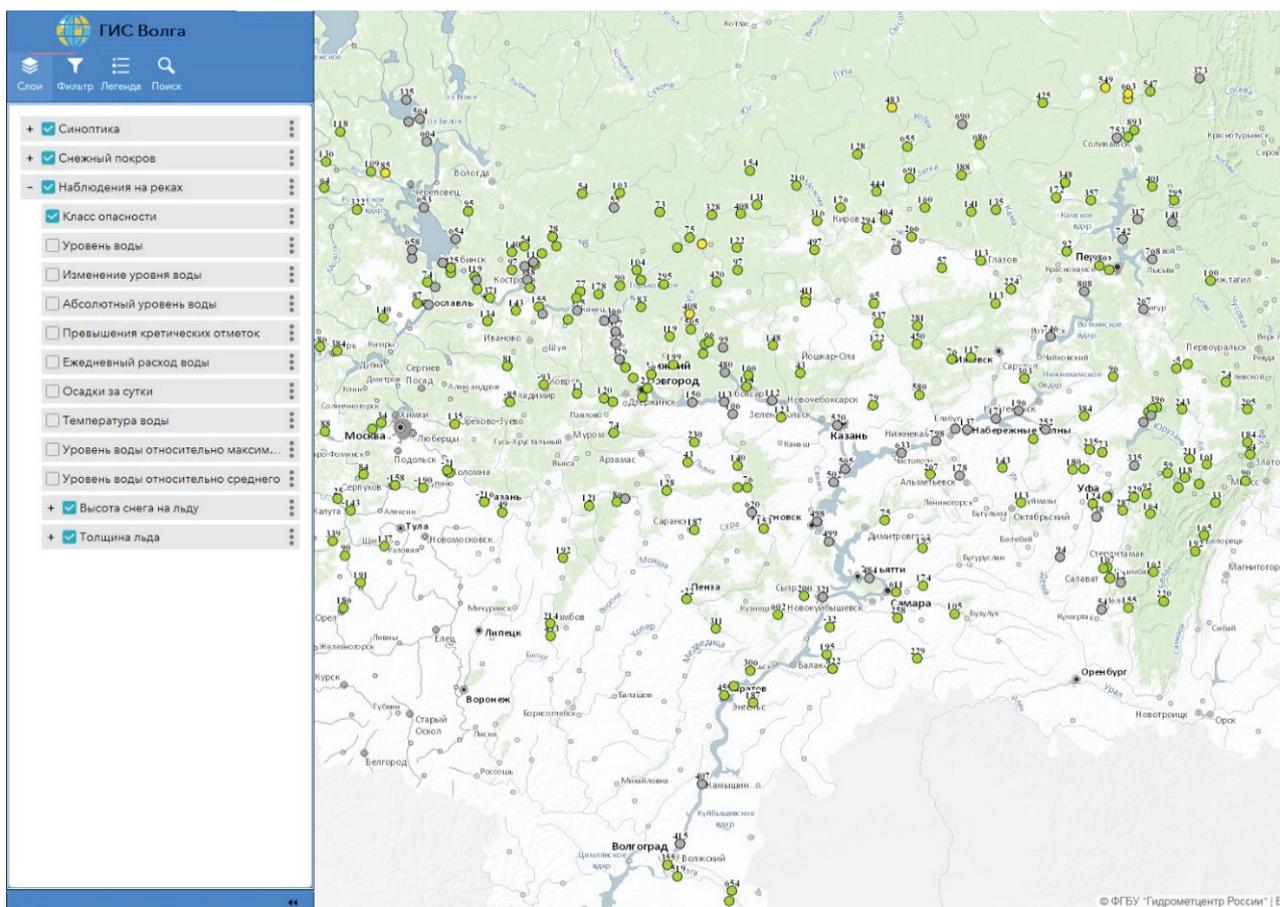


Рисунок 6.10 – Отображение наиболее актуальной гидрологической информации при запуске веб-приложения

В веб-приложении предусмотрена возможность проверки точности прогнозов, при этом осуществляется графическое совмещение фактических и прогностических данных об уровне воды. Неблагоприятные гидрологические явления отображаются на картах затопления речных пойм, построенных по спутниковым данным с помощью водного индекса. Кроме того, с помощью графического интерфейса можно комбинировать спутниковые данные с наземной гидрологической информацией. Помимо представления оперативной гидрометеорологической информации, веб-приложение позволяет пользователю выбирать картографическую основу (например, картографическую подложку ArcGIS Online,

мультимасштабную карту Росреестра, карту Bing Maps и др.), на основе которой можно отображать разные виды гидрометеорологической информации. Интерфейс позволяет отображать на картографической основе все гидрологические посты, метеорологические станции, ГЭС и другие объекты, расположенные в бассейне р. Волга, или выборочно по отдельным притокам, получать не только фактические значения с этих постов, но и прогностические с учетом заданной заблаговременности. Результаты могут быть представлены в виде графиков, таблиц и анимации, либо оформлены в электронном и печатном видах. Также пользовательский интерфейс предусматривает комплексирование разных видов гидрологической, метеорологической, синоптической, спутниковой информации, представленной в векторном и растровом видах. Кроме того, гидрологи под своим уровнем доступа с помощью отдельного дополнительного веб-приложения могут вводить в систему официальную выходную информационно-аналитическую и прогностическую продукцию: справки, бюллетени, отчеты, а пользователи в основном веб-приложении могут просматривать эти документы. Вид окна загрузки документов «ГИС Волга» представлен на рисунке 6.11.

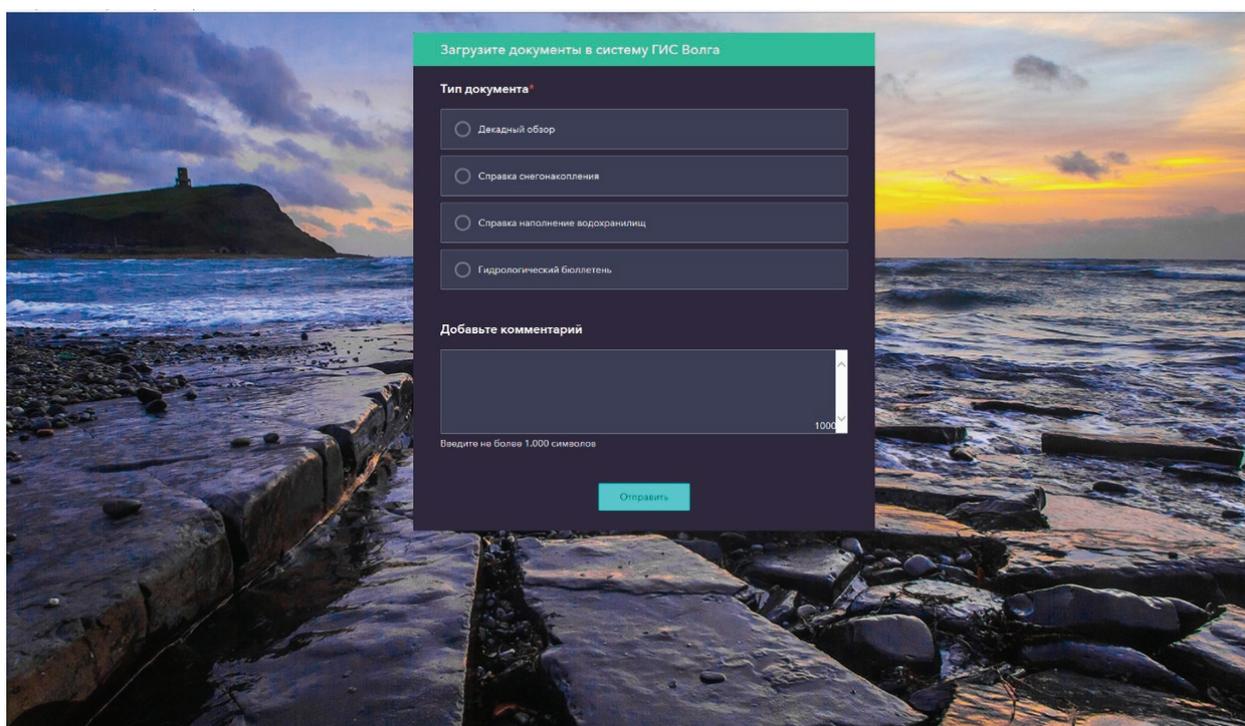


Рисунок 6.11 – Вид окна загрузки документов «ГИС Волга»

