

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени М.В. ЛОМОНОСОВА

Географический факультет



На правах рукописи

АНТОХИНА Елена Николаевна

УДК 556.5072, 556.506, 556.535.3

**ВОДНЫЙ РЕЖИМ РЕК ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ И
ЕГО ИЗУЧЕНИЕ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА**

Специальность 25.00.27 – Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата географических наук

Москва – 2012

Работа выполнена на кафедре гидрологии суши географического факультета
Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова

Научный руководитель: **ЖУК Виктор Архипович**
кандидат географических наук, доцент

Официальные оппоненты: **ГЕЛЬФАН Александр Наумович**
доктор физико-математических наук
ПОЛЯНИН Владислав Олегович
кандидат географических наук

Ведущая организация: ФГУП «Центр Российского регистра
гидротехнических сооружений и
государственного водного кадастра»
(г. Москва)

Защита состоится « 16 » февраля 2012 г. в 15 часов на заседании
диссертационного совета Д 501.001.68 при Московском государственном
университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, ГСП-1,
Ленинские горы, дом 1, МГУ, географический факультет, ауд. 1801.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке географического факультета
Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова на 21
этаже.

Автореферат разослан « 12 » января 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор геолого-минералогических наук,
профессор



Савенко В.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. В условиях уже заметных глобальных изменений климатических условий, сокращения сети станций гидрометеорологического мониторинга, нарушения однородности рядов наблюдений из-за значительной антропогенной нагрузки на отдельные речные водосборы, вызывающей изменения их водного режима, расчеты и прогнозирование речного стока с использованием существующих традиционных методов становятся малоэффективными. Практически отсутствуют надёжные методы прогнозирования стока для малоизученных рек. Успешное решение многих гидрологических задач требует разработки новых методических средств исследования условий формирования стока, расчетных и прогнозных схем. Одним из перспективных путей служит математическое моделирование речного стока на основе ландшафтно-гидрологического принципа с использованием современных геоинформационных технологий и моделирующих возможностей. Так как каждый конкретный бассейн включает в себя различные по условиям формирования стока участки, модель, кроме полного описания основных процессов формирования стока, должна учитывать их пространственную изменчивость с учетом реально имеющегося информационного обеспечения.

Среди большого числа существующих сегодня моделей формирования стока на речных водосборах этим условиям, в значительной мере, удовлетворяет разработанный Мотовиловым Ю.Г. информационно-моделирующий комплекс (ИМК) ECOMAG (ECOlogical Model for Applied Geophysics, 1993г.), предназначенный для расчетов гидрологического режима рек. Важным признаком данного комплекса является наличие автоматизированной системы обработки и управления пространственно-распределенной информацией.

Уже накоплен некоторый опыт успешного использования комплекса для решения одной из важнейших прикладных гидрологических задач – расчета и прогноза притока воды к крупным водохранилищам Волжско-Камского

бассейна, а также для некоторых других крупных водохранилищ РФ. При этом актуальным остается дальнейшее исследование возможностей использования программного комплекса в других задачах моделирования стока, ранее нереализованных.

Целью диссертационной работы является адаптация универсального программного комплекса ECOMAG для моделирования водного режима отдельных рек ЕТР с различными природными условиями, с разными размерами водосборов и уровнями хозяйственной деятельности в их бассейнах, а также разработка методических средств для расчетов и прогнозов стока рек на основе данного комплекса.

В соответствии с целью работы решались следующие **задачи**:

1. Составить краткий обзор современных математических моделей формирования стока и обозначить место используемого вычислительного комплекса среди них;
2. Выполнить анализ водного режима избранных рек ЕТР;
3. Создать информационную основу исследования: базы картометрических, физико-географических и гидрометеорологических данных;
4. Разработать и реализовать методику предмодельного анализа исходной метеорологической информации;
5. Построить цифровые модели бассейнов рек по данным дистанционного зондирования Земли и выполнить схематизацию исследуемых водосборов;
6. Выполнить моделирование гидрографов стока рек и оценить его эффективность;
7. Выполнить моделирование притока воды к Москворецким, Павловскому и Цимлянскому водохранилищам;
8. Выполнить объединение модели формирования стока ECOMAG и метеорологической модели WRF;
9. Разработать методику краткосрочных прогнозов расходов воды на основе модели формирования стока и средства корректировки прогнозов.

Объектом исследования являются бассейны рек Оки и Москворецких водохранилищ, бассейны р. Белой (приток р. Камы) и Павловского водохранилища, бассейн Цимлянского водохранилища (р. Дон) и три бассейна северных рек ЕТР (Северная Двина, Мезень и Печора).

Исходные материалы и методы исследований. При проведении исследований использовались архивные данные наблюдений гидрометеорологической сети мониторинга разных регионов, данные баз кафедры гидрологии суши МГУ, ФГУП «Центра Регистра и Кадастра» и МГУП «Мосводоканала», данные дистанционного зондирования Земли и цифровые модели рельефа различного пространственного разрешения, прогностическая метеорологическая информация метеорологической модели WRF, а также электронные топографические карты масштаба 1: 50 000, карты почв и ландшафтов различных масштабов.

При подготовке данных проводился анализ качества и репрезентативности исходной гидрометеорологической информации на основе пространственно-корреляционных функций. Комплексная обработка картографических материалов выполнялась на основе ГИС-технологий. Компьютерное моделирование стока рек с использованием программного комплекса ECOMAG сопровождалось процедурой определения параметров расчетных уравнений и их калибровкой, статистической проверкой эффективности результатов.

Основные защищаемые положения:

- результаты моделирования гидрографов стока с водосборов разных размеров, с различными физико-географическими условиями и уровнями хозяйственной деятельности и рекомендации по дальнейшему использованию комплекса применительно к другим речным бассейнам;
- результаты оценки влияния информационного обеспечения модели на качество моделирования стока;
- методика краткосрочного прогноза расходов воды на основе модели формирования стока и варианты его корректировок;

- методика краткосрочного прогноза притока воды к водохранилищам на основе синтеза гидрологической и метеорологической моделей.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- ✓ оценена возможность моделирования стока рек с разными водосборными площадями, при различной информационной обеспеченности программного комплекса ЕСОМАГ, для решения задач гидрологических расчетов и краткосрочных прогнозов стока;
- ✓ предложена методика предмодельного анализа исходной гидрометеорологической информации;
- ✓ разработан и проверен алгоритм корректировки краткосрочных прогнозов расходов воды рек;
- ✓ разработана и реализована схема объединения модели гидрологического цикла ЕСОМАГ и метеорологической модели WRF, состоящая из блока программ, обеспечивающих обмен данными между моделями.

Практическая значимость. В работе реализованы новые технологии применения программного комплекса ЕСОМАГ к малым и средним речным бассейнам и водохранилищам, позволяющие существенно повысить качество моделирования стока при решении комплексных водохозяйственных задач.

Результаты диссертационной работы в части моделирования притока воды к Москворецким водохранилищам использованы в рамках выполнения темы «Разработка системы информационного обеспечения оперативного управления водными ресурсами и противопаводковыми мероприятиями для бассейнов рек России на основе моделирования процессов формирования стока и функционирования водохозяйственных систем» (Государственный контракт № И-08-20 от 1 сентября 2008 года), выполненную ФГУП «Центр Российского регистра гидротехнических сооружений и государственного водного кадастра» в период 2008 - 2010 г. по заданию Федерального агентства водных ресурсов. Методика составления краткосрочных прогнозов стока рек и притока воды к водохранилищам на основе синтеза моделей гидрометеорологического цикла использовалась при выполнении работ в

рамках гранта Президента Российской Федерации для поддержки молодых российских ученых МК-7722.2010.5 «Водный режим и гидрологическая безопасность речных бассейнов» (2010-2011гг.). Моделирование стока рек Центральной части России, с использованием пространственно распределенной информации о состоянии их водосборов выполнено в рамках проекта № 02.740.11.0336 «Исследования пространственно-временных закономерностей формирования водных ресурсов и качества вод с учетом изменений климата и антропогенной нагрузки на водные объекты и их водосборы» для ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (2011г.). Исследование водного режима северных рек методами математического моделирования проведено в рамках гранта Правительства Российской Федерации для государственной поддержки научных исследований №11.G34.31.0007 «Оценка природных рисков в береговой зоне» (2011г.).

Апробация работы. Результаты исследования были представлены на Третьей, Четвертой и Пятой международных научных конференциях молодых ученых и талантливых студентов «Водные ресурсы, экология и гидрологическая безопасность» (Москва, ИВП РАН, 2009, 2010, 2011); на Третьей Всероссийской конференции с международным участием «Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов» (Барнаул, 2010); на Восьмой всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, ИКИ РАН, 2010); на научном семинаре кафедры гидрологии суши МГУ (Москва, МГУ, 2011).

Публикации. По результатам исследований опубликовано 7 научных работ, из них 2 статьи в журналах и изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией и 5 работ в сборниках материалов конференций.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения, объемом 220 страниц, включая 94 рисунка, 36 таблиц, список литературы из 62 наименований и 5 приложений.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, определены цели и задачи исследований, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов, а также приведены сведения об апробации и внедрении результатов работы.

В **первой главе** диссертационной работы кратко рассмотрена история моделирования. История моделирования процессов стокообразования на речных водосборах берет начало в 40-50 гг. прошлого века. Модели формирования отдельных процессов составляли Великанов М.А., Алексеев Г.А., Бефани А.Н., Калинин Г.П., Комаров В.Д., Попов Е.Г., Хортон Р.Е., Линслей Р.К., Колер М.А. и др. Работы этих авторов в значительной мере сформировали общие представления о формировании стока на речном водосборе и определили состав будущей первой модели формирования дождевого стока, составленной Линслеем Р.К. в 1963г. (Стенфордская модель). После этого, процесс моделирования стока активизировался. Появилось множество вариантов моделей дождевого стока, позже – талого стока и стока за весь гидрологический цикл. Важную роль в развитии вопросов моделирования гидрологических процессов на речных водосборах в отечественной гидрологии сыграла монография Кучмента Л.С. (1972), где обобщен накопленный зарубежный и отечественный опыт моделирования. Позже это направление в нашей стране активно развивалось, и, к сегодняшнему дню, накопился достаточно большой банк разнообразных моделей, описывающих формирование речного стока с разной степенью детальности, разработанных, в основном, усилиями группы исследователей, в которую следует отнести: Буракова Д.А., Виноградова Ю.Б., Гарцмана Б.И., Гельфана А.Н., Гусева Е.М., Гопченко Е.Д., Голубцова В.В., Денисова Ю.М., Демидова В.Н., Иваненко А.Г., Кондратьева С.А., Корня В.И., Кучмента Л.С., Мотовилова Ю.Г., Румянцева В.А. и др.

В соответствии с уровнем описания стокообразующих процессов, по степени учета пространственной изменчивости параметров, и по уровню

информационного обеспечения, среди множества моделей сегодня можно выделить несколько групп: модели типа "черного ящика", динамические (концептуальные) модели стока с сосредоточенными параметрами, физико-математические с распределенными параметрами и динамико-стохастические модели. В последние два десятилетия развивается новый тип моделирующих структур – интегрированные информационно-моделирующие системы. По уровню описания процессов они находятся между концептуальными и физико-математическими моделями, превосходя их наличием автоматизированной системы обработки и управления пространственно распределенной информацией, включая выборку информации из баз данных. Используемый в работе программный комплекс, относится к этому классу моделирующих систем.

Вторая глава посвящена описанию структуры и принципам работы ИМК ЕСОМАГ, на основе которого в работе выполняется моделирование и прогнозирование гидрографов стока рек ЕТР. Программный комплекс включает в себя: математическую модель с упрощенными обыкновенными дифференциальными уравнениями и распределенными параметрами, географическую информационную систему (ГИС), базы данных информации о характеристиках территории и программную оболочку, управляющую всеми частями комплекса. Гидрологический блок модели описывает основные процессы, определяющие сток с водосбора. ЕСОМАГ базируется на принципах ландшафтных единиц, называемых “элементарными водосборами”.

Отличительной чертой данного комплекса, является оригинальный способ пространственной схематизации речного бассейна на основе данных дистанционного зондирования Земли и электронных тематических карт с помощью ГИС-технологий, обеспечивающий учет основных физико-географических, почвенных и топографических особенностей бассейна, что позволяет адаптировать модель к речному водосбору любого масштаба.

Схематизация речного бассейна производится автоматически на основе цифровой модели рельефа (ЦМР) на базе пакета ArcView. Для крупных

водосборов в работе используется уникальная по широте охвата ЦМР GLOBE с разрешением 1 км, а для малых рек и водохранилищ в бассейнах р. Москвы применяется ЦМР с разрешением 50 м, созданная на основе оцифрованных топографических карт масштаба 1: 50 000. Детализация смоделированной речной сети на основе ЦМР задается пороговым значением, которое определяет, в конечном счете, размеры выделенных элементарных водосборов. Выделенные водосборы представляют собой области аккумуляции стока между узлами речной сети и являются расчетными элементами модели. На рис. 1 изображен схематизированный для расчетов бассейн р. Оки, для которого выделено 679 элементарных водосборов со средней площадью 360 км². Элементарным водосборам передается информация о типах почв и ландшафтов, которая считывается с соответствующих тематических карт в программном комплексе ArcView, а необходимые для расчетов характеристики почв и ландшафтов автоматически выбираются из баз данных комплекса, и в дальнейшем усредняются с учетом весовых коэффициентов по занимаемой ими площади.