Графический интерфейс веб-компонента подсистемы выполнен на языке программирования JavaScript с использованием технологии API for ArcGIS, что дает возможность пользователю запускать веб-приложение на любых медиа носителях (компьютерах, планшетах, смартфонах и др.), имеющих выход в Интернет, без установки

дополнительных программ. При этом компьютерный код приложения был написан с использованием открытого программного кода JavaScript Viewer for ArcGIS (Esri) и Hard Cider (btfou). Веб-приложение работает во всех основных просмотревых системах Интернет-страниц (браузерах): Internet Explorer версии 6 и выше, Mozilla Firefox, Google Chrome, Yandex, Opera, Safari и др.

В разработанном веб-приложении пользователю предоставляется доступ к следующим веб-сервисам:

- веб-сервис гидрологической обстановки на реках, озерах и водохранилищах,
- веб-сервис характеристик снежного покрова,
- веб-сервис агрометеорологических характеристик (прежде всего влажности почвы и промерзания почвогрунтов),
- веб-сервис синоптических данных,
- веб-сервис информационно-аналитической продукции,
- веб-сервис дополнительной информации.

Разработка автоматизированной системы гидрологического мониторинга и прогнозирования «ГИС Волга» обеспечивает использование современных ГИС и веб-технологий для доведения прогностической и информационно-аналитической продукции до пользователей с помощью сети Интернет. По сути, результатом выполненных работ является модернизированная базовая технология гидрологического прогнозирования в бассейне р. Волга, характеристики которой полностью согласуются с современным представлением о системах гидрологического прогнозирования на реках, озерах и водохранилищах.

6.4 Автоматизированная система выпуска краткосрочных и среднесрочных прогнозов стока рек России

В период с 2019 по 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. Данная система в настоящий момент проходит оперативные испытания и планируется к внедрению в 2023 г. Основная цель системы – поддержка принятия решений гидролога-прогнозиста для выпуска официального прогноза и возможно штормового оповещения об опасном развитии паводковой обстановки на реках.

Для получения прогнозов в системе используются два метода – описанный в главе 2 метод экстраполяции гидрографа и описанный в главе 3 метод, основанный на концептуальной модели формирования речного стока HBV-96 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. Наиболее успешные прогнозы получаются для достаточно крупных равнинных рек с плавными очертаниями гидрографа и площадью водосбора более 5 000 км².

Модель HBV-96 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 с последующей коррекцией метеорологических прогнозов, описанной в разделе 3.2. Получаемые в результате предварительные прогнозы расхода воды подвергаются коррекции по формуле (3.1), в которой учитывается и устраняется автокорреляция их ошибок. 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 обоих методов входящие в схему получения прогноза параметры оценивались для каждого конкретного водосбора. На независимом материале выполнена описанная в разделах 2.1 и 3.3 проверка получаемых с их помощью прогнозов, и рассчитаны оценки отношения S/σ_{Δ} их среднеквадратической погрешности к погрешности инерционного прогноза, а также значения показателя Нэша–Сатклиффа NSE .

Автоматизированная система выпускает прогнозы уровня воды с заблаговременностью от 1 до 10 суток и прогнозы расхода воды с заблаговременностью более трех суток, полученные методом экстраполяции гидрографа. Этот же метод используется для получения прогнозов расхода воды для 1552 речных створов, не вошедших в число створов, прогнозируемых с помощью модели HBV-96 и системы COSMO-RU.

Для 546 речных створов в системе учитываются прогнозы расхода воды с заблаговременностью 1, 2 и 3 суток, полученные обоими методами, и для каждого конкретного речного створа выбирается наилучший вариант, давший минимальное значение S/σ_{Δ} и максимальное значение NSE . Как правило, более точные прогнозы расхода воды с заблаговременностью 1 сутки получаются методом экстраполяции гидрографа, а с заблаговременностью 3 суток – с помощью модели HBV-96 и системы COSMO-RU.

Автоматизированная система подготовки и выпуска краткосрочных и среднесрочных прогнозов расходов и уровней воды разработана и реализована с использованием новейших технологий в области проектирования баз гидрометеорологических данных, автоматизации выпуска прогнозов расходов (уровней) воды и визуализации с помощью ГИС и веб-технологий. При этом использовался весь ранее накопленный опыт создания таких систем в Гидрометцентре России, в том числе при разработке систем раннего предупреждения «ГИС Амур» и «ГИС Волга» [112], описание которых представлено выше. В частности, для проектирования баз данных использовались средства PostgreSQL, находящиеся в открытом доступе и позволяющие создать связанную структуру необходимых для методики гидрометеорологических данных. Информационной основой системы является подсистема подготовки входной гидрометеорологической информации, состоящая из процедур обработки наблюдений за уровнями и расходами воды для прогностических гидрологических створов, а также их возможного заполнения в случае наличия пропусков в исходных данных. Подготовка входных данных для расчета осредненных по территории водосбора значений температуры воздуха и осадков занимает отдельное место в схеме подготовки информации. Вычислительная часть системы, т.е. автоматизация реализации методик прогнозирования, выполнена средствами языка программирования Python (версия 3.4). Часть доведения прогностической продукции до пользователей создана с использованием серверной версии ArcGIS, а также программных средств программирования веб-приложений.

Для конкретных потребителей визуализация прогнозов для интересующих их речных створов осуществляется в рамках веб-приложения в виде рисунков типа 6.6 и 6.7 с указанием прогноза уровня воды, прогноза изменения уровня воды. Также дается прогноз гидрологической обстановки на основе соотношения между прогнозируемым уровнем воды и его критическими отметками (отметка поймы, неблагоприятного НЯ и опасного ОЯ явлений).

Общую картину для всей Российской Федерации дает ее ежедневно выпускаемая карта, на которой по результатам среднесрочного прогнозирования уровней воды отмечены:

- территории с отсутствием опасных проявлений водного режима рек;
- территории, на которых затопления не ожидаются;
- территории, на которых уровень воды в реках превышает отметки поймы реки;
- территории, на которых уровень воды в реках превышает отметки НЯ;
- территории, на которых уровень воды в реках превышает отметки ОЯ;
- прогнозы уровня воды, его роста или спада.

Пример такой карты, составленной к 8⁰⁰ 14 ноября 2022 года дан на рисунке 6.12.

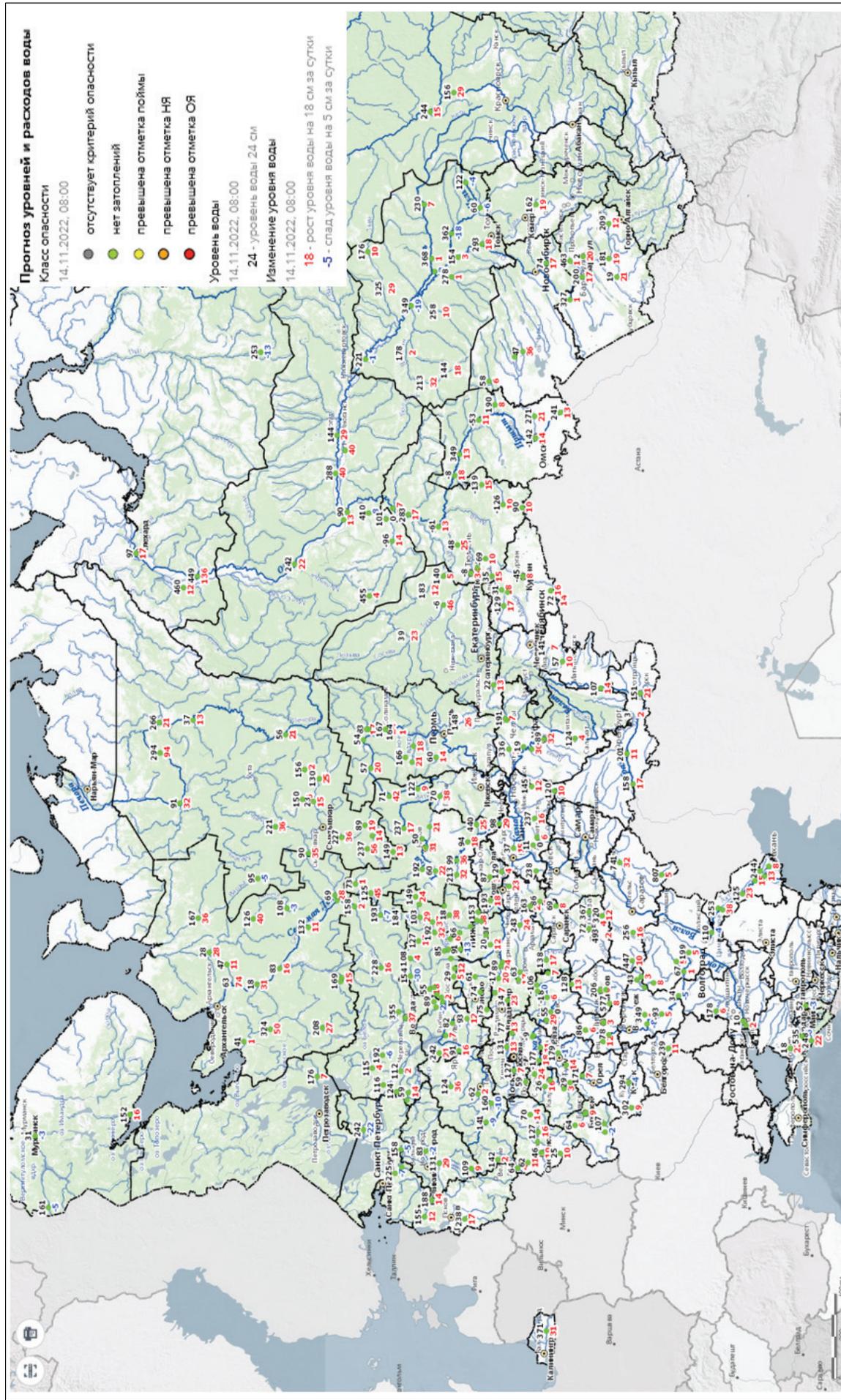


Рисунок 6.12 – Пример карты прогнозируемого состояния рек России

Таким образом, 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.

Выводы из главы 6

1. В ФГБУ «Гидрометцентр России» в последнее десятилетие активно развиваются автоматизированные системы выпуска гидрологических прогнозов и их доведения до пользователей, базирующиеся на современных гидрологических моделях, всей доступной гидрометеорологической информации, включая численные прогнозы погоды, а также современных программных средствах, включая ГИС и веб-технологии. Такие системы реализованы для крупных речных бассейнов, включая бассейн Кубани и реки черноморского побережья России, бассейн Амура и Волги. В последние годы происходит развитие системы для всей территории России.

2. Одной из первых современных систем автоматизированного выпуска прогнозов Гидрометцентра России является система прогнозов для рек бассейна Кубани и Черноморского побережья Краснодарского края. В рамках данной системы реализованы концептуальные и физико-статистические модели, используется весь спектр наземной информации и численные прогнозы погоды. Прогностическая продукция формируется с помощью ГИС-технологий и передается пользователям по электронной почте.

3. Максимальное развитие автоматизированных систем раннего предупреждения достигнуто в рамках систем для бассейна Амура и Волги, где помимо автоматизированного внедрения различных гидрологических методов и моделей детально реализован ГИС и веб-компонент, позволяющий пользователям просматривать прогностическую продукцию в различном виде в рамках веб-приложения. Системы активно используются оперативно-прогностическими подразделениями Росгидромета, а также специалистами МЧС России. Разработанные Гидрометцентром России системы неоднократно удостоивались видных международных наград, в том числе высшей наградой за особые достижения в области применения геоинформационных технологий – Special Achievement in GIS (SAG Award 2015), а также дипломом финалиста национальной премии Русского географического общества «Хрустальный компас».

4. В последние годы в связи с успешной адаптации модели формирования стока и метода экстраполяции гидрографа для многих гидрологических постов России в Гидрометцентре России проводится разработка и внедрение автоматизированной системы краткосрочного и среднесрочного прогноза гидрологической обстановки для всей территории России.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ

АРМ – Автоматизированное рабочее место

ВМО – Всемирная метеорологическая организация

ВСВ (UT) – Всемирное координированное времени

ГИС – Гидрометеорологическая информационная система

ИВП РАН – Институт водных проблем РАН

МСК – Московское время

НГМС – Национальная гидрометеорологическая служба

ООН – Организация Объединенных Наций

ПРООН – Программы развития ООН

СРП – Система раннего предупреждения о паводках и наводнениях

УГМС – Управление гидрометеорологической службой

ХАБ – Хабаровское время (МСК+7)

ЦМР – Цифровая модель рельефа

EFAS – European Flood Awareness System

ЕСОМАГ – Модель формирования стока, разработанная в ИВП РАН

НВУ, НВУ-96 – Модель формирования стока, разработанная в Институте метеорологии и гидрологии Швеции

COSMO-RU – Оперативная система численного прогнозирования погоды

SCE-UA – Эволюционный метод оптимизации параметров модели формирования стока, основанный на алгоритме перемешивания и эволюции выборок значений параметров