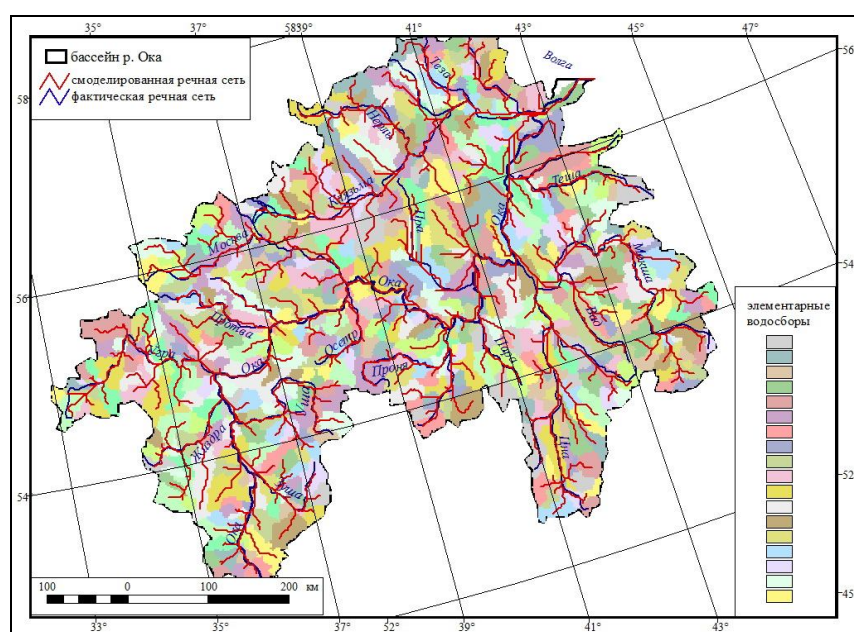


Рис. 1. Выделенные элементарные водосборы в бассейне р. Оки

В уравнениях рассматриваемой модели имеется ряд параметров, отображающих объективные характеристики водосборов. Большая их часть имеет конкретный физический смысл и оценивается в результате анализа

физико-географических условий территории, другие определяются по имеющимся базам данных характеристик почв, растительности и морфометрии речных бассейнов. Для наиболее весомых параметров, при необходимости, проводится процедура их оптимизации по условию наилучшего соответствия фактических и рассчитанных гидрографов. В данном исследовании для выбранных рек в качестве первого приближения использовался набор параметров, составленный ранее автором модели для крупных водосборов равнинной части ЕТР.

В третьей главе коротко изложено описание водного режима рек, участвующих в процедуре моделирования стока. Каждый из выбранных объектов отличают свои особенности и условия формирования стока. К числу рек с высокой степенью хозяйственной освоенности бассейнов относятся реки Дон, Москва, верховья р. Оки и р. Белая. Наибольший пресс испытывают реки бассейна Дона, водный режим которого типичен для рек степной и лесостепной зон. При исключительно высокой доле снегового питания (до 70%) и сравнительно слабом грунтовом и, особенно, дождевом питании, Дон отличается высоким весенним половодьем и низкой меженью в остальное время года. Основной источник питания Дона – снежный покров, дающий 60–70% годового стока. Подземное питание составляет около 30%, причем доля его возрастает вниз по течению. Дождевое питание незначительно – меньше 10% и снижается к низовьям. Под влиянием хозяйственной деятельности к началу 80-х годов уменьшение годового стока р. Дон составило около 30%. Максимум использования водных ресурсов в бассейне наблюдался до 1986г. В последующем забор воды из поверхностных и подземных источников сокращался, следуя экономическому спаду в России. Водосбор Цимлянского водохранилища испытывает огромную антропогенную нагрузку – пашня занимает 90% всей площади водосбора. В бассейне водохранилища построено громадное число малых водохранилищ, прудов и других гидротехнических сооружений, которые сильно влияют на формирование и трансформацию речного стока.

Бассейн р. Оки густо заселен, но мало зарегулирован. В бассейне р. Москвы построено четыре самых крупных в бассейне Оки водохранилища – Можайское, Рузское, Озернинское и Истринское. Их общая емкость составляет $0,75 \text{ км}^3$. Водный режим рек бассейна Оки характеризуется четко выраженным высоким весенним половодьем, низкой летне-осенней меженью, прерываемой дождевыми паводками, и устойчивой продолжительной зимней меженью.

Реки бассейна р. Белой относятся к типу рек с четко выраженным весенним половодьем, летне-осенними дождевыми паводками и длительной устойчивой зимней меженью. Доля талых вод в суммарном стоке рек достигает 70% в южных лесостепных районах. Значительно меньше (50-60%) она в пределах наиболее возвышенных частей горного Урала, где наряду с твердыми осадками в питании рек велика роль дождей (до 40%). В среднем примерно 26-36% годового стока формируется подземным путем. Павловское водохранилище расположено в западной части Южного Урала на Уфимском плато. Водоохранилище обеспечивает сезонное, недельное и суточное регулирование стока р. Уфы, аккумулируя до 16% стока весеннего половодья. В бассейне р. Белой развит карст.

Наименее освоенными являются водосборы северных рек ЕТР, для которых условия формирования стока воды можно считать естественными. Реки характеризуются смешанным питанием. Доля талых вод в общем годовом стоке в среднем составляет более 50%. На дождевое питание приходится от 20 до 30%. Водный режим рек характеризуется высоким весенним половодьем и низкой зимней меженью. В летне-осенний период нередко дождевые паводки. Сток воды р. Мезень отличается большой неравномерностью внутригодового распределения. Главной фазой водного режима является весенне-летнее половодье.

В четвертой главе рассмотрены количественные оценки эффективности моделирования расходов воды и особенности использования гидрометеорологической информации в задачах моделирования стока.

В работе используется несколько критериев соответствия: 1) Нэша-

Сатклифа – $NS = 1 - \frac{\sum_1^1 (Q_p - Q_\phi)^2}{\sum_n (Q_\phi - Q_\phi^{cp})^2}$; 2) средняя относительная ошибка –

$|\Delta|_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Q_p^i - Q_\phi^i|}{Q_\phi^i} * 100\%$; 3) коэффициент парной корреляции между

фактическими и рассчитанными (или спрогнозированными) рядами расходов воды; 4) критерий эффективности методики прогноза – s/σ , где s – среднеквадратическое отклонение фактических величин и рассчитанных (или прогнозных) значений, а σ – среднеквадратическое отклонение исследуемой величины; 5) критерий эффективности методики краткосрочного прогноза –

s/σ_Δ , где $\sigma_\Delta = \sqrt{\frac{\sum_1^n (\Delta_i - \bar{\Delta})^2}{n-1}}$ (Δ_i – разность между начальным и конечным

значениями расходов воды за период заблаговременности прогноза, $\bar{\Delta}$ – норма

этой разности); 6) обеспеченность методики прогноза – $P = \frac{m}{n} * 100\%$, где m –

число оправдавшихся прогнозов, а n – длина прогнозного ряда (оправдываемость конкретного прогноза определялась сравнением ошибки срочного прогноза с допустимой $\Delta_{доп} = \pm 0,674\sigma_\Delta$).