FFGS/WGC – Flash Flood Guidance System with Global Coverage

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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акилина В.А., Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В., Юмина Н.М. Долгосрочное прогнозирование характеристик весеннего стока рек бассейна Тобола // Гидрологические исследования и прогнозы. 2022. № 4 (386). С. 64–78.
2. Алексеевский Н.И., Фролова Н.Л., Христофоров А.В. Мониторинг гидрологических процессов и повышение безопасности водопользования. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2011. 387 с.
3. Антропогенные воздействия на водные ресурсы России и сопредельных государств в конце XX столетия / Отв. ред. Коронкевич Н.И., Зайцева И.С. М.: Наука, 2003. 367 с.
4. Аполлов Б.А., Калинин Г.П., Комаров В.Д. Курс гидрологических прогнозов. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 419 с.
5. Арефьева О.Н., Полунин А.Я. Алгоритм идентификации параметров распределения осадков и температуры воздуха в горном водосборе // Труды Гидрометцентра СССР. 1989, Вып. 309. С. 57–67.
6. Асарин А.Е., Бестужева К.Н., Христофоров А.В., Чалов С.Р. Водохозяйственные расчеты. М.: Изд-во МГУ, 2012. 142 с.
7. Багров А.Н. Сравнительная оценка успешности прогнозов элементов погоды на основе ряда отечественных моделей и зарубежных моделей атмосферы различного масштаба // Информационный сборник № 39. Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. М., 2012. С. 69–79.
8. Барабанов А.Т., Долгов С.В., Коронкевич Н.И., Панов В.И., Петелько А.И. Поверхностный сток и инфильтрация талых вод на пашне в лесостепной и степной зонах Восточно Европейской равнины // Почвоведение. 2018. № 1. С. 62–69.
9. Беликов В.В., Зайцев А.А., Милитеев А.Н. Математическое моделирование сложных участков русел крупных рек // Водные ресурсы. 2002. Т. 29. № 6. С. 698–705.
10. Беликов В.В., Зайцев А.А., Милитеев А.Н. Численное моделирование кинематики потока на участке неразмываемого русла // Водные ресурсы. 2001. Т. 28. № 6. С. 701–710.
11. Бельчиков В.А., Корень В.И. Модель формирования талого и дождевого стока для лесных водосборов // Труды Гидрометцентра СССР. 1979. Вып. 218. С. 3–21.
12. Белякова П.А., Борщ С.В., Христофоров А.В., Юмина Н.М. Вероятностное прогнозирование максимальных расходов и уровней воды и критических осадков на реках Черноморского побережья Кавказа // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2013. Вып. 349. С. 104–121.
13. Белякова П.А., Борщ С.В., Христофоров А.В., Юмина Н.М. Краткосрочное прогнозирование стока рек Черноморского побережья Кавказа // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2013. Вып. 349. С. 122–141.

14. Блинов Д.В., Ривин Г.С., Розинкина И.А. Система краткосрочного прогноза погоды COSMO-RU: технологические аспекты визуализации и распространения прогнозов // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2012. Вып. 346. С. 53–61.
15. Бобровицкая Н.Н. Современное состояние гидрологической сети России и основные направления ее развития // Доклады VI Всероссийского гидрологического съезда. Секция 1. М.: Метеоагентство Росгидромета, 2006. С. 5–8.
16. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов, прогноз и управление: Пер. с англ. М.: Мир, 1974. Кн. 1. 406 с.
17. Болгов М.В., Мишон В.М., Сенцова Н.И. Современные проблемы оценки водных ресурсов и водообеспечения. М.: Наука, 2005. 317 с.
18. Большая российская энциклопедия (электронная версия).
19. Большой географический атлас России / Под ред. Г.В. Борисова. М.: Изд-во АСТ, 2019. 224 с.
20. Борщ С.В., Бураков Д.А., Симонов Ю.А. Методика оперативного расчета и прогноза суточного притока воды в водохранилище Зейской ГЭС // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2015. Вып. 359. С. 23–38.
21. Борщ С.В., Симонов Ю.А. Оперативная система краткосрочных гидрологических прогнозов расхода воды на реках бассейна Кубани // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2013. Вып. 349. С. 63–87.
22. 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.
23. Борщ С.В., Асарин А.Е., Болгов М.В., Полунин А.Я. Наводнения. Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. М., 2012. С. 87–125.
24. 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.
25. 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.

26. 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.
27. 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.
28. 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). 2018. С. 122–136.
29. 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.
30. 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.
31. 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.
32. Борщ С.В., Полунин А.Я., Романов А.В., Симонов Ю.А., Самсонов Т.Е., Макаrchук Т.А., Мамедов Э.Э. Визуализация развития паводковой ситуации в бассейне Кубани средствами ГИС-технологий // Материалы Международной конференции «ИнтерКарто. ИнтерГИС», г. Барнаул. 2011. Т. 17. С. 309–312.
33. Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Методы коррекции прогнозов речного стока // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 1 (375). С. 162–175.
34. 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.
35. 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.

36. 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.
37. Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Прогнозирование стока рек России. М.: Гидрометцентр России, 2023. 200 с..
38. Борщ С.В., Христофоров А.В. Оценка качества прогнозов речного стока // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2015. Вып. 355. 198 с.
39. Борщ С.В., Христофоров А.В., Юмина Н.М. Статистический анализ в гидрологических прогнозах. М.: Гидрометцентр России, 2018. 160 с.
40. Бубин М.С., Рассказова Н.С. Ритмичность многолетних колебаний стока рек как интегральный показатель изменчивости климата (на примере Урала). Томск: Изд-во Томского политехнического ун-та, 2013. 278 с.
41. Бураков Д.А. Воднобалансовые зависимости для прогнозов стока талых вод в лесной зоне Западно-Сибирской равнины // Труды РНИИГМИ. 1977. Вып. 35. С. 24–32.
42. Бураков Д.А., Литвинова О.С. Водно-балансовые зависимости для прогноза стока талых вод на юге Западно-Сибирской равнины // География и природные ресурсы. 2010. № 3. С. 111–120.
43. Бельчиков В.А., Жидиков А.П., Полунин А.Я. Краткосрочный прогноз весеннего стока рек, впадающих в волжские водохранилища (Костромы, Унжи и Ветлуги) // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2004. Вып. 339. С. 68–79.
44. Варенцова Н.А., Гречушникова М.Г., Повалишникова Е.С., Киреева М.Б., Харламов М.А., Фролова Н.Л. Влияние климатических и антропогенных факторов на весенний сток в бассейне Дона // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2021. № 5. С. 91–100.
45. Вильфанд Р.М., Ривин Г.С., Розинкина И.А. Мезомасштабный краткосрочный прогноз погоды в Гидрометцентре России на примере COSMO-RU // Метеорология и гидрология. 2010. № 1. С. 5–17.
46. Виноградов Ю.Б. Математическое моделирование процессов формирования стока. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 312 с.
47. ВМО-№ 1259; Комиссия по обслуживанию и применениям в областях погоды, климата, воды и соответствующих областях окружающей среды: Сокращенный окончательный отчет первой сессии. 214 с.
48. Гандин Л.С., Каган Р.Л. Статистические методы интерпретации метеорологических данных. Л.: Гидрометеоздат, 1976. 359 с.