Обеспечение модели формирования стока метеорологической информацией – одна из важнейших проблем моделирования. Сокращение сети наблюдений привело к дефициту информации для многих регионов. В связи с этим, в нашем исследовании разработана **методика предмодельного анализа исходной метеорологической информации** на основе пространственно-корреляционных функций (ПКФ), проверенная на полях суточных сумм осадков и среднесуточных значениях температуры воздуха. По осредненной ПКФ оценивался радиус корреляции L_r , т.е. предельное расстояние между станциями, допустимое для интерполяции метеорологических характеристик между ними. Критическое значение коэффициента корреляции r для оценки L_r , принято равным 0,70. Этот предварительный прием позволяет, не приступая к

моделированию, оценить достаточность имеющейся метеорологической информации для ее интерполяции на моделируемых водосборах. Для всех исследуемых бассейнов ЕТР установлено, что используемое количество метеостанций являются репрезентативными при описании полей суточных температур воздуха, но при этом, их явно недостаточно для интерполяции суточных сумм осадков. Наименьший радиус корреляции поля осадков отмечен в бассейне полугорной р. Белой (35 км), наибольший – в бассейнах северных рек (70 км), что заметно меньше, в целом, расстояний между осадкомерными пунктами существующей сегодня сети.

Далее в диссертации проведены численные эксперименты по **оценке влияния густоты сети метеорологических станций на точность моделирования стока**. Расчеты выполнены для бассейна р. Северная Двина, характеризующегося естественными условиями формирования стока, небольшой антропогенной нагрузкой и достаточно густой сетью метеорологических станций. Моделирование стока проводилось для 7 гидрологических постов при использовании поочередно данных 35 станций, затем 30, 25, 20, 15, 10, 5 и 1. Период моделирования составил 10 лет (2000-2009 гг.). В результате исследования установлено, что качество моделирования стока становится неудовлетворительным, при использовании пяти и менее станций, среднее расстояние между которыми равно 340 км (минимальное – 205км), что значительно превышает радиус корреляции суточных сумм осадков в бассейне Северной Двины (75 км). Для замыкающего створа в с. Усть-Пинега (площадь водосбора 348 000 км²) качество расчетов по критерию соответствия NS за период моделирования из категории «хороших» переходит в категорию «удовлетворительных» при уменьшении станций с 15 до 10 (среднее расстояние между 10 станциями равно 250 км, минимальное – 162 км).

Оценка динамики снежного покрова выполнена для водосборов северных рек ЕТР (Северная Двина, Мезень, Печора) за период наличия данных снегомерных съемок, проводимых на 20 метеорологических станциях ежедекадно, отдельно для поля и леса (2002-2009гг.). В программном

комплексе расчет суточных запасов воды в снежном покрове для центра каждого элементарного водосбора ведется по сумме наблюдаемых отрицательных температур воздуха. В результате сравнения измеренных на станциях запасов воды и рассчитанных по гидрологической модели установлено, что, в целом, расчет запаса воды в снежном покрове имеет схожие с фактическими данными величины ($r \geq 0,70$). Но, для станций, расположенных в прибрежной зоне, наблюдаются существенные несовпадения, вероятно, из-за сильных ветров. Средние относительные ошибки для станций, расположенных в глубине материка, не превышают 27%. Высокие относительные ошибки связаны, в основном, с периодом начала установления снежного покрова и периодом его полного схода (при малых абсолютных значениях воды в снежном покрове). Безусловно, что сегодня наиболее перспективными для оценки динамики снежного покрова и его характеристик могут быть результаты дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), которые в итоге должны послужить уточнением соответствующих параметров физико-математической модели до начала калибровочного процесса.

Пятая глава посвящена анализу и оценке результатов моделирования притока воды к водохранилищам и гидрографов стока рек различного масштаба, расположенных в разных природных зонах. Моделирование расходов воды проводилось для 13 гидрологических постов в бассейне р. Оки с площадями водосборов от 280 до 244 000 км²; в бассейне р. Белой (12 постов с площадями от 1810 до 121 000 км²); в бассейнах рек Северная Двина (10 постов с площадями от 13 200 до 348 000 км²), Мезень (6 постов с площадями от 2010 до 56 400 км²) и Печора (8 постов с площадями от 4290 до 310 000 км²). Моделирование притока воды выполнялось для четырех Москворецких водохранилищ (площади от 991 до 1360 км²) и Рублевского гидроузла (площадь незарегулированной части водосбора – 3290 км²), а также для Павловского (47100 км²) и Цимлянского водохранилищ (255 000 км²). Период расчетов для разных объектов составил от 10 до 30 лет (1970-1989 гг. и 2000-2009гг.).

В бассейне **р. Оки** удовлетворительных результатов моделирования стока на основе ЦМР GLOBE и мелкомасштабных карт факторов подстилающей поверхности (масштаб 1: 2 500 000) можно добиться лишь для водосборов с площадью более 10 000 км². Средние относительные ошибки при расчете слоев стока за период половодья и максимальных расходов воды замыкающего створа (г. Горбатов) составляют 15,8 и 25,2% соответственно. Осредненный критерий соответствия NS за период моделирования равен 0,68 (табл.1). Успешное моделирование стока малых рек (площади водосборов менее 1000 км²) достигнуто при условии использования подробной съемки рельефа (с разрешением 50 м) и более детальных карт почв и растительности (масштаба 1: 500 000 и 1: 200 000). Для створов р. Москва – д. Барсуки (рис.2) и р. Малая Истра – д. Киселево осредненный за период расчетов критерий соответствия после адаптации комплекса к детализированной схематизации водосбора повысился более чем в 2 раза (с 0,26 до 0,58 и с 0,20 до 0,55 соответственно).