49. Гармаев Е.Ж. Христофоров А.В. Водные ресурсы рек бассейна озера Байкал: основы их использования и охраны. Новосибирск: ГЕО, 2010, 227 с.
50. Гарцман Г.И. Дождевые наводнения на реках юга Дальнего Востока: методы расчетов, прогнозов, оценок риска. Владивосток: Дальнаука, 2008. 222 с.
51. Гельфан А.Н. Динамико-стохастическое моделирование формирования талого стока. М.: Наука, 2007. 276 с.
52. Гельфан А.Н. О проблеме валидации гидрологической модели для диагностических задач // Водные ресурсы: новые вызовы и пути решения. Новочеркасск, 2017. С. 143–149.
53. Гельфан А.Н., Калугин А.С., Мотовилов Ю.Г. Оценка изменений водного режима реки Амур в XXI веке при двух способах задания климатических проекций в модели формирования речного стока // Водные ресурсы. 2018. Т. 45. № 3. С. 223–234.
54. Гельфан А.Н., Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Григорьев В.Ю., Мотовилов Ю.Г., Гусев Е.М. Влияние изменения климата на годовой и максимальный сток рек России: оценка и прогноз // Фундаментальная и прикладная климатология. 2021. Т. 7. № 1. С. 36–79.
55. Гельфан А.Н., Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Григорьев В.Ю., Мотовилов Ю.Г., Гусев Е.М. Влияние изменения климата на годовой и максимальный сток рек России: оценка и прогноз // Фундаментальная и прикладная климатология. 2021. Т. 7. № 1. С. 36–79.
56. Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Милюкова И.П., Барабанова Е.А., Кашутина Е.А. Современные и сценарные изменения стока Волги и Дона // Водное хозяйство России. 2017. № 3. С. 6–23.1
57. Гладкевич Г.И., Терский П.Н., Фролова Н.Л. Оценка опасности наводнений на территории Российской Федерации // Водное хозяйство России. 2012. № 2. С. 29–46.
58. Голубцов В.В. Моделирование стока горных рек в условиях ограниченной информации. Алматы: Руспуббликанское гос. предприятие «Казгидромет», 2010. 232 с.
59. Гост ИСО/МЭК ТО 10032-2007. Эталонная модель управления данными. 2007. 29 с.
60. Григорьев В.Ю., Фролова Н.Л., Джамалов Р.Г. Изменение водного баланса крупных речных бассейнов европейской части России // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2018. № 4. С. 36–47.
61. Данилов-Данильян В.И., Гельфан А.Н., Мотовилов Ю.Г., Калугин А.С. Катастрофическое наводнение 2013 года в бассейне реки Амур: условия формирования, оценка повторяемости, результаты моделирования // Водные ресурсы. 2014. Т. 41. № 2. С. 111–122.
62. Данилов-Данильян В.И., Залиханов М.Ч., Лосев К.С. Экологическая безопасность. Общие принципы и российский аспект. М.: Изд-во МППА БИМПА, 2007. 288 с.

63. Джамалов Р.Г., Киреева М.Б., Косолапов А.Е., Фролова Н.Л. Водные ресурсы бассейна Дона и их экологическое состояние. М.: ГЕОС, 2017. 204 с.
64. Доброумов Б.М., Тумановская С.М. Наводнения на реках России: их формирование и районирование // Метеорология и гидрология. 2002. № 12. С.70–78.
65. Долгов С.В., Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А. Ландшафтно-гидрологические изменения в бассейне Дона // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 6. С. 674–685.
66. Евстигнеев В.М. Речной сток и гидрологические расчеты. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1990. 304 с.
67. Жабина И. И., Пурина И.Э., Степанов Ю.А., Чекулаева Т.С. Новые оперативные технологии обработки гидрометеорологических данных и управления прикладными программами с использованием супер-ЭВМ CRAY. // 70 лет Гидрометцентру России. СПб, 1999. С. 90–117.
68. Закономерности гидрологических процессов / Под ред. Н.И. Алексеевского. М.: ГЕОС, 2012. 733 с.
69. Змиева Е.С., Комаров В.Д., Сапожников В.И. Методы прогнозов весеннего притока воды в водохранилища Волжско-Камского каскада // Труды Гидрометцентра СССР. 1967. Вып. 8. С. 25–49.
70. Калинин Г.П., Милюков П.И. Приближенный расчет неустановившегося движения водных масс. Л.: Гидрометеиздат, 1958. 72 с. (Труды ЦИП. Вып. 66).
71. Киреева М.Б., Фролова Н.Л. Современные особенности весеннего половодья рек бассейна Дона // Водное хозяйство России. 2013. № 1. С. 60–76.
72. Комаров В.Д. Весенний сток равнинных рек европейской части СССР, условия его формирования и методы прогнозов. М.: Гидрометеиздат, 1959. 259 с.
73. Комаров В.Д., Макарова Т.Т., Синегуб Е.С. Расчет гидрографа половодья небольших равнинных рек на основе данных об интенсивности снеготаяния // Труды Гидрометцентра СССР. 1969. Вып. 37. С. 3–30.
74. Комаров В.Д., Мухин В.М., Полуниин А.Я. Модель формирования снежного покрова и поступления воды на поверхность горного бассейна // Труды Гидрометцентра СССР. 1976. Вып. 163. 1976. С.38–57.
75. Кондратюк В.И., Покровский О.М., Светлова Т.П. О принципах построения наземной сети // Труды ГГО. 1999. Вып. 547. С. 3–14.
76. Корень В.И. Математические модели в прогнозах речного стока. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 200 с.
77. Корень В.И., Бельчиков В.А. Методические указания по использованию методов краткосрочных прогнозов ежедневных расходов (уровней) воды для речных систем на основе математических моделей. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 176 с.

78. Корень В.И. Статистический алгоритм адаптации при выпуске непрерывных краткосрочных прогнозов стока // Метеорология и гидрология. 1983. № 3. С. 80–84.
79. Кучмент Л.С. Речной сток (генезис, моделирование, предвычисление). М.: Изд-во ИВП РАН, 2008. 394 с.
80. Кучмент Л.С., Демидов В.Н., Мотовилов Ю.Г. Формирование речного стока. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 216 с.
81. Кучмент Л.С., Мотовилов Ю.Г., Назаров Н.А. Чувствительность гидрологических систем (Влияние антропогенных изменений речных бассейнов и климата на гидрологический цикл). М.: Наука, 1990. 144 с.
82. Методика расчета ежедневного притока воды в Цимлянское водохранилище. Ростов-на Дону, Изд-во Северо-Кавказского УГМС, 1989. 62 с.
83. Методические рекомендации по оценке точности и гидрологическому контролю данных государственного учета вод и их использования. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 117 с.
84. Многолетние колебания и изменчивость водных ресурсов и основных характеристик стока рек Российской Федерации: научно-прикладной справочник / Под ред. В.Ю. Георгиевского. СПб: РИАЛ, 2021. 190 с.
85. Морейдо В.М. Долгосрочный ансамблевый прогноз весеннего половодья и летней межени на основе динамико-стохастической модели формирования речного стока // Научное обеспечение реализации «Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 года». М., 2015. С. 180–186.
86. Мотовилов Ю.Г. Моделирование полей речного стока (на примере бассейна Лены) // Метеорология и гидрология. 2017. № 2. С. 78–88.
87. Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н. Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М., Изд-во РАН, 2018. 300 с.
88. Муравьев А.В., Вильфанд Р.М. О стандартизации оценок качества среднесрочных и долгосрочных прогнозов погоды // Метеорология и гидрология. 2000. № 12. С. 24–36.
89. Наставление по глобальной системе обработки данных и прогнозирования. Т. 1. Всемирная метеорологическая организация № 485. Женева, 2010. 37 с.
90. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. РД 52.88.629-2002. СПб: Гидрометеиздат, 2002. 42 с.
91. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть 1. Прогнозы режима вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 193 с.
92. Нежиховский Р.А. Гидролого-экологические основы водного хозяйства. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 229 с.

93. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. СП 33-101-2003. М.: Госстрой России, 2004. 72 с.
94. Основные гидрологические характеристики рек бассейна Камы / Под ред. В.Ю. Георгиевского. СПб: Гидрометеиздат, 2015. 135 с.
95. Павроз Ю.А. Опыт разработки методики долгосрочного прогноза сроков вскрытия ото льда рек бассейна р. Вятки // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. Вып. 382. С. 99–111.
96. Перечень действующих гидрологических постов сети Росгидромета (RU_RIHMI-WDC_2665). (ИНТЕРНЕТ-источник)
97. Покровский О.М. О рационализации региональных наблюдательных сетей // Метеорология и гидрология. 2000. № 8. С. 5–21.
98. Полуниин А.Я. О моделировании процесса поступления воды на водосбор для краткосрочных прогнозов стока // Труды Гидрометцентра СССР. 1990. Вып. 295. С. 69–79.
99. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. Методические указания. СПб: Гидрометеиздат, 1991. 150 с.
100. Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Т. 11. Средний Урал и Приуралье. Вып. 2. Тобол / Под ред. В.В. Николаенко. Л.: Гидрометеиздат, 1965. 240 с.
101. Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Т. 7. Донской район / Под ред. Д. Д. Мордухай-Болтовского. Л.: Гидрометеиздат, 1964. 267 с.
102. Ривин Г.С., Розинкина И.А., Блинов Д.В. Технологическая линия системы краткосрочных мезомасштабных оперативных прогнозов погоды COSMO-RU с шагом сетки 7 км // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2012. Вып. 347. С. 1–18.
103. Ривин Г.С., Розинкина И.А., Астахова Е.Д., Блинов Д.В., Бундель А.Ю., Кирсанов А.А., Шатунова М.В., Чубарова Н.Е., Алферов Д.Ю., Варенцов М.И., Захарченко Д.И., Копейкин В.В., Никитин М.А., Полухов А.А., Ревокатова А.П., Татаринovich Е.В., Чурюлин Е.В. Система краткосрочного численного прогноза высокой детализации COSMO-RU, ее развитие и приложения // Гидрологические исследования и прогнозы. 2019. № 4 (374). С. 37–53.
104. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 1. Долгосрочные прогнозы элементов водного режима рек и водохранилищ. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 356 с.
105. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 2. Краткосрочные прогнозы расхода и уровня воды на реках. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 245 с.

106. Руководство по гидрологической практике. Сбор и обработка данных, анализ, прогнозирование и другие применения. ВМО-0168. 1994. 808 с.
107. Сендайская рамочная программа по снижению риска бедствий на 2015–2030 гг. Женева: Управление ООН по уменьшению опасности бедствий, 2015. 40 с.
108. 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.
109. Системы заблаговременных предупреждений о многих опасных явлениях. Всемирная метеорологическая организация, 2018. 22 с.
110. Степанов Ю.А., Жабина И.И. Новая версия автоматизированной технологии АСООИ на выделенном сервере Гидрометцентра России // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2011. Вып. 346. С. 146–169.
111. Степанов Ю.А., Жабина И.И., Пурина И.Э., Недачина А.Ю., Елисеев Г.В. Автоматизированная технология Гидрометцентра России для оперативной обработки информации в высокопроизводительной кластерной инфраструктуре // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. Вып. 4 (374). С. 257–285.
112. Фролов А.В., Георгиевский Ю.В. Экстремальный паводок 2013 года в бассейне реки Амур // Экстремальные паводки в бассейне р. Амур: причины, прогнозы, рекомендации. М.: Росгидромет, 2014. С. 5–39.
113. 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. Система мониторинга, прогнозирования и раннего оповещения о наводнениях «ГИС Амур» // Метеорология и гидрология. 2016. № 3. С. 5–21.
114. Фролова Н.Л. Гидрология рек (антропогенные изменения речного стока). Учебное пособие. М.: Географический ф-т МГУ, 2006. 111 с.
115. Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Григорьев В.Ю., Гельфан А.Н., Сазонов А.А., Шевченко А.И. Сток рек России при происходящих и прогнозируемых изменениях климата: обзор публикаций. 1. Оценка изменений водного режима рек России по данным наблюдений // Водные ресурсы. 2022. Т. 49. № 3. С. 251–269.
116. Христофоров А.В. Надежность расчетов речного стока. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1993. 166 с.
117. Христофоров А.В. Теория случайных процессов в гидрологии. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1994. 139 с.
118. Христофоров А.В. Эколого-экономические основы водопользования. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2010. 160 с.

119. Христофоров А.В., Юмина Н.М. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Изд-во АПР, 2017. 151 с.
120. Швер Ц.А. Закономерности распределения количества осадков на континентах. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 284 с.
121. Экстремальные гидрологические ситуации / Под ред. Н.И. Коронкевича, Е.А. Барабанова, И.С. Зайцевой. М.: Медиа-ПРЕСС, 2010. 464 с.
122. Adams T.E., Pagano T.C. Flood Forecasting – A Global Perspective. L.: Academic Press, 2016. 480 p.
123. Assessment of Precipitation and Soil Moisture / B. Sevruk, ed. Operational Hydrology Report No. 35, WMO-No. 749. Geneva. 271 p.
124. Barrett C., Canterford R. Assessment Report, Coastal Inundation Forecasting Demonstration Project (CIFDP). Geneva: World Meteorological Organization, 2018.
125. Barrett C., Quirno M.U., Simonov Yu. Review of the Flash Flood Guidance System (FFGS) with Global Coverage Project. Geneva, 2018. 100 p.
126. Barrette J., Grossman, M. Python Scripting for Map Automation. Esri Developer Summit, March 26–29, 2012, Palm Springs, California. [Электронный ресурс] – esri.com/events/devsummit
127. Bergstrom S. The HBV model – its structure and applications // SMHI Hydrology. 1992. RH No.4, Norrkoping. 35 p.
128. Bergström S. The HBV model // V.P. Singh, ed. Computer models of Watershed Hydrology. Water Resources Publications, Highland Ranch CO, 1995.
129. Beven K., Wood E.F. Flow routing and the hydrological response of channel networks // K. Beven and M.J. Kirkby, eds. Channel Network Hydrology Chichester: John Wiley and Sons, 1993.
130. Beven K.J. A discussion of distributed hydrological modeling // M.B. Abbott and J. Ch. Refsgaard, eds. Distributed Hydrological Modelling, WaterScience and Technology Library. V. 22. Dordrecht: Kluwer, 1996. P. 255–278.
131. Borsch S., Simonov Y. Operational Hydrologic Forecast System in Russia // T.E. Adams III and T.C. Pagano, eds. Flood Forecasting. A Global Perspective. L.: Academic Press, 2016. 478 p.
132. 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.
133. 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.

134. Box G.E.P., Jenkins G.M. Time Series Analysis, Forecasting and Control. San Francisco: Holden-Day, 1970.
135. Brier G.W. Verification of forecasts expressed in terms of probability // *Mon. Weth. Rev.* 1950. V. 78. P. 1–13.
136. Buizza R., Hollingsworth A., Lalauette F., Ghelli A. Probabilistic predictions of precipitation using the ECMWF ensemble prediction system // *Weather and Forecasting*. 1999. V. 14. P. 168–189.
137. Burman P., Chow E., Nolan D. A cross-validatory method for dependent data // *Biometrika*. 1994. № 81. P. 351–358.
138. Burnash R. The NWS river forecast system-catchment modeling // Singh V., ed. *Computer Models of Watershed Hydrology*. Colorado: Water Resources Publication, 1995. P. 311–366.
139. Carpenter T.M., Georgakakos K.P., Sperflage J.A. Distributed hydrologic modeling for operational use // *HRC Technical Report No. 3*. 1999. 224 p.
140. Chow V.T., Maidment D. R., Mays L.W. *Applied Hydrology*. New York: McGraw–Hill, 1988. 627 p.
141. Cigizoglu H.K. Estimation, forecasting and extrapolation of river flows by artificial neural networks // *Hydrological Science Journal*. 2003. V. 48. № 3. P. 349–361.
142. COMET: URL: <https://www.meted.ucar.edu/index.php>.
143. Davie T. *Fundamentals of Hydrology*. Second ed. L., New York: Taylor & Francis, 2008. 221 p.
144. DHI (Danish Hydraulic Institute). *Introduction to the SHE-European Hydrologic System*. Horsholm, 1985.
145. Dilley M., Chen R.S., Deichmann U., Lerner-Lam A.L., Arnold M., Agwe J., Buys P., Kjevstad O., Lyon B., Yetman G. *Natural disaster hotspots: A global risk analysis* // *Disaster Risk Management Series*. 2005. № 5. Washington, DC, World Bank.
146. Dingman S.L. *Physical Hydrology*. New York: Macmillan Publishing Company, 1993. 575 p.
147. Doherty J. *Calibration and Uncertainty Analysis for Complex Environmental Models*. Brisbane, Australia: Watermark Numerical Computing, 2015. 227 p.
148. Dooge J.C.I. *Linear Theory of Hydrologic Systems*. Technical Bulletin No. 1468. Agricultural Research Service, United States Department of Agriculture, Washington, DC. 1973.
149. Dooge J.C.I. Theory of flood routing // D.A. Kraijenhoff and J.R. Moll, eds. *River Flow Modelling and Forecasting*. Dordrecht: D. Reidel Publishing, 1986.