Таблица 1. Оценка результатов моделирования гидрографов стока рек

Бассейн	Река-пост	S, км ²	NS _{ср.}	Δ ср. между слоями стока за половодье, %	ЦМР имеет разрешение
р. Белая	р. Белая - г. Бирск	121000	0,58	27,7	1 км
	р. Белая - д. Сыртланово	10100	0,61	-	1 км
	р. Уфа - с. Михайловское	5650	0,55	-	1 км
р. Ока	р. Ока - г. Горбатов	244000	0,68	15,8	1 км
	р. Клязьма - г. Ковров	24900	0,60	-	1 км
	р. Москва - д. Барсуки	755	0,58	-	50 м
	р. Искона - д. Новинки	472	0,65	-	50 м
р. Северная Двина	р. Северная Двина - с. Усть-Пинега	348000	0,85	11,9	1 км
	р. Юг - п. Подосиновец	15200	0,69	-	1 км
р. Мезень	р. Мезень - д. Малонисогорская	56400	0,79	11,8	1 км
	р. Б.Лоптюга - д. Буткан	2010	0,63	-	1 км
р. Печора	р. Печора - с. Оксино	310000	0,76	12,6	1 км
	р. Ухта - г. Ухта	4290	0,77	-	1 км

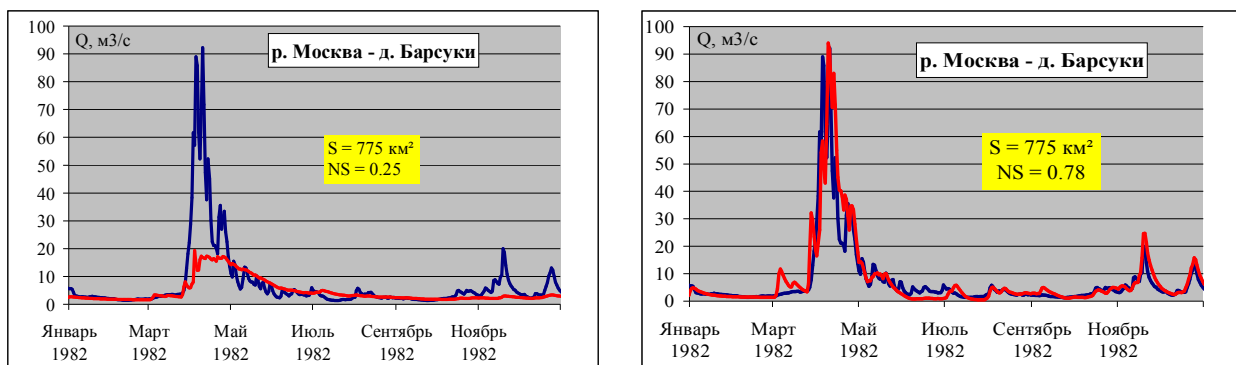


Рис. 2. Гидрографы фактических и смоделированных расходов воды для р. Москва–д.Барсуки на основе ЦМР с разрешением 1км (слева) и 50м (справа)

Согласно результатам расчетов притока воды к **Москворецким водохранилищам** можно заключить, что программный комплекс правдоподобно описывает основные стокоформирующие процессы на водосборах всех водохранилищ, несмотря на их малые водосборные площади. Критерии корреляции для месячных и квартальных объемов стока составили более 0,85. Средние относительные ошибки при расчете объемов половодий за 10-летний период не превышают 31,7% (Рузское в-ще). Высокие относительные ошибки вызваны неточным моделированием дождевых паводков из-за редкой сети станций, малым радиусом корреляции суточных осадков (40-50 км) и большой изменчивостью фактических данных о притоке воды. Наилучшие результаты моделирования получены для Озернинского водохранилища (осредненный критерий соответствия равен 0,69, а средняя относительная ошибка при расчете объемов половодий 15,2%). Наихудшие результаты получены для Рублевского гидроузла (0,54 и 27,6%), вероятно, из-за больших ошибок в фактических данных о притоке воды к Рублево, определяемых балансовым методом.

Результаты моделирования в бассейне **р. Белой** являются удовлетворительными только для относительно крупных рек бассейна – реки Белая и Уфа (табл.1). Для замыкающего створа в г. Бирск в отдельные годы встречаются значительные несоответствия фактических и смоделированных максимальных расходов воды и слоев стока за половодье (средние относительные ошибки составляют 34,2% и 27,7%). Вероятно, повсеместно

распространенный карст оказывает большое влияние на качество моделирования стока рек данного региона, что в итоге приводит к неудовлетворительным результатам расчетов стока и средних по размерам рек (р. Ай и р. Юрюзань, критерии соответствия равны 0,30 и 0,33). Программный комплекс в силу азональности фактора распространения карста не учитывает его при моделировании, и поэтому настроить модель на расчёт гидрографов стока в бассейнах закарстованных рек очень сложно. Моделирование притока воды к **Павловскому водохранилищу** по результатам расчетов критерия соответствия ($N_{Scr}=0,80$), по результатам сравнения объемов половодий ($|\Delta|_{cp}=20\%$) и месячного стока ($|\Delta|_{cp}=9\%$) можно считать успешным, т.е. программный комплекс для решения задачи краткосрочного прогнозирования притока воды в данном бассейне применим.

По результатам проведенного исследования в бассейне **Цимлянского водохранилища** следует заключить, что моделирование гидрографов стока рек в его бассейне, и, тем более, притока воды к водохранилищу является трудной многофакторной задачей, решения которой не было найдено в рамках данной работы. Положительных результатов моделирования удалось достичь лишь для наименее зарегулированного бассейна р. Медведицы ($N_{Scr}=0,35$). Вероятно, здесь для достижения успешных результатов необходимо, во-первых, дополнить базу почв программного комплекса ECOMAG, а, во-вторых, разработать программный блок, позволяющий учитывать влияние малых водохранилищ и прудов на весенний сток рек.

На севере и северо-востоке ЕТР модель правдоподобно описывает процессы формирования стока, но при образовании на реке двумодальных половодий могут возникать значительные расхождения. Наибольшие относительные ошибки отмечаются, как правило, в маловодные или многоводные годы, когда сложившаяся ситуация в бассейне не является типичной, бассейн либо переувлажнен, либо в нем наблюдается нехватка влаги. Здесь не проявилась зависимость величины критерия соответствия NS от площади водосборов, что позволяет утверждать о возможности применения

комплекса для расчетов стока малых рек региона (площади от 2 000 до 10 000 км²) без увеличения детализации цифровой модели рельефа и физико-географических карт территории (табл.1). Значения критерия соответствия за период верификации модели для самых малых водосборов не опускаются ниже 0,60, а для замыкающих створов крупных рек (Северная Двина – с. Усть-Пинега, Мезень – д. Малонисогорская, Печора – с.Оксино) – ниже 0,75. Для всех гидрологических постов коэффициенты корреляции между фактическими и рассчитанными суточными расходами воды не опускаются ниже 0,78. Для замыкающих створов северных рек средняя относительная ошибка между фактическими и смоделированными слоями половодья составляет 12%. Коэффициент корреляции для максимальных расходов воды тех же створов составляет 0,93, а средняя относительная ошибка – 13%. Вывод – программный комплекс ЕСОМАГ применим для решения задачи краткосрочных прогнозов в бассейнах северных рек ЕТР.