150. Driessen T.L.A., Hurkmans R.T.W.L., Terink W., Hazenberg P., Torfs P.J.J.F., Uijlenhoet R. The hydrological response of the Ourthe catchment to climate change as modeled by HBV model // *Hydrol. and Earth System Sci.* 2010. V. 14. № 4.
151. Duan Q.Y., Gupta V.K., Sorooshian S. Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization // *J. Optimum Theory Application.* 1993. V. 76. P. 501–521.
152. Eagleson P.S. *Dynamic Hydrology.* New York: McGraw–Hill, 1970.
153. *Economic and Environmental Principles and Guidelines for Water and Related Land Resources Implementation Studies.* U.S. Water Resource Council. Washington, Federal Register. 1982. V. 47. № 55. 129 p.
154. Efron B. *The Jackknife, the Bootstrap and Other Resembling Plans.* Society for Industrial and Applied Mathematics, 1982. 92 p.
155. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. *Crop Evapotranspiration – Guidelines for Computing Crop Water Requirements.* 1998. 281 p.
156. *Forecast Verification in Atmospheric Science. A Practitioner’s Guide / I. Jolliffe and D. Stephenson, eds.* John Wiley & Sons Ltd, 2003, 240 p.
157. Fread D.L. Flow routing // D.R. Maidment, ed. *Handbook of Hydrology.* New York, McGraw–Hill, 1993.
158. 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.
159. Furst J. *Application of Geographical Information Systems (GIS) in Operational Hydrology.* Report to WMO RA VI. WMO, 2002 30 p.
160. Gelfan A., Moreydo V., Motovilov Y., Solomatine D.P. Long-term ensemble forecast of snowmelt inflow into the cheboksary reservoir under two different weather scenarios // *Hydrology and Earth System Sciences.* 2018. V. 22. № 4. P. 2073–2089.
161. Gelfan A.N., Motovilov Y.G., Moreido V.M. Ensemble seasonal forecast of extreme water inflow into a large reservoir // *IAHS-AISH Proceedings and Reports. Extreme Hydrological Events.* 2015. P. 115–120.
162. Georgakakos, K.P., Modrick, T.M., Shamir, E., Campbell, R., Cheng, Z., Jubach, R., Sperflage, J., Spencer, C.R., Banks R. The Flash flood guidance system implementation worldwide: A successful multidecadal research-to-operations effort // *Bulletin of the American Meteorological Society.* Published-online 09 Nov 2021.
163. Georgakos K.P., Graham R., Jubach R., Carpenter T., Shamir E., Spencer C., Sperflage J. HRC Technical Report No. 9. *Global Flash Flood System, Phase 1.* 2013. 134 p.

164. Golnaraghi M. Institutional Partnerships in Multi-Hazard Early Warning Systems. A compilation of Seven National Good Practices and Guiding Principles. Springer, 2012. 243 p.
165. Goswami M., Connor K.M., Dhattarai K.P., Shamseldin A.Y. Assessing and performance of eight real-time updating models and procedures for the Brosna River // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2005. V. 9. № 4. P. 394–411.
166. Greco M., Cravetta A., Della Morte R. *River Flow*. L.: Taylor and Francis Group, 2004. 1024 p.
167. *Guide to Hydrological Practices*. V. 1. Hydrology – From Measurement to Hydrological Information. WMO-No. 168. 2009. 238 p.
168. *Guide to Hydrological Practices*. V. 2. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices. WMO-No. 168. 2009. 302 p.
169. Gupta H.V., Kling H., Yilmaz K.K., Martinez G.F. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modeling // *Journal of Hydrology*. 2009. № 377. P. 80–91.
170. Hall D.K., Riggs G.A., Salomonson V.V. Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data // *Remote Sensing of Environment*. 1995. V. 54. P. 127–140.
171. *Handbook of Hydrology* / D.R. Maidment, ed. New York: Mc Graw–Hill, 1993. 978 p.
172. Hipel K.W., McLeod A.L., Lennox W.C. Advances in box-jenkins modelling. Part I: Model construction // *Water Resources Research*. 1977. V. 13. P. 567–575.
173. Chow V.T., Maidment D. R., Mays L.W. *Applied Hydrology*. New York: McGraw–Hill, 1988. 627 p.
174. ISO/IEC TR 10032:2003 “Information technology – Reference model of data management”.
175. Jolliffe I.T., Stephenson D.B. *Forecast Verification*. Wiley, 2003. 240 p.
176. Kahneman D., Tversky A. Judgment under uncertainty: Heuristics and biases // *Science*. 1974. № 4157. P. 1124–1131.
177. Kim S., Jang Ch., Kim H., JO Hs., Kim Hr. *DWAT – User’s Manual V1.0*. Han River Flood Control Office, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT). 2018. 111 p.
178. Koren V.I., Kuchment L.S. Physicostatistical model of rainfall flood formation and determination of its parameters // *Proc. Intern. Symp. “Mathematical Models in Hydrology”*. Warszawa, 1971. V. 2. Pt. 2. P. 5–12.
179. Krzysztofowicz R. The case for probabilistic forecasting in hydrology // *Journal of Hydrology*. 2001. № 249. P. 2–9.

180. Lambert A.O. Development and Use of the Management Overview of Flood Forecasting Systems (MOFFS). Technical Reports in Hydrology and Water Resources No. 55. Geneva: HWR, 1994. 23 p.
181. Lange H., Sippel S. Machine learning applications in hydrology // Levia D.F., Carlyle-Moses D.E., Iida S., Michalzik B., Nanko K., Tischer A., eds. Forest-Water Interactions. Ecological Studies (Analysis and Synthesis). V. 240. Cham: Springer, 2020.
182. Lindström, G. A simple automatic calibration routine for the HBV model // Nordic Hydrology. 1997. V. 28. № 3. P. 153–168.
183. Lindström, G., Johansson, B., Persson, M., Gardelin, M. & Bergström, S. Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model // Journal of Hydrology. 1997. V. 201. № 1–4. P. 272–288.
184. Management Overview of Flood forecasting Systems (MOFFS): Version 3. Geneva: HWR, 1995. 26 p.
185. Manual on Flood Forecasting and Warning. WMO-No. 1072. 2011. 138 p.
186. Martinec J., Rango A. Interpretation and utilization of areal snow cover data from satellites // Annual Glaciology. 1987. V. 9. P. 166–169.
187. McKinney W. and PyData Development Team. Pandas: Powerful Python Data Analysis Toolkit. Release 0.9.2.dev-61766ec, November 20, 2012. 392 p.
188. Minns A.W., Hall M.J. Artificial neural networks as rainfall-runoff models // Hydrological Science Journal. 1996. V. 41. № 3. P. 399–417.
189. Mishra A.K., Coulibaly P. Developments in Hydrometric Network Design. WMO Review. April 2009. World Meteorological Organization, 1992: Snow Cover Measurements and Areal Assessment of Precipitation and Soil Moisture (B. Sevruk). Operational Hydrology Report No. 35. WMO-No. 749. Geneva.
190. Moriasi D.N., Arnold J.G., Van Liew M.W., Binger R.L., Harmel R.D., Veith T.L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations // Transactions of the ASABE. 2007. V. 50. № 3. P. 885–900.
191. Motovilov Y.G. ECOMAG – Regional Model of Hydrological Cycle and Pollution Transformation in River Basins. Application to the NOPEX Region. Report Research Council of Norway. Oslo, Moscow, 1995. 64 p.
192. Motovilov Yu.G. ECOMAG: A distributed model of runoff formation and pollution transformation in river basins solution // IAHS Publ. 2013. № 361. P. 227–234.
193. Multi-Hazard Early Warning Systems: A Checklist. World Meteorological Organization, 2018. 18 p.
194. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. Part 1 – A discussion of principles // Journal of Hydrology. 1970. V. 10. P. 282–290.