По результатам выполненных исследований установлено, что невозможно использовать единый набор параметров и получать приемлемые результаты моделирования для водосборов различного масштаба, расположенных в разных природных зонах. В исследуемых речных бассейнах в калибровке, в основном, нуждаются параметры, влияющие на слой весеннего половодья и на его режим. Больше других подчиняется закону зональности эмпирический коэффициент в формуле испарения – он закономерно увеличивается с севера на юг. Для остальных параметров не выявлено достоверных зависимостей от природных условий. На сегодняшний день автор не может назначить универсальные наборы параметров модели для неизученных территорий. При выборе калибровочных параметров для малоизученных бассейнов необходимо руководствоваться здравым смыслом и выбирать подходящие реки-аналоги, возможно, уже участвующие в данной работе.

В шестой главе рассмотрены известные и составлены новые методики краткосрочных прогнозов расходов воды рек и притока воды к

водохранилищам на основе модели формирования стока, а также предложены различные варианты их корректировок.

Краткосрочные прогнозы гидрографов стока северных рек ЕТР выполняются по модели формирования стока с привлечением косвенных данных о запасах воды в русловой сети. Отсутствие надежных прогнозных сведений о входящих в модель метеорологических характеристиках в данном регионе, вынуждает принять допущение (по аналогии с работой В.И. Корня (1991)), что фактические суточные значения температуры воздуха и дефицита влажности в день выпуска прогноза остаются неизменными на весь период заблаговременности прогноза, а осадки при этом равны нулю. Составленные по такой методике краткосрочные прогнозы расходов воды с заблаговременностью до 5 суток за четырехлетний период (2003-2006гг.) для р. Северная Двина – с. Усть-Пинега не приводят к приемлемым результатам ввиду значительных расхождений между фактическими и спрогнозированными расходами воды. Средняя относительная ошибка прогнозов равна 33%. Первый опыт использования результатов моделирования в краткосрочных прогнозах стока свидетельствует о необходимости разработки средств корректировки прогноза, основанных на свойстве гидрологических явлений сохранять одну и ту же закономерность своего хода в течение некоторого времени. Рассмотрено два варианта корректировки:

○ учет внутрирядных связей гидрографов стока, основанных на уравнениях авторегрессии («комплексный прогноз»), когда прогнозируемый расход воды

вычисляется по формуле $Q_{прог,t_0+\delta} = \frac{Q_{мод,t_0+\delta} + Q_{авт,t_0+\delta}}{2}$, где t_0 – дата выпуска

прогноза, δ – заблаговременность прогноза (0,1,...,5), $Q_{мод}$ и $Q_{авт}$ – расходы воды, спрогнозированные по модели формирования стока и по уравнениям авторегрессии соответственно;

○ учет разницы между фактическими и рассчитанными по модели расходами воды в день выпуска прогноза и за несколько дней до этого («корректировка 1»), где величина поправки вычисляется в два приема: сначала

определяется период осреднения отклонений между расходами, а затем оцениваются весовые коэффициенты для прогноза расходов различной заблаговременности. При расчетах установлено, что лучшие результаты достигаются при вычислении поправки по самой простой формуле $\Pi_1 = Q_{\phi, t_0} - Q_{p, t_0}$, а скорректированные значения расходов вычисляются по соотношению $Q_{прог, t_0 + \delta} = Q_{мод, t_0 + \delta} \alpha_{\delta} \Pi_{1, t_0 + \delta}$, где в роли начальных значений α_{δ} приняты соответствующие величины коэффициентов внутрирядной корреляции, подбор которых в дальнейшем осуществлялся методом оптимизации на основе минимизации средней относительной ошибки прогноза.

С учетом каждой корректировки составлены прогнозы гидрографов стока для замыкающих створов рек Северная Двина, Мезень и Печора. По всем приведенным критериям эффективности прогноз, составленный по модели с учетом «корректировки 1», превосходит по точности другие методики прогноза (табл.2). По большинству критериев прогнозы расходов воды с заблаговременностью до 5 суток для трех исследуемых рек оправдываются полностью. На рис. 3 можно отметить визуальное совпадение фактических и прогнозных расходов воды в течение всего рассматриваемого периода для р. Северная Двина. Разработанная методика позволяет достаточно успешно прогнозировать расходы воды не только в период половодья, но и в период паводочного стока на фоне летней межени. Средние относительные ошибки прогноза при максимальной заблаговременности не превышают 19%; коэффициенты корреляции – выше 0,93; обеспеченность методики прогноза – 82% и выше; s/σ – 0,35 и ниже. И только по критерию s/σ_{Δ} получены менее обнадеживающие результаты. Результаты оценки качества по критерию $s_{\Delta} / \sigma_{\Delta}$ более логичны – его величина с ростом заблаговременности увеличивается, и превышает единицу только при заблаговременности в 4 или 5 суток. По этому критерию прогнозы полностью оправдываются для р. Мезень, а для рек Северная Двина и Печора с заблаговременностью только в 1 сутки.

Таблица 2. Оценка качества краткосрочного прогноза расходов воды по модели формирования стока с учетом «корректировки 1» (01.01.2003г. по 31.10.2006)

Река-Пост	δ , сут.	r	$ \Delta _{\text{ср.}}, \%$	$P, \%$	s/σ	$s/\sigma\Delta$	$s\Delta/\sigma\Delta$
р. Северная Двина - с. Усть-Пинега	1	0,99	3,82	85	0,09	0,99	0,71
	2	0,99	5,49	88	0,14	0,82	0,81
	3	0,98	7,91	88	0,19	0,79	0,90
	4	0,97	10,1	88	0,23	0,76	0,97
	5	0,96	12,4	86	0,26	0,73	1,02
р. Мезень - д. Малонисогорская	1	0,99	4,61	91	0,09	0,66	0,61
	2	0,98	8,77	91	0,16	0,60	0,72
	3	0,97	12,6	91	0,21	0,55	0,71
	4	0,97	16,0	92	0,24	0,51	0,69
	5	0,96	19,1	92	0,27	0,47	0,66
р. Печора - с. Оксино	1	0,99	3,96	82	0,09	1,12	0,65
	2	0,98	7,20	82	0,17	1,10	0,82
	3	0,97	10,1	83	0,24	1,08	0,96
	4	0,95	12,6	84	0,30	1,05	1,08
	5	0,93	14,8	84	0,35	1,01	1,17