195. National Weather Service River Forecast Verification Plan. Report of the Hydrologic Verification System Requirements Team. U.S. Department of Commerce. National Oceanic and Atmospheric Administration. 2006. 44 p.
196. Nijkamp P. Cost – Benefit Analysis and Water resource Management. Amsterdam, 2005. 312 p.
197. Osuch M., Romanowicz R.J., Booij M.J. The influence of parametric uncertainty on the relationships between HBV model parameters and climatic characteristics // *Hydrological Science Journal*. 2015. V. 60. № 7–8. P. 1299–1316.
198. Pilon P., Quirno M.U. Proceedings of the Global Flash Flood Guidance System Workshop. February 2019, Geneva, available.
199. Physical Properties of Snow. In *Snow Ecology: An Interdisciplinary Examination of Snow-covered Ecosystems* / H.G. Jones, J.W. Pomeroy, D.A. Walker, and R.W. Hoham, eds. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. P. 45–126.
200. Predictability of Weather and Climate / T. Palmer and R. Hagedorn, eds. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. 635 p.
201. Rango A. Snow hydrology processes and remote-sensing // *Hydrological Processes*. 1993. V. 7. P. 121–138.
202. Ritter A., Muñoz-Carpena R. Performance evaluation of hydrological models: Statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments // *Journal of Hydrology*. 2013. V. 480. P. 33–45.
203. Rivin G., Rozinkina I., Astakhova E., Montani A., Alferov D., Arpagaus M., Helmert J., Kazakova E., Kirsanov A., Kopeikin V., Kukanova E., Majewski D., Marsigli C., de Morsier G., Muravev A., Paccagnella T., Schattler U., Schra C., Shatunova M., Shcherbakov A., Steiner P., Zaichenko M. The COSMO priority project CORSO final report // *COSMO Technical Report*. 2018. № 35. 65 p.
204. Russell S.J., Norvig P. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. 2nd ed. New Jersey: PrenticeHall, 2003.
205. Shiklomanov I.A. Water Resources as a Challenge of the Twenty-First Century. Tenth IMO Lecture. WMO-No. 959. 2003. 146 p.
206. Scharffenberg W.A., Fleming M.J. *Hydrologic Modeling System HEC-HMS: User's Manual*. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. 2006.
207. Singh A., Singh S., Nema A.K., Singh G. Rainfall-Runoff Modeling using MIKE 11 NAM model for Vinayakpur intercepted catchment, Chhattisgarh // *Indian Journal of Dryland Agricultural Research and Development*. 2014. V. 29. № 2. P. 1.
208. Singh V.P. *Hydrologic Systems. Rainfall-Runoff Modeling*. V. 1. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1988.

209. Singh V.P. Kinematic Wave Modeling in Water Resources: Surface Water Hydrology. New York: John Wiley and Sons, 1996.
210. Special Issue on Forecast Verification. – Meteorological Applications. Royal Meteorological Society. 2008. V. 15, Issue 1.
211. Statistical Methods in the Atmospheric Sciences / R. Dmowska, D. Hartman, H.T. Rossby, eds. International Geophysics Series. 2011. Vol. 100. 676 p.
212. Sugawara M., Ozaki E., Watanabe L., Katsuyama S. Tank Model and its Application to Bird Creek, Wollombi Brook, Bikin River, Kitsu River, Sanaga River and Nam Mune. Research Note of the National Research Center for Disaster Prevention, Science and Technology Agency. Tokyo, Japan, 1974.
213. Swail V., Grimes S., Pilon P., Canterford R., Simonov Y. Early warnings of coastal inundation // WMO Bulletin. 2019. V. 68. № 2. P. 49–55.
214. Todini E. Hydrological catchment modelling: Past, present and future // Hydrology and Earth System Sciences. 2007. V. 11. P 468–482.
215. Todini E., Wallis J.R. A real-time rainfall runoff model for an on-line flood warning system // AGU Chapman Conference on Applications of Kalman Filtering Theory and Techniques to Hydrology, Hydraulics and Water Resources. Pittsburgh, Pennsylvania, 22–24 May 1978.
216. Todini E., Ciarapica L. The TOPKAPI model // V.P. Singh and D.K. Frevert, eds. Mathematical Models of Large Watershed Hydrology. Colorado: Water Resources Publications, 2002.
217. Tukey J.W. Exploratory Data Analysis. Reading, Mass. Addison-Wesley, 1977. 688 p.
218. US Army Corps of Engineers. Runoff from Snowmelt. Engineer Manual 1110-2-1406. US Department of the Army. Washington, 1960, DC.
219. Van der Knijff J.M., Younis J., de Roo A.P.J. LISFLOOD: A GIS-based distributed model for river basin scale water balance and flood simulation // Int. J. Geogr. Inf. Sci. 2010. V. 24. № 2. P. 189–212.
220. Van Dirk M.J., Rienties T.H. Geostatistics and Hydrology. Part 3: Hydro-Meteorological Network Design. ISSN-0169-6246, Report No. 59. 1994. 29 p.
221. Welles E. Verification of River Stage Forecasts. University of Arizona, 2005. 157 p.
222. Wiener N. The Extrapolation, Interpolation, and Smoothing of Stationary Time Series. Cambridge, MA, USA: MIT Press. Hoboken, NJ, USA: John Wiley, 1964. 171p.
223. Wilks D.S. Statistical methods in the atmospheric sciences. L.: Academic Press, 2006. 467 p.
224. WMO-No. 1281. World Meteorological Congress. Abridged Final Report of the Extraordinary Session. Virtual session. 11–21 October 2021. 248 p.

225. WMO-No. 1286. Assessment Guidelines for End-to-End Flood Forecasting and Early Warning Systems. 2022. 27 p.
226. WMO-No. 1293. Guidelines in Implementation of Coastal Inundation Forecasting Early Warning System. 2022. 61 p.
227. WMO-No. 429. Intercomparison of Conceptual Models Used in Operational Hydrological Forecasting. Operational Hydrology Report No. 7. 1987. Geneva.
228. World Meteorological Organization. Snow Cover Measurements and Areal. 1992.
229. World Meteorological Organization. Coastal Inundation Forecasting Demonstration Project Implementation Plan. Joint Technical Commission for Oceanography and Marine Meteorology Technical Report No. 64. 2017. Geneva.
230. Yen B.C. Stochastic and Risk Analysis in Hydraulic Engineering. Col., Littleton: Water Resources Publications, 1986. 278 p.
231. Yokum J.T., Armstrong J.S. Beyond accuracy: Comparison of criteria used to select forecasting methods // International Journal of Forecasting. 1995. № 11. P. 591–597.