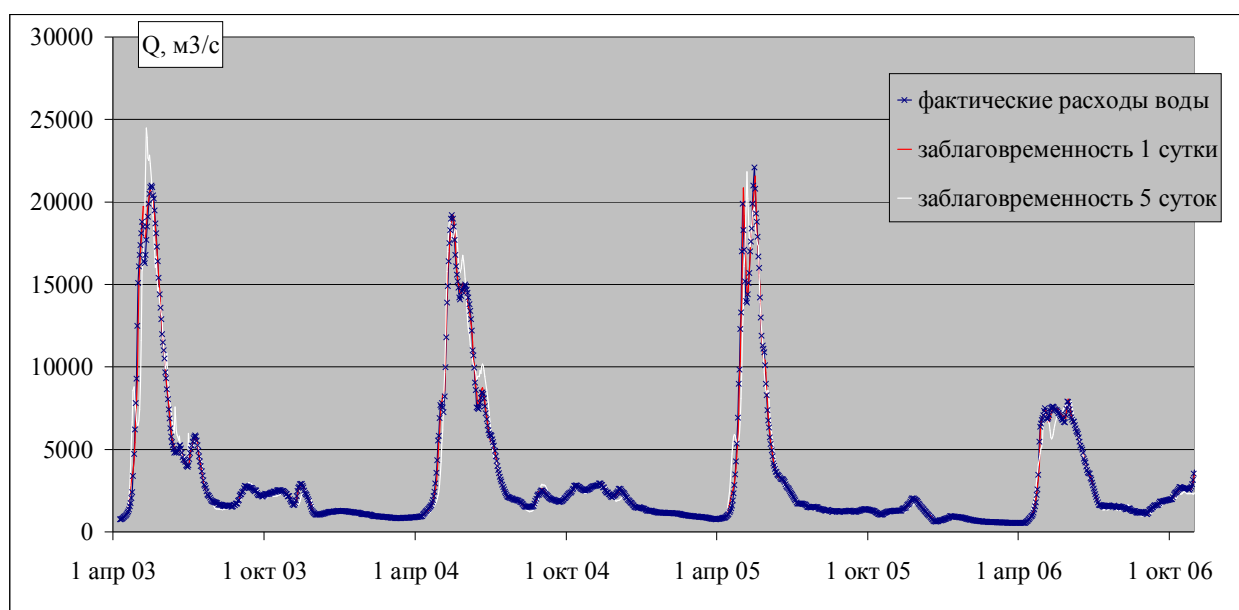


Рис.3. Краткосрочный прогноз расходов воды на основе модели с учетом «корректировки 1» для р. Северная Двина – с. Усть-Пинега

Методика краткосрочного прогноза притока воды к Москворецким водохранилищам разработана на основе синтеза модели формирования стока и мезомасштабной модели циркуляции атмосферы WRF, применяемой в практике оперативных прогнозов Гидрометцентра России. Для проверки качества моделирования метеорологических характеристик моделью WRF, на

ее основе выполнены расчеты среднесуточной температуры воздуха, суточных сумм осадков и температуры точки росы за период с 1.05.2009 по 30.04.2010 на расчетной сетке с шагом 0,02 градуса (около 3000 точек для бассейна р. Москвы в створе п. Рублево). В результате сравнения рассчитанных метеорологических величин с данными наблюдений 11 станций выявлено, что наиболее качественно моделируются температура воздуха и температура точки росы (коэффициенты корреляции по всем станциям превышают 0,91). Отмечены заметные расхождения фактических и смоделированных температур воздуха в период начала снеготаяния при температурах около 0°C, когда по модели WRF рассчитываются отрицательные температуры, а по фактическим данным на водосборе уже идет активное таяние (максимальная разница температур составляет 2-2,5°C), что приводит к уменьшению критической температуры таяния снежного покрова (один из параметров модели формирования стока) на 2°C. Коэффициенты парной корреляции суточных сумм осадков в виде снега по всем станциям превышают 0,75, а суточных сумм жидких осадков составляют всего 0,50–0,60. Сценарные расчеты гидрографов стока половодья весны 2010г. для бассейнов Москворецких водохранилищ на основе рассчитанных данных по модели WRF дают удовлетворительные результаты по критерию соответствия NS, который для Можайского водохранилища составил 0,76, а для остальных водосборов – от 0,60 до 0,71. В итоге, можно заключить, что рассчитанные поля метеорологических характеристик вполне пригодны для моделирования процессов формирования стока в половодье в бассейнах Москворецких водохранилищ, но малоприспособлены для моделирования паводочного стока. По прогнозным метеоданным, полученным по модели WRF с заблаговременностью до 5 суток, предпринята попытка составления краткосрочных прогнозов притока воды к Можайскому, Истринскому и Озернинскому водохранилищам. Детальная оценка эффективности прогнозов выполнена для периода половодья (табл. 3).

Таблица 3. Оценка качества прогнозов притока воды к Москворецким водохранилищам за период половодья (21.03.2010 – 18.04.2010)

Водохранилище	δ , сут.	n, сут.	r	$ \Delta _{cp.}$, %	s/σ	$s/\sigma\Delta$	$s\Delta/\sigma\Delta$	P, %
Истринское	1	29	0,94	18,3	0,30	0,91	0,62	67
	2	28	0,97	16,8	0,29	0,48	0,36	81
	3	27	0,97	17,0	0,32	0,37	0,33	100
	4	26	0,97	18,8	0,36	0,32	0,35	100
	5	25	0,95	21,7	0,41	0,31	0,35	95
Можайское	1	29	0,99	13,8	0,14	0,47	0,55	85
	2	28	0,99	13,0	0,19	0,34	0,40	96
	3	27	0,98	17,3	0,25	0,30	0,31	100
	4	26	0,98	20,9	0,30	0,28	0,25	100
	5	25	0,96	23,8	0,35	0,28	0,23	100
Озернинское	1	29	0,95	19,3	0,32	0,63	0,80	82
	2	28	0,95	17,0	0,33	0,50	0,73	84
	3	27	0,95	18,7	0,33	0,39	0,58	95
	4	26	0,93	21,9	0,40	0,38	0,54	95
	5	25	0,90	21,9	0,46	0,36	0,52	95

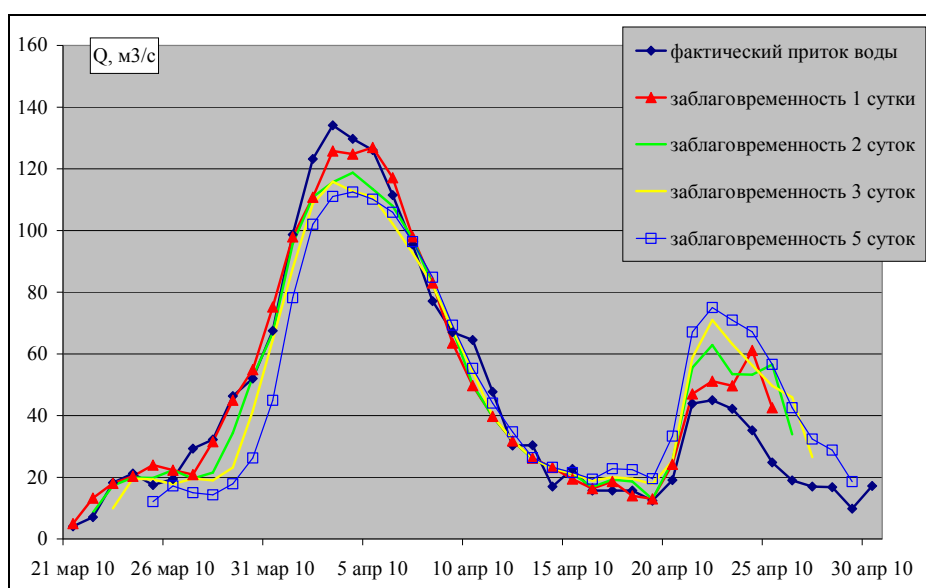


Рис. 4. Фактический приток воды и краткосрочные прогнозы притока с заблаговременностью 1, 2, 3 и 5 суток к Можайскому водохранилищу

Средние относительные ошибки прогнозов притока с заблаговременностью 1 сутки колеблются от 13,8% для Можайского водохранилища (рис. 4) до 23% для Озернинского, а для заблаговременности в 5 суток – от 21,7% (Истринское) до 23,8% (Можайское). Коэффициенты корреляции между фактическими и спрогнозированными величинами притока достаточно высокие – от 0,90 до 0,99. По критерию оценки эффективности

прогнозов $s/\sigma\Delta$ методику можно считать эффективной для Можайского и Озернинского водохранилищ, а для Истринского, только с учетом применения «корректировки 1». Разработанная для северных рек методика корректировки прогноза («корректировка 1») позволила повысить точность прогнозируемых величин только для Истринского водохранилища при заблаговременности до 3 суток. Данная корректировка может эффективно применяться только в том случае, когда прослеживается более или менее постоянная тенденция завышения или занижения фактических расходов воды относительно смоделированных значений.

Для дополнительной проверки достоверности результатов составленных прогнозов применялся критерий $s\Delta/\sigma\Delta$. По этому критерию все прогнозы притока следует признать оправдавшимися. По обеспеченности методики (Р) оправдался только прогноз притока в Истринское водохранилище с заблаговременностью 1 сутки. Неоднозначности оценок качества прогнозов притока воды в Москворецкие водохранилища могут быть связаны с небольшим периодом прогнозирования и неучтенными ошибками при косвенном определении величин фактического притока воды к водохранилищам. В целом, можно заключить, что модель WRF при совместной работе с программным комплексом ECOMAG пригодна для прогнозирования притока воды в Москворецкие водохранилища в период весеннего половодья.

В заключении диссертации содержится концентрированное изложение результатов исследования:

1. Определено место ИМК ECOMAG среди множества математических моделей формирования стока.
2. Разработана методика предмодельного анализа исходной метеорологической информации, по результатам которой установлены допустимые расстояния между метеорологическими пунктами наблюдений для проведения надежной интерполяции суточных сумм осадков.
3. Проведена оценка влияния густоты сети метеорологических станций на точность моделирования стока в бассейне р. Северная Двина. Критическое

число метеостанций, при котором результаты расчетов гидрографов стока рек уже нельзя считать удовлетворительными, равно пяти.

4. Выявлено, что расчет запаса воды в снежном покрове по гидрологической модели ЕСОМАГ имеет адекватные фактическим данным величины, но для прибрежных станций наблюдаются существенные несовпадения (средние относительные ошибки достигают 40%).

5. Выполнено моделирование стока с водосборов различного масштаба, характеризующихся разными условиями формирования стока, и установлено, что программный комплекс позволяет успешно проводить расчеты стока как крупных, так и малых равнинных рек при условии назначения оптимального набора параметров, правильного выбора детализации цифровой модели рельефа и масштаба тематических карт.

6. Установлено, что комплекс лучше описывает весеннее половодье, чем дождевые паводки, ввиду малых радиусов корреляций суточных сумм осадков (от 35 км в бассейне реки Белой до 70 км в бассейнах северных рек).

7. Лучшие результаты расчетов гидрографов стока по модели достигнуты для рек Севера ЕТР, наихудшие для рек бассейна Цимлянского водохранилища и некоторых закарстованных рек бассейна р. Белой.

8. Разработана эффективная методика краткосрочного прогноза расходов воды для северных рек ЕТР и методика его корректировки.

9. Реализован синтез моделей гидрометеорологического цикла, на основе которого составлены краткосрочные прогнозы притока воды к Москворецким водохранилищам.

Публикации по теме диссертации в журналах и изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией:

1. Христофоров А.В., Антохина Е.Н., Гармаев Е.Ж., Кириллов А.В., Юмина Н.М. Расчеты и прогнозы уровней воды на судоходных реках в период навигации // Водное хозяйство России. Проблемы, технологии, управление, том 7, номер 1. Екатеринбург, 2005. – с. 21-33.

2. **Антохина Е.Н., Жук В.А.** Применение ИМК ЕСОМАГ для моделирования стока воды с различных по площади водосборов // Водное хозяйство России. Проблемы, технологии, управление, номер 4. Екатеринбург, 2011. – с. 17-32.

Материалы научных конференций:

1. **Антохина Е.Н.** Моделирование бокового притока воды к Москворецким водохранилищам // Сборник трудов Третьей международной конференции молодых ученых и талантливых студентов "Водные ресурсы, экология и гидрологическая безопасность"/ Отв. ред. Н.Н. Митина. – М.: Типография Россельхозакадемии, 2009. – с. 122-125.

2. **Антохина Е.Н.** Моделирование стока рек бассейна реки Оки // Сборник трудов Четвертой международной конференции молодых ученых и талантливых студентов "Водные ресурсы, экология и гидрологическая безопасность"/ Отв. ред. Н.Н. Митина. – М.: ИВП РАН, 2010. – с. 119-122.

3. Крыленко И.Н., **Антохина Е.Н.**, Анисимова Л.Е., Самохин М.А. Водный режим и гидрологическая безопасность освоенных участков речных долин // Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов: Материалы Третьей Всероссийской конференции с международным участием. – Барнаул: Изд-во АРТ, 2010. – с. 520-523.

4. **Антохина Е.Н.** Применение радарной топографической съемки SRTM для моделирования речного стока на основе программного комплекса ЕСОМАГ //Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов: Материалы Восьмой всероссийской открытой конференция. – М: Изд-во ИКИ РАН, 2010. – с. 92-93.

5. **Антохина Е.Н.** Особенности использования метеорологической информации в задачах моделирования стока // Сборник трудов Пятой международной конференции молодых ученых и талантливых студентов "Водные ресурсы, экология и гидрологическая безопасность"/ Отв. ред. Н.Н. Митина. – М.: ИВП РАН, 2011. – с. 107-109.